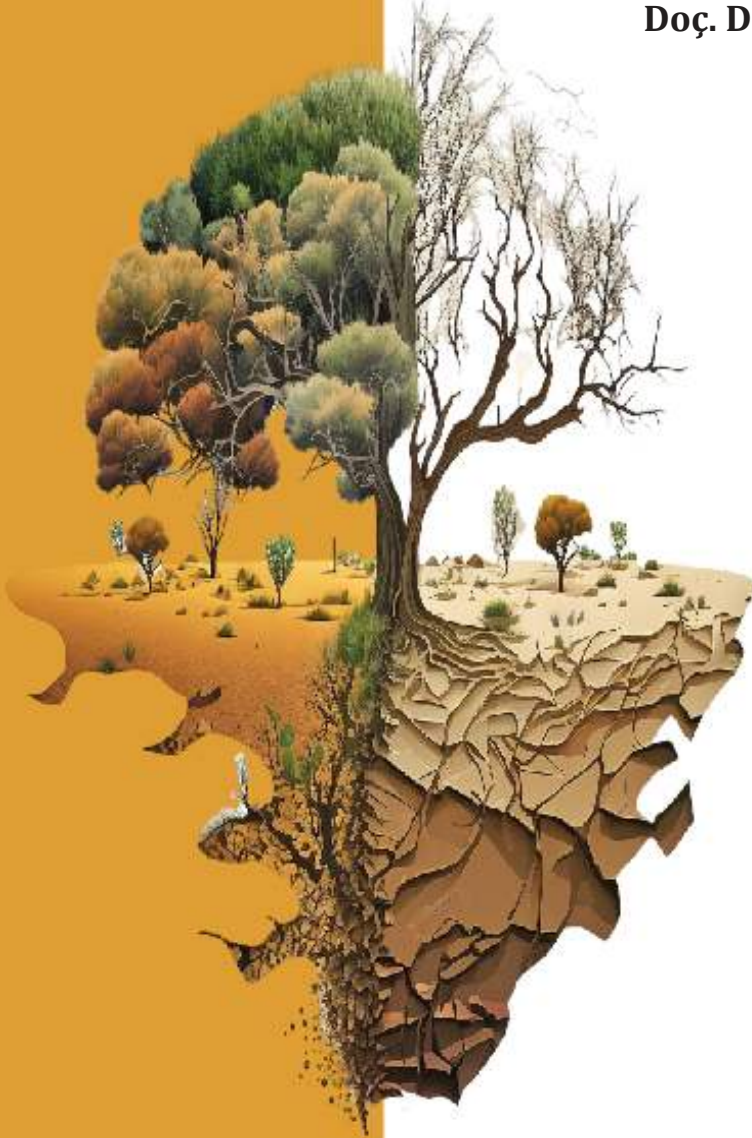


KURAKLIK VE YEM BİTKİLERİ - I

EDİTÖRLER

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ



KURAKLIK VE YEM BİTKİLERİ – I

EDİTÖRLER

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

YAZARLAR

Prof. Dr. Mustafa SÜRMEN

Prof. Dr. Sıdıka EKREN

Prof. Dr. Tahir POLAT

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

Doç. Dr. Nizamettin TURAN

Doç. Dr. Yelda EMEK

Dr. Öğr. Üyesi Aliye YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Emre KARA

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN

Dr. Mithat EKİCİ

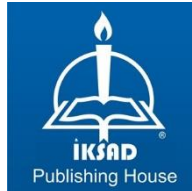
Dr. Muhammed Cem AKCAPINAR

Dr. Pınar UYSAL

Dr. Sibel KADIOĞLU

ZYM Muhammed İzzet TÜRKOĞLU

ZYM Oktay YELMEN



Copyright © 2024 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed
or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial
uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and
Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2024©

ISBN: 978-625-367-823-4
Cover Design: İbrahim KAYA
September / 2024
Ankara / Türkiye
Size = 16 x 24 cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

METEOROLOJİK KURAKLIĞIN TEMELLERİ

Dr. Muhammed Cem AKCAPINAR

Dr. Mithat EKİCİ

Prof. Dr. Sıdıka EKREN.....3

BÖLÜM 2

HİDROLOJİK KURAKLIK

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN.....39

BÖLÜM 3

TARIMSAL KURAKLIK

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

Dr. Öğr. Üyesi Aliye YILDIRIM.....73

BÖLÜM 4

KURAKLIĞIN SOSYO-EKONOMİK ETKİLERİ VE POLİTİKALAR

Dr. Sibel KADIOĞLU.....115

BÖLÜM 5

KURAKLIĞIN EKOLOJİK ETKİLERİ

ZYM. Oktay YELMEN.....147

BÖLÜM 6

KURAKLIKTA BİTKİLERDE KÖK VE KSİLEM DEMETİ MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

Doç. Dr. Yelda EMEK183

BÖLÜM 7

KURAKLIKTA BİTKİLERDE YAPRAK MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

Doç. Dr. Yelda EMEK.....223

BÖLÜM 8

KURAKLIKTA BİTKİLERDE YUTAK İLE FLOEM MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ

Doç. Dr. Yelda EMEK.....267

BÖLÜM 9

KURAKLIKTA BİTKİLERDE VERİM FİZYOLOJİSİ

Prof. Dr. Tahir POLAT

ZYM Muhammed İzzet TÜRKOĞLU.....307

BÖLÜM 10

YONCA (*Medicago sativa* L.) ve KURAKLIK

Dr. Pınar UYSAL.....331

BÖLÜM 11

GAZAL BOYNUZU (*Lotus corniculatus*) & AK ÜÇGÜL (*Trifolium repens*) & ÇAYIR ÜÇGÜLÜ (*Trifolium pratense*)

Doç. Dr. Nizamettin TURAN.....349

BÖLÜM 12

DİKENLİ AKASYA (*Acacia nilotica*) & ÇEMEN OTU (*Trigonella foenum-graecum*) & YEM BAKLASI (*Vicia faba*) & *Medicago truncatula*

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN.....379

BÖLÜM 13

KIRKYONCA (*Medicago polymorpha*) & AFRİKA AKASYASI (*Acacia tortilis* ssp. *raddiana*) & ADI FİĞ (*Vicia sativa*) & BAMBARA FASULYESİ (*Vigna subterranea*) MÜRDÜMÜK (*Lathyrus sativus*)

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN

Dr. Öğr. Üyesi Emre KARA.....415

BÖLÜM 14

SOYA (*Glycine max*) ACI BAKLA (*Lupinus angustifolius*) İSKENDERİYE ÜÇGÜLÜ (*Trifolium alexandrinum*) *Stylosanthes* *spp.*

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN

Prof. Dr. Mustafa SÜRMEN.....449

ÖNSÖZ

Sayın okuyucu,

İklimsel değışimlerin ve göç olgusunun hızlandığı günümüz değışen dünyasında artan kuraklık ve suya kısıtlı erişim, büyüyen küresel nüfus baskısı altında daha önemli hale gelmektedir. Bu kitapta, alanında uzman çeşitli akademisyenlerce, yakın tarihli uluslararası araştırma bilgi birikiminden faydalanılarak kuraklıkla alakalı farklı disiplinlerdeki bilgi zenginliği konu çeşitliliği yüksek tutularak bir araya getirilmiştir. Odak noktası olarak, dünyada yem olarak kullanılan birçok türün kuraklık dayanımı ve bununla ilişkili bitkisel ve tarımsal özellikler, hayvancılıkla ilgili uzmanlık alanlarını da kapsar şekilde, özlü bir şekilde sunulmuştur.

Türkiye birçok kıtada aktif, güçlü uluslararası ilişkileri olan bir ülkeye dönüşürken, sadece ticari değil tarımsal olarak da paydaş ülkelerde faaliyetler yürütebilir hale gelmektedir. Avrupa'nın en büyük tarım ülkesi olarak ülkenin sahip olduğu gelişmiş tarımsal sistemler ve tecrübeler bu alanda faydalanılabilecek önemli değerlerdir. Bu kapasite, gerek diğer ülkelere gerekse de anavatana birçok avantaj sağlayabilir durumdadır. Bu kitap bu nedenle, sadece Türkiye'de yetişen/yetişebilen türleri değil dünyada yem bitkisi olarak faydalanılan birçok farklı cins ve türden çok çeşitli formlarda yem bitkilerini de kapsayacak şekilde planlanmıştır.

BÖLÜM 1

METEOROLOJİK KURAKLIĞIN TEMELLERİ

Dr. Muhammed Cem AKCAPINAR¹

Dr. Mithat EKİCİ²

Prof. Dr. Sıdıka EKREN³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13758663>

¹ Muhammed Cem AKCAPINAR, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Ankara, Türkiye. cemakcapinar@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-8451-8338

² Mithat EKİCİ, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Ankara, Türkiye. mithatekici@gmail.com, Orcid ID: 0000-0001-9300-717X

³ Sıdıka EKREN, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü İzmir, Türkiye. sekren76@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-6812-9586

1. Giriş

Günümüz dünyasında gelişen teknolojiyle birlikte insan yaşamı önemli ölçüde kolaylaşmaktadır. Ancak her yeni gelişme sağladığı kolaylıklar yanında teknik ve etik yaklaşımlar açısından birçok tartışmayı da beraberinde getirmektedir. Bu tartışmalar devam ederken, insanlık sahip olduğu teknolojiyle çok sınırlı olarak müdahil olabildiği iklim odaklı sorunlarla, artan nüfusu ve kısıtlı doğal kaynakları eşliğinde yüzleşmek durumundadır. Birleşmiş Milletler (BM) tarafından paylaşılan bilgilere göre; 1950'de yaklaşık 2,5 milyar olan Dünya nüfusu, 2022 yılı sonunda 8 milyara ulaşmıştır. Bu nüfusun 2050'de 9,7 milyar seviyesine ulaşması öngörülmektedir ([BM, 2022](#)). Türkiye’de ise Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından paylaşılan sonuçlara göre; 2023 yılı nüfusu 85,4 milyona ulaşmış ve nüfus artış hızında son yıllardaki düşüslere rağmen 2007 yılından bu yana 14,8 milyon artış gerçekleşmiştir ([TÜİK, 2024](#)). Artan nüfusun, barınma, güvenlik, eğitim ve sağlık gibi konulardaki en temel insani ihtiyaçları yanında yeterli ve güvenilir gıdaya erişiminin de sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle küresel çerçevedeki en önemli tartışma ve çalışma konularının başında ‘Gıda Güvenliği’ ve ‘Gıda Güvenilirliği’ gelmektedir. Sıkça karşılaşılan bu iki kavramdan gıda güvenliği; insanların yeterli miktarda ve besleyici gıdaya sürdürülebilir şekilde erişiminin sağlanması, gıda güvenilirliği ise; gıdaların insanların sağlığına zarar verebilecek fiziksel, kimyasal ve biyolojik tehlikelerden bertaraf edilerek arz edilmesi olarak açıklanabilir. İnsan sağlığına zarar verebilecek her türlü etken gıda güvenilirliği üzerinde tehdit oluştururken, gıda üretimini sekteye uğratabilecek sosyolojik, ekonomik ve teknolojik sorunlarla birlikte

artan çevre sorunları ve iklim değişikliği kaynaklı doğal afetler gıda güvenliği üzerinde tehdit oluşturmaktadır.

Dünyada ve Türkiye’de sıkça karşılaşılan, aşırı yağışların neden olduğu sel-taşkınlar, kuvvetli fırtınalar, orman yangınları, yıldırım düşmeleri, toprak kaymaları, aşırı sıcak-soğuk hava dalgaları gibi olaylar ve kuraklık iklim değişikliği kaynaklı olarak ele alınabilecek doğal afetlerdendir. Bunlar arasında ‘kuraklık’ oluşumu, etkileri ve sonuçları açısından farklılıklar göstermektedir.

Kuraklık, tarihin her döneminde insanların yüzleşmek zorunda kaldığı, geçim kaynağı tarım olan yerleşik toplum yapılarının ortaya çıkmasıyla birlikte önemi daha da artan iklim kökenli doğal bir afettir. İnsanlık, Mezopotamya’da olduğu gibi, ilk uygarlıklardan bu yana, kuraklık dönemlerinde su kaynaklarını yönetmek için sulama sistemleri, setler, barajlar inşa etmişler ve su kullanımını düzenleyecek yasal çerçeveler geliştirmişlerdir (Kornfeld, 2009). Antik dönemlerde kuraklık, toplumsal çöktüşlere ve göçlere yol açmıştır. Günümüzden 4000 yılı aşkın bir süre önce, Mezopotamya’da 300 yıl süren kuraklık, o dönemde hüküm süren Akad İmparatorluğu’nun çöktüşünde temel etken olmuştur (WEF, 2019). Kuraklığın tarih boyunca insan yaşamı üzerindeki böylesi etkileri, bu doğal afetin tüm yönleriyle ele alınmasını ve doğru stratejilerle yönetilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kuraklığın önemi, artan nüfus ve iklim değişikliği nedeniyle her geçen gün daha da artmıştır. Tarım, enerji üretimi ve su kaynakları üzerindeki baskılar, kuraklık dönemlerinde toplumsal ve ekonomik sorunları tetiklemektedir. Meteorolojik kuraklık, genel olarak bir bölgede uzun bir süre boyunca devam eden yağış eksikliği olarak

tanımlanmaktadır. Kuraklık sürecinde söz konusu yağış eksikliğine, uzayan süreyle birlikte, evapotranspirasyonun (buharlaştırma-terleme) artmasını sağlayan yüksek sıcaklıklara, ortalamanın üzerinde hızda rüzgâr ve düşük nem eklendiğinde, su kaynaklarında azalmalar, tarımsal üretimde düşüşler ve ekosistemlerde bozulmalar gerçekleşmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1930'larda yaşanan kuraklık sırasında şiddetli toz fırtınalarına maruz kalan '*Dust Bowl*' bölgesinde, insanlar, çiftlik hayvanları ve mahsuller büyük zararlar görmüştür. Birçok çiftçi ailesi iş ve daha iyi yaşam koşulları arayışıyla göçe sürüklenmiştir (NDMC, 2024a).

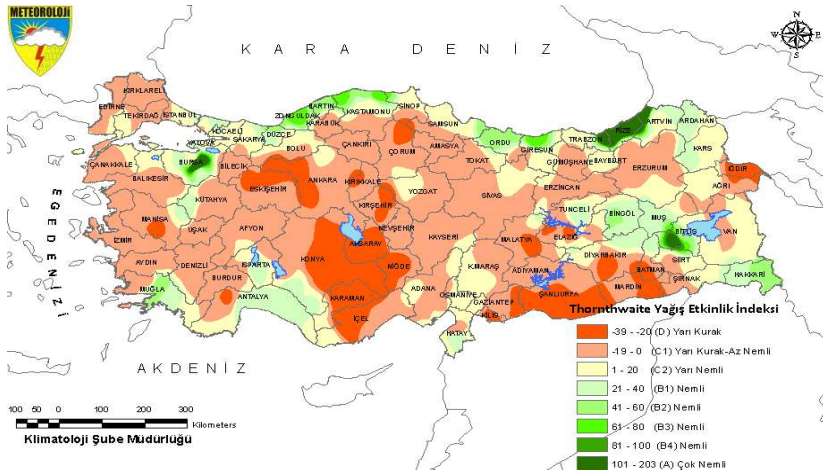
Kuraklık, genellikle yerel iklim koşullarına ek olarak insan faaliyetlerinin etkisiyle artan küresel ısınma sonucu ortaya çıkmaktadır. Kuraklığın etkilerini hafifletmek ve yönetmek için erken uyarı sistemleri, sürdürülebilir su yönetimi ve iklim değişikliğine uyum stratejileri gibi yöntemler üzerinde durulmaktadır. Kuraklıkla mücadelenin başarılı olabilmesi için kuraklık süreçlerinin, türlerinin ve etkilerinin en doğru şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Çalışmamızda kuraklığın genel hatlarıyla incelenmesi, kuraklık türlerinin birbirlerinden ayrımlarının ortaya koyulması, meteorolojik kuraklığın oluşumunun, etkilerinin ve iklim değişikliği ile ilişkisinin ele alınarak meteorolojik kuraklık konusunda genel bir çerçevenin sunulması amaçlanmıştır. Bunu yaparken, Türkiye için iklim ve kuraklık açısından genel görünümlere de yer verilmiş, sonuç ve değerlendirme bölümünde ise kuraklıkla mücadele konusu irdelenmiştir.

2. Kuraklık türleri ve kuraklıkla ilgili temel kavramlar

Kuraklık her bölgenin iklim tipi ve yağış dağılımına göre değişkenlik gösteren bir olaydır. Bu nedenle anlaşılmasında karışıklıklar söz konusu olabilmektedir. Örnek vermek gerekirse, yıllık ortalama toplam yağış miktarı 2000 mm olan bir bölgede 1500 mm yağışın gerçekleşmesi, o yıl özelinde kuraklık yaşandığının bir göstergesi iken, yıllık ortalama toplam yağış miktarı 300 mm olan bir başka bölgede 450 mm yağışın gerçekleşmesi o bölge için nemliliğin hâkim olduğuna işaret etmektedir. Söz konusu bölgelerin yağış normallerinin yüksek ya da düşük olması ise iklim tipleri ile ifade edilmektedir. Nitekim yıllık yağış miktarı 50 mm'den küçük olan bölgeler 'çöl', 50-250 mm yağış alan bölgeler 'kurak' ve 250-500 mm yağış alan bölgeler 'yarı kurak' olarak değerlendirilmektedir (Driessen vd. 2001). Yağış miktarı 500 mm'yi aşıyorsa nemliliğe doğru yönelim gerçekleşmektedir.

Türkiye için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından çeşitli yöntemlerle 1981-2010 periyodu temel alınarak belirlenmiş iklim sınıflandırmaları paylaşılmaktadır. Thornthwaite Yağış Etkinlik İndeksi iklim haritasına göre; Türkiye ağırlıklı olarak kurak-az nemli (C_1) ve yarı nemli (C_2) iklim sınıfında yer almaktadır (Şekil 1) (MGM, 2024).



Şekil 1. Thornthwaite yöntemine göre Türkiye iklimi

Kaynak: MGM

Bir bölgenin iklim tipinin nemli ya da kurak (arid) olması ile kuraklık olayının gerçekleşmesi aynı şeyi ifade etmemektedir. Kurak iklim; uzun yıllar devam eden yağış azlığı koşullarının kalıcı bir iklim tipine dönüşmesi durumu iken, kuraklık; süresi kısa (birkaç hafta) veya uzun (birkaç yıl) olsa da geçici bir olaydır. Bir örnekle açıklamak gerekirse; iklim tipi bol yağışlı ve nemli olan Rize ilinde kuraklığın yaşanmayacağı şeklinde bir anlam çıkarılamayacağı gibi, az yağışlı-yarı kurak (semi-arid) iklim tipinin hâkim olduğu Konya-Aksaray civarında bol yağışlı ve nemli dönemlerin yaşanamayacağı anlamı da çıkarılamaz.

Bu noktada kuraklık ve türlerinin irdelenmesi yerinde olacaktır. Kuraklık, izleme faaliyetlerinin ve ilgili süreçlerin doğru yönetilmesi amacıyla, meteorolojik, hidrolojik, tarımsal, sosyoekonomik ve ekolojik olmak üzere beş türe ayrılmaktadır (NOAA, 2024a).

a) Meteorolojik kuraklık; herhangi bir bölgedeki yağış miktarının normalinin altında düşmesidir ve diğer kuraklık türlerinin

başlangıcıdır. Dünyada her bölgenin kendi yağış ortalaması vardır. Dolayısıyla meteorolojik kuraklık değerlendirmesi bölgelerin kendi yağış ortalamalarından sapmalarına göre yapılmaktadır. Meteorolojik kuraklık aylık, mevsimlik ve yıllık zaman ölçeklerinde gerçekleşen yağış miktarlarının ortalama veya normalleriyle kıyaslanmasıyla değerlendirilmektedir (NDMC, 2024b).

b) Tarımsal kuraklık; meteorolojik kuraklığın devamında, bitkilerin sağlıklı büyüme ve gelişmesi için ihtiyaç duydukları su miktarını karşılayamadıkları durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tarımsal kuraklık meteorolojik kuraklıktan farklı dinamiklere sahiptir ve tespit edilmesinde zorluklar yaşanabilmektedir. Tarımsal kuraklıkla bitkilerin suya duyarlılığının yüksek olduğu dönemlerde (buğdayda sapa kalkma dönemi gibi) karşılaşılması durumunda, ürün verimliliği olumsuz etkilenmektedir (NDMC, 2024b).

Tarımsal kuraklık, hayvancılık üzerinde de olumsuz etkilere sahiptir. Yem bitkilerinin azlığı, hayvanların yeteri kadar beslenememesi nedeniyle ölümlerine yol açabilmektedir. Bu durum geçim kaynağı bitkisel ve hayvansal üretim olan bölgelerde sosyoekonomik sorunlara da neden olmaktadır. Dünyanın bazı bölgelerinde böyle vakalar yaşanmıştır. Etiyopya’da 1984 ve 2002 yıllarında yaşanan kuraklıklar, tarım ve hayvancılıkla geçinen nüfus için yıkıcı afetler olarak kayıtlara geçmiştir (Mera, 2018).

c) Hidrolojik kuraklık; toprak nemi, akarsu akışı, yeraltı suyu ve rezervuar seviyeleri gibi hidrolojik sistemlerin unsurlarında yağış eksikliklerinin gerçekleşmesiyle ortaya çıkmaktadır. Oluşumu ve etkisi, meteorolojik ve tarımsal kuraklığa göre daha uzun sürmektedir. Tarımsal

kuraklık, toprak neminin azalmasıyla belli olurken, hidrolojik kuraklık çoğunlukla akarsu havzalarına göre ele alınır ve su kaynaklarındaki azalma, içme suyu temini, hidroelektrik enerji üretimi ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir (NDMC, 2024b).

d) Sosyoekonomik kuraklık; diğer kuraklık türlerinin bir neticesi olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, tahılın yetiştirilmesinde iklim faktörleri doğrudan etkilidir. Dolayısıyla, yağışa bağlı tarım yapılan bölgelerde, yağışın düşük gerçekleştiği dönemlerde yeterli üretim miktarı sağlanamamaktadır. Ürün arzının talebi karşılayamadığı böyle bir durumda sosyoekonomik kuraklık meydana gelmektedir (NDMC, 2024b).

e) Ekolojik kuraklık; karasal ya da su ekosistemlerinin maruz kaldıkları su stresinin bir neticesi olarak biyoçeşitlilik üzerinde olumsuzlukların belirginleşmesiyle ortaya çıkmaktadır (NDMC, 2024b).

Kuraklık tipleri haricinde kuraklıkla mücadelede ve kuraklıkla ilgili her çalışmada karşılaşılabilecek bazı temel kavramların da iyi anlaşılması önem arz etmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- **Kuraklığın Yeri:** Kuraklığın meydana geldiği bölgeyi ifade eder. Kuraklık dar ya da geniş alanlarda etkili olabilir.

- **Kuraklığın Şiddeti:** Herhangi bir bölgede yaşanan su azlığının ne kadar ciddi olduğunun ölçüsünü ifade etmektedir. Kuraklığın şiddetini belirlemek için sahadan doğrudan toprak nemi ölçümleri, uydu teknolojileri veya Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) gibi farklı yaklaşımlarla geliştirilmiş kuraklık indeksleri kullanılmaktadır.

Ancak özellikle toprak nemi ölçümleri konusunda Dünya genelinde yaşanan sorunlar kuraklığın doğrudan sahadan izlenmesine büyük oranda engel olmaktadır. Günümüzde bu duruma çözüm olarak, çeşitli uzaktan algılama yaklaşımlarıyla, kabul edilebilir düzeylerde, çeşitli toprak nemi içeriği modelleri (FLDAS gibi) geliştirilmektedir (Akıl ve Akcapınar, 2023).

- ***Kuraklığın Süresi:*** Kuraklığın başlangıcından bitişine kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Kuraklığın bitki örtüsü, tarım ürünleri ve su kaynakları üzerinde etkilerinin görülmesi geçen süreye göre değişmektedir. Bu nedenle, örneğin, SPI ile analiz gerçekleştirirken, meteorolojik kuraklık için 1-2 aylık, tarımsal kuraklık için 1-6 aylık ve hidrolojik kuraklık için 6-24 aylık zaman ölçeklerine bakılabilir (Svoboda vd. 2012).

- ***Kuraklığın Zamanlaması:*** Kuraklığın yılın hangi döneminde gerçekleştiğini ifade etmektedir. Tarım açısından, kuraklığın zamanlaması büyük önem taşımaktadır. Bitkilerin suya duyarlılıklarının yüksek olduğu bir dönemde karşılaşılan kuraklık, bitkinin sağlığı ve ürün verimliliği açısından sorunlara neden olabilir.

- ***Kuraklık tehlikesi:*** Kuraklığın meydana gelme sıklığı şeklinde tanımlanabilir (UNDP, 2021).

- ***Erken uyarı:*** Herhangi bir tehlike kaynağının neden olacağı olumsuzlukların hedefindeki kişi, topluluk ya da kuruluşların uğrayacağı potansiyel zarar ve kayıpların azaltılması için gerekli önlemlerin zamanında alınmasına yardımcı olacak bilgileri üretmek ve yaymak için gereken işlemlerin bütünüdür (UNDP, 2021).

- ***Kuraklık azaltma:*** Kuraklıktan kaynaklanan tehlike ve olumsuzlukların tehdit seviyesinin düşürülmesini ifade etmektedir.

- ***Kuraklık izleme:*** Kuraklığın eğilimlerinin, meydana gelme olasılığının ve şiddetinin tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilen işlemlerdir (UNDP, 2021).

- ***Kuraklık riski:*** Kuraklık olaylarının, insanlar, ekosistemler ve ekonomiler arasındaki etkileşimini ortaya koyan, insan ve doğal sistem üzerindeki potansiyel kayıp ve olumsuz etkileri ifade etmektedir (Sayers vd. 2016).

- ***Kuraklık hassasiyeti:*** Kuraklıktan olumsuz şekilde etkilenmeye karşı yatkınlığı ifade etmekle birlikte, güvenlik açığı, zarara duyarlılık, uyum kapasitesi ile ilgili çeşitli faktörleri içermektedir (Okumu, 2021).

- ***Kuraklık etkileri:*** Kuraklığın insan ve doğal sistemler üzerindeki etkilerini ifade etmektedir. Kuraklıklar nedeniyle yaşamlar, geçim kaynakları, sağlık, ekosistemler, ekonomiler, toplumlar, kültürler, hizmetler ve altyapı üzerindeki etkileri içermektedir (Okumu, 2021).

- ***Kuraklığa karşı dayanıklılık:*** Doğal kaynakların korunmasını ve uğradıkları bozulmanın düzeltilmesine önayak olarak, kuraklığın insanlar, ekosistemler ve ekonomiler üzerindeki olumsuzluklarını, çabuk ve etkin olarak tahmin etme, hapsedme ile bunlara uyum sağlama veya bunlardan kurtulma kabiliyetini artırmak olarak tanımlanmıştır (Crossman, 2018).

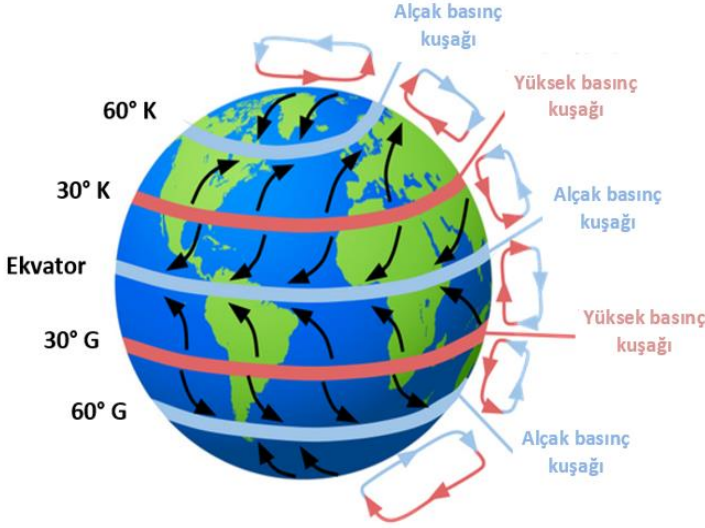
Kuraklık tipleri ve kuraklıkla ilgili kavramların ardından kuraklık sürecinin başlangıcı olan meteorolojik kuraklığı ele alalım.

3. Meteorolojik kuraklık

Tüm kuraklık türlerinin temeli meteorolojik kuraklığa dayanmaktadır. Meteorolojik kuraklığın süresi uzadıkça başta tarım olmak üzere tüm sektörlerde etkileri görülmeye başlar. Herhangi bir bölgedeki meteorolojik kuraklık, o bölgenin ele alınan dönemindeki normal yağışından daha azının gerçekleştiği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Meteorolojik kuraklık bitkiler ihtiyacı olan suyu karşılayamadığı andan itibaren tarımsal kuraklığa dönüşmeye başlar. Toprak neminin azalması ürün verimlerinin düşmesine ve üretim kayıplarına, su açığını kapamak için gerçekleştirilen sulamalar ise su kaynakları üzerinde baskıların ve dolaylı olarak üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu döngü tüketiciye yüksek gıda fiyatları olarak yansımaktadır. Ancak bütün bu süreçlerin öncesinde meteorolojik kuraklık ve meteorolojik kuraklığın oluşum sürecini başlatan atmosferik koşulların irdelenmesi gerekmektedir.

3.1 Atmosfer hareketleri

Atmosfer, yerkürenin etrafını kuşatan ve yükseklikle yoğunluğu azalan bir gaz karışımıdır. Atmosferin uzun bir periyod içerisindeki ortalama hareketine ise atmosferik sirkülasyon denir (Şekil 2). Dünyanın dönmesi, mevsimler, kara-denizlerin farklı ısınmaları atmosferin sirkülasyonu üzerinde etkili temel faktörlerdir. Hava kütlesi ise, belirli sıcaklık ve nem özelliklerine sahip, yatay yönde ve geniş alanlar kaplayan atmosfer parçasıdır (Çöleri vd. 2007).



Şekil 2. Atmosferdeki hava hareketleri

Kaynak: senecalearning.com

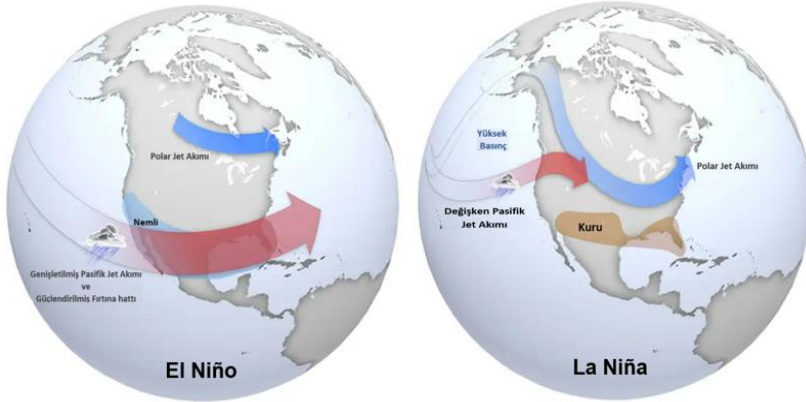
Hava kütleleri, atmosferik sirkülasyon tarafından hareket ettirilir ve kaynak bölgesinden uzaklaşarak farklı iklim bölgelerine taşınırlar. Hava kütlelerinin taşınması esnasında atmosferdeki hava basıncının yatay ve dikey olarak değişmesi sonucu alçak ve yüksek basınç sistemleri meydana gelmektedir. Kuzey yarım küre koşullarında alçak basınç sistemleri (siklon) merkezi, çevresine göre alçak basınç değerlerine, yüksek basınç sistemleri (antisiklon) merkezi ise çevresine göre yüksek basınç değerlerine sahiptir. Hava hareketlerinin yönü her zaman alçak basınca doğru gerçekleşir. Alçak basınç sistemlerinde genellikle yağışlı ve bulutlu hava koşulları söz konusu iken, yüksek basınç sistemlerinde açık ve güneşli hava koşulları söz konusudur. Bu nedenle yüksek basınç sistemlerinin etkili olduğu alanlarda kuraklık koşulları oluşabilir. Özellikle güneş radyasyonunun fazlaca emildiği,

seyrek bitki örtüsüne sahip, kuru/çorak alanlarda yüksek basınç sistemlerinin tekrar eden oluşumları hâlihazırda kuru olan bu alanların daha fazla kurumasına neden olabilir (C2ES, 2024).

Avrupa’da görülen yağışların temel nedenlerinden ‘*Kuzey Atlantik Salınımı*’ olarak bilinen basınç dalgalanması ise; Azor Adaları üzerindeki dinamik yüksek basınç ile İzlanda üzerindeki alçak basınç merkezleri arasında gerçekleşmektedir ve pozitif-negatif olarak 2 fazı bulunmaktadır. Pozitif fazda, İzlanda alçak basınç merkezi normalinden daha kuvvetli ve Azor yüksek basınç merkezi ise normalinden daha derinken; negatif fazda, İzlanda ve Azor basınç merkezleri daha zayıftır, bu nedenle pozitif faza göre basınç farkı daha az olarak gerçekleşmektedir. Pozitif fazda kış periyodunda Türkiye kurak ve soğuk geçerken, negatif fazda ise Akdeniz ve Türkiye ılık ve yağışlı bir kış dönemi geçirmektedir (Çöleri vd. 2007).

Diğer taraftan, küresel düzeyde yaşanan El Niño ve La Niña olayları, etkisi altına aldıkları alanlarda yağış ve sıcaklık normallerinde sapmalara neden olarak, kuraklık ve aşırı yağışları tetiklemektedir. El Niño, Pasifik Okyanusu’nun ekvatorial bölgesinde deniz yüzey sıcaklıklarının normalden daha yüksek olduğu, La Niña ise El Niño’nun tersine, daha düşük olduğu iklim olaylarıdır. El Niño olayında ABD’nin kuzeyi ile Kanada arası daha sıcak ve kurak, ABD Körfez kıyısı ve güney kesimleri daha yağışlı geçer, sel olaylarında artışlar olur. La Niña olayında ise ABD’nin güneyinde kuraklık, Kuzeybatı Pasifik ve Kanada’da ise şiddetli yağışlar ve su baskınları görülür (NOAA, 2024b) (Şekil 3). Avrupa’da ise El Niño dönemlerinde siklon, La Niña dönemlerinde ise antisiklon sıklıklarında artışların olduğu

değerlendirilmektedir. Bu durum Akdeniz Havzası'nda antisiklon yolunun güneye kayması nedeniyle El Niño dönemlerinde daha kurak koşulların oluşmasına neden olmaktadır (Çöleri vd. 2007).



Şekil 3. El Niño ve La Niña olayları

Kaynak: studyiq.com

Bir başka meteorolojik sistem olan Jet akımları, atmosferin üst seviyelerinde (troposferin üst kısımları), batıdan doğuya doğru esen kuvvetli rüzgâr bantlarıdır. Jet akımları sıcak ve soğuk hava arasındaki sınırları takip eder. Bu yüzden kuzeye ve güneye doğru hareket eğilimi gösterir (NOAA, 2024c). Jet akımları bu hareketi ve kuvvetiyle etkili olduğu bölgelerde hava kütlelerini kaydırarak yağış düzenlerini değiştirebilir, kuraklıklara neden olabilir.

Benzer şekilde bölgesel rüzgâr desenleri veya tropik rüzgârlar, nemli hava kütlelerinin hareketini ve yağış oluşumunu etkileyerek, kuraklık koşullarının ortaya çıkmasına veya süresinin uzamasına neden olabilir. Örneğin, Hindistan ve Güneydoğu Asya'da yıllık yağışın gerçekleşmesinde önemli rol oynayan Muson rüzgârları yazın

okyanustan karaya, kışın ise karadan okyanusa doğru esmektedir. Yazın çok fazla nem taşıdığı ve sıcak olduğu için karaya vardığında soğuyup yoğunlaşarak aşırı ve etkili yağışlara neden olmaktadır (Çöleri vd. 2007). Ancak, muson rüzgârlarındaki zayıflama veya gecikme, bu bölgelerde ciddi kuraklıklara neden olabilir. Hindistan'da muson yağışlarının zayıf olması, tarımda büyük kayıplara ve su kıtlığına yol açabilmektedir (Aijaz, 2013).

3.2 Yağışın miktar ve dağılımı

Herhangi bir bölgede kuraklığın ortaya çıkmasındaki temel neden, yağışın o bölgenin normalinden daha düşük miktarlarda gerçekleşmesidir. Yağış miktarları ise, deniz seviyesinden yüksek dağlık alanlarda, deniz seviyesindeki kıyı bölgelerde veya denizde uzak iç bölgelerde kayda değer ölçülerde değişkenlik gösterebilmektedir. Yağışın coğrafi dağılımındaki farklılıklardan dolayı, kimi bölgelerde su kıtlığı yaşanırken, kimi bölgelerde aşırı nemlilik yaşanabilir.

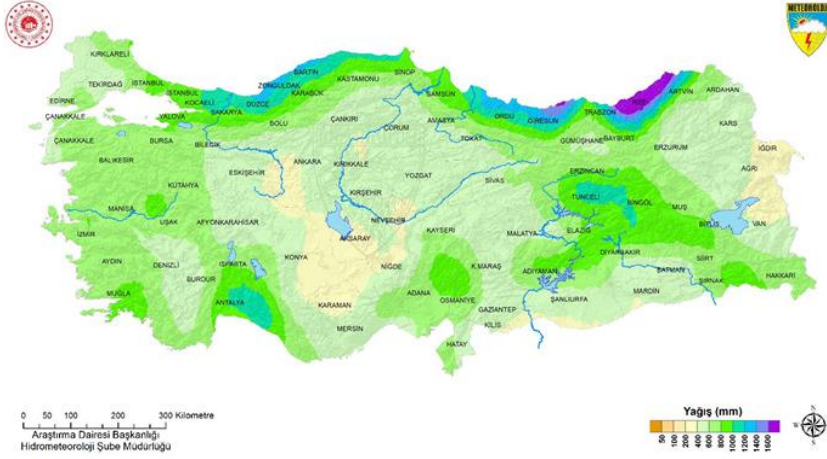
Bunun yanında, kuraklığın oluşumunda ve yayılmasında yağışın zamansal dağılımının etkisi, yaygın olarak kullanılan kuraklık indeksleriyle gözden kaçabilmektedir. Bu durum bazen, aylık toplam yağış dikkate alındığında normal kadar yağış alınmasına rağmen, açıklamakta zorlanılan kuraklık koşullarıyla karşılaşılmasına neden olmaktadır. Değişen iklim nedeniyle, hidrolojik ihtiyaçların başarılı bir şekilde belirlenmesinde yağmurlu dönemlerin uzunluğu (yağışların miktarı) ile dağılımlarının da dikkate alınması gerekmektedir (Singh vd. 2021).

Bitkilerin ihtiyaç duydukları su miktarlarının dönemsel olarak farklılık göstermesi nedeniyle, tarımsal açıdan yağışın zamansal dağılımı ayrıca önem arz etmektedir. Yağışın bitkinin ihtiyaç duyduğu dönemde gerçekleşmemesi ya da aşırı miktarda kısa zaman içerisinde gerçekleşmesi ürün verimleri ve kalitelerinde olumsuzluklara neden olabilmektedir. Özellikle hububatta havaların ısınmaya başladığı, olgunlaşmanın hemen öncesinde gerçekleşen kısa süreli aşırı yağış ve fırtınaların bitkilerde hasarlara yol açarak, büyük verim kayıplarına neden olabileceği tahmin edilmektedir (Akcapınar ve Çakmak, 2022).

Yağışın mevsimsel dağılımı ise, herhangi bir bölgede gerçekleşen yağışın yıl boyunca hangi zaman diliminde ya da hangi mevsimlerde ne kadar miktarda gerçekleştiği, yağışın yoğunluğunun hangi dönemde arttığı ya da azaldığı ile ilgili bir değerlendirmedir. Yıllık ve mevsimsel yağış dağılımındaki değişiklikler, kuraklık koşullarının kötüleşmesine katkıda bulunabilmektedir (Deng vd. 2018).

Türkiye’de Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından aylık olarak yağış, sıcaklık ve meteorolojik kuraklık analizleri gerçekleştirilerek, resmi internet sitesi (mgm.gov.tr) üzerinden kamuoyuyla paylaşılmaktadır. MGM tarafından yapılan değerlendirmelere göre; Türkiye’de 2023 yılı alansal yağış ortalaması 641,5 mm olarak gerçekleşmiştir. Uzun yıllar (1991-2020 normali) ortalamasının 573,4 mm olduğu düşünüldüğünde, bu değer ortalamadan %11,9 oranında bir artışa denk gelmektedir. MGM alansal yağış haritası incelendiğinde, genel olarak, en yüksek yağışların Batı ve Doğu Karadeniz kıyı kesimleri ile Antalya’nın doğusunda, en düşük yağışların ise yer yer İç Anadolu (Ankara, Konya, Karaman, Aksaray, Niğde,

Nevşehir, Kırıkkale çevreleri), Doğu Anadolu (Iğdır, Ağrı, Van çevreleri) ve Güneydoğu Anadolu’da (Kilis, Şanlıurfa civarları) gerçekleştiği görülmektedir (MGM, 2023a) (Şekil 4).



Şekil 4. Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2023 yılı alansal yağış haritası

Kaynak: MGM

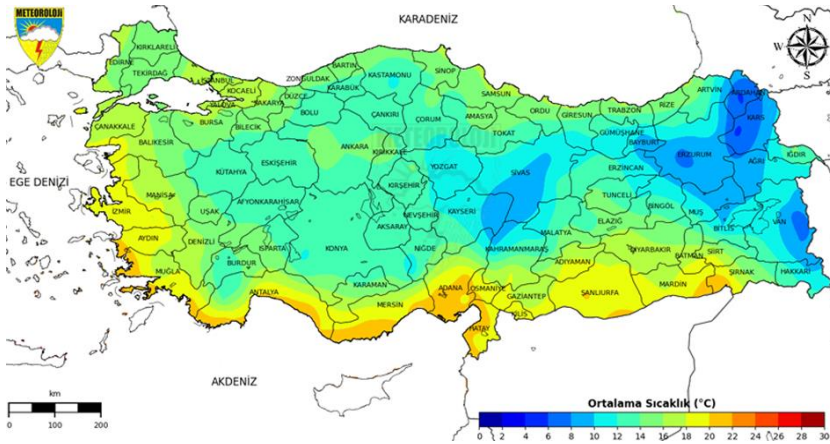
3.3 Evapotranspirasyon ve etkileri

Meteorolojik kuraklığı anlamak için yalnızca yağışa dayalı değerlendirme yeterli olmayacaktır. Yağışla birlikte, evapotranspirasyon süreçlerini de dikkate almak gereklidir.

Evapotranspirasyon, hidrolojik döngünün kritik bileşenlerindendir ve toprak yüzeyinden buharlaşma ile bitki üzerinden terlemeyi ifade etmektedir. Kuraklık dönemlerinde, genellikle buharlaşmada önemli bir artış gözlemlenmektedir ve bu da kuraklık koşullarını yoğunlaştırmaktadır (Teuling vd. 2013). Özellikle iklim değişikliği etkisiyle, ortalama sıcaklıklar ile sıcak hava dalga sayılarında gözlemlenen artışlar, evapotranspirasyonun da artmasına neden olarak,

meteorolojik kuraklıktan, sosyoekonomik ve ekolojik kuraklığa kadar uzanan bir süreci başlatmaktadır.

Geride bıraktığımız 2023 yılı için hazırlanan MGM sıcaklık değerlendirmelerine göre; Türkiye ortalama sıcaklığı, artış eğilimi göstererek 15,1°C'ye ulaşmıştır. Bu değer geçmiş 30 yıllık (1991-2020) dönemin ortalaması olan 13,9°C değerinden 1,2°C daha yüksek seyretmiş ve sıcaklıklar Şubat, Mayıs ve Haziran ayları hariç tüm aylarda aylık ortalamalarının üzerinde gerçekleşmiştir. Sıcaklık haritasına göre, genel olarak, en sıcak bölgelerin; Türkiye'nin güney ve batı kesimlerinde, en soğuk bölgelerin ise İç Anadolu'nun doğusu ile Doğu Anadolu civarlarında yoğunlaştığı görülmektedir (MGM, 2023b) (Şekil 5).



Şekil 5. Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2023 yılı ortalama sıcaklık haritası

Kaynak: MGM

Çeşitli evapotranspirasyon kavramları bulunmaktadır. Bunlar arasında en sık kullanılanlarından biri Potansiyel Evapotranspirasyon (PET) kavramıdır. PET, bitki örtüsünde, topraktaki suyun kullanılmaya

başladığı ana kadar gerçekleşen evapotranspirasyondur. Her bitkinin terleme oranı ve dolayısıyla su ihtiyacı farklıdır. Ancak aynı bitkinin terleme oranı ile su ihtiyacı arasında paralellik söz konusudur. Daha açık bir ifadeyle; PET miktarı yüksek ise, bitkinin ihtiyaç duyduğu su miktarı da yüksektir.

PET’i etkileyen faktörler; sıcaklık, güneşlenme süresi/şiddeti, rüzgâr hızı ve nem olarak sıralanabilir. PET’in tahmin edilmesinde, veri ihtiyacı daha yüksek olan ve uluslararası düzeyde kabul gören FAO Penman-Monteith (PM) yönteminin kullanılması önerilirken, özellikle kuraklık analizlerinde, veri durumu ve analiz tecrübesine göre Blaney Criddle, Hargreaves Samani ve Thorntwaite gibi farklı yöntemler de kullanılmaktadır (Akcapınar ve Çakmak, 2021). Kuraklık yaşanan bölgelerde gerçekleşen yağışın (P), PET ile gerçekleşen su açığını (PET-P>0 koşulu) kapamaya yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Su açığının karşılanması için yapılan sulamalar ise bu kez su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Suyun ekonomik bir değer kabul edildiği günümüzde, su kaynaklarının korunması için suyun dağıtım ve kullanım etkinliği, uygun fiyatlandırma yöntemleri, su tasarrufu sağlayan teknoloji ve yöntemler konularında çalışmalar sürdürülmelidir (Akcapınar, 2007). Bu kapsamda, özellikle suyun tasarruflu kullanımına yönelik planlamalarda evapotranspirasyon miktarları da dikkate alınmalı, evapotranspirasyon günlük izlenmelidir.

3.4 İklim değişikliği etkisi

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, atmosferde yer alan sera gazı oranlarının artmasına bağlı olarak, dünya genelinde küresel sıcaklıkların

yükselmesi ve önceki bölümde bahsedilen, yağış miktar-dağılımlarında değişikliklere neden olan bir süreçtir. Özellikle orman arazilerinin yanlış kullanımı, yangılar gibi nedenlerle yok olması, arazi yapılarının bozulması, bilinçsiz sulama uygulamaları ve yüksek karbon salımına neden olan fosil yakıtların kullanımı gibi insan faaliyetlerinin sıklaşması, herhangi bir bölgedeki ekosistem, iklim ve su döngüsü üzerine doğrudan etkilidir. Bu faaliyetler, yerel yağış ve evapotranspirasyon üzerinde etki göstererek, kuraklık riskini artırabilir. Böylece bazı bölgelerde etkisi uzun sürebilen, şiddetli kuraklıklara neden olabilir.

4. Meteorolojik kuraklığın değerlendirilmesi

Kuraklıkla mücadele sürecinin ilk aşaması kuraklık izleme faaliyetlerinden oluşmaktadır. Meteorolojik kuraklığın izlenmesinde; yağış miktarı, sıcaklık, evapotranspirasyon ve toprak nemi gibi verileri içeren çeşitli indeksler kullanılmaktadır. Aşağıda, en yaygın kullanılan kuraklık indekslerinden bazılarına yer verilmiştir.

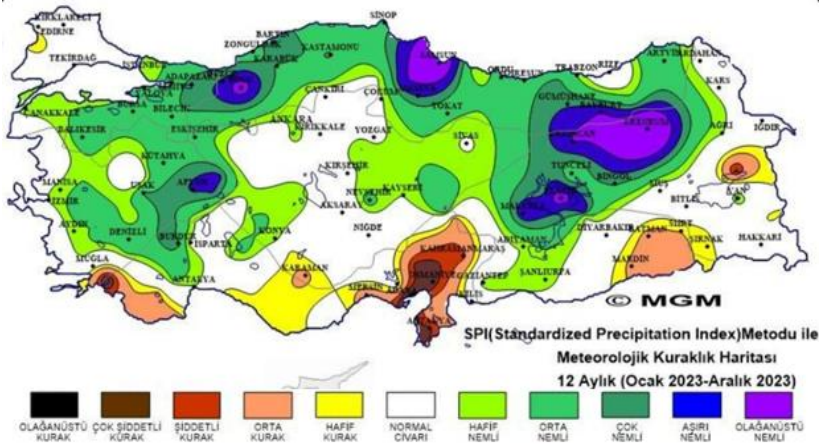
4.1 Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI)

Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI), meteorolojik kuraklığı tercihen en az 30 yıllık geçmiş döneme ait aylık yağış verileri kullanarak, 1-48 ay veya daha uzun zaman ölçeklerinde hesaplayabilen bir indekstir. SPI ile yapılan analizlerde, bitkide sapa kalkmayla birlikte, su ihtiyacının arttığı Mart-Nisan-Mayıs (3 aylık) dönemi tarımsal kuraklık açısından mutlaka izlenmelidir ([Akcapınar, 2023](#)). SPI için genel olarak tarımsal etkilerin izlenmesinde 6 ay veya daha kısa, hidrolojik etkilerin izlenmesinde 12 ay veya daha uzun zaman ölçeklerinin değerlendirilmesinin yararlı olacağı vurgulanmaktadır. SPI ile kuraklık

analizlerinde, sadece yağış verilerinin kullanılması avantaj sağlarken, sıcaklık verilerinin hesaba katılmaması nedeniyle su dengesi için yetersiz olması dezavantaj yaratmaktadır (Svoboda ve Fuchs 2016).

Türkiye genelinde 2023 yılı yağış açısından olumlu bir yıl olurken, uzun dönem içindeki en sıcak yıllardan biri olarak da kayda geçmiştir. Bu yağış ve sıcaklık durumları her bölgede ayrı bir meteorolojik kuraklık dinamiği oluşturmaktadır. Bu yönüyle kuraklık göreceli bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Kuraklık başlangıç ve bitiş olarak iki bileşene sahip olan, zamana yayılan bir süreçtir. Bu nedenle kuraklığın farklı zaman ölçeklerinde (3, 6, 9, 12, 24 aylık vb.) ele alınması ve bu zaman ölçeklerinin başlangıç aylarının seçimi önem arz etmektedir. Örneğin, 2023 su yılı (Ekim 2022-Eylül 2023) ile 2023 yılı (Ocak-Aralık 2023) kuraklık durumu farklı dönemleri ifade etmektedir.

Aşağıda Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından SPI ile hazırlanan ve sunulan, 2023 yılı (Ocak-Aralık) kuraklık haritası görülmektedir. Buna göre, Türkiye’de 2023 yılında, en şiddetli kuraklıkların (şiddetli ve çok şiddetli kurak) Muğla, Antakya, Adana, Osmaniye, Kahramanmaraş ve Van illeri civarlarında, en yüksek nemliliğin (aşırı ve olağanüstü nemli) ise Bolu, Afyon, Samsun, Amasya, Bayburt, Erzincan, Erzurum, Elazığ ve Malatya illeri civarlarında yaşandığı görülmektedir (MGM, 2023c) (Şekil 6).



Şekil 6. Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2023 yılı SPI kuraklık haritaları

Kaynak: MGM

Sıcaklığın kuraklık üzerine olan etkilerinin yansıtılabilmesi için SPI temeli üzerine geliştirilen Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) kullanılmaktadır.

4.2 Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI)

Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI), Vicente-Serrano vd. (2010) tarafından geliştirilmiştir. SPEI sıcaklığın kuraklığa etkisini su dengesi (P-PET) üzerinden ele almaktadır ve 1-48 aylık (veya daha uzun) zaman ölçekleri için hesaplanabilmektedir. SPEI aylık sıcaklık ve aylık yağış verileriyle hesaplanmaktadır. Sıcaklık faktörünün kuraklığa etkisini aktarması ve iklim değişikliği etkilerinin izlenmesi açısından sahip olduğu kabiliyetler güçlü yönlerini oluştururken, eksiksiz veri setleri gereksinimi zaman zaman kullanımını sınırlamaktadır (Svoboda ve Fuchs 2016).

4.3 Palmer Kuraklık Şiddeti İndeksi (PDSI)

1960'larda geliştirilen Palmer Kuraklık Şiddeti İndeksi (PDSI), yağış verilerinin yanına sıcaklık verilerini ekleyerek kuraklığı tanımlamaya yönelik ilk girişimlerden biridir. PDSI, aylık sıcaklık ve yağış verilerini (toprak su tutma kapasitesi bilgileri de kullanılabilir) kullanmakta ve potansiyel nem kaybını hesaplayarak ilgili bölgedeki tarımsal ve hidrolojik kuraklık açısından değerlendirmelere imkân sunmaktadır. Bu yönüyle güçlü bir yapıya sahip PDSI, eksiksiz veriye ihtiyaç duyması ve bazı koşullarda toprak nemi bileşenine dayalı kuraklık koşullarını belirleme gecikmeye neden olabilmesi zayıf yönlerini işaret etmektedir (Svoboda ve Fuchs 2016).

5. Meteorolojik kuraklık ve iklim değişikliği ilişkisi

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından belirli zaman aralıklarında hazırlanan raporların sonuncusu '*IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6)*' 2023 yılında yayınlanmıştır ve iklim değişikliğinin yaygın etkileri, riskleri ve iklim değişikliğine adaptasyon hakkında genel durumları özetlemektedir. Kuraklık hadisesinin iklim değişikliğinden ayrı ele alınmaması gerektiğinin ortaya koyulduğu raporda mevcut koşullar, geleceğe yönelik öngörüler ve alınacak tedbirler derlenmiştir (IPCC, 2023). Rapora (AR6) göre, 2011-2020 dönemi mevcut durumu şöyledir:

- İnsan faaliyetleri sonucu salınan sera gazları 2011-2020 döneminde küresel sıcaklıkların artmasında etkili olmuştur. Bu dönemde

küresel yüzey sıcaklığı 1850-1900 döneminden 1,09 °C daha yüksek değere ulaşmıştır.

- Atmosfer, okyanuslarda yaygın ve hızlı değişimler meydana gelmiştir. Bu bağlamda, küresel ortalama deniz seviyesi 1901 ve 2018 yılları arasında ortalama 0,20 m yükselmiştir.

- İklim değişikliğinin ekosistemler üzerinde neden olduğu baskılar yüzlerce yerel türün kaybına yol açmıştır.

- Sıcak hava dalgaları, çok şiddetli yağışlar, kuraklıklar ve tropikal siklonlar gibi şiddetli olayların insan etkisine atfedilmesi, AR5'ten (2014) bu yana daha da kuvvetlenmiştir.

- Dünyada yaklaşık 3,3-3,6 milyar insan iklim değişikliği etkilerine karşı savunmasız durumdadır ve 2010-2020 yılları arasında, sel, kuraklık ve fırtınalardan kaynaklanan insan ölümleri dünyanın bazı bölgelerinde 15 kat artış göstermiştir.

- İklim değişikliği, gıda ve su güvenliğini olumsuz etkileyerek '*Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini*' sekteye uğratmıştır. Tarımsal üretimdeki küresel büyüme yavaşlamış, Dünya nüfusunun yaklaşık yarısı su kıtlığı ile baş başa kalmıştır.

- Tüm bölgelerde aşırı sıcaklıklardan kaynaklanan gıda ve su kaynaklı hastalıkların ve insan ölümlerinin artmasına neden olmuştur.

- İklimin etkilerine doğrudan maruz kalan tarım, ormancılık, balıkçılık, enerji ve turizm gibi sektörlerde ekonomik zararlar tespit edilmiştir.

- Kentsel alanlarda da iklim değişikliği etkisi görülmüştür. Ulaşım, su, enerji sistemleri ile ilgili altyapı hizmetlerinde aksamalar yaşanmış, sosyal ve ekonomik zararlara neden olmuştur.

- İklim değişikliğine uyum çalışmalarının önünde, kaynakların sınırlı olması, özel sektör ve vatandaş katılım eksikliği, düşük iklim okuryazarlığı gibi temel engeller bulunmaktadır.

- Küresel sera gazı emisyonlarına dair bulgular, ısınmanın 21. Yüzyıl için hedeflenen 2 °C'nin altında sınırlanmasının zor olacağına işaret etmektedir.

Mevcut durumu özetlemek gerekirse; su ve gıdaya erişilebilirlik, sağlıklı yaşam koşulları, şehir ve altyapı sistemleri, biyoçeşitlilik ve ekosistemler üzerindeki baskıların devam ettiği ortaya konmaktadır. Ayrıca aşırı yağış ve sıcaklıkların artmasında, üst okyanus asitlenmesinde, küresel deniz seviyelerinin yükselmesinde, buzulların erimesinde, sel/taşkın ve yangınların gerçekleşmesinde, tarımsal-ekolojik kuraklık olaylarının sayısının artmasında insan faaliyetlerinin etkileri sürmektedir (IPCC, 2023).

Geleceği yönelik iklim değişikliği kaynaklı riskler raporda (AR6) genel olarak şu şekilde belirlenmiştir.

- Artan sera gazı emisyonları, küresel ısınmanın artmasına neden olarak, yakın vadede 1,5 °C'ye ulaşacaktır. Bu artış nedeniyle ortalama iklimde bölgesel değişiklikler ve aşırı olaylarda artış beklenmektedir.

- Sıcak hava dalgaları ve kuraklıkların, birden fazla yerde eşzamanlı ve daha sık olarak gelmesi beklenmektedir.

- Beklenen bölgesel değişiklikler arasında tropikal siklonların ve/veya fırtınaların yoğunlaşması ve kuraklık ile yangın havasında artışlar yer almaktadır.

- Yıllık ortalama toprak nemi projeksiyonları, genellikle yıllık ortalama yağıştaki projeksiyonları ile uyumludur, ancak evapotranspirasyon nedeniyle bazı farklılıklar da meydana gelebilmektedir.

- Yıllık en yağışlı gün yağışlarının, yıllık ortalama toprak neminin düştüğü bölgelerde artacağı tahmin edilmektedir.

- Yakın vadede kara, tatlı su ve okyanus ekosistemlerinde biyolojik çeşit kayıplarında artışlar, gıda üretiminde düşüşler, sel, toprak kayması ve su potansiyelinde değişiklikler ile şiddetli yağışlara bağlı yerel sel/taşkınların sayısında artışlar beklenmektedir.

- Tarımsal ürünlerin (örneğin; mısır) verimlerinde düşmelerin meydana geleceği öngörülmektedir.

Rapora göre; sera gazı salımları ve buna bağlı küresel ısınma artarak devam edecek ve bu durum tüm ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere neden olacaktır. Sıcaklıkların yükselmesi, kuvvetli fırtınalar, aşırı ve düzensiz yağışlar, sel, artan evapotranspirasyon ve toprak nemi kayıpları gibi kuraklıkla doğrudan ilişkili kuvvetli olaylara ve kuraklığa neden olacaktır. Türkiye’de de TUIK verilerine göre 1990 yılında 219,5 milyon ton olan CO₂ eşdeğeri, düzenli bir artış eğilimi göstererek 2021 yılına gelindiğinde 564,4 milyon tona ulaşmıştır (TUIK, 2023). Artan bu sera gazı salımları nedeniyle küresel ısınma etkisi, kuraklık ve kuvvetli hava olayları şeklinde kendisini göstermektedir.

Türkiye’de MGM tarafından, iklim değişikliğine yönelik çalışmalarda kullanılabilmesi amacıyla, 2016-2099 dönemi için üç küresel model (HadGEM, MPI ve GFDL) ve iki senaryo (RCP4.5 ve RCP8.5) ile 20 km çözünürlüklü olarak iklim projeksiyonları

geliştirilmiştir. Sıcaklıklar açısından RCP4.5 senaryosuna göre, 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık ortalama sıcaklıklarının ortalama olarak 1,5-2,6 °C aralığında, RCP8.5 senaryosuna göre ise 2,5-3,7 °C aralığında artması beklenmektedir. Yağışlarda ise genel olarak azalmanın söz konusu olacağı, herhangi bir düzenli eğilimin olmayacağı, yağış düzensizliklerinin ise artış eğiliminde olacağı öngörülmektedir. Türkiye yıllık toplam yağış anomalisinin, RCP4.5 senaryosuna göre ortalama % 3 ile % 6 aralığında azalması, RCP8.5 senaryosuna göre ise % +3 ile % -12 aralığında olması öngörülmektedir (Akcakaya vd. 2015)

Türkiye için gelecekte hem IPCC AR6 raporunda belirtilen bulgulara hem de MGM tarafından geliştirilen sıcaklık ve yağış projeksiyonlarına göre iklim değişikliği kaynaklı, kuraklık ve şiddetli hava olaylarının sayısı ve şiddetlerinde artışların meydana gelebileceği olası gözükmemektedir. Su kaynakları açısından zengin olmayan Türkiye’de özellikle Trakya, İç ve Orta Anadolu ile Güneydoğu Anadolu gibi kurak-yarı kurak alanlar ile yüksek sıcaklıklar ve yüksek evapotranspirasyona sahip olan, kuraklıkla sıkça yüzleşen Akdeniz Bölgesi gelecekte de yüksek riskli alanlar olarak göze çarpmaktadır.

6. Sonuç ve değerlendirmeler

Türkiye’de ve Dünya’da yaşanan doğal afetlerin sayısı ve şiddeti her geçen yıl artmaktadır. Bu doğal afetler içinde kuraklık, etkisi uzun süreli ve yıkıcı olabilen bir olaydır. Kuraklığın süresi uzadıkça ortaya çıkan sonuçlar birçok sektörü etkilemeye başlayacaktır. Kuraklığa karşı en savunmasız sektör tarımdır ve tarımsal kuraklık doğrudan yerel ve küresel gıda arzı ile ilişkilidir. Bu nedenle Türkiye’de ve Dünyada yapay

zekâ ve uzaktan algılamaya dayalı verim tahmin çalışmaları yapılmakta ve %90'ların üzerinde tahmin başarıları elde edilebilmektedir (Akcapınar ve Çakmak, 2024).

Yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının gerekli su arzını sağlayamaması ise, hidrolojik kuraklığın habercisidir ve yetersiz hidroelektrik enerji üretimi, yetersiz içme suyu temini gibi majör ölçekli problemlere neden olabilmektedir. Bu sorunların ilgili bütün sektörlerle yayılması neticesinde sosyal yaşamdaki düzenin etkilenmesi sosyoekonomik kuraklığa, çevresel problemlerin ortaya çıkması, su ve kara ekosistemlerinin alarm vermesi ve biyoçeşitliliğin azalmaya başlaması ise ekolojik kuraklığı işaret etmektedir. Anlaşılabacağı üzere, kuraklık birçok farklı etkilere sahiptir. Kuraklığın türü ne olursa olsun ilk basamağı meteorolojik kuraklıktır. İklim değişikliği etkilerinin artması ise meteorolojik kuraklığın sıcaklık artışlarıyla artmasına ve düzensiz yağışlar yüzünden ise tarım yılı içerisinde hem kuraklık hem de sel/taşkın olaylarının aynı dönemde yaşanmasına neden olabilmektedir.

Türkiye’de sıklıkla kuraklıkla karşılaşilmektedir. Türkiye geneli hububat tarım yılına göre yapılan değerlendirmeler, kuraklığa yönelik en kuvvetli doğrusal eğimin 3 aylık zaman ölçeklerinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır (Akcapınar vd. 2022). Ayrıca son yıllarda Akdeniz Bölgesi, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi’nde yoğunlaşan kuraklıklar tarımda ve su kaynakları yönetiminde ciddi problemlere neden olmaktadır. Kurak ve yarı kurak bir iklim kuşağının hâkimiyetinde olan Türkiye, zaman zaman çölleşme ve erozyon problemleriyle burun buruna gelmektedir (MFA, 2024).

Bu nedenle Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de kuraklıkla mücadele konusunda belirlenmiş temel prensipler çerçevesinde hareket edilmesi gerekmektedir. Burada her ne kadar meteorolojik kuraklık konusu ele alınmış olsa da kuraklıkla mücadele konusunda kuraklık tipine göre bir ayırım söz konusu olmamaktadır. Kuraklık öncesi, kuraklık anı ve kuraklık sonrası için ayrı ayrı ele alınmalı, bütüncül (entegre) bir yaklaşımla sorunun çözümüne odaklanılmalıdır.

İller ve havzaların kuraklık erken uyarı ve izlenmesinde iklim projeksiyonlarında kullanılan orta-iyimser ve kötümser senaryolarda sıcaklık artışlarında önemli farklar olduğu göz önüne alınmalıdır. Yağış öngörülere; küresel ve Türkiye bazında birbirine benzerlikler göstermekte ve düzensiz bir yağış rejimi yaşanacağı öngörülmektedir. Kent tasarım ve planlamalarında geniş bir bakış açısıyla değerlendirmeler yapılmalıdır. Bu durum hem kuraklık hem de aşırı yağış şartlarını birlikte düşünmeyi gerektirmektedir. Sıcaklık artışlarının sonucu olarak daha güçlü fırtınalara göre önlemler geliştirilmelidir. Ani sıcaklık artışları, sıcak dalgaları ve soğuk dalgalarıyla mücadele önlemleri insan, hayvan ve bitki sağlığı için önlemler geliştirmeyi ve koruyucu yaklaşımları gerektirmektedir (Ekici, 2023). Meteorolojik kuraklık şartları tarımsal kuraklık ile doğrudan insan yaşamını etkilerken, hidrolojik kuraklık ile de içme ve kullanma suyu eksikliği riskini ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda biyolojik çeşitlilik için etki yaratan ekolojik kuraklık riskini ortaya çıkaran önemli bir göstergedir. Tüm kuraklık çeşitlerinin domino etkisiyle birbirini tetiklemesi ise sosyoekonomik kuraklığa ve toplumsal olaylara, bölgesel ve küresel göçlere neden olmaktadır.

Kuraklıkla mücadele konusunda Dünya genelinde benimsenmiş yaklaşımlar genel hatlarıyla şunlardır:

- Kuraklığın nedenleri konusunda kamuoyu bilinçlendirilmeli, iklim okuryazarlığı arttırılmalıdır. İklim değişikliğine uyum konusunda gerekli çalışmalar kararlılıkla sürdürülmelidir.

- Kuraklık izleme ve erken uyarı sistemleri konusundaki çalışmaların sayısı artırılmalı ve bu çalışmaların operasyonel olarak kullanımı sağlanmalıdır.

- Su kaynakları ve su yönetimine ilişkin çalışmalar geliştirilerek sürdürülmelidir. Temel prensip olarak su tasarrufu sağlayacak, su israfını önleyecek (tarımda damla sulama yönteminin kullanılması, suyun geri kazanımı üzerine projelerin geliştirilmesi gibi) yaklaşımlar yaygınlaştırılmalıdır.

- Zaman ve kaynak israfının önüne geçilmesi amacıyla, konuyla ilgisi bulunan kamu kurum ve kuruluşları ile üniversite, STK ve özel sektörün iş birlikleri artırılarak sürdürülmelidir.

- Toprak ve su kaynaklarını koruma kapsamında, başta toprak nemi olmak üzere, konuyla ilgili çalışmalara yol gösterecek veri çeşitliliği artırılmalıdır. Yapay zekâ ve uydu tabanlı güncel yaklaşımların, su kaynaklarının ve kuraklığın izlenmesinde kullanımları artırılarak zaman ve kaynak tasarrufu sağlanmalıdır.

- İklim değişikliğinin tarım ve su kaynakları üzerine etkilerinin ortaya konduğu çalışmaların sayısı artırılmalıdır.

- Kuraklık coğrafi sınırlara bağlı kalmayan bir olay olduğundan, kuraklıkla mücadele çalışmaları yürüten ve konuyla ilgili ülkeler arasında uluslararası iş birlikleri artırılmalıdır.

- Kuraklığın neden olduğu sosyoekonomik zararlar net şekilde belirlenmeli, bu kapsamda alınması gereken önlemler üzerine çalışmalar (yasal düzenlemeler, sigorta sistemleri vs.) düzenli olarak sürdürülmelidir.

Yukarıda kuraklığa yönelik genel çerçevesi çizilen mücadele yöntemlerinin temel prensibi; doğal kaynakların (su ve toprak) sürdürülebilirliğinin sağlanması, zaman ve kaynak israfı ile sosyoekonomik ve ekolojik sorunların önüne geçilmesi olarak özetlenebilir. Buna yardımcı olacak erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ile veri çeşitliliği artırılması ve teknolojik gelişimlerin kullanımının yaygınlaştırılması ise bu kapsamdaki mücadele unsurlarıdır. Ancak kuraklıkla mücadelenin başarısı, ulusal ve uluslararası iş birliği bir yana konunun paydaşı olan toplumların topyekûn bilinçli ve kararlı olmasına bağlıdır.

KAYNAKÇA

- Aijaz, R. (2013). Monsoon variability and agricultural drought management in India.
- Akcapınar, M. C. (2007). Afyon İli Şuhut Ovası sulama organizasyonlarında sulama suyu fiyatlandırma yaklaşımları ve üretim maliyeti üzerine etkileri (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Akcapınar, M. C., & Çakmak, B. (2021). Ankara ili Ayaş ilçesinde kuraklığın değerlendirilmesi. *Uluslararası Biyosistem Mühendisliği Dergisi*, 2(2), 119-130.
- Akcapınar, M. C., Dolay, N., Sarıgül, K., & Yücel, G. (2022). Drought Assessment in Türkiye During 2020-2021 Agricultural Year. 10th International Hybrid Symposium on Atmospheric Sciences (10/2022). İTÜ, İstanbul.
- Akcapınar, M. C., & Çakmak, B. (2022). Meteorolojik Faktörler Yardımıyla Bazı Buğday Çeşitlerinde Verim Tahmini: Şanlıurfa Ceylanpınar Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(Ek Sayı 1), 200-213. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.a.vi.943245>
- Akcapınar, M. C. (2023). Uydu Tabanlı İndekslerle Konya Altınova Bölgesinde Kuraklığın Analizi ve Buğday Verimi ile İlişkisi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akcapınar, M. C. & Akıl, S. (2023). FLDAS Modeli Toprak Nemi İçeriği ile Alansal Yağış İlişkisinin 2022 Yılı Uzamsal Değerlendirilmesi: Türkiye Atlası. *Uluslararası Katılımlı 5. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu*. p 651-667. Alanya-Antalya. 11/2023.
- Akcapınar, M. C., & Çakmak, B. (2024). Yield prediction models for some wheat varieties with satellite-based drought indices and machine learning algorithms. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1002/ird.2989>
- Akçakaya, A., Sümer, U.M., Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Gürkan, H., Yazıcı, B., Kocatürk, A., Şensoy S., Bölük, E., Arabacı, H., Açar, Y., Ekici, M., Yağan, S. ve Çukurçayır, F. 2015. Yeni Senaryolarla Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği-TR2015-CC. *Meteoroloji Genel Müdürlüğü yayını*, 149 s., Ankara.
- BM (2022). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2022: Ten Key Messages*.
- Crossman, N. D. (2018). Drought resilience, adaptation and management policy (DRAMP) framework. Bonn: UNCCD, 20, 2019-04.
- C2ES (2024). Center For Climate and Energy Solutions (C2ES) <https://www.c2es.org/content/drought-and-climate>

change/#:~:text=In%20some%20areas%2C%20droughts%20can,area%20to%20become%20even%20drier. Erişim: 03.07.2024

- Çöleri, M., Yayvan, M., Deniz, A., Turgut, Ü., Eryılmaz, A., Geçer, C., & Güser, A. (2007). Hava Analiz ve Tahmin Tekniği Kitabı. Dmi Yayınları.
- Deng, S., Chen, T., Yang, N., Qu, L., Li, M., & Chen, D. (2018). Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin. *Science of the Total Environment*, 619, 28-41.
- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., & Nachtergaele, F. (2001). Lecture notes on the major soils of the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Ekici, M., (2023). Ankara İklimi; Dünü, Bugünü ve Geleceği. Sürdürülebilirlik, Kent ve Doğa (Editörler) Öktem, M.K. ve Çiftçi, L. Gazi Kitabevi, Ankara. S. (67-80), ISBN: 978-625-365-485-6
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Kornfeld, I. E. (2009). Mesopotamia: A history of water and law. The evolution of the law and politics of water, 21-36.
- Mera, G. A. (2018). Drought and its impacts in Ethiopia. *Weather and climate extremes*, 22, 24-35.
- MFA (2024). T.C. Dışişleri Bakanlığı <https://www.mfa.gov.tr/kuraklik-ve-collesmeyle-mucadele.tr.mfa> Erişim: 07.07.2024
- MGM (2023a). MGM 2023 yılı yağış değerlendirmesi. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/yagis-degerlendirme/2023yagisdegerlendirmesi.pdf> Erişim: 30.06.2024
- MGM (2023b). MGM 2023 yılı iklim değerlendirmesi. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2023-iklim-raporu.pdf> Erişim: 30.06.2024
- MGM (2023c). MGM 2023 yılı kuraklık değerlendirmesi. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx?d=yillik#sfB> Erişim: 30.06.2024
- MGM (2024). Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İklim Sınıflandırmaları. <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx> Erişim: 30.06.2024

- NDMC (2024a). National Drought Mitigation Center. The Dust Bowl. <https://drought.unl.edu/dustbowl/> Erişim: 24.06.2024
- NDMC (2024b). <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx> Erişim: 23.06.2024
- NOAA (2024a). National Integrated Drought Information System (NIDIS) <https://www.drought.gov/what-is-drought/drought-basics#types-of-drought> Erişim: 23.06.2024
- NOAA (2024b). National Ocean Service <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html> Erişim: 03.07.2024
- NOAA (2024c). <https://www.noaa.gov/jetstream/global/jet-stream> Erişim: 04.07.2024
- Okumu, C. K. (2021). Drought Vulnerability & Impact Assessment A Rapid Review Of Practices & Policy Recommendations Ukceh & The Borders Institute (TBI), Kenya With inputs from: Amara Keita, Consultant, Bamako, Mali Ibrahim Jarso, MS Candidate, Isiolo, Kenya 30th MARCH 2021.
- Sayers, P. B., Yuanyuan, L., Moncrieff, C., Jianqiang, L., Tickner, D., Xiangyu, X., ... & Pegram, G. (2016). Drought risk management: a strategic approach. Published in.
- SENECA (2024). Global Atmospheric Circulation Model. <https://senecalearning.com/en-GB/revision-notes/gcse/geography/aqa/1-3-1-global-atmospheric-circulation> Erişim: 04.07.2024
- Singh, G. R., Dhanya, C. T., & Chakravorty, A. (2021). A robust drought index accounting changing precipitation characteristics. Water Resources Research, 57(7), e2020WR029496.
- STUDYING (2024). El Niño ve La Niña olayları. <https://www.studyiq.com/articles/el-nino-and-la-nina/> Erişim: 08.07.2024
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized precipitation index: user guide.
- Svoboda, M. D., & Fuchs, B. A. (2016). Handbook of drought indicators and indices (Vol. 2). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Teuling, A. J., A. F. Van Loon, S. I. Seneviratne, I. Lehner, M. Aubinet, B. Heinesch, C. Bernhofer, T. Grünwald, H. Prasse, and U. Spank (2013). Evapotranspiration amplifies European summer drought, Geophys. Res. Lett., 40, 2071–2075, doi:10.1002/grl.50495.
- TÜİK (2023). Sera Gazi Emisyon İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021->

49672#:~:text=Sera%20gaz%C4%B1%20envanteri%20sonu%C3%A7lar%C4%B1na%20g%C3%Bcre,CO2%20e%C5%9Fd.%20olarak%20hesapland%C4%B1. 15.06.2024

TÜİK (2024). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi. Haber bülteni Sayı:49684
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuc-lari-2023-49684> Erişim: 15.06.2024

UNDP (2021). Methodology for Drought Hazard Assessment, Modelling, and Mapping for Georgia.
https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ge/undp_ge_ee_gcf_drought_modelling_mapping_methodology-2021_eng.pdf
 Erişim:07.07.2024

Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria and J.I. Lopez-Moreno, (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23:1696–1718.

WEF (2019). Dünya Ekonomik Forumu. <https://www.weforum.org/agenda/2019/03/our-turn-next-a-brief-history-of-civilizations-that-fell-because-of-climate-change/> Erişim: 24.06.2024

BÖLÜM 2

HİDROLOJİK KURAKLIK

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13758815>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. feyzagundel@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-7435-4130

1. Giriş

Tatlı su kaynakları küresel olarak kıt ve eşit olarak dağılmamış durumdadır ve endişe verici bir oranda bozulmaktadır. Tatlı su kaynaklarının yönetimi, sınıraşan doğası nedeniyle bir çok bölge için zordur. Tatlı su kaynakları, gözenekli boşluklarında su içeren jeolojik kaya oluşumları için kullanılan bilimsel bir terim olan akiferlerde bulunur. Akiferler gezegendeki erişilebilir tatlı suyun %99'unu içerir ve tüm kıtalara geniş bir şekilde dağılmışlardır. Akiferlerin uluslararası sınırları aştığı yerlerde, sınıraşan nehir havzaları gibi sınıraşan sistemler olarak bilinirler (Puri, 2003).

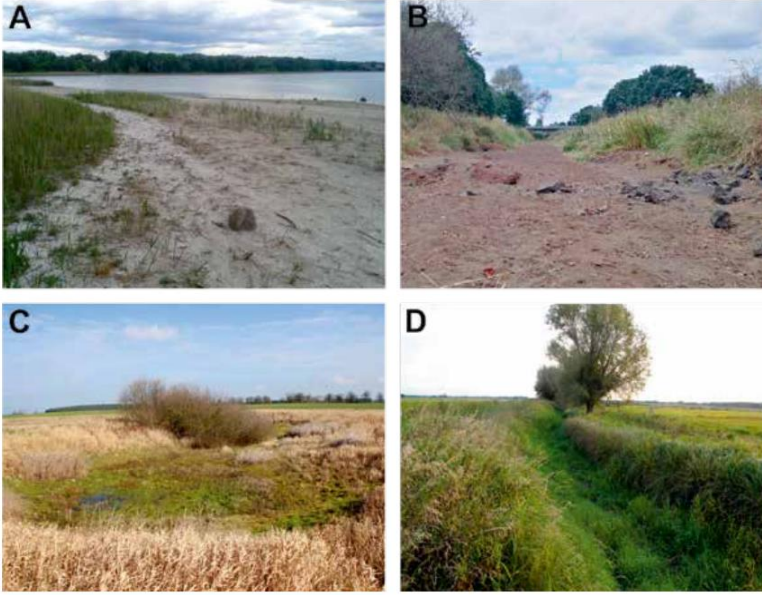
Akarsu akışı insanlar için her zaman önemli olmuştur ve Mısır, Mezopotamya, Hindistan ve Çin gibi dünyanın büyük uygarlıklarının çoğu büyük nehirlerin kıyısında yer almıştır (McKerchar, 2003). Akarsu akışı birçok hidrolik ve hidrolojik uygulamada önemli bir rol oynamaktadır (Heddarn ve Kişi, 2021). Akarsu akışı, uzun vadeli hidro-iklimsel değişikliklerin çok yararlı bir göstergesidir. Su kaynakları yönetimi açısından bakıldığında, akarsu akışındaki eğilim ve değişkenliğin belirlenmesi, planlama açısından kritik öneme sahiptir. Trend analizleri, hidrolojik ve iklimsel değişkenlerin uzun vadeli dinamiklerini ve davranışlarını anlamak için faydalıdır (Fentaw ve ark., 2019).

2. Hidrolojik kuraklık

Kuraklık ve taşkınların her ikisi de bireyler, ekosistemler ve toplumlar üzerinde ciddi etkileri olan potansiyel yıkıcı olaylardır (Findell ve Delworth, 2010). Kuraklık potansiyel olarak önemli

ekonomik, sosyal ve ekolojik sonuçları olan doğal bir afettir. Düşük yağış, su mevcudiyetinin zamanlaması veya su kaynaklarına erişimin azalması gibi çeşitli nedenlerle kuraklık ortaya çıkabilir (Kebede ve ark., 2019).

Hidrolojik kuraklık, hidrolojik sistemdeki su eksikliği anlamına gelir ve kendisini nehirlerde, göllerde, rezervuarlarda ve yeraltı suyunda anormal derecede düşük seviyelerle gösterir. Tekrarlayan bir doğal afeti ifade eden daha büyük kuraklık olgusunun bir parçasıdır (Van Loon, 2015).



Şekil 1. Brandenburg'da (Almanya) 2018 ve 2020 yılları arasında hidrolojik kuraklığın sonuçları olarak göl ve akarsularda kurumalar (Fotolar: Knut Kaiser; Thorsten Schönbrodt; Lukas Landgraf; Wikipedia/CC-BY-SA-3.0)

Kaynak: Kaiser ve ark., 2021

Genel olarak dört tür kuraklık tanımlanmıştır: meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik kuraklık. Meteorolojik kuraklık, kuru hava koşullarının bölgede hakim olduğu durumlarda ortaya çıkar. Buna karşılık, tarımsal kuraklık, belirli bir zamanda mahsulün ve bitki büyümesinin ihtiyacını karşılamak için yeterli nem olmadığında meydana gelir. Hidrolojik kuraklık, akarsularda, rezervuarlarda ve yeraltı suyu seviyelerinde (genellikle meteorolojik kuraklıkların ardından) meydana gelen eksiklikleri ifade eder. Sosyoekonomik kuraklık meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklık unsurlarını içeren malların arz ve talebiyle ilgilidir. Ekonomik bir mala olan talebin arzı aşması durumunda ortaya çıkar. Ayrıca kuraklık olayları hafif, orta, şiddetli ve aşırı gibi farklı kategorilere de sınıflandırılır. Kuraklık miktarının belirlenmesinde yağışın potansiyel önemi yüksektir. Kuraklığın olumsuzluklarına karşı azaltım politikalarının planlanması ve sınırlandırılması bir diğer önemli faktörlerdir (Mishra ve ark., 2022).

Hidrolojik kuraklık, yağış eksikliğinin doğrudan etkisi olmadan, yüzey ve yer altı sularının kullanım açısından yetersiz olduğu bir dönemi ifade eder. Akarsu akışını, toprak nemini, rezervuar seviyelerini, göl seviyelerini ve yeraltı suyunun beslenmesini etkileyebilir. Hidrolojik kuraklıklar aylarca süren meteorolojik kuraklıkların ardından ortaya çıkar (Kebede ve ark., 2019). Hidrolojik kuraklık, genellikle meteorolojik kuraklıkların ardından, akarsularda, rezervuarlarda ve yeraltı suyu seviyelerinde meydana gelen eksiklikleri ifade eder (Mishra ve ark., 2022). Örneğin, yağışsız geçen birkaç gün ve nehir yüzeyindeki suyun insani amaçlarla sürekli kullanılması, su depolama kaynaklarını azaltabilir ve dolayısıyla tarım sektörlerini hem doğrudan hem de dolaylı

olarak etkileyebilir. Kuraklığın tanımlanması ve karakterizasyonu karmaşıktır çünkü tespit edilmesi zordur. Bu nedenle kuraklığın incelenmesi multidisipliner bir analiz gerektirir ve süreyi, şiddeti, büyüklüğü ve sıklığı tanımlayan mümkün olduğunca geniş bir karakterizasyon gerektirir. Mahsul ve hayvancılık-yem sistemlerinin ekimini, büyümesini ve kullanımını etkiler ki bu sistemler sıcaklık ve yağıştaki olumsuz değişikliklere karşı özellikle hassastır. Yağış ve mevsimsel su rejimlerindeki değişiklikler kuraklığın artmasına neden olarak verimliliği büyük ölçüde etkileyebilir (Emadodin ve ark., 2021).

Hidrolojik kuraklıkla bağlantılı etkiler arasında su ekolojisi üzerindeki olumsuz etkiler, enerji üretimindeki kayıplar, suyla taşınan ulaşım olanaklarının azalması, turizm ve rekreasyondaki bozulmalar, kamusal su temini veya sulu tarım için azalan su mevcudiyeti ve diğer yüzey veya yeraltı suyuna bağımlı sektörler üzerindeki etkiler yer almaktadır (Stahl ve ark., 2024).

Pek çok gelişmekte olan ülkenin de dahil olduğu su kıtlığı olan bölgelerde tarımsal su tüketimi, toplam su tüketiminin %90'ını aşabilmektedir. Su kıtlığı tarımsal üretimin önündeki en ciddi kısıtlamalardan birini temsil etmektedir. Antropojenik faaliyetlerin neden olduğu iklim değişikliğinin su dağılımını, tuzluluk ve besin bulunabilirliğini kötüleştirilmesi beklenmektedir (Chauhan ve ark., 2014). İklim değişikliği altında, su mevcudiyetinin azaldığı dönemlerin ve yüksek sıcaklıkların daha sık hale gelmesi ve bunun da mahsul verimini olumsuz etkilemesi beklenmektedir. İklimsel değişkenlikteki artış, aşırı sıcaklık ve kuraklık stresi olaylarının daha sık görülmesinden sorumludur. Sera gazlarının artan emisyonları, dünyanın iklim

sisteminin ışımsal enerji bütçesini değiştirir, dünyanın termal dengesini etkiler ve küresel sıcaklıkta bir artışa neden olur. Artan sıcaklıklar mahsullerin su ihtiyacının artmasına neden olur. İklim değişikliği nedeniyle dünyanın birçok bölgesinde kuraklıkların sıklığı ve şiddeti artmaktadır (Kebede ve ark., 2019).

3. Hidrolojik kuraklık türleri ve alt türleri

Van Loon ve Van Lanen (2012) ile Van Loon ve ark., (2014) bir hidrolojik kuraklık tipolojisi geliştirmişlerdir. Hidrolojik kuraklıkları, neden olan faktörlere ve yayılma süreçlerine göre aşağıdaki sekiz şekilde sınıflandırmışlardır:

- Klasik yağış eksikliği kuraklığı (rainfall deficit drought): Bu tip hidrolik kuraklık her mevsimde görülür.
- Yağmur sezonundan kar sezonuna dek kuraklık (rain-to-snow-season drought): Yağmur mevsiminde yağış eksikliği görülür ve kar mevsiminde kuraklık devam eder. Yağışın buz ve kar olarak depolanması, hidrolojik kuraklığın önemli bir moderatörü olarak hareket edebilir (Staudinger ve ark., 2014).
- Islak sezondan kuru sezona dek kuraklık (wet-to-dry-season drought): Yağışlı sezonda yağış eksikliği vardır ve kuraklık kurak sezonda da devam eder.
- Soğuk kar sezonu kuraklığı (cold snow season drought): Kar mevsiminde görülen düşük sıcaklık, kar mevsiminin erken başlamasına, kar erimesinin gecikmesine ve su rezervlerinin yeniden doldurulmasına engel olur.

- Sıcak kar sezonu kuraklığı (warm snow season drought): Kar mevsiminde yüksek sıcaklık karların erken erimesine neden olur ve yağış açığıyla birlikte olursa su rezervlerinin yeniden doldurulmasına engel olur.
- Kar erimesi kuraklığı (snowmelt drought): İlkbaharda yağışların az olması veya kışın ekstrem düşük sıcaklıklar nedeniyle karların erimemesi durumunda olur. Kar erimesi kuraklığı, kardan etkilenen havzalarda ilkbaharda kar erimesi deşarj zirvesindeki eksiklikten kaynaklanır.
- Buzul erimesi kuraklığı (glacier melt drought): Yaz aylarında sıcaklığın düşük olması nedeniyle buzulların erimemesi durumunda olur. Buzul erimesi kuraklığı, buzullaşmış havzalarda yaz aylarında buzul erimesi deşarjının zirve noktasındaki bir eksikliktir.
- Bileşik kuraklık (composite drought): Çeşitli mevsimlerdeki bir dizi kuraklık olayının birleşimidir.

Sıcak ve kurak yaz günleri, yağış eksikliği ve artan buharlaşma nedeniyle akarsu akışının azalmasına neden olabilir. Bununla birlikte, buzullaşmış havzalarda, bu tür dönemler çok farklı bir hidrolojik tepkiye yol açabilir, çünkü buzullar artan miktarda erimiş su sağlayabilir ve böylece yağış açıklarını telafi edebilir. Fakat buzulların telafi etmesi doğrudan değildir ve telafi seviyelerindeki aralık geniştir. Buzul, kar ve yağmur gibi farklı akış bileşenleri ve bunların varyasyonları, bu yüksek dağ su sistemlerinde buzulların tamponlama kapasitesi ve telafi edici etkisi açısından önemlidir (Van Tiel ve ark., 2021).

4. Hidrolojik rejimler ve tahmini

Akış rejimi (veya hidrolojik rejim), nehir kanallarını ve taşkın ovalarını şekillendiren ve büyük ölçüde fiziksel yaşam alanını ve ilgili biyotik toplulukları şekillendiren ve düzenleyen süreçleri belirleyen jeomorfolojik süreçleri yönlendiren, yüzlerce yıla yayılabilen yüksek ve düşük akışların zamansal modellerinin uzun vadeli istatistiksel bir genellemesidir. Akış rejimi aynı zamanda büyük ölçüde akan su ekosistemlerinin mevsimselliğini de belirler. Genellikle beş akış bileşeniyle karakterize edilir: büyüklük, sıklık, süre, öngörülebilirlik (farklı akış olaylarının meydana gelme düzenliliği/zamanlaması) ve akışların değişim hızı veya anilik (akışın bir büyüklükten diğerine ne kadar hızlı değiştiği) (Soulis, 2021). Hidro-iklimsel aşırılıklar güçlü anilik, düşük frekans ve geniş etki ile karakterize edilir ve bu durum sıklıkla hem sosyo-ekonomik ilerlemede hem de bireylerin refahında derin aksamalara neden olur. Küresel iklim önemli ölçüde değiştiğinden klimatolojik ve hidrolojik sistemlerin istikrarsızlığı, hidro-iklimsel aşırılıkların sıklığı ve afetlerin yoğunluğu artırmıştır (Wang ve ark., 2023).

Bir nehrin akış rejiminin özelliklerini etkili bir şekilde tanımlamak için genellikle uzun yıllar süren sürekli akış verilerine ihtiyaç duyulur. Bu özellikler büyük ölçüde coğrafi konuma, iklime, topoğrafyaya, bitki örtüsüne ve jeolojik ve hidrolojik özelliklere bağlıdır. Saat, gün, mevsim, yıl ve hatta daha uzun döngülerden oluşan farklı zaman ölçekleri havza alanı, özellikle kuru koşullar altında akış değişkenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Doğal akış değişkenliği aralığı daha geniştir, alan arttıkça bu aralık azalır (Soulis, 2021).

Aralıklı nehirlerin ve geçici akarsuların çoğunun hidrolojik rejimleri, akarsu kanalındaki ıslak ve kuru fazların değişimini ve bitişik ekosistemlerle oldukça dinamik yanal, dikey ve boylamsal bağlantıları içerir. Geçici akış, besin ve organik madde girdilerinde, akış içi işleyişte ve akış aşağı taşımada darbeleri zamansal ve mekansal değişime sahip benzersiz bir 'biyojeokimyasal kalp atışı'dır. Aralıklı nehirler ve geçici akarsu ağlarının yeraltı ve yan bölmelerle etkileşimleri ve karasal ekosistemler ile arasında havza ölçeğindeki bağlantıları mevcuttur (von Schiller ve ark., 2017).

Akarsu akışı, su döngüsünün en önemli bileşenlerinden biridir ve tahmini, su kaynaklarının havza, bölgesel ve kıtasal mekansal ölçeklerde planlanması ve yönetimi için büyük önem taşımaktadır. Akarsu akışı, akarsu ekosistemlerini doğrudan etkiler ve uzay-zamansal değişkenlik dikkate alınarak doğru tahmini, çevre ve su kaynakları yönetimi açısından önemlidir (Malekian ve Chitsaz, 2021).

Hidrolojik kuraklıkta incelenen su kaynağı formları, kar erimesi ve bahar akışını içeren akarsu akışları, göl ve rezervuar depolaması, akiferlerin beslenmesi, akiferlerden deşarj ve taban akışı gibi çeşitli hidrolojik değişkenlere yansıtılmaktadır (Nalbantis ve Tsakiris, 2009). Bu nedenle, yüzey suyu alt sisteminden gelen yüzey akışı, üst ve alt doymamış bölgelerden gelen yeraltı akışı ve yeraltı suyu alt sisteminden gelen taban akışı dikkate alındığından, hidrolojik kuraklıkları tanımlamada akarsu akışı temel değişkendir. Akarsu akışı, hidroelektrik üretimi, rekreasyon ve sulu tarım gibi mahsul büyümesinin ve veriminin büyük ölçüde akarsudaki su mevcudiyetine bağlı olduğu çeşitli su temini faaliyetleri için sosyoekonomik kuraklığı önemli ölçüde etkilemektedir.

Dolayısıyla hidrolojik ve sosyoekonomik kuraklıklar, hidrolojik olarak normal koşullar veya ekonomik büyüme ve sosyal refah için hedeflenen su kaynakları açısından akarsu akışındaki eksikliklerle ilişkilidir (Sung & Chung, 2014).

Akarsu akışı ölçümleri genellikle bir derecelendirme eğrisi kullanılarak deşarj oranına dönüştürülen su seviyesi ölçümlerine dayanır. Derecelendirme eğrisi, hız-alan yöntemi kullanılarak ölçülen akarsu akışlarının bir örneğine ve bunlara karşılık gelen su seviyesine dayalı olarak oluşturulur. Derecelendirme eğrisi daha sonra istatistiksel teknikler kullanılarak ölçümlere uyarlanır, ancak aynı zamanda nehir kesitinin şeklinin etkisi gibi diğer faktörleri de hesaba katabilir. Son yıllarda çevresel su gereksinimlerine ilişkin bilgimiz önemli ölçüde gelişmiştir. Ancak çevrenin neye ihtiyacı olduğuna dair anlayışımızda ve herhangi bir çevresel akış değerlendirmesiyle ilgili belirsizlikte hâlâ boşluklar var. Belirsizlik, diğer kaynakların yanı sıra, çevresel su gereksinimlerini belirleyen süreçlerin eksik anlaşılmasından ve bu süreçlerin yaklaşık değerleri olan modellerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Akarsu akışı tahmini, tahminciler ve su yöneticileri tarafından, esas olarak akarsu akışı veri kümelerindeki rastgeleliğin varlığı nedeniyle çok zorlu bir görev olarak görülmektedir. Akışın teknik olarak tahmin edilmesinin oldukça zor olduğu iyi bilinen bir gerçektir ve bunun makul nedenleri, onun karmaşık, doğrusal olmayan, dinamik ve kaotik davranışı ve bunların yanı sıra tarihsel veri kümelerinde mevcut olan rastgeleliktir. Bu karmaşık hidrolojik süreç, topoğrafya, yağış dağılımı, toprak özellikleri, arazi kullanımı, iklim değişikliği, kentsel gelişim vb. gibi birçok faktörden etkilenir. Bu nedenle, akarsu akışı

tahmini, incelenmesi gereken çeşitli hata kaynaklarına maruz kalır. Akışın doğru tahmin edilmesindeki diğer bir zorluk, verilerin optimum zaman ölçeğinin seçimidir. Aylık akış hesaplamaları, iyi tahminler sağlamada günlük verilere göre daha etkilidir. Bu nedenle, akarsu akışı modellemesi ve tahmini, uzun vadeli planlama (yapısal ve yapısal olmayan önlemler) ve kısa vadeli acil durum uyarısı uygulayarak su kaynakları sistemini optimize etmek ve yıkıcı doğal afetlerin (sel ve kuraklık) etkisini azaltmak için çok faydalıdır (Sharma & Machiwal, 2021).

5. Hidrolojik kuraklık endeksleri ve modelleri

Yağış, sel ve kuraklık gibi hidrolojik olaylar doğası gereği rastgeledir. Hidrolojik sistemin karmaşıklığı nedeniyle bu fiziksel süreçler tam olarak anlaşılamamıştır ve güvenilir deterministik matematiksel modeller hala geliştirilmeyi beklemektedir. Bu nedenle hidrolik tesislerin ve altyapıların tasarımında faydalı analizler sağlamak amacıyla istatistiksel yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmıştır (Grimaldi ve ark., 2011). Birçok hidrolojik olay doğrusal olmayan ilişkileri içerir. Doğrusal olmayan süreçler faylardan, altta yatan litolojideki farklılıklardan veya erozyon/birikim süreçlerinden kaynaklanan topraktaki süreksizliklerden, arazi örtüsü ve arazi kullanımındaki farklılıklardan ve bir dizi başka faktörden kaynaklanabilir. Malzeme özelliklerindeki heterojenlik ve belirsizlikler doğadaki çoğu hidrolojik ortama hakimdir. Bu faktörler, çoğu ortamda baskın akış yollarını ve kalış sürelerini oldukça belirsiz hale getirir. Bu nedenle hidrolojik modeller genellikle modelleyicinin önemli sistem davranışlarını temsil ettiğine inandığı algısal bir modelden başlar. Daha sonra bir dizi denklem

hesaplamalı bir modele kodlanır ve test edilir. En yaygın hesaplamalı hidrolojik model türleri şunlardır: analitik, kavramsal, veriye dayalı ve süreç tabanlı (Ogden, 2021).

Günlük, aylık, mevsimsel ve yıllık doğal akış değişimlerini dikkate alarak bir kuraklık olayının süresini ve şiddetini tanımlayan eşik seviyesi yaklaşımları, kuraklık analizlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır (Tigkas ve ark., 2012; van Huijgevoort ve ark., 2012). Bu yaklaşımlar nehir akışının beklenen kullanılabilirliğine ilişkin analitik bir yorum sağlar; Akarsu akışı eşik seviyesinin altına düştüğünde kuraklık meydana gelir. Bu seviye sıklıkla belirli bir süre için belirli bir yüzdelik akış olarak kabul edilir ve söz konusu ay, mevsim veya yıl boyunca sabit olduğu varsayılır (Sung & Chung, 2014). Kuraklığın en önemli yönü akarsu akışındaki önemli azalma ve rezervuarlardaki su depolamasının azalmasıdır (Allen ve ark., 2011).

Kuraklık olgusunun çeşitli boyutlarının aynı anda incelenmesinin zorluğundan dolayı yakın zamanda basitleştirici prosedürler önerilmiştir. Bunların arasında belirli bir bölgesel birimi (örneğin nehir havzası veya alt havza) ve sabit referans dönemlerini (örneğin 3, 6, 9 ve 12 ay) dikkate alan tek boyutlu yaklaşımdır. Bu basitleştirme, kuraklık olgusunun, meteorolojik parametrelere dayanan kuraklık endeksleri ile tahmin edilebilen yoğunluğuna göre değerlendirilmesine yol açmaktadır. Akarsu akışı kuraklık indeksi (SDI, streamflow drought index) adı verilen boyutsuz güçlü bir hidrolojik kuraklık indeksi, hidrolojik kuraklığın rasyonel temsili bir ölçüsü gibi görünmektedir (Tigkas ve ark., 2012).

Hidrolojik kuraklığı karakterize etmek için, genel olarak veri gerektiren ve hesaplama açısından yoğun olan çeşitli endeksler geliştirilmiştir. Aksine meteorolojik kuraklıklar için Standardize Yağış İndeksi (SPI, standardized precipitation index) gibi çok basit ve etkili endeksler kullanılır. Hidrolojik kuraklıkların ciddiyetini karakterize etmek için, Standardize Yağış İndeksi (SPI)'ye benzer bir indeks olan Akarsu Akışı Kuraklık İndeksi (SDI, streamflow drought index) kullanan bir metodoloji önerilmiştir. Kümülatif akış, her hidrolojik yılda 3, 6, 9 ve 12 aylık örtüşen dönemler için kullanılır. Durağan olmayan bir Markov zinciri oluşturan kuraklık durumları tanımlanır (Nalbantis ve Tsakiris, 2009).

Oloruntade ve ark., (2017), Nijer havzasının güney bölgesindeki kuraklık oluşumunu incelemek için SPI (Standartlaştırılmış Yağış İndeksi) ve SPEI (Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi) meteorolojik kuraklık indekslerini ve Standartlaştırılmış Akış İndeksi (SRI, standardized flow index) hidrolojik kuraklık indeksini analiz etmiştir. 1970–2008 istatistiksel döneminde elde ettikleri sonuçlar hidrolojik kuraklığın havzada yağıştan (kurumadan) çok sıcaklıktan (ısınma) etkilendiğini göstermiştir.

Geleneksel hidrolojik modeller, çeşitli havza süreçlerinin fiziksel ve matematiksel temelli temsiline sahiptir ve dolayısıyla durağan verilere uygun, esas itibarıyla doğrusal modellerdir. Geliştirilen hidrolojik modellerin çoğu veri kümelerinin doğrusal olduğu varsayımına dayandığından dolayı, durağan olmayan ve doğrusal olmayan hidrolojik veri kümelerini işleme konusunda yetersiz, doğrusal olmayan problemlerin çözümü için uygun modeller değildir. Hidrolojik

modeller, stokastik zaman serilerinin veri dağılımlarındaki doğrusal olmayan ve durağan olmayan davranışlarla başa çıkamama kısıtlamalarına ek olarak, yağış, akarsu akışı ve arazi kullanımı/arazi örtüsü, toprak türleri ve hidrolojik toprak durumu gibi havza özellikleri dahil olmak üzere çeşitli hidrolojik süreçlere ilişkin kapsamlı verilere ihtiyaç duyar. Hidrolojik modellerin kalibrasyon ve doğrulama gerekliliği hidrolojik modellerin bir diğer dezavantajıdır (Malekian ve Chitsaz, 2021).

"Yapay Sinir Ağları" modelleri (ANN, Artificial Neural Network) gibi veriye dayalı yapay zeka modelleri, havza süreçleri ve özellikleri dahil olmak üzere kapsamlı hidrolojik verilerin toplanması gerekliliğini en aza indirme yeteneğine sahiptir. Yapay Sinir Ağları modelleri her ne kadar durağan ve normal dağılımlı bir veriye ihtiyaç duymasa da doğal küresel olaylardaki durağan olmayan özellikleri kendi iç yapılarına yakalayıp etkilerini çıktılara aktarabilme yeteneğine sahiptir. Yapay Sinir Ağları modelleri, veri setlerindeki herhangi bir gürültüyü dikkate alarak girdi-çıkı ilişkilerini genelleştirme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle ANN modelleri fiziksel temelli hidrolojik modellere alternatif olarak uygulanmaktadır. Son birkaç on yıldır ANN modelleri, yağış-akış modellemesi, akarsu akışı tahmini, su kalitesi değerlendirmesi ve yeraltı suyu modellemesi bağlamında hidroloji ve su kaynakları yönetimi alanında giderek daha fazla kullanılmaktadır (Malekian ve Chitsaz, 2021).

Yin ve ark. (2018) yarı kurak bölgelerdeki nehir akış verilerini tahmin etmek için bir çalışma yürütmüştür. Bu amaçla MARS (multivariate adaptive regression spline), SVR (Support Vector

Regression) modeli ve M5 modelinin üç modelini kullanmışlardır. M5 model ağaçları (MT), regresyon ve sınıflandırma görevleri için kullanılan bir tür makine öğrenimi modelidir. M5 model ağacı, karar ağaçlarını doğrusal regresyon modelleriyle birleştiren hibrit bir modeldir. Karar ağacı düğümlerini kullanarak verileri yinelemeli olarak alt kümelerle böler ve her bir alt kümeye doğrusal regresyon modellerini yerleştirir. M5 model ağaçlar hem sürekli hem de kategorik giriş özelliklerini yönetir. Yorumlanabilirler ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilirler. Sonuçlara göre M5 modelinin performansının SVR modeli ve MARS modelinden daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca araştırmacılar, yarı kurak dağlık bölgelerde kısa vadeli nehir akışlarının tahmin edilmesinde M5 modelinin başarıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir.

Fung ve ark., (2018), Langat Nehri havzasında dalgacık ön işleme tekniklerini kullanarak SVR (Destek Vektör Regresyon) tabanlı kuraklık tahmin modellerinin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Wavelet'ler, sıfırdan başlayan, artan veya azalan ve daha sonra bir veya daha fazla kez sıfıra dönen bir dalga benzeri salınım olarak tanımlanır. Wavelet'ler, “kısa süreli salınım” olarak adlandırılır ve dar bir frekans aralığına sahiptir. Wavelet modelleri, hidrolojik kuraklığı tahmin etmek için kullanılan bir "dizi yöntemi"dir. Bu modeller, veri analizi ve tahminlerde kullanılan geleneksel makine öğrenimi modelleriyle birleştirilerek daha iyi sonuçlar elde edebilir. Araştırmacılar, Hibrit dalgacık modellerinin SPEI (Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi)'lerinin tahmini, SVR ve Artırılmış Destekli Vektör Regresyon (BS-SVR) modelleri ile karşılaştırıldığında, hibrit dalgacık BS-SVR modelinin

Langat Nehri havza kuraklığını tahmini için daha fazla doğruluk sağladığını göstermişlerdir.

Sahoo ve ark., (2019), Hindistan'ın üç istasyonunda aylık düşük akışlı zaman serilerini modellemek için SVR (Destek Vektör Regresyon) modelinin uygunluğunu incelemişlerdir. Bu çalışmada düşük akış tahmini için SVR modelinin doğru bir model olduğu tespit edilmiştir.

Yağış yoğunluğu-süre-sıklık eğrileri (Rainfall intensity–duration–frequency curves) (IDF eğrileri), su kaynakları mühendisliğinde en yaygın kullanılan araştırma araçlarından biridir (Tsangaratos ve ark., 2019).

6. Su kıtlığı ve kuraklık

Kuraklık, düşük akış, su kıtlığı ve çölleşme ile karıştırılmamalıdır. 'Düşük akış' sıklıkla kullanılan bir terimdir ve düşük nehir deşarjını ifade eder. Düşük akışlar genellikle yıllık minimum serilerle karakterize edilir ve bunlar tüm yıllarda "akarsu akışı kuraklığı" değildir. Bu nedenle, düşük akış özellikleri ile akarsu akışı kuraklık özellikleri arasında ayırım önemlidir (Feyen & Dankers, 2009). Kuraklık ve su kıtlığı, su sıkıntısı çeken bölgelerde nehir havzası yönetimi için anahtar kelimelerdir. “Kuraklık” büyük ölçekli iklim değişkenliğinden kaynaklanan doğal bir tehlikedir ve yerel su yönetimiyle önlenemez. “Su kıtlığı”, su yöneticilerinin etkileyebileceği su kaynaklarının uzun vadeli sürdürülemez kullanımını ifade etmektedir. Kuraklık ile su kıtlığı arasında ayırım yapmak önemlidir çünkü bunlar sıklıkla aynı anda meydana gelir. Su kıtlığı ve kuraklık, birbiriyle yakından bağlantılı olduğundan ve sıklıkla eş zamanlı olarak meydana geldiğinden,

genellikle ayırt edilmesi zordur. Su yönetimi açısından muhtemelen en kötü durum, ek olarak su kıtlığının da yaşandığı kurak bir iklimde düşük akış mevsiminde yaşanan kuraklıktır (Van Loon & Van Lanen, 2013). Kuraklık olaylarında kuraklığın süresi ve yoğunluğu temel değişkenlerdir (Abu Arra ve Şişman, 2023). Alternatif olarak hidrolojik kuraklık, su mevcudiyeti ile talep arasındaki dengesizliğe vurgu yapılarak bir su kaynakları sorunu olarak da görülebilir (Tate & Gustard, 2000)

7. Yeraltı suyu ve kıyı akiferleri

Yeraltı suyu, küresel tatlı su kaynağının %30'unu oluşturur ve dünya çapında 2 milyardan fazla insan için önemli bir su kaynağıdır. Yüzeysel su kaynakları dünya genelinde başlıca su kaynağı olmakla birlikte, özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde kuraklık dönemlerinde ve sulama amaçlı güvenilir bir kaynak olarak yeraltı suyunun önemi giderek artmaktadır. Son tahminler toplam yeraltı suyu deposunun yaklaşık 22,6 mkm³ olduğunu ve kalma sürelerinin aylar ile binlerce yıl arasında değiştiğini göstermektedir. Bu miktarın yalnızca 0,1-5 mkm³'ü modern veya 50 yaşın altındadır (Ajami, 2021).

Yeraltı suyu, içme suyu temini, gıda üretimi ve ekosistemin işleyişi için gereklidir. Yeraltı suyunun beslenmesine katkıda bulunan su, yüzeye ulaşan yağışlardan, yeraltına sızan ve doymamış bölgeden su tablasına doğru dikey olarak sızan yağıştan veya kar erimesinden kaynaklanır. Toprak nemi fazlalığının bir sonucu olarak su tablasına ulaşan doğrudan beslemeye ilişkin küresel tahminler, örneğin çöllerde çok düşük yıllık hacimlerden, tropik bölgelerde yılda 1.000 mm'den daha büyük hacimlere kadar değişmektedir. Doğrudan beslemeye ek olarak,

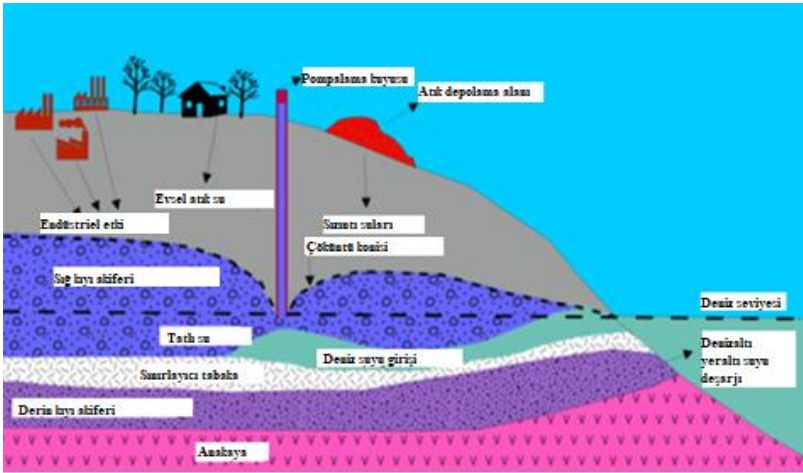
odaklanmış veya lokalize beslemenin çok kısa zaman ölçeklerinde büyük miktarlarda yeraltı suyu beslemesi ürettiği gösterilmiştir. Buharlaşma ve köklerden su alımı, doğrudan besleme olarak aşağıya doğru süzülen su hacimlerini önemli ölçüde azaltır. İklima, mevsime ve bitki örtüsüne bağlı olarak şarj sıfıra kadar düşebilmektedir. Yeraltında oluşması nedeniyle beslenmenin ölçümü doğrudan değildir (Hartmann, 2022).

Hidrolojik döngünün bir parçası olarak yeraltı suyu beslemesi, özellikle küresel ölçekte tahmin edilmesi en zor bileşenlerden biridir. Çünkü buharlaşma, yüzey-yeraltı suyu bağlantıları veya yerel jeoloji ve arazi kullanımı gibi yeraltı suyu beslenmesinin bağlı olduğu çeşitli su dengesi parametrelerinin neden olduğu yeraltı suyu beslenmesinin tahmininde çeşitli belirsizlik kaynakları mevcuttur (Reinecke ve ark., 2021). Bu süreçte hidrolojik modeller gibi etki modelleri iklim modelleriyle birleştirilir. İklim modelleri sıcaklık artışlarını tahmin etmede oldukça doğru olsa da atmosferik nem içeriğini ve dolayısıyla yağışları tahmin etmede güçlük çeker (Fatichi ve ark., 2016). Bu belirsizlik, karmaşık atmosferik süreçlerden ve mekansal ölçek küçültülmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, hem iklim belirsizliği hem de hidrolojik modeller, yeraltı suyu beslemesindeki tahmini değişikliklerin genel belirsizliğine katkıda bulunur (Luetkemeier ve ark., 2022).

Yeraltı suyunun yeniden doldurulması oranının ölçüldüğü yarı kurak ve kurak 140 bölge için tahmini olarak ortalama yeniden beslenme oranının 0,2-35 mm/yıl olduğu rapor edilmiştir ve bu ortalama yıllık yağışın yaklaşık %0,1-5'ini temsil etmektedir. Sulanan bölgelerde

tahmini besleme oranları daha yüksektir ve 10 ile 485 mm/yıl arasında değişmektedir. Bu bölgelerde, toplam beslemenin yağış artı sulamaya oranı daha büyüktür ve %1 ile %25 arasında değişmektedir (Ajami, 2021).

Çeşitli kuvvetler yeraltı suyu akışını kıyı akiferleri boyunca yönlendirerek, zaman ve mekanda önemli değişkenlik gösteren karmaşık bir akış rejimine yol açar. Karasal araziden akan su, sonuçta tatlı su ve çözünmüş maddeleri kıyı okyanusuna ulaştırır. Yüzey suyu girdileri (örneğin nehirler ve akarsular) kolayca görülebildiğinden ve genellikle kıyıya yönelik büyük nokta kaynaklar olduğundan, bunlar üzerinde iyi çalışılmış ve okyanus jeokimyasal bütçelerine katkıları hakkında yeterince bilgi mevcuttur. Benzer şekilde yüzey haliçlerinin hidrodinamiği ve jeokimyasal önemi de iyi bilinmektedir. Ancak son zamanlarda okyanuslara yeraltı suyu girdilerinin rolüne ciddi bir ilgi gösterilmektedir. Tarihsel olarak bu tür girdilerin önemsiz olduğu düşünülüyordu çünkü yeraltı suyu akışı nehir akışından çok daha yavaştı. Ancak, yeraltı suyunun kıyı çökeltileri yoluyla akışının ve ardından kıyı okyanusuna boşaltılmasının, jeokimyasal döngü üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği gösterilmiştir (Mulligan & Charette, 2009).



Şekil 2. Kavramsal model, kıyıdaki yeraltı suyu durumlarını ve kirlilik sorununu tasvir etmektedir.

Kaynak: Karthikeyan ve ark., 2022

Kıtasal tatlı yeraltı suyu ile deniz suyunun bulunduğu alanlar olan kıyı akiferleri önemli su tedarik bölgeleridir. Kıyı akiferlerinde, tatlı su-deniz suyu arayüzü boyunca tatlı yeraltı suyu okyanusa boşalır. Kıyı akiferlerinden denizaltı yeraltı suyu deşarjı, hem tatlı hem de tuzlu suyun deniz sularına deşarjını içerir. Denizaltı yeraltı suyu deşarjı, ısıyı, besin maddelerini, kirlenici maddeleri ve çözünmüş iyonları taşıyarak jeokimyasal döngüleri etkiler. Ortalama olarak, kıyı şeridinin birim uzunluğu başına tatlı denizaltı yeraltı suyu deşarjının hacimsel akışı 420 m²/yıl'dır. Bununla birlikte, kıyı boyunca tatlı denizaltı yeraltı suyu deşarjı önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Kıyı akiferleri aynı zamanda deniz seviyesinin yükselmesine ve yeraltı suyunun aşırı çekilmesine karşı da hassastır. Yeraltı suyunun aşırı çekilmesine ek olarak, arazi kullanımındaki değişiklikler ve küresel iklim değişikliğinin neden olduğu deniz seviyesindeki yükselme de deniz suyu girişine yol

açabilir. Deniz suyunun karaya girişi olarak tanımlanan, deniz suyu girişi, iç tatlı su yeraltı suyu sistemlerinin su kalitesini bozar (Ajami, 2021) (Şekil 2).

8. Hidrolojik tepki

Yarı kurak ortamlar belirli hidrolojik tepkiler ve jeomorfolojik süreçler gösterir. Yarı kurak ortamlar, tam bir bitki örtüsüne izin vermeyen, bunun yerine yalnızca kısmi bir bitki örtüsüne izin veren kuru koşullarla karakterize edilir. Bitki örtüsü genellikle bitki örtüsü yamaları ve çıplak boş aralıklardan oluşan heterojen bir mozaik şeklinde desenlenmiştir. Bu durum yarı kurak yamaçlardaki jeomorfolojik süreçleri oldukça etkilemektedir. Bu desenler statik değildir ve jeomorfolojik süreçler ile bitki örtüsü arasında karşılıklı bir etkileşim mevcuttur. Çıplak aralıklarda yüzeysel akış meydana gelir ve bitki bulunan alanlara su sızar. Yüzeyi bitkisiz bölgelerin mekansal desenleri ve çıplak yüzey koşullarındaki değişiklikler (başlangıçtaki toprak nemi koşulları, eğim uzunluğu ve açısı, kabuk türleri ve kaya parçası örtüsü gibi) bunların jeomorfik tepkisini belirler. Arazi kullanımı değişikliği, otlatma veya iklim değişikliği nedeniyle bu modellerde meydana gelen değişiklikler, bitki örtüsü modelini ve dolayısıyla bağlantıyı ve tepe yamacındaki erozyon ve sedimantasyon modelleri ile ifade edilen jeomorfolojik tepkiyi etkiler (Cammeraat, 2013).

9. Hidrolojik kuraklık süreçleri

Hidrolojik kuraklığın ortaya çıkma nedenleri sadece atmosfere değil aynı zamanda atmosfere nemi besleyen ve suyun depolanmasına ve akarsulara akışına neden olan hidrolojik süreçlere de bağlıdır. Kuraklığın

yayılması hidrolojik kuraklık gelişiminin başlangıç noktası iklimsel değişkenliğin bir sonucudur. Genel olarak, uzun süreli yağış eksikliği hidrolojik sisteme daha az girdi oluşturur. Yağış eksikliğinin nedensel mekanizmaları yüksek basınç sistemlerini ve muson yağmurlarını engelliyor olabilir (Cook ve ark., 2010).

Alternatif olarak hidrolojik kuraklık, karla kaplı havzalarda kışın uzun süreli donma koşulları gibi sıcaklık anormallikleri veya buzulların hakim olduğu havzalarda yaz aylarında düşük sıcaklıklar tarafından da tetiklenebilir (Van Loon ve ark., 2014).

Toprak nem deposunun tükenmesi, önceki durumuyla, çıplak topraktan buharlaşmayla, bitkiler yoluyla buharlaşmayla, yeraltı suyuna drenajla ve akarsulara akışla ilgilidir. Kurak bir dönemde, drenaj ve akış genellikle düşüktür, ancak artan radyasyon, rüzgar hızı veya buhar basıncı açığı (örneğin, nem mevcudiyetinin azalması veya sıcaklığın artması) nedeniyle potansiyel buharlaşma-terleme artabilir. Bu, gerçek buharlaşmanın artmasına yol açarak topraktan ve açık su kütlelerinden fazladan su kaybına neden olabilir. Toprak nemi depolaması, yeraltı suyu sistemine beslemenin azalmasına neden olur ve bu da yeraltı suyu seviyelerinin düşmesine neden olur. Yeraltı suyunun iklimsel girdiye tepkisi sıklıkla geciktiğinden ve yumuşatıldığından, yeraltı suyu kuraklığı her zaman gelişmez, ancak oluştuğunda genellikle uzun süre normalin altında yeraltı suyu seviyeleri görülür. Bu süreçler zinciri, hidrolojik döngünün karasal kısmında hareket ederken kuraklık sinyalinin değişimini ifade eden 'kuraklığın yayılması' terimiyle özetlenir (van Lanen ve ark., 2004).

10. Son yıllardaki bazı kuraklık olayları

Son yıllarda pek çok ciddi kuraklık olayı yaşanmıştır. 2003 ve 2006'da Avrupa, mahsul kıtlığına, navigasyon sorunlarına, soğutma suyu kısıtlamalarına ve sıcak hava dalgası nedeniyle can kaybına (2003 yılında 70 bin ölüm) neden olan kuraklıklardan etkilenmiştir. Ortalama aylık sıcaklıklar 2003 yılının Temmuz ayında oldukça yüksek olmuş ve hem Haziran hem de Ağustos aylarında rekor seviyelere ulaşmıştır. 2006 yılında Temmuz ayı ortalama aylık sıcaklığı rekor seviyeye ulaşmıştır. Temmuz 2006'da, 2003 yazında olduğu gibi, maksimum sıcaklıklar minimum değerlerden daha anormal olmuştur. 2006 sıcak hava dalgası 2003 yılına göre daha kuzeyde gerçekleşmiş ve özellikle Hollanda, Belçika, Almanya, Polonya, Fransa ve İsviçre'yi etkilemiştir (Rebetez ve ark., 2009).

Doğu ve Güneydoğu İspanya'daki çoğu havza, yağış ve nehir akışlarında büyük yer ve zaman değişkenliği nedeniyle yarı kurak veya kurak olarak sınıflandırılabilir. 2008 yılında İber yarımadası, yeraltı suyu seviyelerini ve rezervuar depolamasını minimuma indiren çok yıllık bir kuraklığın etkileriyle başa çıkmak zorunda kalmıştır (Andreu ve ark., 2009).

2005 ve 2010 yıllarında Amazon yağmur ormanları yağış eksikliğinden şiddetli düzeyde etkilenmiştir. Bu da bitki örtüsünde büyük bir ölüme ve atmosfere CO₂ salınımına neden olmuştur (Lewis ve ark., 2011). 2005 yılındaki, Amazon bölgesinde Atlantik deniz yüzeyi sıcaklıklarıyla ilişkili olan büyük kuraklık 100 yılda bir görülen bir olay olarak tanımlanmıştır. Kuraklık, Amazon Nehri'nin ana kanalı ve onun batı ve güneybatı kolları ve Madeira Nehirleri boyunca uzanan insan

nüfusunu ciddi şekilde etkilemiştir. Nehir seviyeleri tarihin en düşük seviyelerine düşmüş ve bu nehirler boyunca ulaşımın askıya alınması gerekmiştir. Bu kuraklık, 1926, 1983 ve 1998'deki El Nino ile ilgili kuraklıklardan farklı bir model ortaya koymuş ve orta veya doğu Amazonya'yı etkilememiştir.

2010 yılında dünyada büyük çaplı orman yangınları yaşanmıştır. Çin'in bazı bölgeleri kuraklıktan etkilenerek gıda üretimini büyük ölçüde engellemiştir. 2009 yazında ortaya çıkan ve Çin'in güneybatısındaki sonbahar ve kış aylarında da devam eden şiddetli kuraklık, önemli miktarda içme ve drenaj suyu sıkıntısına neden olmuştur. Yüzyılda bir görülen bu kuraklık, 2009 yazından 2010 baharına kadar güneybatı Çin'i (Yunnan, Guizhou, Guangxi, Sichuan ve Chongqing dahil) kasıp kavurmuştur. Kuraklık, su kaynaklarını buharlaştırmış ve 16 milyondan fazla insan ve 11 milyon hayvanın su sıkıntısı çekmesine neden olmuştur. 4 milyon hektardan fazla tarım arazisindeki mahsuller ciddi zarar görmüş ve bunların dörtte birinden hasat yapılamamıştır. Çoğu nehir normal hacminin yüzde 30 ila 80'i kadar küçülmüş ve bazıları tamamen kurumuştur. Kuraklıktan en çok etkilenen ve çölü andıran subtropik kuşakta yer alan Yunnan eyaleti olmuştur. Kuruyan göllerde kurumuş su hayvanları açığa çıkmıştır. Yunnan Eyaleti Enformasyon Bürosu tarafından 26 Mart'a kadar yaşanan kuraklığın 8,2 milyon insana ve 3,1 milyon hektar mahsulün susuz kalmasına neden olduğu bildirilmiştir (Lu ve ark., 2011).

2010 yılında İskandinavya içme suyu sıkıntısı ve hidroelektrik üretim sorunlarıyla karşı karşıya kalmıştır (Cattiaux ve ark., 2010). 2010

ve 2011 yıllarında Rusya'da kuraklık ve sıcak hava dalgası yaşanmış ve bunun sonucunda orman yangınları yaşanmıştır (Huijnen ve ark., 2012).

2010-2012 yılları arasında pek çok kuraklık (bazı olağandışı) kuzey yarımkürenin çok önemli tarım bölgelerini etkilemiştir: ABD (2011, 2012), Kazakistan (2012), Ukrayna (2010, 2012) ve Rusya (2010). Bazı yıllarda bu kuraklıklar şiddetli olmuş, uzun sürmüş, geniş alanları kaplamış ve çevreyi, ekonomileri (özellikle tarımı) ve insan geçimini ciddi şekilde etkilemiştir. 2012 yılında ABD'nin orta ve güneyi ile Rusya'da eş zamanlı yaşanan kuraklık, gıda fiyatlarında artışa neden olmuştur. 2011 baharında Batı Avrupa ciddi su kıtlığı ve düşük su seviyeleriyle karşı karşıya kalmıştır. Bu kuraklığın ABD'nin merkezi çevresi ve ekonomisi üzerindeki etkisi çok büyük olmuştur çünkü orman yangınlarını, su seviyesindeki azalmayı ve verim kayıplarını (mısır, soya fasulyesi, saman ve mera) tetiklemiştir. İkincisi gıda ve tarım arazilerinde fiyat artışına neden olmuştur. Dünyanın diğer tarafında (Kazakistan, Ukrayna ve Rusya'nın güneyi) 2012 kuraklığı 5-7 ay sürmüş ve mahsul üretimini önemli ölçüde düşürmüştür. Tahıl kayıpları (2011'e kıyasla) Rusya'da %20'ye, Kazakistan'da ise %50'ye ulaşmıştır (Kogan & Guo, 2016). ABD'nin Kaliforniya eyaleti tarihteki en şiddetli çok yıllık kuraklıklardan biriyle karşı karşıya kalmıştır. Bu kuraklık rezervuar ve yeraltı suyu seviyelerinin son derece düşük olmasına ve sulama ve evsel kullanım için su kullanımının kısıtlanmasına yol açmıştır (Aghakouchak ve ark., 2014).

Kıta çapında şiddetli çok yıllık geniş bir kuraklık 2002 ile 2010 yılları arasında Avustralya'yı etkilemiştir. Güneydoğu Avustralya'da yakın zamanda yaşanan bir kuraklık olan "Big Dry", 1997 civarında

başlamış ve 2011 yılına kadar devam etmişken, 2002-2010 yılları arasında, yerel bir kuraklık yerine, kıta çapında su depolama, bitki örtüsü ve yağışta bir azalma olan ve Avustralya'nın kuzeybatısından güneydoğusuna etkili olan bir kuraklık yaşanmıştır (McGrath ve ark., 2012).

2010 yılında Moğolistan'da yaşanan aşırı kış felaketi (dzud), büyük hayvan ölümlerine (ulusal sürünün yaklaşık yüzde 20'si), kırsal geçim kaynaklarının kaybına ve kırsal kesimde yerinden edilmeye yol açmış ve ülke nüfusunun yüzde 28'ini etkilemiştir. Çevresel koşullar doğrudan neden olsa da, katkıda bulunan faktörler arasında değişen iklim, mevcut hayvancılık uygulamaları ve zayıf yönetim yer alır. Olayın ciddiyeti, sürünün hassasiyetine, dzud hazırlık eksikliğine ve iklimin bozkır hayvancılığı üzerindeki yıkıcı etkisine işaret etmektedir (Sternberg, 2010). Moğolistan'da insanların aşırı düşük sıcaklıklarla ilgili kuraklığa yerel bir isim olarak 'Dzud' vermeleri ve bu tür kuraklıkların genellikle ciddi hayvan kayıplarına neden olması nedeniyle Moğolistan için özel yardım programlarının bulunmasını gerektirmektedir (Van Loon, 2015).

2013'te Namibya ve Angola, Brezilya, Orta Avrupa ve Yeni Zelanda'da kuraklık felaketi oluşmuştur. 2011 yılında uzun süren kuraklık Afrika Boynuzu'nda açlığı, kitlesel göçü ve can kaybını tetiklemiştir. Afrika Boynuzu'nda 2011 yılı, Somali'nin bazı bölgelerinde, kuzey Kenya'da ve güney Etiyopya'da son 60 yılın en kurak yılı olmuş ve çok yıkıcı etkiler göstermiştir. Etiyopya sıklıkla kuraklıktan muzdarip bir ülke olarak tasvir edilir. Fakat Etiyopya'nın dağlık kesimlerindeki ortalama yıllık yağış miktarının 2.000 mm'yi aşması, Etiyopya'nın kurak bir ülke olduğu izlenimini çelişkili

durmaktadır. Diğer tarafta ovalardaki kurak/yarı kurak bölgeler 300 mm kadar yetersiz bir yağış alır. Yağışın güçlü mevsimselliği durumun karışıklığını artırmaktadır (Viste ve ark., 2013). 2014 yılında İskandinavya'da bir kış kuraklığı yaşanmıştır ve şiddetli orman yangınlarına neden olmuştur (Van Loon, 2015).

KAYNAKÇA

- Abu Arra, A., & Şişman, E. (2023). Characteristics of hydrological and meteorological drought based on intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Water*, 15(17), 3142.
- Aghakouchak, A., Feldman, D., Stewardson, M. J., Saphores, J. D., Grant, S., & Sanders, B. (2014). Australia's drought: lessons for California. *Science*, 343(6178), 1430-1431.
- Ajami, H. (2021). *Geohydrology: groundwater*. Editor(s): David Alderton, Scott A. Elias, *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, Academic Press, Pages 408-415, ISBN 9780081029091
- Allen, P. M., Harmel, R. D., Dunbar, J. A., & Arnold, J. G. (2011). Upland contribution of sediment and runoff during extreme drought: A study of the 1947–1956 drought in the Blackland Prairie, Texas. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 1-11.
- Andreu, J., Ferrer-Polo, J., Pérez, M. A., & Solera, A. (2009). Decision support system for drought planning and management in the Jucar river basin, Spain. In 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia (Vol. 1317).
- Cammeraat, E. L. H. (2013). Semiarid hillslope processes. Editor(s): John F. Shroder, *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, Pages 355-362, ISBN 9780080885223.
- Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V., & Codron, F. (2010). Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 37(20).
- Chauhan, B. S., Mahajan, G., Randhawa, R. K., Singh, H., & Kang, M. S. (2014). Global warming and its possible impact on agriculture in India. *Advances in agronomy*, 123, 65-121.
- Cook, E. R., Anchukaitis, K. J., Buckley, B. M., D'Arrigo, R. D., Jacoby, G. C., & Wright, W. E. (2010). Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *science*, 328(5977), 486-489.
- Emadodin, I., Corral, D. E. F., Reinsch, T., Kluß, C., & Taube, F. (2021). Climate change effects on temperate grassland and its implication for forage production: A case study from northern Germany. *Agriculture*, 11(3), 232.
- Fentaw, F., Melesse, A. M., Hailu, D., & Nigussie, A. (2019). Precipitation and streamflow variability in Tekeze River basin, Ethiopia. In *Extreme Hydrology and Climate Variability* (pp. 103-121). Elsevier.
- Feyen, L., & Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D17).

- Findell, K. L., & Delworth, T. L. (2010). Impact of common sea surface temperature anomalies on global drought and pluvial frequency. *Journal of Climate*, 23(3), 485-503.
- Fung, K. F., Huang, Y. F., & Koo, C. H. (2018). Improvement of SVR-based drought forecasting models using wavelet pre-processing technique. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 65, p. 07007). EDP Sciences.
- Faticchi, S., Ivanov, V. Y., Paschalis, A., Peleg, N., Molnar, P., Rimkus, S., ... & Caporali, E. (2016). Uncertainty partition challenges the predictability of vital details of climate change. *Earth's Future*, 4(5), 240-251.
- Grimaldi, S., Kao, S. C., Castellarin, A., Papalexiou, S. M., Viglione, A., Laio, F., ... & Gedikli, A. (2011). Statistical hydrology. In *Treatise on Water Science, Four-Volume Set*, 1st Edition (pp. 479-517). Elsevier.
- Hartmann, A. (2022). The Hydrology of Groundwater Systems-From Recharge to Discharge. Editor(s): Thomas Mehner, Klement Tockner, *Encyclopedia of Inland Waters* (Second Edition), Elsevier, Pages 324-330, ISBN 9780128220412.
- Heddad, S., & Kişi, Ö. (2021). A new heuristic model for monthly streamflow forecasting: outlier-robust extreme learning machine. In *Advances in Streamflow Forecasting* (pp. 281-303). Elsevier.
- Huijnen, V., Flemming, J., Kaiser, J. W., Inness, A., Leitão, J., Heil, A., ... & Eremenko, M. (2012). Hindcast experiments of tropospheric composition during the summer 2010 fires over western Russia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(9), 4341-4364.
- Kaiser, K., & Hattermann, F. F. (2021). Auf dem Weg zur" Steppe"? Der landschaftswasserhaushalt in Brandenburg. *Berlin-Brandenburger Naturmagazin*, 35(1), 4-10.
- Karthikeyan, S., Kulandaisamy, P., Senapathi, V., Thangaraj, K., Arumugam, M., Sekar, S., & Ranganathan, P. C. (2022). Issues of coastal groundwater contamination. In *Groundwater Contamination in Coastal Aquifers* (pp. 9-18). Elsevier.
- Kebede, A., Kang, M. S., & Bekele, E. (2019). Advances in mechanisms of drought tolerance in crops, with emphasis on barley. *Advances in agronomy*, 156, 265-314.
- Kogan, F., & Guo, W. (2016). Early twenty-first-century droughts during the warmest climate. *Geomatics, natural hazards and risk*, 7(1), 127-137.
- Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van Der Heijden, G. M., & Nepstad, D. (2011). The 2010 amazon drought. *Science*, 331(6017), 554-554.

- Lowe, L., Szemis, J., & Webb, J. A. (2017). Uncertainty and environmental water. In *Water for the Environment* (pp. 317-344). Academic Press.
- Lu, E., Luo, Y., Zhang, R., Wu, Q., & Liu, L. (2011). Regional atmospheric anomalies responsible for the 2009–2010 severe drought in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D21).
- Luetkemeier, R., Söller, L., & Frick-Trzebitzky, F. (2022). Anthropogenic pressures on groundwater. *Encyclopedia of Inland Waters*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 548-559.
- Malekian, A., & Chitsaz, N. (2021). Concepts, procedures, and applications of artificial neural network models in streamflow forecasting. In *Advances in streamflow forecasting* (pp. 115-147). Elsevier.
- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., De Oliveira, G. S., De Oliveira, R., ... & Brown, I. F. (2008). The drought of Amazonia in 2005. *Journal of climate*, 21(3), 495-516.
- McGrath, G. S., Sadler, R., Fleming, K., Tregoning, P., Hinz, C., & Veneklaas, E. J. (2012). Tropical cyclones and the ecohydrology of Australia's recent continental-scale drought. *Geophysical Research Letters*, 39(3).
- McKerchar, A. I. (2003). Streamflow. Editor(s): Robert A. Meyers, *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition), Academic Press, Pages 129-142, ISBN 9780122274107.
- Mishra, A., Alnahit, A., & Mukherjee, S. (2022). Rainfall and droughts. In *Rainfall* (pp. 451-474). Elsevier.
- Mulligan, A. E., & Charette, M. A. (2009). Groundwater flow to the coastal ocean. *Elements of Physical Oceanography: A derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*, 465.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*, 23, 881-897.
- Oloruntade, A. J., Mohammad, T. A., Ghazali, A. H., & Wayayok, A. (2017). Analysis of meteorological and hydrological droughts in the Niger-South Basin, Nigeria. *Global and Planetary Change*, 155, 225-233.
- Puri, S. (2003). Transboundary aquifer resources: International water law and hydrogeological uncertainty. *Water International*, 28(2), 276-279.
- Rebetez, M., Dupont, O., & Giroud, M. (2009). An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 1-7.

- Reinecke, R., Müller Schmied, H., Trautmann, T., Andersen, L. S., Burek, P., Flörke, M., ... & Döll, P. (2021). Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: a global-scale multi-model ensemble study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 787-810.
- Sahoo, B. B., Jha, R., Singh, A., & Kumar, D. (2019). Application of support vector regression for modeling low flow time series. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 923-934.
- Sharma, P., & Machiwal, D. (2021). Streamflow forecasting: overview of advances in data-driven techniques. *Advances in Streamflow Forecasting*, 1-50.
- Soulis, K. X. (2021). Hydrological data sources and analysis for the determination of environmental water requirements in mountainous areas. In *Environmental Water Requirements in Mountainous Areas* (pp. 51-98). Elsevier.
- Stahl, K., Blauhut, V., Barker, L. J., & Stagge, J. H. (2024). Drought impacts. In *Hydrological Drought* (pp. 563-594). Elsevier.
- Staudinger, M., Stahl, K., & Seibert, J. (2014). A drought index accounting for snow. *Water Resources Research*, 50(10), 7861-7872.
- Sternberg, T. (2010). Unravelling mongolia's extreme winter disaster of 2010. *Nomadic Peoples*, 14(1), 72-86.
- Sung, J. H., & Chung, E. S. (2014). Development of streamflow drought severity–duration–frequency curves using the threshold level method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3341-3351.
- Tate, E. L., & Gustard, A. (2000). Drought definition: a hydrological perspective. In *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 23-48). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2012). Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*, 440, 33-41.
- Tsangaratos, P., Ilia, I., & Matiatos, I. (2019). Spatial analysis of extreme rainfall values based on support vector machines optimized by genetic algorithms: The case of Alfeios basin, Greece. In *Spatial modeling in GIS and R for earth and environmental sciences* (pp. 1-19). Elsevier.
- Ogden, F. L. (2021). *Geohydrology: hydrological modeling*. Editor(s): David Alderton, Scott A. Elias, *Encyclopedia of Geology* (Second Edition), Academic Press, Pages 457-476, ISBN 9780081029091
- Van Huijgevoort, M. H. J., Hazenberg, P., Van Lanen, H. A. J., & Uijlenhoet, R. (2012). A generic method for hydrological drought identification across different climate regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2437-2451.

- van Lanen, H. A., Fendeková, M., Kupeczyk, E., Kasprzyk, A., & Pokojski, W. (2004). Flow generating processes. In Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater (pp. 53-96).
- Van Loon, A. F., Ploum, S. W., Parajka, J., Fleig, A. K., Garnier, E., Laaha, G., & Van Lanen, H. A. (2014). Hydrological drought typology: temperature-related drought types and associated societal impacts. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 11(9).
- Van Loon, A. F., & Van Lanen, H. A. (2012). A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915-1946.
- Van Loon, A. F., & Van Lanen, H. A. (2013). Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*, 49(3), 1483-1502.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.
- Van Tiel, M., Van Loon, A. F., Seibert, J., & Stahl, K. (2021). Hydrological response to warm and dry weather: do glaciers compensate?. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-32.
- Viste, E., Korecha, D., & Sorteberg, A. (2013). Recent drought and precipitation tendencies in Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 112, 535-551.
- von Schiller, D., Bernal, S., Dahm, C. N., & Martí, E. (2017). Nutrient and organic matter dynamics in intermittent rivers and ephemeral streams. In *Intermittent rivers and ephemeral streams* (pp. 135-160). Academic Press.
- Wang, L., Zhang, F., Zeng, C., & Zhang, W. (2023). Variation of hydro-climatic extremes in headwater regions of Hei River basin under climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101561.
- Yin, Z., Feng, Q., Wen, X., Deo, R. C., Yang, L., Si, J., & He, Z. (2018). Design and evaluation of SVR, MARS and M5Tree models for 1, 2 and 3-day lead time forecasting of river flow data in a semiarid mountainous catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 2457-2476.

BÖLÜM 3

TARIMSAL KURAKLIK

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ¹
Dr. Öğr. Üyesi Aliye YILDIRIM²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13758830>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Aydın, Türkiye. iyavas@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6863-9631

² Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, İzmir, Türkiye. aliye.yildirim@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-8101-0803

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğinin bitki, toprak, hayvan ve zararlılar üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileri yoluyla tarımı etkileyebilir. Atmosferdeki karbondioksit seviyesindeki artış, fotosentetik etki yoluyla bitkiler üzerinde gübreleme etkisi yaparak büyüme ve gelişmelerine olumlu etki edecektir. Mevcut ortam sıcaklığına bağlı olarak sıcaklıktaki artış ise, bitkinin yetiştirme süresini kısaltabilir, solunum oranlarını artırabilir, fotosentatin ekonomik ürünlere dönüşmesini değiştirebilir, zararlı popülasyonlarının hayatta kalmasını ve dağılımını etkileyebilir, toprakta besin mineralizasyonunu hızlandırabilir, gübre kullanım etkinliğini azaltabilir ve buharlaşma-terleme oranını artırabilir. Sıcaklıktaki değişiklik, ekim tarihlerinde kaymaya neden olur ve bu durum fenolojik evrelerin başlangıcını ve sonunu değiştirir. Tüm ürün yetiştirme dönemi (ekimden hasada kadar geçen süre) sıcaklık desenindeki bir değişiklik nedeniyle kayabilir, küçülebilir veya genişleyebilir (Boken 2005). Dolaylı olarak iklim değişikliklerinin, karların erimesi, sulama suyunun mevcudiyeti, mevsimler arası ve mevsim içi kuraklık ve taşkınların sıklığı ve yoğunluğu, topraktaki organik madde dönüşümleri, toprak erozyonu, zararlı profillerindeki değişiklikler, arazilerinin su altında kalması ve tarıma elverişli alanların azalması nedeniyle arazi kullanımı üzerinde önemli etkiler olabilir. Sel, kuraklık, kasırga ve sıcak hava dalgaları gibi aşırı hava olaylarının artması tarımsal verimliliği olumsuz etkileyecektir. Yağış düzenindeki değişiklikler ve bitkinin su talebinin artması nedeniyle yağmurla beslenen alanlarda verimde azalma beklenmelidir. Küresel ısınma nedeniyle gelecekte soğuk hava dalgaları ve don olaylarının görülme sıklığı azalabilir ve bu da soğuk kaynaklı verim kaybı olasılığının azalmasına yol açabilir. Yağışların azalması ve sıcaklıkların artması, deniz seviyesinin yükselmesi, kuraklık, kasırga ve taşkınların sıklık ve şiddetinin artması nedeniyle tarımsal biyolojik çeşitlilik ise tehdit altındadır (Kar, 2022).

Tarımsal su yönetimi, ekonomik kalkınmanın dört alanı arasında yer alan faaliyetlerin yani; kırsal kalkınma, tarım, su temini ve çevre yönetiminin bir toplamıdır. Tarımsal su yönetiminin planlanmasında, gıda üretimi için su ile ekosistem arasındaki dengenin hesaba katılması ve genellikle çevresel olumsuz dış etmenlere maruz kalan ve kırsalda yaşayan yoksul halka olan sosyal etkisinin de ele alınması gerekmektedir (Ramirez-Vallejo, 2011).

Ormansızlaşma, aşırı otlatma ve sera gazı emisyonları kuraklığın sorumlularındandır (Lobell ve ark., 2011). Dünyanın birçok yerinde kaydedilen sıcaklık artışları kuraklığın daha yaygın ve uzun süreli etkili olmasında etkilidir.

Kuraklığa yatkın bölgelerde yapılan tarımsal faaliyetlerde sıcaklığın artması beklendiğinden buharlaşma-terlemeyle bağlantılı olarak tarım üzerindeki olumsuz etkiler muhtemelen çoğalacaktır. Yağış ve buharlaşma-terleme eşit derecede önemli iklim faktörleri olarak kabul edilir. Kuraklık, bitkinin tüm büyüme aşamalarında meydana gelebilen, köklerin su alımından sürgün yoluyla buharlaşmanın daha fazla olmasından kaynaklanan bitki su rejimindeki dengesizliktir (Reynolds ve ark., 2005). Kuraklık, doğal afetlerin en yıkıcılarından biridir; gıda üretimini sekteye uğratar, meraları tüketir, pazarları bozar ve en uç noktada ise kuraklığa bağlı yangınlar insan ve hayvan ölümlerine neden olur. Aynı zamanda kırsal alanlardan kentsel alanlara göçün artmasına da yol açarak gıda üretiminin azalmasına da yol açar. Düzensiz ve yetersiz yağış, tropikal bölgelerde de bitkisel üretim miktarını ve kalitesini ciddi şekilde ve olumsuz yönde etkilemektedir (Reynolds ve Ortiz, 2010). Kuraklığın sonuçları, yerel ölçekten (örneğin ilçe düzeyinde), bölgesel ölçeğe (örneğin eyalet veya ülke düzeyinde) ve küresel ölçeğe kadar zaman ve mekana göre değişiklik göstermektedir (Mishra ve ark., 2015). Son yıllarda tarımsal yönetim uygulamaları (sulama gibi) ve ürün iyileştirmeleri tahıl veriminin artmasına yol açmış

olsa da, tarımsal kuraklık hâlâ gıda güvenliği için potansiyel bir tehdit olmaya devam etmektedir (Zhao ve ark., 2017).

2. Tarımsal kuraklık

Normal koşullara göre suyun kıtlığı olarak ifade edilen kuraklık, ağır tarımsal kayıplara neden olan afetler arasında yer almaktadır (West ve ark.,2019). Tarımsal kuraklık genel olarak toprak neminin bitkisel üretim için yetersiz olması olarak ifade edilebilir (Wu ve ark., 2020). Toprak tabakasının önceki nem durumuna bağlı olarak, tarımsal kuraklığın başlangıcı genellikle meteorolojik kuraklığın başlangıcından sonra gelir (Heim,2002). Toprağa su temini büyük ölçüde yağıştan gelir; terleme ("yeşil su" olarak adlandırılır) ve yeraltı suyuna ("mavi su" olarak adlandırılır) sızıntı yoluyla karışarak kolayca kaybolabilir (Gavrilescu, 2021).

Tarımsal kuraklık, bitkilerin zarar görmesi durumunda ortaya çıkar ve bu kuraklık, meteorolojik kuraklıktan daha sık meydana gelir, ancak iki kuraklık arasındaki zaman aralığı, bitkinin büyüme aşamasına göre belirlenir. Bitkiler için toprak nemi mevcudiyeti, ürün verimini ve dolayısıyla tarımsal karlılığı önemli ölçüde etkileyecek noktaya düştüğünde, tarımsal kuraklık ilan edilir. Özetle tarımsal kuraklık, meteorolojik kuraklıklar ve iklim koşulları sonucu oluşan topraktaki nem açığını ve bu faktörlerin tarımsal üretim ve karlılık üzerindeki etkilerini ifade etmektedir (Bogale ve Erena, 2022).

Tarım üzerindeki etkisi bakımından kuraklık, bitkilerde büyük hasara, özellikle de verim kaybına yol açan uzun süreli yetersiz yağış dönemi olarak tanımlanabilir. Bu tanımlamada iki önemli hususu ele alınmaktadır. Biri su temini ile bitkinin su gereksinimleri arasındaki dengesizlik, diğeri ise anormal kuraklık oluşumudur. Tarımsal kuraklığın tespitinde, bitki su açığının şiddeti ve anormal nadir stres iki önemli faktördür. Mevcut kuraklık endekslerinin bu iki faktörün birlikte varlığını yansıtıp yansıtmadığı incelenmelidir (Zhao ve

ark.,2017).Tarımsal kuraklığın yayılışını ve sinyallerini anlamak erken uyarı ve önlem açısından önemlidir. Gıda güvenliği açısından tarımsal kuraklığa yönelik araştırmalara olan ihtiyaç artmaktadır. Kuraklıkla mücadele edebilmek için nedenlerinin anlaşılması gerekmektedir. Kuraklığa birçok farklı faktör neden olabilir. Başlıca nedenlerden bazıları şunlardır:

1) Yetersiz yağış: Bu, çoğu bölgedeki kuraklığın ana nedenidir. Uzun süre yağışsız geçen bir dönem, bir alanın kurumasına neden olabilir. Atmosferdeki su buharı miktarı bir bölgenin yağışını büyük ölçüde etkiler.

2) İklim değişikliği: Küresel ısınma kuraklığa katkıda bulunabilir. Küresel ısınma başta üçüncü dünya ekonomileri olmak üzere tüm dünyayı etkilemektedir. Bilim insanları, atmosferdeki sera gazlarının artmasına, bunun da ısınmayı arttırıp iklim değişikliğine yol açmasına ana katkının insan faaliyetleri olduğunu ikna edici bir şekilde kanıtlamışlardır.

3) Antropojenik faaliyetler (insan faaliyetleri): Mahsullerin ekili olduğu alanı artırmak için ağaçların kesilmesi (ormanların yok edilmesi) büyük miktarda suyun buharlaşmaya maruz kalmasına neden olur. Ormansızlaşma, toprağın suyu tutamamasına neden olur ve çölleşmenin oluşmasına neden olur. Çünkü ormanlar suyun depolanmasına yardımcı olur, buharlaşmayı en aza indirir ve terleme yoluyla büyük miktarda atmosferik neme katkıda bulunur. Toprağı gevşeten ve onu erozyona karşı savunmasız hale getiren aşırı tarım, kuraklığa katkıda bulunan bir diğer insan faaliyetidir. Toprak erozyonu toprağın su tutma kapasitesini tehlikeye atabilir.

4) Yüzey su kaynaklarının aşırı kullanımı: Belirli alanlar, kaynağı havzalar ve dağlar olan nehirler ve akarsular gibi yüzey suyu kaynaklarıyla donatılmıştır. Bu yüzeysel su kaynakları, ana kaynaklarına müdahale edilmesi halinde kuruyabilir. Sulama sistemleri ve

hidroelektrik barajlar, yüzey suyu kaynaklarının aşırı kullanımına katkıda bulunan ve aşağı havzadaki toplulukları olumsuz yönde etkileyen unsurlardan birkaçıdır (Kebede ve ark., 2019).

3. Toprak-su-bitki-atmosfer yolu

Toprak-su-bitki-atmosfer yolu, suyun topraktan bitkiler yoluyla atmosfere doğru hareket ettiği yoldur. Suyun hareketi, suyun potansiyel enerjisindeki farklılıklara tepki olarak meydana gelir. Bu sistem, kütle ve enerjinin etkileşiminin gerçekleştiği, fiziksel olarak entegre, dinamik bir sistemdir. Bu sistem, karmaşık bir mekanizma oluşturan, değişen fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip farklı bileşenlerden oluşur. Düzensiz yağışlar, su stresinin öncelikli sebebidir. Su rezervuarının bir bitki tarafından tüketilmesi, yapay olarak yeniden doldurulmasını gerektirir. Bu nedenle, su akışının ekosistemle nasıl etkileşime girdiğini ve kara-atmosfer arayüzünde su akışını kontrol eden mekanizmaları anlamak önemlidir. Atmosfer, iklim sisteminde suyu madde olarak alan, dönüştüren ve koruyan bir üst tampon görevi görür. Suyun toprak-bitki-atmosfer sürekliliği içerisindeki akış yolu, sistemin farklı bileşenleri tarafından sunulan bir dizi direnç nedeniyle karmaşıktır. Farklı atmosferik, bitki örtüsü ve toprak faktörleri bu sistemdeki su akışını etkiler (Rekwar ve ark., 2022).

4. Toprakta nem eksikliği

Bitkilerin toprak nemine ürün verimini etkileyen ve sırayla gelişen üç fenolojik aşamada ihtiyacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki ekimden tam yaprak gelişimine kadar olan dönemi içeren vejetatif aşama, ikincisi bitkide tane oluşumu dönemini içeren çiçeklenme/döllenme/tane doldurma aşaması ve üçüncüsü yaprakların sarardığı, tanelerin sertleştiği ve ürünün hasata geldiği aşamadır. Toprak nem gereksinimleri vejetatif fazda oldukça doğrusal olarak artar, üreme fazında zirvede kalır ve hasat fazında azalır. Topraktaki nem eksikliği en çok üreme döneminde bitkiyi

ve dolayısıyla verimi etkilemektedir (Mahalakshmi et al., 1988, Boken 2005).

Su toprakta toprak parçacıklarının dışında ince filmler halinde ve toprağın dokusu, kütle yoğunluğu ve yapısı tarafından belirlenen gözenek boşluklarında (yerçekimi suyu ve kılcal su gibi) bulunur. "Su tutma kapasitesi", toprağın yağışlardan gelen ve bitkiler için kullanılabilir suyu depolayabilme kapasitesini temsil eder. Bu, özellikle kurak dönemlerde bitki yetiştirmek için son derece önemli bir toprak özelliğidir. "Kılcal su", bitkiler için en önemli rolü oynar çünkü yer çekimi etkisi sonucu toprakta hareket eden "yerçekimi suyu"nun aksine, yerçekimi kuvvetine karşı toprak parçacıkları tarafından tutulur. Toprak suyunun iki formu rekabet halindedir: Su toprağa sızdıkça gözeneklerin boşluklarını suyla doldurur; gözenekler doldukça yerçekimi ve kılcal kuvvetler nedeniyle toprakta hareket eder. En yaygın olarak tanımlanan toprak su içeriği değerleri "doygunluk", "tarla kapasitesi", "solma noktası" ve "fırın kuruluğu"dur. Doyma anında topraktaki tüm gözenekler su ile dolar. Hızlı süzülme meydana geldikten sonra toprakta kalan su miktarı tarla kapasitesi olarak tanımlanır. Bitki kökünün su emme potansiyeli veya yeteneğinin toprağın su potansiyeli ile dengelendiği toprak su içeriği ise solma noktasını tanımlar (Gavrilescu, 2021)

Yenilenemeyen bir kaynak olan toprak, küresel gıda üretiminin yaklaşık %95'ini destekleyerek ve biyokütle üretimi, kirleticilerin filtrelenmesi ve diğer ekosistem hizmetlerini sağlayarak dünyadaki yaşama katkı sağlar. Toprak, dünya yüzeyinde ince bir tabaka oluşturur, ancak litosfer, biyosfer, hidrosfer ve atmosfer arasındaki akış, kütle ve enerji aktarımının düzenlenmesinde önemli bir rol oynar. Topraklar, küresel biyolojik çeşitliliğin ana havuzlarıdır ve okyanuslardan sonra dünya üzerindeki en büyük ikinci karbon havuzudur. Toprak materyali zaman ve mekandaki karmaşık fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin sonucu oluşmuştur. Toprak verimliliğindeki kalıcı azalma veya kayıp,

arazilerin terk edilmesine ve çölleşmeye yol açabilir (Ferreira ve ark., 2022).

Yağış ile ürün verimi arasında karmaşık bir ilişki vardır çünkü ürün büyümesine ve verimine nihai olarak katkıda bulunan şey yağış değil, toprak nemidir. Tarımsal kuraklıkların izlenmesinde toprak nemi verileri yağış verilerinden daha önemlidir, ancak toprak nemi verilerine yağış verileri kadar kolay ulaşılamamaktadır. Toprak nemi verileri deneysel olarak toplanır veya tarımsal meteoroloji modelleri kullanılarak tahmin edilir (Boken, 2005). Toprak nemi eksikliği kilit öneme sahiptir çünkü azalan toprak su seviyeleri tipik olarak bitki örtüsü için topraktaki su stresi ile ilişkilidir. Bu, doğal ve ekili ekosistemlerin fizyolojik işleyişi üzerinde büyük bir kısıtlama oluşturur ve dolayısıyla tarımsal üretim üzerinde büyük etkilere yol açabilir (Berg & Sheffield, 2018).

Evapotranspirasyon, tane verimi, biyokütle, su kullanım etkinliği ve hasat indeksi değerlerinin tümü bitkilerin büyüme mevsimleri sırasında topraktaki su içeriğinden etkilenir. Sulamaya verilen dane verimi tepkisi, toprağın nem içeriğindeki ve sulama planlamasındaki farklılıklar nedeniyle önemli ölçüde değişiklik gösterir. Evapotranspirasyon ve toprak üstü biyokütle yüksek toprak nemi koşullarında yüksek seviyede olur ancak tane verimi bu koşullarda her zaman en yüksek seviyede olmaz (Bhattacharya, 2019).

5. Toprağın su iticiliği

Tarımsal sistemlerde organik maddenin önemli rolünün incelenmesi ve toprak-su-bitki ilişkilerinin, özellikle toprak-su hareketinin fiziğinin bilgisi toprağın su iticiliği konusundaki önemli iki temel konudur (DeBano, 2000).

Toprağın su iticiliği (soil water repellency, SWR), toprak parçacıkları üzerindeki hidrofobik (su iten) kaplamaların varlığından dolayı toprağın ıslanmasındaki ve suyun tutulma oranındaki azalmadır. Yağışlardan ve tatlı su rezervlerinden (akkiferler, nehirler vb.) elde

edilen mevcut su miktarının bariz sınırlamasının yanı sıra, toprakların fazla kuruması, onların su tutma kabiliyetini azaltır. Kuruma, organik çözünen maddelerin toprak yüzeylerine hareketini artırır ve eğer kritik bir su içeriğine ulaşırsa, su emme oranını ve kapasitesini sınırlayan su itici bir bariyer oluşabilir. Bazı kurak bölgelerde su iticiliği o kadar kötüleşir ki, maliyetli iyileştirmeler yapılmadan tarımsal üretim mümkün değildir. Dünyanın kurak bölgeleri dışındaki diğer bölgelerinde su iticiliği daha az oranda görülür ancak uygulanan ıslatıcı maddelerle ürün veriminin arttığı gösterilmiştir (Hallett, 2008).

Toprağın su iticiliği ve kumlu toprakların hidrofobik özellikleri iyi bir şekilde incelenmiştir. Toprağın su iticiliği her türlü toprak türünde oluşabilmesine rağmen, kum parçacıklarının yüzey alanının düşük olması nedeniyle genellikle kumlu topraklarda görülür. Toprağın su iticiliği, toprak parçacıklarının hidrofobik organik maddelerle (yani mantar miselleri/hifleri, hümkik asitler, bitki artıkları) kaplanması durumunda da meydana gelir ve yanma, kuru koşullar ve yüksek miktarda organik madde nedeniyle meydana gelebilir. Su itici topraklarda tercihli akış yolları oluşabilir ve ayrıca toprak erozyonu ve akıntı riski de artar. Suyun toprağa nüfuz etmesi için gereken süreye bağlı olarak beş adet toprak su iticiliği sınıfı vardır ve bunlar şu şekildedir: 1) ıslanabilir (<5 s), 2) hafif itici (5-60 s), 3) kuvvetli itici (60-600 s), 4) ciddi derecede itici (600–3600 s) ve 5) son derece itici (>3600 s). Toprağın su iticiliği toprak nemi, toprak organik maddesi, toprak dokusu ve pH'dan etkilenir. Yavaş salınımlı azotlu gübre, kireçleme, fungisitler, solucanlar ve sulama gibi birçok doğrudan yaklaşımın ve yüzey aktif maddelerin uygulanması, killi toprağın havalandırılması ve sıkıştırılması gibi dolaylı yaklaşımların toprağın su iticiliğinin neden olduğu sorunları düzelttiği kabul edilse de bu yaklaşımların her birinin farklı derecelerde artıları ve eksileri vardır (Yost ve Hartemink, 2019).

6. Toprağın su tutma kapasitesi ve elverişli su

Toprağın su tutma kapasitesi (water holding capacity, WHC) fazla su tahliye edildikten sonra toprağın tutabileceği toplam su miktarıdır. Bu, hava değişkenliğine karşı verimi tamponlayarak iklim değişikliği etkilerinin hafifletilmesine katkıda bulunan mahsul üretiminin anahtarıdır. Toprağın su tutma kapasitesinin iyileştirilmesi, toprağın artan iklim değişkenliğine karşı dayanıklılığının artırılmasıyla sonuçlanır ve ayrıca tarımsal ekosistemin, örneğin yoğun yağmur ve kuraklık dalgaları gibi aşırı olayların ortaya çıkmasına uyum sağlamasına yardımcı olur. Artan toprak su tutma kapasitesi çoğunlukla daha yüksek sızma oranları ve daha düşük yüzey akışıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, özellikle yoğun yağmur olayları sırasında toprak erozyonu potansiyelini azaltabilir. Bununla birlikte, düşük toprak su tutma kapasitesine sahip topraklar, derin süzülme yoluyla sulama ve/veya yağmur suyunun önemli bir kısmını kaybeder, dolayısıyla besin maddeleri kök bölgesinden süzülür, bu da kaynakların verimsiz kullanımına ve olumsuz çevre sorunlarına ve ekonomik sonuçların azalmasına neden olur. Bu nedenle toprağın su tutma kapasitesi, kaynak kullanım verimliliğini, besin döngüsünü, ürün etkinliğini, verim stabilitesini ve çevre kalitesini etkileyen en önemli toprak özelliklerinden biridir (Abdallah ve ark., 2021). Topraktaki organik madde seviyesinin artmasıyla toprağın su tutma kapasitesi de artmaktadır (Bordoloi ve ark., 2019).

Uzun kuraklık dönemlerinde toprağın su stoğu, suyun artık bitkiler için alınamadığı değerlere kadar düşer ve bu da şiddetli kuraklık stresine ve solmaya neden olur. Bitki tarafından kullanılabilir su potansiyelleri farklı topraklarda oldukça farklılık göstermektedir ve tarımsal yoğunlaşmanın bu kapasiteyi azalttığı gösterilmiştir. Toprak biyojeokimyası, özellikle toprağın organik madde içeriği ile su tutma kapasitesi arasında pozitif bir korelasyon vardır (Schaller ve ark., 2020).

Toprağın bitkiye su temini, topraktaki bitki tarafından kullanılabilen su miktarı (aslında toprağın suyu tuttuğu emme gücü), toprak profilindeki köklerin dağılımı ve yoğunluğu ve toprağın hidrolik iletkenliği ile belirlenir. Çoğu mahsul modeli, toprağın bitkiye su teminini toprağın su durumuna, toprak-kök hidrolik iletkenliğine ve kök yoğunluğuna göre tahmin eder (Singels ve ark., 2021).

Su alımı ve su kullanım etkinliği, yüzey akışını, derin drenajı ve toprak yüzeyinden buharlaşmayı azaltarak ve terlemeyi artırarak tarımsal olarak iyileştirilebilir. Pratik olarak bu, toprağın su tutma kapasitesinin artırılmasıyla başarılabilir (Singels ve ark., 2021).

7. Yoğun yağışla yüzeyde kaymak tabakası oluşumu

Kaymak tabakası oluşumu özellikle bitki örtüsünün az olduğu çıplak topraklarda, su sızmasını azaltabileceği, yüzey akışını artırmayacağı ve tohum çimlenmesini engelleyebileceği için genel olarak büyük bir sorun olarak düşünülmektedir (Assouline, 2011; Hou et al. 2020; Saygın ve Huang 2022). Ancak kaymak tabakası oluşumunun rüzgar erozyonuyla ve tuzlulaşma-kristalleşme sonucu toz taneciklerinin kaybını azaltma konusunda tarımsal kuraklık bakımından olumlu ve umut verici olduğu bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Middleton et al. 2017; Ishizuka ve ark., 2008; Saygın ve Huang 2022).

Yağış yoğunluğu ve kinetik enerji, toprak yüzeyinde oluşan kaymak tabakasının özelliklerinin ve oluşum hızının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Yağış yoluyla toprak yüzeyine kinetik enerji girdisi ne kadar büyük olursa, sızdırmazlık tabakaları o kadar hızlı oluşur ve bunların özellikleri bozulmamış topraktan o kadar farklı olur. Sızdırmazlık katmanının oluşumu ve özellikleri, toprak parçacıklarının kohezyonu ve toprak agregatlarının stabilitesi ile ilgili toprak özelliklerinden de güçlü bir şekilde etkilenir. Bunlar arasında i) toprak mineralojisi ve dokusu; ii) toplam büyüklük dağılımı; iii) toplam stabilite; iv) başlangıç kütle yoğunluğu; v) toprak profilindeki

başlangıçtaki su içeriği dağılımı, vi) fosfojips veya polimerlerin üst toprak katmanına uygulanması; vii) eğim, viii) organik madde içeriği; ix) toprakta değiştirilebilir sodyum yüzdesi (percent exchangeable sodium, ESP); ve x) uygulanan suyun elektriksel iletkenliği (electrical conductivity, EC) yer alır. Toprak ve yağış faktörlerinin bu sayısal çokluğu etkileşim halindedir, dolayısıyla fırtına, toprak ve kaymak tabakası özellikleri arasındaki ilişkiler karmaşık ve değişkendir. Bu karmaşıklık, deneysel sonuçların doğrudan karşılaştırılması veya tahmin edilmesinin zor olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, toprak bilimcileri i) yapıyı, ii) oluşumu, iii) hidrolik özellikleri ve iv) kaymak tabakası içindeki suyun akışını tanımlamak için modellere güvenmek zorundadır. Yağmur damlalarının toprak yüzeyine fiziksel etkisi sonucu kabuklar ve yüzeyde geçirimsiz katmanlar oluşur. Yağmur damlaları toprak yüzeyindeki agregatları hızla ıslatır ve mekanik olarak parçalayarak, ince çökeltiler yıkandığında yoğun sızdırmazlık katmanları oluşturur ve toprak gözeneklerini tıkar. Kaymak tabakası katmanları sert kabuklara dönüştüğünde, uzun süreli fiziksel etkiler fidelerin toprak yüzeyine çıkışını kısıtlar ve toprak ile yüzey arasındaki su, enerji ve besin maddesi hareketini değiştirir. Kaymak tabakası ve kabuk katmanları, özellikle kurak alanlarda bitki örtüsünün büyümesini destekleyen akış-akıntı dinamikleri oluşturarak alandaki bitki topluluklarının ve peyzajın önemli unsurlarını etkiler (Assouline ve Thompson, 2023).

8. Toprak verimliliği

Toprak verimliliği genellikle su ve/veya besin girdisine karşı ürün verimini ifade eder. Herhangi bir toprakta verimliliğini etkileyen kritik toprak işlevleri: fiziksel destek, bitkinin kullanabileceği su içeren bir köklenme ortamı, solunum için hava ve temel besin maddelerini sağlayan işlevlerdir (Karlen, 2005).

Yaygın olarak kabul edilen üç kuraklık kategorisi arasında, yani meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklık arasında, tarımsal kuraklığın daha doğrudan ve ani bir etkisi vardır. Bitkilere sağlanan

toprak nemi, mahsul verimini ve dolayısıyla tarımsal üretimi olumsuz etkileyecek bir seviyeye düştüğünde tarımsal kuraklığın başladığı kabul edilir. Sonuç olarak kuraklık, dünya çapında yağmurla beslenen tarımsal ekosistemlerde sınırlı üretkenliğin ana nedenidir ve bitkisel ürün kayıplarının ve bitkilerdeki yıllık verim değişimlerinin büyük bir kısmına karşılık gelir. Bağlantılı süreçler durumundan dolayı toprak nemi, kuraklık sınıflandırmaları ve kuraklık göstergeleri spektrumunun tam merkezine yerleştirilir. Bu nedenle, bitki su stresinin mutlak miktardan ziyade toprakta bitki tarafından kullanılabilen suyun bağlı miktarıyla daha güçlü bir şekilde ilişkili olduğu dikkate alındığında, toprak nemi gözlemlerinin tarımsal kuraklığın izlenmesi için uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmesi mantıklı olacaktır (Martinez-Fernandez ve ark., 2015).

Bitki büyüme döngüsünün çeşitli aşamalarında kök bölgesindeki toprak nem eksikliğinin bitki verimi üzerinde derin bir etkisi vardır. Bitkilerdeki su stresi toprağın nem içeriğiyle yakından ilişkili olduğundan, toprak nemi tarımsal kuraklığın izlenmesinde önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Son zamanlarda, toprak nemini otomatik olarak izlemek için daha fazla bölgede toprak nemi izleme istasyonları kurulmaya başlanmıştır. Toprağın dokusu toprağın nem içeriğiyle yakından ilişkilidir. Tarlanın su tutma kapasitesi toprak türlerine göre farklılık gösterir ve buna bağlı olarak etkin toprak su içeriği ve bitki tarafından kullanılabilir su içeriği de değişir. Bitkinin mevcut su içeriği, tarımsal kuraklığın olup olmadığına karar vermede hayati bir eşik koşulu olduğundan, tarla su tutma kapasitesinin doğru tahmini özellikle önemlidir. Bir sahanın su tutma kapasitesini tahmin etmek için çeşitli yerleşik yöntemler önerilmiştir (Yu ve ark., 2023).

Toprak verimliliği terimi eski kökenlere sahiptir ve yüzyıllar boyunca toprağın tarımsal bağlamlarda bitki üretimini destekleme kapasitesini ifade etmek için sürekli olarak kullanılmıştır. Tarihsel olarak, toprak verimliliğinin en yaygın kullanımı bitki büyümesi için

mineral besin sağlanmasına odaklanmıştır. Tarımsal bağlamda "verimli bir toprak" öncelikle kimyasal verimliliğini artıran besin uygulamalarıyla desteklenir (Abbott & Johnson, 2017). Verim istikrarı, iklim değişikliği karşısında küresel gıda güvenliğinin temelidir ve artan hava değişkenliğine karşı ürün verimini korumak için daha iyi stratejilere ihtiyaç vardır. Toprak özelliklerinde yapılan iyileştirmeler, kuraklık ve toprak bozulmasının yaygın olduğu bölgelerde bitki verimi ve verim istikrarı üzerinde faydalı etkilerle ilişkilendirilmiştir. Fakat altta yatan mekanizmalar belirsizliğini korumaktadır (Williams ve ark., 2016).

Toprak verimliliği ve bitki besleme, genellikle seçilen yönetim hedeflerine ulaşmak için bitki büyümesi için gerekli olan temel unsurların yönetimini kapsar. Temel mineral makro besin maddeleri, azot (N), potasyum (K) ve fosfor (P) içeren birincil makro besinler ve ikincil makro besinler, kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) ve kükürt (S) olarak ayrılabilir. Sekiz mikro besin maddesi bakır (Cu), mangan (Mn), demir (Fe), bor (B), nikel (Ni), molibden (Mo), klor (Cl) ve çinkodur (Zn). Diğer birçok element bitkiler tarafından değişen derecelerde alınır, ancak temel olarak kabul edilmez. Optimum toprak verimliliği, yalnızca temel elementlerin yeterli miktarlarını değil, aynı zamanda bunların bitkilerin alımına ve dolayısıyla optimum bitki beslenmesine uygun bir formda ve konumda olmasını da gerektirir (McGrath ve ark., 2014).

Bazen toprağın mahsul üreticileri tarafından aşırı kullanımı ve çevresel nedenlerden dolayı toprak verimliliği ve kalitesi düşer. Bu, bozulan arazinin antropojenik faaliyetler nedeniyle normal verimliliğini bir dereceye kadar kaybettiği anlamına gelir. Tarım arazileri doğal ve antropojenik faaliyetler nedeniyle sürekli olarak bozulmakta ve bozulmuş sahaların kapladıkları alan artmaktadır. Tarımda toprağın aşırı kullanımı nedeniyle dünya çapında büyük miktarda arazi halihazırda bozulmuş arazi haline gelmiştir (Pandey, 2020).

Toprak ekosistemi aşırı kuraklık stresinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Topraktaki su miktarındaki yüksek değişkenlikler nedeniyle uzun süreli su stresi yaşandıktan sonra toprak ekosisteminin kuraklık stresine adaptasyonuna dikkat edilmelidir. Yüksek verimliliğin sürdürülebilmesi için, toprak ekosistemi, tane verimini artırmak için toprağın iyileştirilmesine referans sağlayan kütle su içeriği %14,3'ün altına düştüğünde sulanmalıdır (Geng ve ark., 2015).

9. Toprak kütle yoğunluğu

Kurak ve yarı kurak bölgelerde yağışların, yıllar arası ve mevsimsel değişimleri, sıklıkla yıllık ve mevsimsel toprak kuraklığına yol açmakta ve dolayısıyla tarım alanlarındaki mahsullerin büyümesini olumsuz etkilemektedir (Li ve ark., 2021). İyi yapıya, kütle yoğunluğuna, gözenekliliğe ve hidrolik iletkenliğe sahip toprak, toprak profilinde suyun ve besinlerin daha iyi taşınması, tutulması ve kök sistemlerinin daha fazla büyümesi için iyi bir ortam sağlar ve bu da daha yüksek bitki verimi sağlar (Tokova ve ark., 2020). Toprağın kütle yoğunluğu (ρ_b), toprak sıkışması ve toprağın birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliği ile ilişkili olan önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir ve kurutulmuş toprak kütlelerinin toplam hacmine oranı olarak hesaplanmaktadır (Han ve ark., 2016; Walter ve ark., 2016; Ai-Shammary ve ark., 2018).

Toprak işleme, büyüme koşulları ve ürün performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve esas olarak toprağın kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini değiştirerek toprağın verimliliğini optimize etmek için yapılır. Toprak işleme, teknolojik ilerlemenin ve tarımsal mekanizasyonun, özellikle toprağın sıkışmasının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmalıdır. Tarım makinelerinin ve cihazlarının tarlada tekrar tekrar hareket ettiği geleneksel toprak işleme (sürme), tohum yatağı hazırlama ve toprak işlemleri toprağın sıkışmasını artırır. Ağır tarım makineleri toprak agregatlarına zarar verir, toprağın yoğunluğunu ve nem içeriğini artırır, toprağın gözenekliliğini ve geçirgenliğini azaltır.

Toprağın sıkışması toprağın havalandırmasını ve su tutma kapasitesini tehlikeye atar ve kimyasal ve biyolojik özelliklerinde değişikliklere neden olur, toprağın bozulmasına ve ürün veriminin azalmasına yol açar. Çağdaş tarımda, enerji yoğun çiftçiliğin yerine basitleştirilmiş toprak işlemenin getirilmesi, toprak işleme ve gevşetme işlemlerinin sayı ve yoğunluğunun azaltılması, hatta bu uygulamaların tamamen ortadan kaldırılması yönünde girişimlerde bulunmaktadır (Orzech ve ark., 2021).

10. Toprak erozyonu

Kuraklık sonucu topraktaki bitki yoğunluğunun ve sayısının azalması toprak erozyonuna neden olmaktadır. Bu yüzden şiddetli kuraklık ve yüksek sıcaklıklar gibi ekstrem abiyotik faktörler küresel toprak erozyonunun ve bitki örtüsü kaybının başlıca nedenleridir (Azadi ve ark. 2018). Erozyonla kaybedilen her 10 cm toprak, üretkenliğin yaklaşık %4 oranında azalmasına neden olmaktadır (Vaezi ve Bahrami, 2014). Tarımsal toprak erozyonunun kısa vadede topraktaki su kaybına, uzun vadede ise mevcut su içeriğinin azalmasına etkisi vardır, dolayısıyla tarımsal ekosistemde toprak kuraklığını artırır. Ek olarak toprak erozyonu toprağın hidrolik ve fiziksel özelliklerini, yani toprağın parçacık boyutu dağılımını, kütle yoğunluğunu, agregat boyut dağılımını ve doymamış ve doymuş hidrolik iletkenliği değiştirir. Bu tür değişiklikler yağmur suyunun sızmasını, yüzey akışını ve dolayısıyla toprak kuraklığını etkilemektedir. Toprağın hidrolik ve fiziksel özelliklerinin toprak erozyonuna tepkisi toprak dokusuna göre değişir. İnce parçacıklar makro gözeneklere girer ve su erozyonu sırasında yüzey topraklarını kapatır, bu da toprağın gözenekliliğini, gözenek boyutunu ve topluluk ve su geçirgenliğini azaltır. Kapalı makro gözenekler ve toprak gözenekliliğindeki azalma, kütle yoğunluğunun artmasına ve dolayısıyla doymamış/doymuş hidrolik iletkenliğin azalmasına neden olabilir. Toprak işlemenin, rüzgar erozyonu ve çoğu su erozyonunun toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri

yüzey topraklarında (0–20 cm) yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Tarımsal erozyon, hidrolik özelliklerin bozulmasına neden olur ve tarımsal ekosistemin hidrolojik döngüsünü daha da etkiler (Live ark., 2021).

11. Bitki örtüsü türü

Yanlış bitki örtüsü türlerinin kullanılması, aşırı topluluk yoğunluğu ve üretkenlik gibi yanlış bitki örtüsü kullanımının yarı kurak ve yarı nemli bölgelerde toprak kurumasına yol açtığı bildirilmektedir (Zhang ve ark., 2019). Otlaklar dünyadaki tarımsal yüzeyin %70'ini kaplar ve dünya çapında 800 milyondan fazla insanın geçimine katkıda bulunan ürün-hayvancılık sistemlerini destekler. Otlaklar hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde dünyanın birçok otlayan hayvanı için yem üretir ve karbon tutumu, toprağın korunması ve zenginleştirilmesi ve biyolojik çeşitliliğin muhafaza edilmesi de dahil olmak üzere önemli ekosistem hizmetleri sağlar (Gaujour ve ark., 2012).

Yem türleri ve yem bitkisi popülasyonları, verimlilik ve kalıcılık için belirli bir iklim değişkenliği aralığına (örneğin sıcaklık ve yağış) fizyolojik ve morfolojik olarak uyum sağlayabilirler. Uyum yeteneği aralığı genetik ile kontrol edildiğinden dolayı çoğu tür, kısa ve uzun vadeli üretimin sürdürülebilir olduğu bir bölgeye (veya uyum bölgesine) adapte edilmiştir. Pek çok türün adaptasyon bölgeleri de örtüşerek bir bölge için tür seçeneği sağlar. Ek olarak, verimli genotiplerin ekonomik olarak yetiştirilebileceği alanları daha da genişletmek amacıyla iklimsel kısıtlamaları veya stresleri azaltmak için agronomik yönetim teknikleri geliştirilir ve kullanılır. Günümüzde yabancı ve kültüre alınmış yem bitkisi türleri, çok farklı tarımsal ekosistemler ve ekolojik bölgelere dağılmıştır. Türler, iklim ve toprak koşullarına verdikleri fizyolojik ve morfolojik tepkilerdeki farklılıklar nedeniyle bu bölgelere uyum sağlamıştır. Ancak adaptasyon bölgesinin dış sınırında, iklim ve yönetimden kaynaklanan stresler, türün genetik yapısının belirlediği adaptif özellikler dizisinin üstesinden gelemeyecek kadar büyük olabilir. Konum itibarı ile dış sınıra yakın türler daha zayıf olacak, sıkı bir

yönetim gerektirecek ya da agresif ve çok iyi adapte olmuş diğer türler tarafından yem meşceresinden elenecektir. Uyum bölgelerinin merkezlerine yakın konumda yetişen türler ise kuraklıklarda iyi şekilde hayatta kalabilir. Fakat şiddetli kuraklık ve yoğun otlatma, toprak örtüsünü azaltabilir ve yerli otlaklardaki tür baskınlığını değiştirebilir. Kuraklık, büyümenin azalması nedeniyle mevsimsel verimi etkiler ve kültür türlerinde kalıcılığın olmaması nedeniyle uzun vadede verim de etkilenir (Baron ve Belanger, 2020).

Doğal ve ekili otlakların istikrarı ve bunlara bağlı olan pastoral tarımın sürdürülebilirliği, küresel iklim değişikliği nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır (Tubiello ve ark., 2007). Değişen iklim koşulları, çok yıllık serin mevsim (C_3) yem bitkilerinin gelişimini olumsuz etkilemektedir. Bu gerçek doğal otlaklarda gittikçe çok yıllık C_3 bitkilerinin kompozisyonundan çekilmesiyle desteklenmektedir (Gillen ve Berg 2005). Bununla birlikte yaz aylarında aktif olan C_4 bitkileri ekosistemlere hakim olmaktadır. Sonuç olarak, yaz aylarında aktif olan türlere dayanan meralarda çok yıllık serin mevsim türleri kısa ömürlüdür ve sık sık yeniden tesis edilmeyi gerektirir, bu da hayvanlar için yem maliyetini artırır ve alternatif yem seçenekleri arayışını teşvik eder (Norton ve ark., 2016).

Yem bitkileri dünya çapında tarımsal ekosistemlerin büyük bir bileşenidir ve dünya gıda üretimine önemli ölçüde katkıda bulunur. Baklagillerden serin ve sıcak mevsimde yetişen çok yıllık buğdaygillere ve mısır ve yulaf gibi tek yıllık bitkilere kadar çok çeşitli bitkiler yeşil yem, kuru ot ve silaj olarak değerlendirilebilir veya mera tesisinde kullanılarak otlatılabilir. Yem bitkisi türleri yıl boyunca kuru madde birikiminde önemli farklılıklar gösterir. Serin iklim yem bitkileri ilkbaharda büyük miktarda biyokütle üretir ancak sıcak yaz aylarında "yaz çöküşü" olarak bilinen ot üretiminin azalması durumuna maruz kalır. Daha sonra serin sonbahar döneminde üretim sıklıkla yeniden artar. Bu, yonca veya diğer baklagillerin aksi bir durumdur. Bu bitkiler,

erken sezon veriminde yüksek miktarda biyokütle üretir, sıcak aylarda bir miktar düşüş sergiler, ancak yıl boyunca daha tekdüze bir verim modeline sahiptir ve çoğu tür, yaz aylarında önemli bir düşüş göstermez. Ancak sıcak iklim yem bitkileri, sıcak yaz dönemlerinde yem üretimini maksimuma çıkarır ve büyümeyi ilkbaharın sonlarında başlatır. Çok yıllık sıcak iklim yem bitkileri tek yıllıklardan daha erken büyümeye başlar, ancak mısır veya sorgum gibi C₄ tek yıllık buğdaygillerin yaz büyüme oranları genellikle çok yıllık sıcak iklim yem bitkilerinden daha fazladır (Putnam ve Orloff, 2014).

12. Kuraklığa toleransla ilişkili tarımsal tür özellikleri

Toprak ortamı yalıtılmış bir alan değildir. Topraklar belirli ana materyaller, iklim, fizyografi, hidrolojik rejimler, toprak florası ve belirli bitki türleri dizisi ile gelişir. Buna karşılık, belirli bir bitki topluluğu içinde, toprak ortamı ve ilgili hidrolojik dinamikler bitki büyümesini etkiler ve çoğu zaman bireysel bitki türlerinin yaşam alanını ve uyumunu belirler. Bitki toplulukları gelişip olgunlaştıkça, hidrolojik dinamiklerin ve bitkilerin tüm yerel ekosistem boyunca nedensel etkiler ortaya koyduğu bir sistem olan hidroloji üzerinde önemli etkiler yaparlar. Büyüyen bitkiler, toprak üstü biyokütlenin sonunda yaşlandığı, bitkisel atık haline geldiği, ayrıştığı ve organik madde ve besin maddelerini yenilediği toprak gelişiminin ve sürdürülebilirliğinin bir parçasıdır. Toprak altı kökleri su sızması için mikrokanallar sağlar ve aynı zamanda köklerin ayrışması ve toprağın mikrobiyal etkileşimleri yoluyla besin maddeleri ve organik madde sağlar. Göreceli bir denge seviyesinin mevcut olduğu yerleşik bitki topluluklarında (ormanlar, otlaklar), biyotik bütünlük, hidrolojik fonksiyon ve toprak stabilitesinin tümü uyum içinde çalışır ve erozyon seviyeleri sürdürülebilir hale gelir. Hidroloji ve erozyon süreçlerini etkileyen rahatsızlıklar bitkisel üretim sistemlerinde sürekli ve minimal ve toprak işlemez sistemlerde en aza indirilebilir. Sayısız biyotik alt sistemin bağlı olduğu karasal ortamlarda su en sınırlayıcı faktör olduğundan toprak sağlığı ve hidrolojik süreçler

birbiriyle yakından ilişkilidir. Yaşamın ayrılmaz bileşeni olan su, rüzgarla birlikte ana materyallerin aşınmasında ve peyzajın aşındırılmasında (doğal jeolojik erozyon ve/veya antropojenik kaynaklı) önemli bir rol oynar (Spaeth Jr ve ark., 2020).

Kuraklığa dayanıklı bitkisel ürün çeşitleri, kuraklığa eğilimli bölgelerdeki ürün verimi kayıplarına karşı direnç gösterir. Bu nedenle, ilgili kuraklığa toleransla ilişkili tarımsal özelliklerin ve bunların hedef çevrelerdeki karşılıklı ilişkilerinin derinlemesine anlaşılması vazgeçilmezdir (Kebede ve ark., 2019). Kuraklık stoma iletkenliğinin azalmasına, yaprak kıvrılmasına, tozlanma-döllenmenin ve bitkisel büyümenin zayıflamasına, bitki boyunun, yaprak alanının ve fotosentezin azalmasına neden olur (Verma ve ark., 2023).

Bitkiler, köklere su temini zorlaştığında veya terleme oranı çok arttığında kuraklık stresi yaşarlar. Kuraklıktan büyüme, verim, membran bütünlüğü, pigment içeriği, ozmotik düzenleme, su ilişkileri ve fotosentetik aktivite etkilenir. Bitkilerin su eksikliğine alışması, bitki yapısında, büyüme hızında, doku ozmotik potansiyelinde ve antioksidan savunmasında değişiklikler gibi bitki büyümesinde ve fizyolojik kimyasal süreçlerde adaptif değişikliklere yol açan farklı olayların sonucudur. Kuraklığın ilk ve en önemli etkisi çimlenmenin bozulması ve zayıf meşçere oluşumudur. Şiddetli su eksikliği altında, bitkilerin hücre uzaması, ksilemden çevredeki uzayan hücrelere su akışının kesilmesiyle engellenebilir. Su eksikliği bitki başına yaprak sayısını ve bireysel yaprak boyutunu azaltır. Yaprak alanındaki kuraklığın neden olduğu azalma, fotosentezdeki azalma yoluyla yaprak genişlemesinin baskılanmasına atfedilir. Verim bu süreçlerin çoğunu karmaşık bir şekilde bütünleştirir. Su eksikliği, yalnızca kaynak ve yutak dokuların boyutunu sınırlamakla kalmayıp aynı zamanda floem yüklemesini, asimilat translokasyonunu ve kuru madde porsiyonlamasını da bozan yaprak gazı değişim özelliklerini bozarak mahsul bitkilerinin verim özelliklerinde ciddi bir düşüşe yol açar. Stomalar su kaybının ve CO₂

emilebilirliğinin girişidir ve stomaların kapanması kuraklık stresine verilen ilk tepkilerden biridir ve bu da fotosentez oranının azalmasına neden olur. Kuraklığın neden olduğu kökten yaprağa sinyal iletimi vardır ve bu sinyal, toprağın terleme yoluyla kuruması ile desteklenir ve stomaların kapanmasıyla sonuçlanır. Kuraklık stresi altında klorofil içeriğindeki azalma, oksidatif stresin tipik bir belirtisi olarak kabul edilmektedir. Birçok türde kuraklık stresi sırasında klorofil seviyesinin azaldığı veya değişmediği rapor edilmiştir. Bağlı su içeriği (relative water content, RWC), yaprak su potansiyeli, stoma direnci, terleme oranı ve yaprak sıcaklığı bitki su ilişkilerini etkileyen önemli özelliklerdir. Gelişimin zamanlaması, süresi, şiddeti ve hızı, hiç şüphesiz, bir bitkinin su kıtlığına nasıl tepki vereceğini belirlemede çok önemli rollere sahiptir (Anjum ve ark., 2011).

13. Bitkilerin su kullanım etkinliği

Sulu tarım, tatlı suyun en büyük tüketicisidir. Tarımsal üretimde suyun güvence altına alınması açısından tarımsal sistemlerde su kullanım etkinliğinin artırılması önemlidir. Bu nedenle, su kıtlığı olan bölgelerdeki tarım sistemleri için birim araziden elde edilen verimi değil, su etkinliğini maksimuma çıkarmak bir stratejidir (Jacobsen ve ark., 2012).

Kurak alanlar küresel kara yüzeyinin %40'ını kaplar. Bu nedenle kuraklık stresi altında gıda güvenliğini garanti altına almak için bitkinin su kullanım etkinliğini artırmak önemlidir. Kurak alanlardaki ürün ekim yapısını kuraklığa karşı dayanıklılıklarına göre ayarlamak, ürün verimini artırma ve su kaynaklarından tasarruf etme konusunda önemli bir adımdır (Yu ve ark., 2021). Küresel olarak su, tarımsal üretimi sınırlayan ana faktörlerden biridir. Dünyanın birçok yerinde su kıttır ve kalitesi düşmektedir. Bununla birlikte bitki kütlesi üretilirken çok miktarda su tüketilir. Su kullanım etkinliği (water use efficiency, WUE) terimi bunu ölçmek için yaygın olarak kullanılır (Raviv ve Blom, 2001).

Kuraklığa dayanıklı tarımsal bitki genotiplerin seçiminde üzerine önemle eğilinen morfolojik ve fizyolojik özellikler arasında kök özellikleri ve kuraklık stresi (su kısıtı) altında azot fiksasyon kapasitesi yaygın olarak çalışılmıştır. Diğer önemli bir fizyolojik faktör olan su kullanım etkinliği (WUE), kullanılan birim su başına biriken toplam biyokütledir. Bir bitkinin su kullanım etkinliğinin artırılması daha iyi verimlerle sonuçlanabilir çünkü su kullanım etkinliği ile toplam biyokütle verimi arasında pozitif bir korelasyon vardır. Topraktaki su eksikliğinin belirli bir seviyesinde stomaların kısmi kapanması düzenlenerek su kullanım etkinliğinde artış sağlanabilir (Shaheen ve ark., 2016).



Şekil 1. Kuraklığa dayanıklı mısır çeşidi (solda) ve kuraklığa duyarlı çeşit (sağda)

Kaynak: Woomer ve ark., 2024

Sulanan alanların artması ve bitkilerin yüksek su ihtiyaçları nedeniyle yarı kurak bölgelerdeki tarımda su kullanım verimliliği önemli bir konudur. Bitkilerin su kullanım etkinliğini artırmak, temel tarım ve gıda güvenliği hedefi haline gelmektedir. Tarımın %60'ı yarı kurak bölgelerde yer aldığından ve bitkilerin büyüme döngüsünü tamamlamak için düzenli su uygulamaları gerektiğinden, su konusu tarımın çevresel sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Yarı kurak

bölgelerdeki bitkiler en kurak aylarda büyüyüp olgunlaşır, bu da sulama planlamasını ve zamanlamasını kritik hale getirir. Sonuç olarak, bitkilerin su kullanım etkinliği üzerine yapılan araştırmalara yönelik bilimsel ilgi, yeni sulama tekniklerinin değerlendirilmesine ve bitkilerde su kullanım etkinliğindeki genetik varyasyona odaklanmıştır. Farklı bilimsel disiplinlerde su kullanım etkinliğine ilişkin çeşitli tanımlar uygulansa da, tüm bu ölçümlerin karakteristik özelliği, su kullanım verimliliğinin, su kaybına (buharlaşma-terleme veya terleme) göre karbon kazanımı oranını yansıttığıdır. CO_2 asimilasyon hızı net CO_2 değişimi, kuru maddedeki artış veya ekonomik verim olarak ölçülebilirken, su kullanımı suyun kütlesi veya molar birimleri olarak ölçülebilir. Tarım bilimcileri genellikle su kullanım etkinliğini verim veya biyokütle ile terleme veya mahsule sağlanan toplam su (çökeltme ve sulamayla sağlanan su miktarı dahil) arasındaki ilişki olarak belirler (Bhattacharya, 2019). Su kullanımı etkinliği genellikle bitkilerin hasat edilmesi, bitkisel kısmın veya danenin kuru ağırlığının belirlenmesi ve bunun yağış veya sulama artı yağışa bölünmesiyle ölçülür. Tartım lizimetreleri, kullanılan suyun daha hassas ölçümlerine olanak sağlamaktadır (Kirkham, 2005).

14. Stoma iletkenliği

Bitkiler, su alımlarını terleme yoluyla su kaybı şeklinde dengelendiğinde veya ozmotik ayarlama kapasitelerinin aralığı aşılmadığında turgor durumundadır (suyla şişkin). Su kaybı su alımından fazla olduğunda su stresi gelişmeye başlar (Raviv ve Blom, 2001).

Hem iklim hem de bitki faktörleri, özellikle stoma düzenlemesi, bitkilerin terlemesini yönetir. Su buharı için stoma iletkenliği, fotosentetik aktif radyasyonun (PAR), sıcaklığın, bağıl nemin ve yaprak su potansiyelinin bir fonksiyonudur (Jacobsen ve ark., 2012). Stoma iletkenliği stoma açıklığının derecesinin bir ölçüsüdür ve bitki su durumunun bir göstergesi olarak kullanılabilir. Stoma iletkenliği hem

dinamik hem de kararlı durum difüzyon parametreleriyle ölçülebilir. Artan bitki su stresine yanıt olarak stomalar kısmen kapandığından bitkinin enerji dengesi değişir; suyun buharlaşması yoluyla daha az ısı yayılır ve sonuç olarak kanopi sıcaklığı artar. Bitki su stresinin artmasıyla birlikte gölgelik ve hava sıcaklığı arasındaki fark azalır ve şiddetli su stresi koşullarında pozitif hale gelebilir. Kanopi sıcaklığı en yaygın olarak kızılötesi termometrelerle ölçülür (Gimenez ve ark., 2013).

15. Yaprak alanı

Toplam yaprak alanının bireysel bitkilerin su kaybı üzerinde önemli etkileri vardır, çünkü geniş yaprak alanına sahip bitkiler genellikle küçük yaprak alanına sahip olanlardan daha fazla terleme gösterirler (Pallardy, 2008). Bitkilerin verimi, biyokütle üretimi ve bunun hasat edilen bitki organlarına sevkıyla kontrol edilir. Biyokütle üretimi yaprakların fotosentetik aktivitesine bağlıdır. Yaprak gelişim hızı, sıcaklık tarafından güçlü bir şekilde düzenlenir (Engels ve ark., 2012). Tüm bitki düzeyinde yaprak alanı gelişimi aynı zamanda yaprak üretim hızına, kardeşlenmeye ve yan dalların oluşumuna da bağlıdır. Bazı besin eksiklikleri bitki gelişimini geciktirebilir. Birbirini takip eden iki yaprağın ortaya çıkması arasında geçen termal süreye filokron adı verilir. Suyun bulunabilirliği ve bazen de besin eksiklikleri filokronu etkileyebilir (Kirkby ve ark., 2023).

16. Evapotranspirasyon

Tarımsal kuraklığa meteorolojik değişimler, bitkinin su ve iklim isteği, toprak özellikleri gibi birçok ve karmaşık faktör etki etmektedir ve tarımsal kuraklığın gelişimini belirleyen indeksler genellikle atmosfer-toprak-bitki arasındaki döngünün fiziksel mekanizmasını genellikle ihmal etmektedirler (Wilhite, 2000; Zhao ve ark., 2017). Bu fiziksel mekanizmanın belirlenmesinde önemli indekslerden biri olan

evapotranspirasyonun yani terleme ve buharlaşma yoluyla su kaybının ölçülmesi gereklidir (Zhao ve ark., 2017).

Küresel ve kıta ölçeğinde hidrolojik döngünün sürdürülmesinde ve dünyanın tatlı su kaynaklarının yenilenmesinde buharlaşmanın önemi binlerce yıldır bilinmektedir (Katul ve Novick, 2009). Toprakta buharlaşma ve bitki örtüsünden terleme büyük miktarda suyu (ve gizli ısı formundaki enerjiyi) atmosfere aktarır. Su tüketimi oranları, yüzeydeki enerji mevcudiyeti (hava ve iklim), topraktaki su mevcudiyeti (yağış, sulama ve sığ su tablaları) ve bitki örtüsünün miktarı, türü ve sağlığının bir kombinasyonu tarafından yönetilir (Anderson ve ark., 2012).

Bitki örtüsündeki terleme ile toprak, bitki ve açık su yüzeyinden buharlaşmanın toplamı olan evapotranspirasyon (ET), çoğu durumda hidrolojik döngünün en büyük bileşenidir. Evapotranspirasyonun doğru ölçülmesi, su tahsisi, sulama yönetimi, değişen arazi kullanımının su verimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, çevresel değerlendirme ve yüzey ve yeraltı suyu miktarını ve kalitesini korumaya yönelik en iyi yönetim uygulamalarının geliştirilmesinde çok önemlidir (Irmak, 2008).

Evapotranspirasyon hidrolojik döngünün en önemli bileşenlerinden biri olarak kabul edilir. Dünya yüzeyinde buharlaşma-terleme, su-enerji dengesi ve sulamanın yanı sıra tarım uygulamalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Evapotranspirasyon, toprak yüzeyinden buharlaşma ve bitkiden stomalar yoluyla terleme şeklinde oluşan birleşik su kaybıdır. Evapotranspirasyonun değerlendirilmesi için tartım lizimetresi, Bowen oranı enerji dengesi (bowen ratio energy balance, BREB), girdap kovaryans teknikleri, pan ölçümü, öz akışı ve sintilometre gibi bazı geleneksel yöntemler kullanılır. Potansiyel buharlaşma ve terlemedeki hızlı değişiklikler, tarımsal ürün performansının yanı sıra hidrolojik süreçlerin anlaşılmasında da önemli bilgiler sağlayabilir. Bu tür bilgiler iklimle ilgili çalışmalarda da

yararlıdır. Ancak buharlaşmanın doğru ölçümü ve tahmin edilmesi özellikle büyük mekansal ölçeklerde zordur (Singh ve ark., 2021).

17. Radyasyon kullanım etkinliği

Radyasyon kullanım etkinliği (radiation use efficiency, RUE), genellikle yeşil kanopi bileşenleri tarafından emilen fotosentetik olarak aktif fotonların molü başına üretilen kuru maddenin mikromol değeri olarak tanımlanır. Bu, fotosentezi, yani ışık enerjisinin ve CO₂'nin biyokütleye dönüşümünü simüle etmek için birçok basit bitki büyüme modeli tarafından kullanılan önemli bir parametredir (Kimball ve ark., 2002).

Radyasyon kullanım etkinliği, diğer faktörlerin sınırlayıcı olmadığı varsayıldığında, hem mahsul tarafından yakalanan güneş ışıını miktarını hem de mahsulün kuru madde üretme verimliliğini birleştirdiğinden, fotosentezle ilgili olarak mahsul üretiminin önemli bir nicelik belirleyicisidir. Radyasyon kullanım etkinliği yaklaşımı, farklı tarımsal sistemlerin fotosentetik olarak aktif radyasyon (photosynthetically active radiation, PAR)'ı nasıl yakaladığını ve onu biyokütle veya daneye nasıl dönüştürdüğünü belirlemek için niceliksel bir çerçeve olarak kullanılabilir. Bitki biyokütlesi baklagil olmayan türlerdeki azota ve bol toprak suyuna bağlı olduğundan, sınırlayıcı olmayan faktörler olarak su ve azotun bulunması radyasyon kullanım etkinliğini artırır. Bitki popülasyonu, dallanan veya kardeşlenen türlerde radyasyon kullanım etkinliğini etkilemez çünkü büyüme alışkanlığındaki esneklik, büyüme mevsimi boyunca ışığın verimli şekilde yakalanmasını destekler (Hatfield ve Dold, 2019).

Radyasyon kullanım etkinliği, kuraklık ve besin mevcudiyeti gibi abiyotik faktörlerden etkilenir. Baklagiller, baklagil olmayan C₃ türlerine göre daha düşük radyasyon kullanım etkinliğine sahiptir (Sehgal ve ark., 2021). Azot eksikliği ve biyotik stres yaprak fotosentezini ve radyasyon kullanım etkinliğini azaltabilir. Kök boyutunun küçülmesi de su alımını

azaltarak su stresinin artmasına ve yaprak turgorunun azalmasına neden olabilir (Carolina Lizana ve ark., 2021).

18. Kanopi mimarisi

Fotosentez, ışığın hücresel düzeyde karbonhidratlara dönüştürülmesidir. Fotosentetik oranlar, belirli bir sıcaklık rejimi için ışığın, karbondioksitin (CO_2) ve suyun mevcudiyetine göre belirlenir. C_4 ve C_3 bitkileri olarak sınıflandırılan bitki türleri arasında, özellikle ışığa ve CO_2 'ye verdikleri tepkiler açısından farklılıklar vardır. Fotosentez yaprak seviyesinde gerçekleşir; ancak birim alan seviyesindeki genel fotosentetik oran, bitkilerin yaprak alanı biriktirme hızına ve yaprakların kanopiler halinde düzenlenmesine bağlıdır. Yaprak düzeyindeki fotosentez, yaprağın sıcaklığından ve fotosentetik sürecin etkinliğini belirleyen su ve besin durumundan etkilenir. Kanopi seviyesinde, yaprak düzeni, ışığın kanopi içerisinde nasıl dağıtıldığını belirleyen önemli bir faktördür. Kanopi mimarisi bitki sıra aralığının, bitki popülasyonunun, mahsul türlerinin ve bitki karışımlarının bir fonksiyonudur (Hatfield ve Dold, 2019).

19. Kuru madde birikimi ve dağıtımı

Bitkiler tarafından biriktirilen kuru madde veya fotosentat, ürün oluşumunun maddi temelidir. Bitkilerde verimin temeli kuru madde birikimidir ve kuraklık altında, bitkilerin yapraklarında stoma iletkenliği azalır, fotosentez miktarı düşer ve bunun sonucunda kuru madde üretimi azalır. Kuru madde üretiminin azalmasıyla, kuru maddenin bitkinin farklı organları arasında bölünmesi etkilenir ve kökler ve toprak üstü organların büyümesi yavaşlar. Yaprakların büyümesindeki azalma ise fotosentezi ve besin alımını etkileyerek fotosentatların dağılımını etkiler (Cai ve ark., 2022). Kuru madde birikimi ve kuru maddenin dağıtımı, ürün verimi oluşumunu belirleyen önemli fizyolojik süreçlerdir (Cai ve ark., 2023).

Tarımsal ekosistemlerde bitki verimi yalnızca kuru madde birikimine bağlı değildir, aynı zamanda kuru maddenin hasat edilen organlara verimli bir şekilde tahsis edilmesiyle de yakından ilişkilidir. Bitkilerin farklı büyüme aşamalarında çeşitli organlarda depolanan toplam fotosentat miktarı kuru madde dağılımı ile belirlenir ve beslenme, sıcaklık, radyasyon ve toprağın nem durumu gibi faktörlerden etkilenir. Bitkilerin kuru madde birikimi ve kümülatif terlemesi arasında genellikle iyi bir ilişki vardır çünkü hem CO₂ alımı hem de su buharı kaybı stomalar yoluyla gerçekleşir. Kuru madde dağıtımı, biriken fotosentatın yapraklar tarafından farklı organlara taşınması anlamına gelir; bu, belirli bir andaki anlık değerler ve belirli bir süre boyunca kümülatif değerler olarak ifade edilebilir. Hasat indeksi, tanelere tahsis edilen toplam toprak üstü kuru maddenin oranıdır. Kuru madde dağıtımı üzerine yapılan çalışmalar ekim yoğunluğu, ekim tarihi, ekim türü, toprak gübresi ve kuraklık gibi faktörlerin etkileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Kuraklık, ürün verimini etkileyen en hayati kısıtlamalardan biridir ve kuru madde dağılımını etkileyen önemli bir faktördür. Bir yandan fotosentezi engelleyerek kuru madde kalitesini düşürürken, diğer yandan kuru madde dağıtım düzenini değiştirerek kök ve yaprak büyümesini etkileyerek besin emilimi ve fotosentez gibi fizyolojik süreçleri etkiler (Cai ve ark., 2023).

20. Kök büyümesi

Rizosfer süreçleri bitki süreçleri ile toprak süreçleri arasındaki bağlantıdır. Bitkiler, su kıt olduğunda köklerine daha fazla biyokütle sevk eder. Stres koşullarında kök büyümesi bitkinin en önemli hayatta kalma mekanizmalarından biridir. Kök büyümesi bir bitkinin su ve besin alma yeteneğini belirler. Kök büyümesi, aktif olarak fotosentez yapan yapraklar tarafından kontrol edilir. Kök büyümesi ve kapsamlı bir kök sisteminin oluşması, su ve besin maddeleri gibi kaynakların tutulmasında ve edinilmesinde önemli bir rol oynamakta ve dolayısıyla bitkilerin besin

maddesi kullanım etkinliğine büyük katkı sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2010).

Su alma kapasitesi toprak ve bitki faktörlerinden etkilenir. Toprağın dokusu su tutma kapasitesini, hidrolik iletkenlik ise köklere giden akış hızını belirler. Bitki faktörleri, toprak suyuna erişimi ve bu suyun çekilmesini belirleyen kök derinliğini ve yoğunluğunu kapsar (Cock & Connor, 2021). Kök boyutu ve dağılımı ile belirli kök türlerine karbon tahsisi, kök sistemi mimarisini belirleyen faktörlerdir. Kök sistemi mimarisinin önemi, su ve besin kaynaklarının kısıtlı olduğu ortamlarda açıkça fark edilir (Mi ve ark., 2016).

21. Karbon sabitleme ve fotosentetik kapasite

Bitkiler ve diğer fotosentetik organizmalar tarafından karbon asimilasyonu, küresel karbon döngüsünde çok önemli bir olaydır. CO₂'nin stomaya ve daha sonra karboksilasyon bölgesine akışı bir difüzyon süreci olarak tanımlanır. Karbon fiksasyonu, organik moleküllerin inorganik karbondan oluşturulduğu süreçtir. Bu reaksiyon, CO₂'nin atmosferden, ışığa bağımlı fotosentetik elektron taşınmasının son ürünlerini kullanarak şeker üretmek için kullanıldığı bitki hücrelerinin kloroplastlarındaki karbon sabitleme bölgesine hareket etmesini gerektirir (Lawson ve ark., 2022).

Fotosentez bitkilerde temel bir süreçtir. Yüksek fotosentetik kapasiteye sahip bitkiler, çevresel stres olmadığında yüksek stoma iletkenliğine sahiptir. Bu, yüksek fotosentetik kapasiteye sahip bitkilerin, yüksek oranda su kaybı pahasına hızla karbon kazanmasını sağlar. Bunun tersine, düşük fotosentetik kapasiteye sahip türler, düşük stoma iletkenliği nedeniyle suyu korur. Düşük su mevcudiyetine alıştıran ve adapte edilen bitkiler, suyu korumak için düşük stoma iletkenliğine ve fotosentetik kapasiteyi azaltan düşük doku azot konsantrasyonuna sahiptir. Özetle bitkiler, yüksek azot konsantrasyonuna ve yüksek fotosentetik hıza sahip kısa ömürlü ince yapraklardan, düşük azot

konsantrasyonuna ve düşük fotosentetik orana sahip uzun ömürlü yoğun yapraklara kadar değişen, sürekli fotosentetik özelliklere sahip yapraklar üretir (Chapin ve Eviner, 2003).

Net fotosentez üzerinde su stresinin getirdiği kısıtlamalar geleneksel olarak 'stomatal' ve 'stomatal olmayan' sınırlamalar şeklindedir. Stomatal sınırlamalar hücreler arası yaprak boşluklarına CO₂ difüzyonuna karşı dirençten kaynaklanır ve 'stomatal olmayan' sınırlamalar ise genellikle dolaylı olarak metabolik bir kısıtlama durumu olarak kabul edilir. Kuraklık sırasında meydana gelen ilk olaylardan birinin stoma kapanması olduğu iyi bilinmektedir (Grassi & Magnani, 2005).

22. Tarımsal kuraklıkla diğer kuraklık tiplerinin bağlantısı

Kuraklık, uzun süreli ve yaygın etkiye sahip, yavaş bir süreçtir. Farklı kuraklık türleri ile bir kuraklık türünden diğerine dönüşüm arasındaki yakın ilişki, kuraklık tepkisi olarak kabul edilir. Meteorolojik kuraklık, tarımsal kuraklıkla güçlü bir şekilde nedensel bağlantılıdır. Tarımsal kuraklık, esas olarak, yağış eksikliği ve toprak nem eksikliğinin yanı sıra artan hava sıcaklığı ve buharlaşmanın bir sonucu olan toprak nem eksikliğine bağlanmaktadır (Sun ve ark., 2023).

Tarımsal kuraklık ile diğer kuraklık tipleri arasındaki ilişkisi açısından arazilerin yüzeyindeki ve arazi-atmosfer arayüzündeki farklı süreçler yağış kaynaklı kuraklık anormalliklerini yoğunlaştırma veya iyileştirme kapasitesine sahiptir. Yüksek sıcaklıklar, atmosferdeki buharlaşma talebini ve yüzeydeki nem kayıplarını artırabilir, kar yerine yağmur olarak düşen yağış oranını artırabilir ve ilkbaharda kar erime mevsiminin zamanlamasını ilerletebilir. Bitki örtüsü (örneğin, fenoloji, arazi örtüsü) ve arazi yüzeyi özellikleri (örneğin, toprak tipi, topografya), toprağın su tutma kapasitesi, yüzeysel akış verimliliği ve enerji ve nem akışlarının belirli bölgelerde paylaştırılması kuraklığın ortaya çıkışını etkileyebilir (Cook ve ark., 2018).

23. Kötü yönetim kaynaklı kuraklık

Kuraklık aynı zamanda yerel ve/veya bölgesel düzeydeki zayıf yönetim ve planlama kararlarının bir belirtisi de olabilir. Kötü yönetim, su kaynaklarının düzensiz kullanımını içerir ve bu da uygunsuz tüketime, israfa dayalı verimsiz su kullanımına ve yoksulluğa yol açar (Lal, 2016). Örneğin bir sulama yönetim sistemi, tarımsal topraktaki ve ürün koşullarındaki coğrafi ve zamansal değişiklikleri bir tarla içinde ve tarlalar arasında tespit edebilmeli ve ölçebilmelidir. Sulama yönetimi, suyun, toprağın, bitki besin maddesinin ve enerjinin israf edilmeden, zamanın ve su uygulamasının yönetimi yoluyla bitkilerin su ihtiyacının karşılanmasını içerir. Şu anda gömülü sistemlerle damla sulama, diğerleri arasında toprak, haşere, rüzgar hızı, güneş radyasyonu, nem, bitki yoğunluğu gibi parametrelerden yararlanılarak su kullanımının azaltıldığı hassas tarımda en belirgin şekilde kullanılmaktadır. Hava durumu, toprak, sıcaklık, nem, sulama, ekim gereksinimleri ve mahsulle ilgili diğer kriterler gibi farklı tarımsal alanlardan elde edilen veriler, tarımla ilgili tahminler için analiz edilmekte ve entegre edilmektedir. Bitki verimindeki artış, yalnızca ekim, hasat ve bitki sağlığının izlenmesi için en iyi zamanın tahmin edilmesiyle değil, aynı zamanda hassas tarım yoluyla kimyasallar, gübreler, sulama vb. tarımsal girdilerin maliyetinin azaltılmasıyla da sağlanır. Buna paralel olarak, yetersiz yağış, yabani ot büyümesi, haşere saldırıları ve hasat sonrası kayıplar gibi sorunlar ele alınarak tarımsal riskler de en aza indirilir (Redhu ve ark., 2022).

Toprakların yanlış kullanımı ve yanlış yönetimi toprağın bozulmasına ve çölleşmeye yol açabilmektedir. Tarımsal topraklar ekim, hayvancılık ve diğer türlerde biyokütle üretimi için kullanılır. Topraklar ne şekilde kullanılırsa kullanılsın bir tür yönetime ihtiyaç duyarlar. Toprağın yanlış kullanımı ve yanlış yönetimi, marjinal toprakların işlenmesini, uygun olmayan toprak işlemeyi, ekim ve hasat için ağır makinelerin kullanımını, hatalı sulama ve drenaj sistemlerini, gübre, kireç ve böcek ilaçları dahil zirai kimyasalların uygunsuz kullanımını,

mahsul kalıntılarının üretildiği tarladan uzaklaştırılmasını, sürekli ekimi, ormansızlaşmayı, aşırı otlatma vb. içerir. Her ne kadar topraklar, bazı küçük değişiklikler meydana geldiğinde doğal olarak orijinal durumuna dönme kapasitesine veya esnekliğine sahip olsa da, insan kaynaklı yoğun bozulmaya maruz kalan topraklar, bir tür koruma ve rehabilitasyon çabası olmaksızın genellikle üretken kapasitelerini yeniden kazanamazlar. Bu nedenle toprak bozulmasının, geri dönülemez bir duruma ulaşmasından çok önce engellenmesi gerekmektedir. Bozulmanın orta düzeyde olduğu durumlarda toprağın rehabilitasyonu teknik ve ekonomik açıdan mümkün olabilir. Geri dönüşü olmayan bir bozulma meydana geldiğinde, onu yeterince üretken duruma döndürmek neredeyse imkansızdır. Aşırı sömürü ve yanlış yönetim, kurak, yarı kurak ve kuru yarı nemli bölgelerdeki birçok kurak alanı çöl benzeri alanlara dönüştürmüştür. Bu süreç halk arasında çölleşme olarak bilinir. Çölleşme 3,6 milyar hektar yağmurla beslenen tarım arazisini, meraları ve sulanan arazileri etkisi altına almıştır. Ancak, çölleşmiş arazilerin rehabilitasyonuna yönelik bazı çabalar cesaret vericidir (Osman ve Osman, 2018).

KAYNAKÇA

- Abbott, L. K., & Johnson, N. C. (2017). Introduction: perspectives on mycorrhizas and soil fertility. In *Mycorrhizal mediation of soil* (pp. 93-105). Elsevier.
- Abdallah, A. M., Jat, H. S., Choudhary, M., Abdelaty, E. F., Sharma, P. C., & Jat, M. L. (2021). Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A Review. *Agronomy*, 11(9), 1681.
- Al-Shammary, A. A. G., Kouzani, A. Z., Kaynak, A., Khoo, S. Y., Norton, M., & Gates, W. (2018). Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere*, 28(4), 581-596.
- Anderson, M.C., Allen, R.G., Morse, A. ve Kustas, W.P. (2012). Evapotranspirasyonun izlenmesinde ve su kaynaklarının yönetilmesinde Landsat termal görüntülerinin kullanılması. *Ortamın uzaktan algılanması*, 122, 50-65.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Assouline, S. (2011). Soil surface sealing and crusting. *Encyclopedia of agrophysics*, 786-790.
- Assouline, S., & Thompson, S. (2023). Crusts and seals: Structural. Editor(s): Michael J. Goss, Margaret Oliver, *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Second Edition), Academic Press, Pages 57-68, ISBN 9780323951333.
- Azadi, H., Keramati, P., Taheri, F., Rafiaani, P., Teklemariam, D., Gebrehiwot, K., ... & Witlox, F. (2018). Agricultural land conversion: Reviewing drought impacts and coping strategies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 184-195.
- Baron, V. S., & Belanger, G. (2020). Climate, climate-change and forage adaptation. *Forages: The science of grassland agriculture*, 2, 151-186.
- Berg, A., & Sheffield, J. (2018). Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Reports*, 4, 180-191.
- Bhattacharya, A. (2019). Nitrogen-use efficiency under changing climatic conditions. *Changing climate and resource use efficiency in plants*, 181-240.
- Bogale, G. A., & Erena, Z. B. (2022). Drought vulnerability and impacts of climate change on livestock production and productivity in different agro-Ecological zones of Ethiopia. *Journal of Applied Animal Research*, 50(1), 471-489.

- Boken, V. K. (2005). Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts (Vol. 472). New York: Oxford University Press.
- Bordoloi, R., Das, B., Yam, G., Pandey, P. K., & Tripathi, O. P. (2019). Modeling of water holding capacity using readily available soil characteristics. *Agricultural Research*, 8, 347-355.
- Cai, F., Mi, N., Ming, H., Zhang, Y., Zhang, H., Zhang, S., ... & Zhang, B. (2023). Responses of dry matter accumulation and partitioning to drought and subsequent rewatering at different growth stages of maize in Northeast China. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1110727.
- Cai, F., Zhang, Y., Mi, N., Ming, H., Zhang, S., Zhang, H., ... & Zhang, B. (2022). The effect of drought and sowing date on dry matter accumulation and partitioning in the above-ground organs of maize. *Atmosphere*, 13(5), 677.
- Carolina Lizana, X., Sandaña, P., Behn, A., Ávila-Valdés, A., Ramírez, D. A., Soratto, R. P., & Campos, H. (2020). Potato.
- Chapin, F. S., & Eviner, V. T. (2003). Biogeochemistry of terrestrial net primary production. *Treatise on geochemistry*, 8, 682.
- Cock, J. H., & Connor, D. J. (2021). Cassava. In *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 588-633). Academic Press.
- Cook, B. I., Mankin, J. S., & Anchukaitis, K. J. (2018). Climate change and drought: From past to future. *Current Climate Change Reports*, 4, 164-179.
- DeBano, L. F. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of hydrology*, 231, 4-32.
- Engels, C., Kirkby, E., & White, P. (2012). Mineral nutrition, yield and source–sink relationships. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (pp. 85-133). Academic Press.
- Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106.
- Gaujour, E., Amiaud, B., Mignolet, C., & Plantureux, S. (2012). Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review. *Agronomy for sustainable development*, 32(1), 133-160.
- Gavrilescu, M. (2021). Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13(19), 2746.

- Geng, S. M., Yan, D. H., Zhang, T. X., Weng, B. S., Zhang, Z. B., & Qin, T. L. (2015). Effects of drought stress on agriculture soil. *Natural Hazards*, 75, 1997-2011.
- Gillen, R. L., & Berg, W. A. (2005). Response of perennial cool-season grasses to clipping in the Southern Plains. *Agronomy Journal*, 97(1), 125-130.
- Gimenez, C., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2013). Plant–water relations. Editor(s): Daniel Hillel, *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, Pages 231-238, ISBN 9780123485304
- Grassi, G., & Magnani, F. (2005). Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. *Plant, Cell & Environment*, 28(7), 834-849.
- Hallett, P. D. (2008). A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency—a review. *Soil and Water Research*, 3(1), 521-528.
- Han Y Z, Zhang J W, Mattson K G, Zhang W D, Weber T A. 2016. Sample sizes to control error estimates in determining soil bulk density in California forest soils. *Soil Sci Soc Am J*. 80: 756–764.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Photosynthesis in the solar corridor system. In *The solar corridor crop system* (pp. 1-33). Academic Press.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.
- Hou, D., Bolan, N. S., Tsang, D. C., Kirkham, M. B., & O'connor, D. (2020). Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach. *Science of the Total Environment*, 729, 138961.
- Irmak, S. (2008). Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 1432-1438). Elsevier Inc..
- Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J., Yamada, Y., Heidenreich, S., Shao, Y., & McTainsh, G. H. (2008). Effects of soil moisture and dried raindroplet crust on saltation and dust emission. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D24).
- Jacobsen, S. E., Jensen, C. R., & Liu, F. (2012). Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 128, 34-47.
- Kar, G. (2022). Climate change and its impact in agriculture and water resources. In *Conservation Agriculture and Climate Change* (pp. 1-19). CRC Press.
- Karlen, D. L. (2005). Productivity. Editor(s): Daniel Hillel, *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, Pages 330-336, ISBN 9780123485304.

- Katul, G., & Novick, K. (2009). Evapotranspiration. Editor(s): Gene E. Likens, Encyclopedia of Inland Waters, Academic Press, Pages 661-667, ISBN 9780123706263.
- Kebede, A., Kang, M. S., & Bekele, E. (2019). Advances in mechanisms of drought tolerance in crops, with emphasis on barley. *Advances in agronomy*, 156, 265-314.
- Kimball, B. A., Kobayashi, K., & Bindi, M. (2002). Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in agronomy*, 77, 293-368.
- Kirkby, E. A., Nikolic, M., White, P. J., & Xu, G. (2023). Mineral nutrition, yield, and source-sink relationships. In *Marschner's mineral nutrition of plants* (pp. 131-200). Academic Press.
- Kirkham, M. B. (2005). Water-use efficiency. Editor(s): Daniel Hillel, *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, Pages 315-322, ISBN 9780123485304.
- Lal, R. (2016). Tenets of soil and landscape restoration. In *Land Restoration* (pp. 79-96). Academic Press.
- Lawson, T., Emmerson, R., Battle, M., Pullin, J., Wall, S., & Hofmann, T. A. (2022). Carbon fixation. In *Photosynthesis in action* (pp. 31-58). Academic Press.
- Li, H., Zhu, H., Wei, X., Liu, B., & Shao, M. (2021). Soil erosion leads to degradation of hydraulic properties in the agricultural region of Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107388.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620.
- Martinez-Fernandez, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., & Gumuzzio, A. (2015). A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology*, 522, 265-273.
- McGrath, J. M., Spargo, J., & Penn, C. J. (2014). Soil fertility and plant nutrition. In *Plant Health* (pp. 166-184). Elsevier.
- Mi, G., Chen, F., Yuan, L., & Zhang, F. (2016). Ideotype root system architecture for maize to achieve high yield and resource use efficiency in intensive cropping systems. *Advances in Agronomy*, 139, 73-97.
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian research*, 24, 53-63.
- Mishra, A. K., Ines, A. V., Das, N. N., Khedun, C. P., Singh, V. P., Sivakumar, B., & Hansen, J. W. (2015). Anatomy of a local-scale drought: Application of

- assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study. *Journal of Hydrology*, 526, 15-29.
- Norton, M. R., Malinowski, D. P., & Volaire, F. (2016). Plant drought survival under climate change and strategies to improve perennial grasses. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-15.
- Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, 11(7), 666.
- Osman, K. T., & Osman, K. T. (2018). Degraded soils. Management of soil problems, 409-456.
- Pallardy, S. G. (2008). Transpiration and Plant Water Balance, Editor(s): Stephen G. Pallardy, *Physiology of Woody Plants (Third Edition)*, Academic Press, Pages 325-366, ISBN 9780120887651
- Pandey, V. C. (2020). Fly ash application in reclamation of degraded land: opportunities and challenges. *Phytomanagement Fly Ash*, 167-193.
- Putnam, D.H. & Orloff, S.B. (2014). Forage Crops, Editor(s): Neal K. Van Alfen, *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Academic Press, Pages 381-405, ISBN 9780080931395.
- Ramirez-Vallejo, J. (2011). Managing Agricultural Water, Editor(s): Peter Wilderer, *Treatise on Water Science*, Elsevier, Pages 129-151, ISBN 9780444531995.
- Raviv, M., & Blom, T. J. (2001). The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Scientia Horticulturae*, 88(4), 257-276.
- Redhu, N. S., Thakur, Z., Yashveer, S., & Mor, P. (2022). Artificial intelligence: a way forward for agricultural sciences. In *Bioinformatics in Agriculture* (pp. 641-668). Academic Press.
- Rekwar, R. K., Patra, A., Jatav, H. S., Singh, S. K., Mohapatra, K. K., Kundu, A., ... & Sahoo, S. K. (2022). Ecological aspects of the soil-water-plant-atmosphere system. In *Plant Perspectives to Global Climate Changes* (pp. 279-302). Academic Press.
- Reynolds, M. P., Mujeeb-Kazi, A., & Sawkins, M. (2005). Prospects for utilising plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought-and salinity-prone environments. *Annals of applied biology*, 146(2), 239-259.

- Reynolds, M. P., & Ortiz, R. (2010). Adapting crops to climate change: a summary. *Climate change and crop production*, 1, 1.
- Saygin, S. D., & Huang, C. H. (2022). A revisit of sandblasting technique to measure soil crust strength. *Catena*, 212, 106073.
- Schaller, J., Cramer, A., Carminati, A., & Zarebanadkouki, M. (2020). Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. *Scientific Reports*, 10(1), 2424.
- Sehgal, A., Sita, K., Rehman, A., Farooq, M., Kumar, S., Yadav, R., ... & Siddique, K. H. (2021). Lentil. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops* (pp. 408-428). Academic Press.
- Shaheen, T., Riaz, M. S., & Zafar, Y. (2016). Soybean production and drought stress. In *Abiotic and biotic stresses in soybean production* (pp. 177-196). Academic Press.
- Singels, A., Jackson, P., & Inman-Bamber, G. (2021). Sugarcane. In *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 674-713). Academic Press.
- Singh, P., Srivastava, P. K., & Mall, R. K. (2021). Estimation of potential evapotranspiration using INSAT-3D satellite data over an agriculture area. In *Agricultural Water Management* (pp. 143-155). Academic Press.
- Spaeth Jr, K. E., & Spaeth Jr, K. E. (2020). Hydrology and Erosion Processes. *Soil Health on the Farm, Ranch, and in the Garden*, 85-136.
- Sun, P., Liu, R., Yao, R., Shen, H., & Bian, Y. (2023). Responses of agricultural drought to meteorological drought under different climatic zones and vegetation types. *Journal of Hydrology*, 619, 129305.
- Tokova, L., Igaz, D., Horák, J., & Aydin, E. (2020). Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005.
- Tubiello, F. N., Soussana, J. F., & Howden, S. M. (2007). Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19686-19690.
- Vaezi, A. R., & Bahrami, H. A. (2014). Relationship between soil productivity and erodibility in rainfed wheat lands in northwestern Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(6), 1455-1466.

- Verma, H., Theunuo, S., Devi, E. L., & Sarma, R. N. (2023). Abiotic and biotic stress tolerance in rice: Recent advances in molecular breeding approaches. *QTL Mapping in Crop Improvement*, 219-234.
- Walter K, Don A, Tiemeyer B, Freibauer A. 2016. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: A systematic method comparison. *Soil Sci Soc Am J*. 80: 579–591.
- West, H., Quinn, N., & Horswell, M. (2019). Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111291.
- Williams, A., Hunter, M. C., Kammerer, M., Kane, D. A., Jordan, N. R., Mortensen, D. A., ... & Davis, A. S. (2016). Soil water holding capacity mitigates downside risk and volatility in US rainfed maize: time to invest in soil organic matter?. *PloS one*, 11(8), e0160974.
- Wilhite, Donald A. "Drought as a natural hazard." (2000): 3-18.
- Woomer, P. L., Roobroeck, D., & Mulei, W. (2024). *Agricultural transformation in maize producing areas of Africa. New Prospects Of Maize*, Editor: Dr. Prashant Kaushik ISBN 978-1-83768-632-2.
- Wu, B., Ma, Z., & Yan, N. (2020). Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote sensing of environment*, 244, 111813.
- Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in agronomy*, 158, 217-310.
- Yu, L., Zhao, X., Gao, X., Jia, R., Yang, M., Yang, X., ... & Siddique, K. H. (2021). Effect of natural factors and management practices on agricultural water use efficiency under drought: A meta-analysis of global drylands. *Journal of Hydrology*, 594, 125977.
- Yu, M., Zhang, J., Wei, L., Wang, G., Dong, W., & Liu, X. (2023). Impact of soil textures on agricultural drought evolution and field capacity estimation in humid regions. *Journal of Hydrology*, 626, 130257.
- Zhang, F., Shen, J., Zhang, J., Zuo, Y., Li, L., & Chen, X. (2010). Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China. *Advances in agronomy*, 107, 1-32.
- Zhang, Y., Wang, R., Wang, S., Ning, F., Wang, H., Wen, P., ... & Li, J. (2019). Effect of planting density on deep soil water and maize yield on the Loess Plateau of China. *Agricultural water management*, 223, 105655.

Zhao, H., Xu, Z., Zhao, J., & Huang, W. (2017). A drought rarity and evapotranspiration-based index as a suitable agricultural drought indicator. *Ecological Indicators*, 82, 530-538.

BÖLÜM 4
KURAKLIĞIN SOSYO-EKONOMİK ETKİLERİ VE
POLİTİKALAR

Dr. Sibel KADIOĞLU¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759085>

¹ Doğu Anadolu Tarımsal Araştırmalar Enstitüsü Müdürlüğü Erzurum, Türkiye.
sibel.kadioglu@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-9121-1705

GİRİŞ

Kuraklık, yağışların kaydedilen normal seviyelerin önemli ölçüde altına düştüğünde ve arazi kaynaklarının üretim sistemlerini olumsuz yönde etkileyen ciddi hidrolojik dengesizliklere maruz kaldığında ortaya çıkan doğal bir olaydır (Belal ve ark., 2014). Kuraklık genel olarak çeşitli hidrolojik döngü eksikliklerine bağlı olarak meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyo-ekonomik kuraklıklar olmak üzere dört şekilde görülmektedir. Kuraklığın ilk üç şekli yağış, toprak nemi ve yüzey akışındaki eksikliklerle ilgilidir. Tarımsal kuraklık hidrolojik kuraklıktan önce ve meteorolojik kuraklıktan sonra ortaya çıkan kuraklıktır. Sosyo-ekonomik kuraklık ise, su arzının su talebini karşılayamadığı durumlarda oluşan kuraklık şeklidir ve kuraklığın toplumların sosyo ekonomik boyutlarda ortaya çıkan olumsuzluklarını belirtmektedir (Zhao ve ark., 2019). Sosyo ekonomik etkilerin en olumsuz sonuçları ise toplumların göçleri ve yok olmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır (Cookson ve ark., 2019).

Doğa bilimleri kuraklığın çok yönlü etkilerini yakalama kapasitesine sahip olamadığından kuraklığın izlenmesi, erken uyarı, kuraklık planlaması ve politika geliştirme ile ilgili büyük ölçekli çalışmalar çoğu zaman kuraklığın toplumsal etkilerine ilişkin bilgileri de içerebilmektedir. Bu nedenlerle kuraklığın çevresel ve sosyoekonomik etkilerine ilişkin sistematik ve niceliksel bilgi genel olarak kuraklık planlaması ve yönetiminde eksik olan parça olarak kalmaktadır (Stahl ve ark., 2016).

Sosyo-Ekonomik Kuraklık

Sosyo-ekonomik kuraklık, su arzının su talebini karşılayamadığı, dolayısıyla toplum, ekonomi ve çevre için olumsuz sonuçlara yol açan bir durum olarak tanımlanmaktadır (Lee ve ark., 2022). Kuraklığın farklı şeklindeki etkileri, kuraklık olayının farklı aşamalarında farklı olduğundan kuraklık etkilerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi oldukça zordur. Geçmiş yıllarda yapılmış kuraklık etki değerlendirmeleri, kuraklık tehlikesine karşı hassasiyeti azaltmaya yönelik önlemlerin geliştirilmesinde önemli bir adım olmuştur. Kuraklığın etkilerine ilişkin ampirik çalışmaların çoğu, doğrudan, hemen gözlemlenebilir, iyi anlaşılan ve ölçülmesi kolay olan tarımsal ürün üretimine odaklanmıştır. Etki ile ilişkili veriler genellikle tarım ve balıkçılık kuruluşları tarafından tutulduğundan, sektörler arası kuraklık etkilerine ilişkin çalışmalar genellikle kurumlarda mevcut verilerle sınırlıdır. Kuraklıkla ilgili ekonomik kayıplar için tutarlı şekilde kullanılan standart bir terminoloji ve sınıflandırma da yoktur. Kuraklığın etkileri genellikle ya “ekonomik”, “çevresel” ve “sosyal” kategorilere ya da “doğrudan”, “dolaylı” ve “gayri maddi” (piyasa dışı kayıplara atıf) olarak sınıflandırılmaktadır (Stahl ve ark., 2016).

Kuraklığın yavaş yavaş ilerlediğinden etkileri de uzun bir süre boyunca yavaş yavaş birikir. Bu nedenle kuraklığın başlangıcını ve sonunu belirlemek zordur ve bilim adamları ve politikacılar genellikle kuraklığın sona erdiğini ilan etmenin kriterleri konusunda anlaşamazlar. Kuraklığın sıklığı, şiddeti ve süresindeki artışın doğrudan bir sonucu olarak tarım genellikle ilk ve en çok etkilenen sektör olmuş; enerji üretimi, turizm ve rekreasyon, ulaşım, kentsel su temini ve çevre dahil

olmak üzere diğer birçok sektör de de önemli kayıplar yaşanmıştır (Wilhite ve ark., 2014).



Şekil 1. Kuzeydoğu Brezilya kırsalında kuraklıktan etkilenen kırsal bir alan

Kaynak: Silva, 2022

Su yönetiminde yapılan yanlışlar ve eksiklikler nedeni ile havzaların sürdürülebilir yönetimi de karmaşık ve zor bir iştir (Kahil ve ark., 2015). Her ne kadar dört kuraklık şeklinde de (meteorolojik, hidrolojik, tarımsal, sosyo-ekonomik) kuraklık uzun süreli yağış eksikliği ile başlasa da, şiddetini ve bunun sonucunda ortaya çıkan etkilerini değerlendirmek için de yalnızca yağışın izlenmesi yeterli olmamaktadır (Pulwarty ve ark., 2014).

Kuraklık yönetimi hem kısa hem de uzun vadeli önlemleri içermektedir. Reaktif veya kriz odaklı yaklaşım, sezon içi kuraklık yönetiminin etkili olmasını amaçlamaktadır. Sağlam bir operasyonel kuraklık izleme sistemi, sezon içi veya kısa vadeli kuraklık yönetimi için

kritik öneme sahiptir. Kuraklığın etkileriyle proaktif bir şekilde mücadele etmek, hassasiyet değerlendirmesi ve risk yönetimi yaklaşımını gerektirmektedir (Murthy ve ark., 2015).

Kuraklık üzerine yapılan araştırmalarının çoğu tehlike karakterizasyonuna odaklanmış olmakla beraber kuraklığın etkilerine daha az odaklanılmıştır. Ayrıca çoğu kuraklık erken uyarı sistemi tehlikeyi izler ve/veya tahmin eder ancak yağış açığının ne zaman ve nerede olumsuz sonuçlara dönüşebileceği konusunda bilgi sağlamaz. Doğal tehlikelerin olumsuz sonuçlarını değerlendirmek için yaygın bir yaklaşım, kırılabilirlik fonksiyonları veya aşama-hasar eğrileri olarak adlandırılan hasar fonksiyonlarının kullanılmasıdır. Kuraklığın birçok olumsuz etkisi yapısal olmadığından, ölçülmesi veya paraya dönüştürülmesi (örneğin, yerel su temini kısıtlılığı veya evsel su kullanımındaki kısıtlamalar, akarsularda ulaşımın engellenmesi veya sulak alanların geri döndürülemez şekilde bozulması gibi ekolojik etkiler) de oldukça zorlaşmaktadır (Bachmair ve ark., 2017). Genel olarak etkili kuraklık yönetimi üç temele dayanmaktadır: izleme ve erken uyarı, kırılabilirlik ve etki değerlendirmesi ve etki azaltma, hazırlıklı olma ve müdahale (Funk ve Shukla, 2020).

İzleme ve Erken Uyarı

Kuraklık erken uyarısı ve izlenmesi, kuraklığa hazırlık ve azaltma planlarının önemli bileşenleridir. Kuraklık izleme, kuraklık risk yönetiminin önemli bir bileşenidir. Kuraklığa hazırlık ve hafifletme çalışmalarının başarısı, büyük ölçüde kuraklığın başlangıcı, ilerlemesi ve alansal kapsamı hakkında zamanında bilgi alınmasına bağlıdır. Ancak

bazı ülkeler (çoğunlukla gelişmekte olan ülkeler) kuraklığı izlemek ve etkilerini hafifletmek için sınırlı kurumsal ve teknik kapasiteye sahiptir. Uydular ve uzaktan algılamadaki son teknolojik gelişmeler, erken uyarının karmaşıklıklarını çözme ve kuraklık durumlarının etkin bir şekilde izlenmesi yeteneğimizi geliştirmiştir. Kuraklık izleme genellikle yağış ve diğer hidrometeorolojik değişkenlerin sürekli fonksiyonları olan kuraklık göstergeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Kuraklık göstergeleri kuraklığın oluşum sürecini, etkilerini, kontrolünü ve sonuçlarını inceleyerek belirli çıkarımlarda bulunmak amacı ile geliştirilmiştir. Bu göstergeler uydu bazlı yağış tahminleri, standartlaştırılmış yağış indeksi, kuruluk göstergeleri ve sezon başlangıcı analizi olabilmektedir. Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) bitki örtüsünün durumunu izlemek için kullanılmaktadır. NDVI gözlemlenen alandaki bitki örtüsünün sıklığını ve sağlık durumunu analiz ederek belirleyen bir indekstir. Çeşitli uydu verileri birden fazla kısa ve uzun vadeli kuraklık göstergesi üretmek için tarımsal hidrolojik modeller kullanılarak birleştirilmektedir (Senay ve ark., 2015).

Mehran ve ark. (2015), Avustralya'daki sosyo-ekonomik kuraklığı, iklim, yerel dayanıklılık ve su talebi değişkenlerini benzersiz birçok değişkenli standartlaştırılmış güvenilirlik ve dayanıklılık indeksinde birleştiren çok değişkenli hibrit bir çerçeveyi yaklaşımı ile değerlendirmiştir. Yaklaşımın avantajı, bireysel su depolamaları uygulanmasının yanı sıra, su stresinin hem erken başlangıcını hem de zaman içinde yayılmasını tespit etmesidir. Dumitrascu ve ark. (2017), nitel istatistiksel yöntemler kullanarak Güney Romanya'nın sosyo-

ekonomik kuraklığa karşı hassasiyetini değerlendirmiştir. Çalışmada demografik ve sosyal kırılganlık, ekonomik kırılganlık ve altyapı kırılganlığı endekslerini çok değişkenli sosyo-ekonomik kırılganlık endeksine entegre etmiştir. Shi ve ark., (2018) Çin'deki Doğu Nehri Havzası'ndaki iklim değişiklikleri altında kuraklığın şiddetini (hafif, orta, şiddetli ve aşırı şiddetli) değerlendirmek ve bir sosyo-ekonomik kuraklık indeksi geliştirmek amacıyla sezgisel bir yöntem izleyerek çalışmada su açığını hesaplamak için aylık nehir içi su akışını ve minimum su gereksinimini değişkenlerini kullanmışlardır.

Kırılganlık ve Etki Değerlendirmesi

Doğal bir olay olarak kuraklık ile bir risk olarak kuraklık arasında ayırım yapmak önemlidir. Doğal bir olay olan kuraklık, belirli bir dönemde belirli bir bölgede yağış miktarının normalin altına düşmesi anlamına gelir. Risk olarak kuraklık ise azalan yağışların talebi karşılamaya çalışan mevcut su kaynakları üzerinde oluşturabileceği etkiyi ifade eder. Risk olarak anlaşılan kuraklıklar, farklı doğal ve beşeri faktörleri içeren, sürekli etkileşim içinde olan ve farklı mekansal ve zamansal ölçeklerde işleyen karmaşık bir sürecin sonucudur. Diğer doğal afetler gibi kuraklık riski de yüksek düzeyde belirsizlikle ilişkilidir (Vargas ve Paneque, 2019).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), kırılganlığı (vulnerability) maruz kalma, duyarlılık ve uyum sağlama kapasitesinin bir fonksiyonu olarak nitelendirir (Vargas ve Paneque, 2019). Kırılganlık (hassasiyet, zarar görülebilirlik, savunmasızlık), bir bireyin, topluluğun, varlıkların veya sistemlerin tehlikelerin etkilerine karşı duyarlılığını

artıran fiziksel, sosyal, ekonomik ve çevresel faktörler veya süreçler tarafından belirlenen koşullar olarak tanımlanabilir (Funk ve Shukla, 2020). Bir ülkenin coğrafyası, iklimi ve doğal kaynakları, o ülkenin iklim tehlikesine karşı hassasiyetini belirler. Karar vericilerin, kuraklık koşullarının başlangıcı ve gelişimi hakkında zamanında ve doğru iklim bilgilerine ihtiyaçları vardır (Mera, 2018). Bir toplumun kuraklık gibi iklim felaketlerine karşı kırılganlığı; nüfus, teknoloji, politika, sosyal davranış, arazi kullanım modelleri, su kullanımı, ekonomik kalkınma, ekonomik temel ve kültürel kompozisyonun çeşitliliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Shiferaw ve ark., 2014).

Büyük ölçüde kriz yönetimine dayanan mevcut kuraklık yönetimi uygulamalarının etkisizliği konusunda dünya çapında artan bir endişe vardır. Bu uygulamalar reaktiftir ve bu nedenle, kuraklığın etkilerine karşı kırılganlıkların altında yatan nedenler yerine yalnızca kuraklığın belirtilerini iyileştirmek hedeflenir. Riskin azaltılmasına odaklanan ve çeşitli düzeylerinde kuraklık hafifletme veya hazırlık planları ile tamamlanan ulusal kuraklık politikalarının benimsenmesiyle, ulusların kuraklıkla başa çıkma kapasiteleri geliştirilebilir. Dünya genelinde hükümetlerin kuraklığa karşı tepkileri genellikle tepkiseldir (kötü koordine edilmiş ve zamansızdır) ve tipik olarak "kriz yönetimi" olarak nitelendirilir. Kapsamlı izleme, erken uyarı ve bilgi sistemleri, etki değerlendirme prosedürleri, risk yönetimi önlemleri, kuraklığa hazırlık planları ve acil müdahale programlarını içeren koordineli bir ulusal kuraklık politikası olmadan, ülkeler kuraklığa tepkisel bir kriz yönetimi modunda yanıt vermeye devam edeceklerdir (Wilhite ve ark., 2014).



Şekil 2. Ren Nehri, Ağustos 2018

Kaynak: Vogt ve ark., 2018

Wilhelmi ve Wilhite (2002) iklim, toprak, arazi kullanımı ve sulama desteği göstergelerine bakarak kimin ve neyin savunmasız olduğunu ve nedenlerini mekansal ve coğrafi bilgi sistemlerine dayalı olarak değerlendirdiği çalışmada tarımsal kuraklığa karşı kırılganlığı belirlemişlerdir. Tarımsal kuraklığa karşı en hassas alanların sulanmayan tarım arazileri, kumlu topraklardaki meralar olduğunu ve mevsimsel ürünlerde nem eksikliği olasılığının çok yüksek olduğu bölgelerde bulunduğunu göstermişlerdir. Tsheko (2003), seçili istasyonlar için uzun vadeli yağış verilerinden faydalanarak risk ve kırılganlık göstergeleri geliştirmiştir. Mullan ve ark., (2005) iki farklı küresel ortalama sıcaklık projeksiyonunu, iki iklim modelinin ürettiği iki farklı bölgesel modelle birleştirerek dört senaryoyu incelemiş ve Yeni Zelanda'daki kuraklık riskindeki değişiklikleri haritalamıştır. Kuraklık ölçüsü olarak büyüme sezonu boyunca biriken “potansiyel evapotranspirasyon açığını” kullanmışlardır.

Eriyagama ve ark., (2010), iklim değişikliğinin Sri Lanka'da su kaynakları ve tarım üzerindeki etkisini incelemek için bölge düzeyinde

birden fazla parametreye ağırlıklar atayarak kırılğanlık haritalamanın bir ön analizini gerçekleştirmiştir. Ravindranath ve ark., (2011), ikincil verileri kullanarak Hindistan'ın kuzeydoğu bölgesinde tarımsal kırılğanlığı değerlendirmek için endekse dayalı bir yaklaşım benimsemiştir. Amaçları en hassas sektör ve bölgelerin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi; uyumu sağlamak için müdahalelerin belirlenmesi ve uyumun kalkınma programlarına yaygınlaştırılması olmuştur. Jayanthi ve ark., (2013), Afrika'da gıda güvenliği durumunu belirlemek için Standart Yağış İndeksini (SPI) mısır bitkisi verimiyle ilişkilendirerek bitkiye özgü kuraklık kırılğanlığını analiz etmiştir. Malavi'nin kuraklığa yatkın bölgelerinde kuraklığa karşı kırılğanlık modelleri geliştirmek için uydu tahmini yağış girdilerini kullanmıştır.

Kırılğanlığın belirlenmesi için maruz kalma, duyarlılık ve başa çıkma yeteneği konularının ele alınması gerekmektedir. Kırılğanlık çok boyutludur, mekansal ve zamansal olarak dinamiktir ve ölçeğe bağlıdır. Kırılğanlık değerlendirmeleri sistemin maruz kalma, hassasiyet ve uyarlanabilir kapasitesi bileşenlerini kapsamalıdır. Kuraklığa karşı kırılğanlık çalışmalarının büyük çoğunluğu makro düzeyde (ulusal veya bölgesel) yürütülmektedir (Murthy ve ark., 2015).

Kırılğanlık değerlendirmeleri, orta ve uzun vadeli hazırlık eylemlerinin tasarımını, ayrıca hedeflenen sektörlere veya daha hassas nüfuslara yönelik su kaynakları planlamasını desteklediğinden, herhangi bir kuraklık riski tahmininin önemli bir bileşenidir. Özellikle kuraklığın etkilerini azaltmaya yönelik müdahaleler, insani ve doğal sistemlerin hassasiyetini azaltmaya yönelik olmalıdır (Vogt ve ark., 2018).

Kuraklığın etkisi ve kırılganlığı üç farklı yaklaşımla veya metotla değerlendirilebilmektedir. İlk yaklaşım olan "insan merkezli değerlendirme yaklaşımı" (people-centred assessment approach) insanlara, onların varlıklarına ve kuraklıktan kurtulma yeteneklerine odaklanır. Gelirden daha ziyade insan merkezli analizleri sağlar. Hanehalkı ölçeğine odaklanır bu nedenle hane halkı düzeyinde etkileri belirler. Uzun vadeli zaman ufkuna uyum sağlayabilir, farklı türden kapasiteleri dikkate alır. Tarımsal ekosistemlerle ilişkilidir ancak bunlarda veri yoğundur ve zaman alıcıdır. Geçim portföyünü çeşitlendirmeye yönelik tavsiyeleri tercih edebilir ve uzun vadeli sistemik kırılganlığı derinleştiren etkileri gözden kaçırabilir. Çoğu zaman stratejik su yönetimi çözümlerinin belirlenmesini gözden geçirir (King-Okumu ve ark., 2020).

İkinci yaklaşım olan "arazi veya ekosistem temelli değerlendirme yaklaşımı" (land or ecosystem-based assessment approach) ekosistemlere, onların üretkenliğine ve iklim anormalliklerine verilen tepkilere odaklanır. Kaynağa bağımlı üretim sistemlerinin kapsamını sağlar. İklim modellerine ve ekonomik modellere bağlanabilir; uydudan elde edilen veriler kullanılarak düşük maliyetle haritalanabilir ve izlenebilir. Tarımsal yayım sistemlerine ve mevcut kapasitelere aşınadır ancak yoksul ve marjinal grupların dahil edilmesi her zaman sistematik değildir. Diğer sektörlerle göre daha çok tarıma yöneliktir ve kentsel alanlardaki kırılganlığı yakalayamayabilir. Nispeten kısa vadelidir. Ekonominin diğer sektörlerindeki su ihtiyaçlarını dikkate almaz (King-Okumu ve ark., 2020).

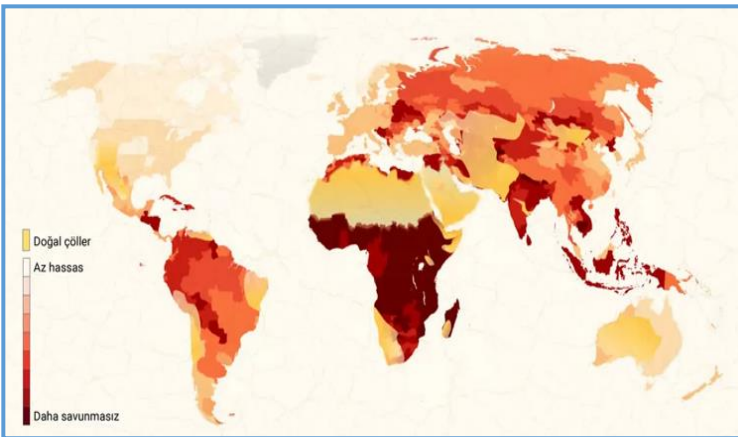
Üçüncü yaklaşım olan "su dengeli değerlendirme yaklaşımı" ise (water balanced assessment approaches), suyun mevcudiyetine ve ekonominin farklı sektörlerinden, yönetim sistemlerinden ve hidro-iklim döngülerinden gelen taleplerle olan ilişkisine odaklanır. Kentsel alanlar da dahil olmak üzere ekonomi genelinde su mevcudiyeti ve talebini dikkate alır. İklim modelleri ve senaryolarını etkin bir şekilde kullanır. Kuraklık izleme ve erken uyarı sistemlerine bağlanır. Kapasite ihtiyaçlarının belirlenmesini sağlayabilir. Risk yönetimi eylemlerinin tanımlanmasını sağlayabilir. Ancak veri toplama, yönetim ve analizi koordine etme konusunda kurumsal zorluklarla karşı karşıyadır. Kuraklıktan etkilenen bölgelerde su çıkarımına ilişkin veriler genellikle eksiktir. Yeraltı suyu yönetimi hakkında bilgi gerektirebilir. Bazı ülkelerde sınıraşan sorunlar, siyasi ve güvenlik hassasiyetleri söz konusudur (King-Okumu ve ark., 2020).

Maruz Kalma Durumunun Değerlendirilmesi

Maruz kalma (exposure), tehlikeye eğilimli bölgelerde bulunan insanların, altyapının, konutların, üretim kapasitelerinin ve diğer maddi insan varlıklarının durumudur (Funk & Shukla, 2020). Maruz kalma durumunun katmanları, kuraklığa maruz kalan nüfusun mekansal dağılımı, tarım alanı olarak kullanılan arazi alanının oranı, hayvan yoğunlukları, göreceli su talebi ve mevcut su temini değişkenlerini kapsar (Vogt ve ark., 2018). Maruz kalma, bir coğrafi alan üzerindeki kuraklık koşullarının doğasını, kapsamını, süresini ve sıklığını gösterir. Tarımsal kuraklığın temel nedeni meteorolojik kuraklık olduğundan, burada maruz kalma bileşeninin belirlenmesinde yağış ve yağışlı günler dikkate alınmaktadır. Maruz kalma bileşenleri toplam sezon yağışı, ekim

dönemi yağışı, toplam sezon yağışlı günleri, ekim dönemi yağışlı günleri ile belirlenebilir (Murthy ve ark., 2015).

Risk ve hasarlara maruz kalma hakkındaki bilgiler, hem riskin azaltılması ve risk değerlendirmesinde hem de sonradan risk yönetimi, hasarın değerlendirilmesi ve yeniden yapılanmada temeldir. Politika yapıcılarının, analiz edilen alanın sosyo-ekonomik değerinin yanı sıra komşu alanlarla olası bağlantıların ne olduğunu açıkça bilmeleri gerekir. Bu şekilde, en uygun afet azaltma politikalarını tanımlamak, bir bölgenin maruz kalacağı muhtemel (veya potansiyel) maksimum maliyeti tahmin etmek ve etkili risk yönetimi stratejilerini detaylandırmak mümkündür. Maruz kalmanın doğrudan bileşenlerini, bir felaket nedeniyle doğrudan kayıplara neden olabilecek olanlar (doğrudan sosyo-ekonomik maruz kalma) maruz kalmanın dolaylı bileşenlerini ise üretim faaliyetlerinin yerel ve küresel tedarik zincirlerinin bozulmasından kaynaklanan kayıplar oluşturmaktadır (dolaylı sosyo-ekonomik maruz kalma) (Marin & Modica, 2017).



Şekil 3. Kuraklığa karşı hassasiyet endeksi, Kasım 2023

Kaynak: Birleşmiş Milletler

Kuraklığın Etki Kategorileri ve Alt Kategoriler

Kuraklığın etkileri, etkilenen bölgenin çok dışında da yaşanabilir ve hatta küresel ölçeğe kadar yayılabilir. Etkilerin karmaşıklığı büyük ölçüde pek çok sektörün mal üretimi ve hizmet sunumu için suya bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır. Su ve diğer doğal kaynaklar üzerindeki artan baskı nedeniyle kuraklığa karşı hassasiyet arttıkça, bilimsel çalışmaların zamanında ve kapsamlı etki değerlendirmeleri konusunda önemli bir zorlukla karşı karşıya olduğu görülmektedir. Doğal afetler arasında kuraklık en karmaşık ve diğer afetlere nazaran daha fazla insanın etkilendiği bir afet olarak nitelendirilebilir. Dolaylı etkileri; bitkisel üretim, mera ve orman alanlarında verimin azalması, çiftçiler ve tarım işletmelerinin gelirinin azalması, gıda ve kereste fiyatlarının artması, işsizlik, azalan harcamalar nedeniyle azalan hükümet vergi gelirleri, artan suç, geri ödenemeyen banka kredileri ve borçlar nedeni ile işletmelerin hacize maruz kalması ve nihayetinde göç edilmesi şeklinde sıralanabilmektedir (Wilhite ve ark., 2007).

Stahl ve ark., (2016), 33 Avrupa ülkesinden 5.000'e yakın etki raporu toplayan ve benzersiz bir araştırma veri tabanı sunan Avrupa Kuraklık Etki Raporu Envanteri'ne (EDII) dayanarak, Avrupa çapında kuraklık etkilerinin çeşitliliğine ilişkin bir değerlendirme sunmuştur. Bildirilen kuraklık etkileri, her biri bir dizi alt sınıfa sahip olan etki 15 kategori (tarım ve hayvancılık, ormancılık, tatlı su ürünleri yetiştiriciliği ve balıkçılık, enerji ve sanayi, su taşımacılığı, turizm ve rekreasyon, kamunun su temini, su kalitesi, tatlı su ekosistemleri, karasal ekosistemler, toprak sistemleri, hava kalitesi, insan sağlığı ve kamu güvenliği, çatışmalar) olarak sınıflandırılmıştır.

Kategori 1'in (tarım ve hayvancılık) alt sınıfları şunlardır:

- Tek yıllık bitkilerin üretiminde verimin azalması; ürün kayıpları, ürün kalitesinde hasar, erken olgunlaşma, kuraklığın neden olduğu haşere istilasına veya hastalıklar nedeniyle ürünün bozulması
- Çok yıllık bitkilerde azalan verim
- Tarımsal verim kayıplarının normal üretimin $\geq$ %30'unu (AB tazminat eşiği) aşması
- Sulama suyunun azalan mevcudiyeti
- Hayvancılıkta verimin azalması (örneğin süt veriminin, süt kalitesinin, hayvan ağırlıklarının azalması)
- Stokların zorla azaltılması (erken satış/kesim)
- Hayvancılık için bölgesel yem/su sıkıntısı
- Diğer
- Artan maliyetler/ekonomik kayıplar

Kategori 4'ün (enerji ve sanayi) alt sınıfları şunlardır:

- Hidroelektrik üretiminin azalması
- Termik/nükleer enerji santrallerinin üretiminin aksaması/bozulması (soğutma suyunun bulunmaması ve/veya akarsulara deşarja ilişkin çevre mevzuatı nedeniyle)
- Endüstriyel üretim prosesinin kısıtlanması/bozulması (proses suyu eksikliği ve/veya çevre mevzuatı/derelelere boşaltım kısıtlamaları nedeniyle)
- Diğer
- Artan maliyetler/ekonomik kayıplar

Kategori 5'in (su yoluyla taşımacılık) alt sınıfları şunlardır:

- Akarsuların seyrüsefer kabiliyetinin bozulması (yükün azalması, malların limanlarda geçici olarak depolanması ihtiyacının artması)
- Akışın su yönlendirme için durdurulması
- Diğer

Kategori 9'un (tatlı su ekosistemleri) alt sınıfları şunlardır:

- Suda yaşayan türlerin artan ölüm oranı
- Su kıyısında artan tür yoğunluğu
- Göç ve yoğunlaşma (bazı bölgelerde yaban hayatının kaybı, diğerlerinde ise çok fazlalaşması)
- İstilacı (egzotik) su türlerinin artan nüfusu
- Nadir/nesli tükenmekte olan (korunan) kıyıdaş türlerin nüfusu üzerinde olumsuz etkilerin gözlemlenmesi
- Nadir/nesli tükenmekte olan (korunan) sulak alan türlerinin popülasyonları üzerindeki olumsuz etkilerin gözlemlenmesi;
- Biyolojik çeşitliliğin kaybı (tür çeşitliliğinin azalması)
- Minimum akış veya çevresel akış gerekliliklerinin tehlikesi veya fiili ihlali
- Sığ su alanlarının kurutulması, yabani ot büyümesi veya alg çoğalması
- Derelerin kuruması
- Göllerin ve rezervuarların (habitat işlevi olan) kuruması;
- Orta/Uzun vadeli sulak alanların bozulması
- Sulak alanların geri dönüşü olmayan bozulması/kaybı

- Diğer
- Artan maliyetler/ekonomik kayıplar (Stahl ve ark., 2016; Stephan ve ark., 2021).

Sel ve deprem gibi kısa bir zaman periyodunda meydana gelen ve görsel olarak belirgin hasara yol açan diğer doğal afetlerden farklı olarak kuraklık, görünür yapısal etkilerden yoksun, yavaş ve sessiz bir şekilde gelişir. Kurumuş bitkiler, terk edilmiş tarım arazileri ve solmuş ve sararmış meralar kuraklığın yaygın belirtileridir. Kuraklığın dolaylı ekonomik etkileri ise endüstriler ve sektörler arasındaki etkileşim ve işlemlerden kaynaklanmaktadır. Kuraklığın neden olduğu üretim kayıpları olumsuz arz şoklarına neden olmaktadır, ancak oluşan ekonomik etkilerin miktarı ve kayıpların dağılımı piyasa yapısına ve tarım ürünlerinin arz ve talebi arasındaki etkileşime bağlıdır. Fiyat artışları ne kadar yüksek olursa tüketicilere o kadar fazla zarar yansır (Ding ve ark., 2011). Kuraklık, gıda güvensizliğine ve yoksulluğa katkıda bulunan üretimi, yaşamları, sağlığı, geçim kaynaklarını, varlıkları ve altyapıyı doğrudan etkiler. Ancak kuraklığın çevresel bozulma ve hanehalkı refahının azalması üzerindeki dolaylı etkileri, bitki ve hayvan fiyatları üzerindeki doğrudan etkilerinden daha büyük olabilir. Kuraklığın değişken doğası ulusal sınırları aşarak resmi olmayan risk yönetimi düzenlemelerini etkisiz hale getirebilir (Shiferaw ve ark., 2014).

Başa Çıkma Yeteneği (Uyum Kapasitesi, Dayanıklılık)

Uyum kapasitesi (adaptive capacity, coping ability, resilience), tarımsal kuraklık durumuyla başa çıkma yeteneğidir. İnsanlar, ekolojik

özellikleri manipüle eden doğal kaynak yönetimi eylemleri yoluyla kuraklığa duyarlılığı ve uyum kapasitesini etkileyebilir (Crausbay ve ark., 2017). Başa çıkma stratejileri, geçim kaynağı kaybıyla tehdit edilen insanlar tarafından gerçekleştirilen eylemlerdir. Bu, kuraklığın etkilerini azaltmak için kuraklık sırasında ve sonrasında kaynakların yönetilmesini içerir. Başa çıkma mekanizmaları, mevcut yapılar ve sistemler içerisinde meydana gelen eylem ve faaliyetlerdir. Yeni ürün çeşitlerinin tanıtılması, tarımsal uygulamaların zamanının değiştirilmesi, ürün rotasyonu, ürün çeşitliliğini teşvik etme, çiftçileri iklim değişikliği konusunda eğitmek bunlar arasındadır (Shikwambana ve ark., 2022).

Çoğu zaman, haneler ve topluluklar daha küçük iklim dalgalanmalarına ve normalden orta dereceli sapmalara uyum sağlayabilirler, ancak aşırı olaylarla ve büyük ölçekli sapmalarla başa çıkmak genellikle başa çıkma aralığının dışında kalır. Zaman sınırı açısından daha kısa süreli tolerans, başa çıkma yeteneği olarak bilinirken, daha uzun süreli tolerans, uyum kapasitesi olarak adlandırılır. İklim değişikliğiyle ilgili etkilere uyum sağlama kapasitesini oluşturan faktörler arasında yönetim yeteneği, finansal kaynaklara erişim, teknoloji kullanımı, altyapı, bilgi ve beceriler, yönetişim, kurumlar ve sosyal ağlar yer alabilir. IPCC (Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli) (Intergovernmental Panel on Climate Change) raporları uyum sağlama kapasitesini "bir sistemin, potansiyel zararları hafifletmek, fırsatlardan yararlanmak, potansiyel zararlarla başa çıkmak için uyum sağlama ve sonuçlara yanıt verme yeteneği" olarak tanımlamaktadır. Uyum sağlama kapasitesini ölçmek için yapılan çalışmaların birçoğunda niceliksel yaklaşımlar kullanılmış ve ülke düzeyinde yürütülmüştür

ancak uyarlanabilir kapasite bağlama özgüdür ve eşit olmayan şekilde dağılmıştır. Uyum kapasitesi dinamikdir ve zamana ve diğer bağlamsal faktörlere göre değişir (Matewos, 2020).

Etki Azaltma, Hazırlıklı Olma ve Müdahale

Savunmasız insanlar için felaket niteliğindeki kayıplar, ulusal ve uluslararası aktörler açısından belirsiz kalır veya nispeten önemsiz görünür. Bunun nedeni, çoğu ulusal muhasebe sisteminin, savunmasız toplulukların ve bireylerin resmi ve gayri resmi ulusal ekonomilere yaptıkları katkıları tanımakta başarısız olmasıdır. Bu toplulukların bel bağladığı ekosistem hizmetlerinin değerinin de farkında değillerdir. Ayrıca, devam eden kuraklık krizlerinin küresel ve bölgesel maliyetleri ve bunların diğer tehditlerle etkileşimi, tek tek ülkelerde meydana gelen etkilerin maliyetinin toplamından daha fazla olabilir. Bu sorunların bir sonucu olarak, kuraklığın, bozulmanın ve çölleşmenin önlenabilir maliyetleri küresel olarak hafife alınır ve basit önleyici faaliyetler rutin olarak göz ardı edilir, önceliklendirilmez ve yetersiz finanse edilir (King-Okumu ve ark., 2020).

Ekolojik kuraklığın etkilerini azaltma işi politikalarda, yönetim uygulamalarında ve su altyapısında yapılacak çeşitli değişikliklerle mümkün olabilir. Hem insanlara hem de çevreye yardımcı olabilecek bir diğer adım, insanların su akışını nasıl değiştireceğini belirleyen yasa ve düzenlemeleri iyileştirmektir (Crausbay ve ark., 2017).

Kuraklık maliyetleri, kuraklık hasar maliyetleri ve kuraklığı hafifletme veya uyum politikalarının maliyetleri olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca hasar maliyetleri doğrudan, dolaylı ve piyasa

dışı maliyetlere ayrıştırılabilir. Kuraklığın doğrudan maliyetlerinin değerlendirilmesi için en uygun yöntemler arasında piyasa değerlendirme teknikleri yer almaktadır. Bunlar herhangi bir ekonomik sektöre uygulanabilir, uygulanması nispeten kolaydır ve oldukça kesin tahminler sağlar. Kuraklığın dolaylı maliyetlerinin değerlendirilmesi için hesaplanabilir genel denge (CGE, computable general equilibrium) analizi ve girdi-çıktı analizi (input-output analysis) en eksiksiz yöntemlerdir çünkü ekonominin tüm sektörlerini hesaba katarlar. Ancak her ikisinin de çeşitli sınırlamaları vardır. Biyofiziksel-tarımsal-ekonomik modelleme (Biophysical-agroeconomic modelling) ve Ricardocu hedonik fiyat modellemesi (Ricardian hedonic price modelling) tarım sektörüne odaklanırken, birleşik hidrolojik-ekonomik modelleme (hydrological-economic modelling) su kullanımıyla doğrudan ilgili maliyetleri kapsar. Dolayısıyla bu yöntemler kuraklık maliyetlerinin yalnızca bir kısmını değerlendirebilmektedir. Koşullu değerlendirme (CVM, contingent valuation) ve seçim deneyleri (CE, choice experiments), bireylerin ödeme istekliliğini ortaya çıkarmak için alternatif yöntemlerdir ve benzer tahminlere ulaşmaları beklenir. Son zamanlarda seçim deneyleri, koşullu değerlemeye göre çeşitli avantajları nedeniyle daha popüler hale gelmiştir, ancak aynı zamanda daha talepkardır. Yaşam memnuniyeti analizi (life satisfaction analysis) hem CVM'nin hem de CE'nin yerine geçen bir yaklaşım olarak görülebilir. Bununla birlikte, CVM ve CE sıklıkla varsayımsal veya gelecekteki değişiklikleri hesaplamak için kullanılırken, yaşam memnuniyeti analizi yalnızca mevcut veya geçmiş durumlara uygulanır. Etki sonrası müdahalelerden, etki öncesi kuraklığı hafifletme politikalarına doğru daha etkili bir geçişe ihtiyaç vardır (Logar & Van den Bergh, 2013).

Toplulukların ve ülkelerin beklenen olaylara nasıl hazırlandıkları, dirençli sistemlerin geliştirilmesi açısından önemlidir. Afet riskinin dört öncelik aracılığıyla ele alınması önemlidir:

- Afet riskini anlamak
- Afet riski yönetimini güçlendirmek
- Afet riskinin azaltılmasına yatırım yapmak
- Müdahaleye hazırlığın artırılması, iyileşme ve rehabilitasyonda “daha iyiyi yeniden inşa etme” hedefi.

Afetlere hazırlık, müdahale ve kurtarma tedbirlerinin organizasyonu, planlanması ve uygulanması aşamasında müdahaleler yapısal olabilir (örn. barajlar, taşkın vergileri, tahliye barınakları) veya yapısal olmayabilir (örn. inşaat kuralları, arazi kullanımı planlama yasaları ve yönetmelikleri, kamuyu bilinçlendirme programları) ve reaktif (örn. müdahale odaklı) veya proaktif (yani riskin azaltılması) olabilir (Raikes ve ark., 2019).

Erken kuraklık bilgisi sağlamaya yönelik en yaygın iki yaklaşım dinamik modelleme ve istatistiksel modellemedir. İkinci yaklaşım, regresyon analizi ve stokastik, olasılıksal ve yapay zeka tabanlı modellemeyi içerir (Fung ve ark., 2020). Dinamik modelleme gerçek zamanlı sonuçlar sağlayabilir. Yağış, akarsu akışı ve sıcaklık gibi doğru gerçek zamanlı çevresel izleme bilgileri ve daha geniş dünya hava durumu veya toprağın su içeriği gibi uzaktan algılama verileri göz önüne alındığında, kuraklık izleme ve tahmin sistemleri oluşturulabilir (Li ve ark., 2019). Dinamik modellemeden elde edilen sonuçlar meteorolojik kuraklık için tahminler ve uyarılar sağlayabilir. Hidrolojik modelleme ve

sosyo-ekonomik yöntemlerin yanı sıra diğer üç kuraklık türü de değerlendirilebilir (Forni ve ark., 2016). Dinamik modelleme genellikle daha geniş alanlarda büyük ölçekli gözlemleri içerir ve model yapısının kendisi ve hesaplama kaynaklarının gerekliliği gibi karmaşıklığı, dinamik kuraklık modellemesinin bireyler tarafından benimsenmesini zorlaştırır. Uzaktan algılama verileri gibi izleme bilgileri girdi görevi görür ve bu nedenle doğruluğu, dinamik modellemenin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Buna karşılık istatistiksel modelleme, dinamik modellemeye göre nispeten daha basittir. Kuraklığın etkisini değerlendirmek ve yoğunluk şiddeti ve mekansal kapsam gibi kuraklık parametrelerini tanımlamak için birçok kuraklık indeksi türetilmiştir. Bu indeksler/göstergeler standartlaştırılmış yağış indisi (SPI, Standardised Precipitation Index), akım kuraklık indeksi, standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon indeksi, erinç kuraklık indeksi, keşif kuraklık indeksi, de martonne kuraklık indeksi, palmer kuraklık indeksi, Mann-kendall trend analizi gibi yöntemlere dayalı olarak belirlenmektedir. Bunlar arasında, yağış su kaynaklarının birincil kaynağı olduğundan, standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) farklı ülkeler tarafından en çok benimsenen endekstir. Birçok çalışma, çeşitli zaman ölçeklerinde (24 aya kadar) kuraklık koşullarını makul bir doğrulukla tahmin etmek için SPI'yi uygulamıştır (Bahrami ve ark., 2019). Farklı istatistiksel modellerin avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin regresyon modeli en basit ve en doğrudan modeldir. Doğrusallık varsayımı, daha uzun vadeli tahmini için uygulanmasını sınırlayabilir. Olasılıksal modeller iyi performans gösterir ancak diğer istatistiksel modellerle karşılaştırıldığında daha büyük hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duyar (Yang & Liu, 2020).

Sel tahminine benzer şekilde, kuraklık tahmini de geleneksel olarak dinamik modellemeye veya gözleme dayalı indekslemeye dayalı olarak yapılmasına rağmen son zamanlarda yapılan çalışmalarda eğilim yapay zekanın uygulanmasına doğru kaymaktadır (Kousari ve ark., 2017). Taşkın tahmininde en çok uygulanan modellemede olduğu gibi, ANN, ANFIS ve SVM de kuraklık tahmini için en çok bahsedilen modellerdir. SVM modeli, özellikle uzun vadeli tahminler açısından diğer yapay zeka modellerinden daha iyi performans gösteriyor gibi görünmektedir (Mokhtarzad ve ark., 2017). Bu, SVM'lerin genelleme hatasını en aza indirmeye çalışması, diğer modellerin ise eğitim hatasını en aza indirmeye çalışmasıyla açıklanabilir. Avantajı aşırı uyumdan ve yerel minimumlardan kaçınmaktır. Tahminler veya uyarılar sağlamak için hangi veriye dayalı modellerin kullanıldığına bakılmaksızın, uzun vadeli ve doğru izleme bilgilerinin girdi olarak kullanılması önemlidir ve tahmin performansı üzerinde önemli etkileri vardır (Yang & Liu, 2020).

Uzaktan algılama teknolojisinin giderek daha fazla işlem yapması, coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve küresel konumlandırma sisteminin gelişmesiyle birlikte, geniş alanlardaki kuraklığın gerçek zamanlı olarak izlenmesi sağlanabilmektedir. Uzaktan algılama ve CBS teknikleri, dünyanın birçok yerinde kullanımının da gösterdiği gibi, giderek daha fazla yararlı kuraklık tespit teknikleri olarak kabul edilmektedir. Uzaktan algılama verilerinden geliştirilen Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Arazi Yüzey Sıcaklığı (LST) gibi bazı indeksler, tarımsal kuraklıkların bitki büyümesiyle ilişkisini izlemek için kullanılmaktadır (Belal ve ark. , 2014).

Kuraklık ve Finansal Koruma

Risk birikimini azaltmak için etkili iklim değişikliği politikalarına ve aşırı bir olayın meydana gelmesi durumunda mali kayıpların korunmasına, paylaşılmasına veya aktarılmasına yardımcı olacak araçlara ihtiyaç vardır. Toplu olarak finansal koruma olarak bilinen bu araçlar, insanların iklimle bağlantılı felaketlerin etkileriyle başa çıkmalarına, iyileştirme ve yeniden inşa maliyetlerini azaltmalarına ve risk azaltımını teşvik etmelerine yardımcı olabilir. Kalkınma planlaması ve politikasında mali koruma ile iklim adaptasyonunun ilişkilendirilmesi, etkilenen toplulukların dayanıklılığını artırma potansiyeline sahiptir (Campillo ve ark., 2017).

Kurulacak fonun hedefi; kuraklığın farklı aşamalarında kuraklığa zamanında müdahaleyi kolaylaştırmak, kuraklığın olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla ortak bir acil durum fonu sağlamak, kuraklık yönetimini geliştirmek amacıyla kapasite ve teknik uzmanlığın geliştirilmesi için fon sağlamak ve belirtilen amaçların gerçekleştirilmesine yönelik proje, faaliyet veya programların oluşturulmasını, yönetimini ve koordinasyonunu finanse etmek olmalıdır (King-Okumu ve ark., 2020).

Ghesquiere ve Mahul (2010), afet sonrası farklı aşamalarda farklı finansman araçlarının kullanılması gerektiğini öne sürmüştür. Etkin bir finansal koruma stratejisi tasarımında, finansal araçların kapasiteyle senkronize olması nedeniyle zaman boyutunun dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Araştırmacılar, finansman araçlarını ön finansman ve afet sonrası finansman araçları olarak ikiye ayırmaktadır.

Hükümetler bir finansal koruma stratejisi tasarlamak için ülkenin ekonomik kalkınma düzeyini de dikkate alacaktır (Michel-Kerijan ve ark., 2011). Örneğin Japonya'da afetlere karşı ayrılan hükümet bütçeleri, ulusal bütçelerdeki genel fonun yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Hükümetlerin temel amacı, bol miktarda yeniden inşa fonu kullanarak yeniden inşayı tamamlamaktır ancak bu olasılık, hükümet finansmanı üzerinde ağır bir yüke yol açmaktadır. Devlet tahvilleri, vergiden düşülebilir rezervler ve sigortayla ilgili mali araçlar dahil olmak üzere dört afet riski finansman aracı genellikle hükümetler tarafından kullanılmaktadır. Ayrıca endekse bağlı sigorta (index-linked insurance), sigortaya bağlı menkul kıymetler (ILS, insurance-linked securities), sigortayla ilgili finansal araçlar ve kamu-özel ortaklığı (PPP, public-private partnership) yer almaktadır (Lo ve ark., 2016).

Çoğu düşük gelirli ekonomilerde, doğal afetlere karşı mali güvenceye yönelik tutarlı bir ulusal strateji çoğunlukla mevcut değildir. Sonuç olarak, bir felaket meydana geldiğinde ülke esas olarak IMF, Dünya Bankası, Avrupa Komisyonu, Amerikalılar Arası Kalkınma Bankası, BM Kalkınma Programı, Asya Kalkınma Bankası ve özel hayır kurumları gibi uluslararası bağışçılardan gelen, sonradan sağlanan finansmana bağımlıdır. Mağdurlar genellikle maddi yardım almadan önce aylarca beklerler. Çoğu zaman, bu düşük gelirli ülkelerin çoğunun hükümetlerinin başka seçeneği kalmaz çünkü sürdürülebilir risk finansmanı çözümlerini önceden ve kendi başlarına uygulayacak kurum içi teknik uzmanlığa sahip değildirler. Bir ülke ekonomik olarak geliştikçe ve hükümetin vergiler yoluyla erişebileceği gelir düzeyi arttıkça, hükümet genellikle felaket riskleri için fiili yardım sağlayıcı

haline gelir. Merkezi hükümetten gelen afet sonrası finansman, yerel geleneklerin daha iyi anlaşılmasıyla birlikte (uluslararası bağışçılara tam güven ile karşılaştırıldığında) daha hızlı yardım sağlar, afet yardımının koordinasyonunda daha fazla etkinlik sağlar. Ekonomik kalkınma düzeyi geliştikçe, sıklıkla özel afetler için risk finansmanı çözümleri oluşturulduğunu görürüz. Nüfusun büyük bir kısmını kapsamasa da kamu ve özel sigorta ile mikro sigorta mevcuttur. Bu düzeyde, özel sigortacılar bireylere, işletmelere ve şirketlere mülk ve kaza sigortası alternatifleri sunmak için çeşitli ürünler sunmaya başlar. Zengin ülkelerde ise sigorta penetrasyonu ve uzmanlığı çok daha iyi gelişmiş durumdadır. İnsanlar genellikle sigorta piyasaları veya ulusal kamu sigorta programı aracılığıyla elde edilen sigorta teminatı için ödeme yapabilirler. Yine de, en zengin ülkelerde bile hükümet, gerçekten felaket niteliğindeki riskler için veya daha genel olarak özel sektörün tek başına üstlenmek istemediği risklerde bir çeşit sigorta sağlamada önemli bir rol oynamaya devam etmektedir. Bu tür uygulama örnekleri ABD, Japonya, Almanya, Fransa ve İngiltere'de görülmektedir (Michel-Kerijan ve ark., 2011).

KAYNAKÇA

- Bachmair, S., Svensson, C., Prosdocimi, I., Hannaford, J., & Stahl, K. (2017). Developing drought impact functions for drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(11), 1947-1960.
- Bahrami, M., Bazrkar, S., & Zarei, A. R. (2019). Modeling, prediction and trend assessment of drought in Iran using standardized precipitation index. *Journal of Water and Climate Change*, 10(1), 181-196.
- Belal, A. A., El-Ramady, H. R., Mohamed, E. S., & Saleh, A. M. (2014). Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 35-53.
- Campillo, G., Mullan, M., & Vallejo, L. (2017). Climate change adaptation and financial protection: synthesis of key findings from Colombia and Senegal. *OECD Environment Working Papers*, No. 120, OECD Publishing, Paris.
- Crausbay, S. D., Ramirez, A. R., Carter, S. L., Cross, M. S., Hall, K. R., Bathke, D. J., ... & Sanford, T. (2017). Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12), 2543-2550.
- Cookson, E., Hill, D. J. & Lawrence, D. (2019). Impacts of long term climate change during the collapse of the Akkadian Empire. *Journal of Archaeological Science*, 106, 1-9.
- Ding, Y., Hayes, M. J., & Widhalm, M. (2011). Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 20(4), 434-446.
- Dumitrascu, M., Mocanu, I., Mitrică, B., Dragotă, C., Grigorescu, I., & Dumitrică, C. (2018). The assessment of socio-economic vulnerability to drought in Southern Romania (Oltenia Plain). *International journal of disaster risk reduction*, 27, 142-154.
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., Chandrapala, L., & Fernando, K. (2010). Impacts of climate change on water resources and agriculture in Sri Lanka: a review and preliminary vulnerability mapping. *Mapping 135 Research IWMI (International Water Management Institute) Report*. ISBN: 978-92-9090-727-5, Sri Lanka, pp. 57.
- Forni, L. G., Medellín-Azuara, J., Tansey, M., Young, C., Purkey, D., & Howitt, R. (2016). Integrating complex economic and hydrologic planning models: An application for drought under climate change analysis. *Water Resources and Economics*, 16, 15-27.

- Fung, K. F., Huang, Y. F., Koo, C. H., & Soh, Y. W. (2020). Drought forecasting: A review of modelling approaches 2007–2017. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 771-799.
- Funk, C., & Shukla, S. (2020). Chapter 6 - Tools of the trade 3—mapping exposure and vulnerability. In: *Drought early warning and forecasting: theory and practice*. Elsevier. Pages 83-99, ISBN 9780128140116.
- Ghesquiere, F., & Mahul, O. (2010). Financial protection of the state against natural disasters: a primer. *World Bank Policy Research Working Paper*, (5429).
- Jayanthi, H., Husak, G. J., Funk, C., Magadzire, T., Chavula, A., & Verdin, J. P. (2013). Modeling rain-fed maize vulnerability to droughts using the standardized precipitation index from satellite estimated rainfall—Southern Malawi case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 4, 71-81.
- Kahil, M. T., Dinar, A., & Albiac, J. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology*, 522, 95-109.
- King-Okumu, C., Orindi, V. A., & Lekalkuli, L. (2019). Drought management in the drylands of Kenya: what have we learned?. In *Current Directions in Water Scarcity Research* (Vol. 2, pp. 277-294). Elsevier.
- King-Okumu, C., Tsegai, D., Pandey, R. P., & Rees, G. (2020). Less to lose? Drought impact and vulnerability assessment in disadvantaged regions. *Water*, 12(4), 1136.
- Kousari, M. R., Hosseini, M. E., Ahani, H., & Hakimelahi, H. (2017). Introducing an operational method to forecast long-term regional drought based on the application of artificial intelligence capabilities. *Theoretical and applied climatology*, 127, 361-380.
- Lee, J. W., Hong, E. M., Jang, W. J., & Kim, S. J. (2022). Assessment of socio-economic drought information using drought-related Internet news data (Part A: Socio-economic drought data construct and evaluation socio-economic drought information). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75, 102961.
- Li, Y., Yuan, X., Zhang, H., Wang, R., Wang, C., Meng, X., ... & Yao, Y. (2019). Mechanisms and early warning of drought disasters: Experimental drought meteorology research over China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(4), 673-687.
- Lo, S. F., Wu, C. Y., & Lin, C. H. (2016). Financial support mechanisms and financing instruments for climate change adaptation. *Journal of Environmental Protection*, 7(02), 242.

- Logar, I., & Van den Bergh, J. C. (2013). Methods to assess costs of drought damages and policies for drought mitigation and adaptation: review and recommendations. *Water resources management*, 27, 1707-1720.
- Marin, G., & Modica, M. (2017). Socio-economic exposure to natural disasters. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 57-66.
- Matewos, T. (2020). The state of local adaptive capacity to climate change in drought-prone districts of rural Sidama, southern Ethiopia. *Climate risk management*, 27, 100209.
- Mehran, A., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(15), 7520-7533.
- Mera, G. A. (2018). Drought and its impacts in Ethiopia. *Weather and climate extremes*, 22, 24-35.
- Michel-Kerjan, E., Zelenko, I., Cardenas, V., & Turgel, D. (2011). Catastrophe Financing for Governments. Working Paper.
- Mokhtarzad, M., Eskandari, F., Jamshidi Vanjani, N., & Arabasadi, A. (2017). Drought forecasting by ANN, ANFIS, and SVM and comparison of the models. *Environmental earth sciences*, 76, 1-10.
- Mullan, B., Porteous, A., Wratt, D., & Hollis, M. (2005). Changes in drought risk with climate change. Prepared for Ministry for the Environment (NZ Climate Change Office) and Ministry of Agriculture and Forestry. NIWA Client Report: WLG2005–23.(National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington).
- Murthy, C. S., Laxman, B., & Sai, M. S. (2015). Geospatial analysis of agricultural drought vulnerability using a composite index based on exposure, sensitivity and adaptive capacity. *International journal of disaster risk reduction*, 12, 163-171.
- Pulwarty, R. S., & Sivakumar, M. V. (2014). Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. *Weather and Climate Extremes*, 3, 14-21.
- Raikes, J., Smith, T. F., Jacobson, C., & Baldwin, C. (2019). Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101207.
- Ravindranath, N. H., Rao, S., Sharma, N., Nair, M., Gopalakrishnan, R., Rao, A. S., ... & Bala, G. (2011). Climate change vulnerability profiles for North East India. *Current Science*, 384-394.

- Senay, G. B., Velpuri, N. M., Bohms, S., Budde, M., Young, C., Rowland, J., & Verdin, J. P. (2015). Drought monitoring and assessment: remote sensing and modeling approaches for the famine early warning systems network. In *Hydro-meteorological hazards, risks and disasters* (pp. 233-262). Elsevier.
- Shi, H., Chen, J., Wang, K., & Niu, J. (2018). A new method and a new index for identifying socioeconomic drought events under climate change: A case study of the East River basin in China. *Science of the Total Environment*, 616, 363-375.
- Shiferaw, B., Tesfaye, K., Kassie, M., Abate, T., Prasanna, B. M., & Menkir, A. (2014). Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. *Weather and climate extremes*, 3, 67-79.
- Shikwambana, S., Malaza, N., & Ncube, B. (2022). Enhancing the resilience and adaptive capacity of smallholder farmers to drought in the Limpopo Province, South Africa. *Conservation*, 2(3).
- Silva, B. C. H. (2022). Development of microservice-based Open Source Banking Platform context for regional and human development in Sobral, Northeast Brazil. Federal University of Ceara.
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., ... & Van Lanen, H. A. (2016). Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 801-819.
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Kampragou, E., van Loon, A. F., Barker, L. J., Melsen, L. A., Bifulco, C., Musolino, D., de Carli, A., Massarutto, A., Assimacopoulos, D., and van Lanen, H. A. J. (2016). Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 801–819, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>.
- Stephan, R., Erfurt, M., Terzi, S., Žun, M., Kristan, B., Haslinger, K., & Stahl, K. (2021). An Alpine Drought Impact Inventory to explore past droughts in a mountain region. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-25. <https://nhess.copernicus.org/articles/21/2485/2021/nhess-21-2485-2021-supplement.pdf>
- Tsheko, R. (2003). Rainfall reliability, drought and flood vulnerability in Botswana. *Water Sa*, 29(4), 389-392.
- Vargas, J., & Paneque, P. (2019). Challenges for the integration of water resource and drought-risk management in Spain. *Sustainability*, 11(2), 308.

- Vogt, J., Naumann, G., Masante, D., Spinoni, J., Cammalleri, C., Erian, W., ... & Barbosa, P. (2018). Drought risk assessment and management. A Conceptual Framework.
- Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V., & Pulwarty, R. (2014). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and climate extremes*, 3, 4-13.
- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., & Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21, 763-774.
- Wilhelmi, O. V., & Wilhite, D. A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study. *Natural Hazards*, 25, 37-58.
- Yang, T. H., & Liu, W. C. (2020). A general overview of the risk-reduction strategies for floods and droughts. *Sustainability*, 12(7), 2687.
- Zhao, M., Huang, S., Huang, Q., Wang, H., Leng, G., & Xie, Y. (2019). Assessing socio-economic drought evolution characteristics and their possible meteorological driving force. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.

BÖLÜM 5

KURAKLIĞIN EKOLOJİK ETKİLERİ

ZYM. Oktay YELMEN ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759152>

¹ Tarım ve Orman İl Müdürlüğü, Adana, Türkiye. oktay.yelmen@tarimorman.gov.tr,
Orcid ID: 0000-0001-8569-1362

1. Giriş

Kuraklığın sıklığı ve şiddetindeki artışların biyoçeşitliliğin korunması üzerinde ciddi olumsuz etkileri vardır çünkü kuraklık bitki ve hayvan türlerinde üreme etkinliğini azaltır ve ölüm oranlarını artırır (Bourne ve ark., 2020). Kuraklığın ekolojik sonuçları son yıllarda büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bu nedenle kuraklığın ekosistemler üzerindeki etkisini karakterize etmek için yeni bir kuraklık kategorisi olarak ekolojik kuraklık önerilmiştir. Ekolojik kuraklık çerçevesinin temeli, su mevcudiyeti ölçüsü ile organizma performansı endeksi arasındaki bağlantıdır (Nam ve ark., 2015). Bir organizmanın performansı, ekosistemin büyümesini, hayatta kalmasını, doğurganlığını ve madde döngüsünü içerir (Cravens ve ark., 2021). Ekosistemlerde kuraklık değişiklikleri ortaya çıktığında, insan toplumları üzerinde bir dalgalanma etkisi oluşur (Sadiqi ve ark., 2022).

Tür etkileşimleri, çevresel stres faktörlerine karşı topluluk ve ekosistem tepkilerinin önemli araçlarıdır. Ancak, değişen tür etkileşimleri yoluyla ortaya çıkan stresin dolaylı ekolojik etkilerine ilişkin mekanik bir anlayışa hâlâ sahip değiliz. Tür etkileşimlerinin çevresel stres etkenleri tarafından nasıl değiştirileceğini anlamak için, bu tür stres etkenlerine karşı savunmasız olan türlerin ekosistem üzerinde de büyük etkileri olup olmadığını bilmemiz gerekir. Yırtıcı hayvanlar sıklıkla strese karşı yüksek hassasiyetle bağlantılı belirli özellikler sergilediklerinden (örneğin, büyük vücut büyüklüğü, uzun nesil süresi) ve aynı zamanda topluluklar üzerinde büyük etkilere sahip olduklarından (örneğin, yukarıdan aşağıya trofik etkiler), yırtıcıların özellikle çevresel stresin ekolojik etkilerine aracılık etmesi muhtemeldir (Amundrud &

Srivastava, 2016).

Kuraklık gibi çevresel stresin ekolojik topluluklar üzerindeki etkilerini anlama çabaları geleneksel olarak stresin bireysel türler üzerindeki doğrudan, fizyolojik etkilerine odaklanmıştır. Ancak çevresel stresin dolaylı etkilerinin, yani değişen tür etkileşimlerinin aracılık ettiği etkilerin de en az onlar kadar önemli olduğuna dair kanıtlar artmaktadır. Dahası, toplulukların çevresel strese tepkisi tüm ekosistem için sonuçlar doğurabilir. Türler, karbonun ve besinlerin akışını ve dönüşümünü belirleyen aktif faktörlerdir; dolayısıyla tür kompozisyonu ve bolluğundaki herhangi bir değişiklik bu ekosistem süreçlerini değiştirebilir. Örneğin kuraklık, baskın ot tiplerini değiştirerek ve genel otların bolluğunu azaltarak çayır topluluklarının birincil üretimini azaltabilir (Hoover ve ark. 2014).

2. Kuraklığın arılara etkisi

Potansiyel tozlayıcıların azalmasıyla ilgili son zamanlarda dikkatleri iki grup arı çekmektedir: Avrupa bal arısı (*Apis mellifera*) ve bombus arıları (*Bombus* spp.). 1990'lı yıllarda, dünyanın birçok yerinde *Apis mellifera* kolonilerinin ölüm oranları, parazitik bir akar olan *Varroa*'nın yayılmasıyla bağlantılı olarak artmıştı. 2006 kışında, Kuzey Amerikalı arıcılar yeni bir semptom sendromu olan koloni çöküşü bozukluğu (CCD) ile bağlantılı olarak kış kolonisi kayıplarında büyük bir artış olduğunu bildirmişlerdir (Steinhauer ve ark. 2014). Benzer şekilde, yakın zamanda peyzaj ölçeğinde yapılan birkaç çalışma, bazı Kuzey Amerika Bombuslarının menzili ve bolluğunda azalma olduğuna dair kanıtlar göstermektedir. Arı popülasyonları zaman içinde büyük

dalgalanmalar gösterebilir ve farklı çevresel faktörlerin varyasyonu tetikleyen etkileri iyi anlaşılmamıştır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, bu sistemlerin düşünülenden daha karmaşık şekillerde abiyotik faktörlerle etkileşime girdiğini öne sürmüştür (Miller-Struttmann ve Galen 2014). Birçok kısa dönemli gözlemsel çalışma, *Apis mellifera*'nın bitki kullanımı açısından yerli arılarla büyük ölçüde örtüşebildiğini ve onları en zengin çiçek kaynaklarından uzaklaştırabildiğini göstermektedir, ancak rekabetin gücü mevsimler içinde ve mevsimler arasında önemli ölçüde değişiklik gösterebilir (Thomson, 2016).

Verimsiz ortamlar genellikle tüketici popülasyonlarını üretici popülasyonlara göre daha güçlü bir şekilde sınırlandırmaktadır, bu durum ortak uzmanlaşmasının maliyet ve faydalarına ve dolayısıyla tozlaşma hizmetlerine yönelik sonuçlar doğurmaktadır Böcek büyümesi ve üremesi üzerindeki zamansal kısıtlamalardaki değişiklikler, küresel ısınmanın rakım ile tüketici nüfus artışı arasındaki ilişkiyi yeniden düzenlediğini göstermektedir. Tozlaşma hizmetlerinin kalitesi, polen veren ve alan arasındaki ilişkinin bir fonksiyonudur. Ev sahibi bitkinin çiçek tüpü uzunluğu ile çiçek ziyaretçisinin dil uzunluğu arasındaki eşleşmenin, bombus arısı türleri arasında kaynak paylaşımına yol açtığı düşünülmektedir (Pyke ve ark. 2012). Çevresel stres, eşleştirmenin maliyet ve faydalarını değiştirerek bu ilişkiyi etkileyebilir. Bombus arısı bolluğunun ve kaynaklar için rekabetin yüksek olduğu nispeten iyi koşullar altında, uzun dilli arılar uzun tüplü çiçekler üzerinde uzmanlaşma eğilimindeyken, kısa dilli arılar genelleşir (Miller-Struttmann ve Galen 2014). Su mevcudiyetinin azalması, bitkilerde

çiçek gelişimini etkileyen fizyolojik strese neden olabilir ve bu da çiçek morfolojisinde ve polen taşıyıcılarla etkileşime aracılık eden özelliklerde değişikliklere yol açabilir. Çiçek özelliklerinde kuraklığın neden olduğu değişiklikler, tozlayıcı ziyaretlerini etkileyebilir. Toprak nemi mevcudiyetinin düşük olduğu durumlarda ziyaretlerin azalması, çiçek sayısının azalması ve dolayısıyla çekiciliğin azalması ve/veya arıların daha küçük çiçekleri idare etmede yaşadığı zorlukların artması söz konusu olabilir (Kuppler ve ark., 2021).

Değişen iklimle birlikte, yağış rejimlerinde düşüşler polen taşıyıcıları doğrudan ve dolaylı olarak etkileyebilir. Doğrudan etkiler arasında zamanla kolonileşmenin azalması, popülasyonların azalması ve uygun olmayan iklime sahip bölgelerdeki yok oluşlar yer almaktadır. Dolaylı etkiler arasında yuvalama ortamlarının azalması, fenolojik uyumsuzluk veya çiçek kaynakları ve fenotiplerdeki değişiklikler yer almaktadır. Çiçek özellikleri bitki-tozlayıcı etkileşimlerinde merkezi bir rol oynadığından, bunların değişiklikleri bu etkileşimleri bozabilir veya değiştirebilir ve bitkiler ve hayvanlar için sonuçlar doğurabilir (Burkle ve Runyon 2016). Bu nedenle, abiyotik koşulların çiçek özellikleri üzerindeki etkisinin anlaşılması, bitki-tozlayıcı etkileşimlerinin çevresel değişim tarafından nasıl değişeceğine ilişkin genel resimde önemli bir yapboz parçasını temsil etmektedir. Azalan su mevcudiyeti bitkilerde fizyolojik strese neden olabilir ve bu da bitkisel ve çiçek fenotiplerinde değişikliklere neden olabilir. Çiçek üretimi ve bakımı, ihtiyaç duyulan karbon, besin maddeleri, su kaynakları ve enerji açısından maliyetlidir. Bu nedenle, su mevcudiyeti azalan bitkiler genellikle daha küçük, daha az ve/veya kısa ömürlü çiçekler üretir (Gallagher ve Campbell 2017).

Daha az sayıda çiçek/çiçek salkımı ve dolayısıyla bitki başına daha az kaynak, ziyaret oranlarını azaltabilir. Daha küçük çiçek boyutu, nektar tüpü derinliği ve taç boyutundaki değişiklikler özellikle önemlidir. Bu nedenle kuraklık, azalan çiçek teşhiri ve boyutu ile azalan ziyaret oranları arasında korelasyon olmasını bekleyebiliriz. Kuraklık ile çiçek gösterimi/boyutu arasında beklenen bu korelasyon, çeşitli çalışmalarda tespit edilmiştir (Gallagher ve Campbell 2017, Glenny ve ark. 2018).

Çiçekler, tozlayıcı böcekleri çeken ve sonrasında tozlaşmayı sağlayan çoklu özelliklere sahiptirler. Çiçeklerde bu özellikleri sağlayan organlar, tozlayıcı böcekleri çekme ve tozlaşma etkinliği yani “çiçek-tozlayıcı uyumu” oluşturmak için çeşitli işlevlerle ilişkilendirilir. Tozlayıcı böcekleri çekme (çekicilik) özelliği genellikle çiçek kokusu, rengi, çiçek bolluğu ve kısmen de morfolojiyle ilişkilendirilir, oysa ercik ve stigmanın konumu veya nektar tüpünün genişliği gibi spesifik morfolojik özellikler de çekicilik ile doğrusal bir ilişki içerisindedir ve bu ilişki genellikle başarılı tozlaşma için kritik öneme sahiptir. Cazibe özellikleriyle ilgili olarak, azalan su mevcudiyeti, koku bileşimini ve emisyon oranlarını değiştirebilir, oysa rengin etkilenmeden kaldığı gösterilmiştir. Ek olarak, su içeriği yüksek olan bitkiler daha fazla miktarda nektar üretebilir ve dolayısıyla daha çekici hale gelebilir (Kuppler ve ark., 2021).

Dünya çapındaki çoğu çöl arısı yerde yuva yapar ve yalnızdır ve birçoğu uzun süreli diyapozda kalabilir. Rekor süreler, 10 yıl sonra ortaya çıkan bir Avustralya türü'ne ve 7 yıl sonra ortaya çıkan bir Pakistan türü'ne aittir. Çöllerin bulunduğu tüm kıtalardaki bazı arı türlerinin, ortaya çıkmayı en az 1 yıl geciktirebildikleri bilinmektedir

(Minckley ve ark., 2013).

İğnesiz arılar (*Apidae*, *Meliponini*), birçok tropikal karasal ekosistemde en yaygın ve bol miktarda bulunan yerli çiçek ziyaretçileri arasındadır ve dolayısıyla bu bölgelerde vazgeçilmez tozlaştırıcılardır. Ağırlıklı olarak dünya çapında tropik habitatlarda yaşayan 510'dan fazla türden oluşan bu son derece sosyal arı grubu, bal arılarından (*Apidae*, *Apini*) birçok biyolojik açıdan farklılık göstermektedir. Bunlardan biri, bal arılarının oğul verme davranışının tersine, iğnesiz arılarda kademeli ve aşamalı olarak yeni kolonilerin kurulmasıdır. Dünyadaki tüm tropikal bitki örtüsü türlerinin %42'si kuru ormanlardır. Bu ekosistemler, 3-9 aya yayılan yıllık ortalama 400 ila 1800 mm yağışla karakterize edilir. Artan güneş radyasyonu ve 30 °C'ye varan yıllık ortalama sıcaklıklar nedeniyle art arda birkaç ay boyunca yaşanan şiddetli su açığı, çiçek kaynaklarının mevcudiyetini genellikle kısa ve öngörülemeyen dönemlerle sınırlandırmaktadır (Lopezaraiza-Mikel ve ark., 2014). Tropikal kuru ormanlarda, yağışların yıllık ortalamanın %50'ye kadar altında kaldığı tekrarlayan yıllık kuraklık olayları, muhtemelen birkaç kişi için kritik derecede azalan yiyecek arzı nedeniyle arılar üzerinde yüksek bir seçici baskı oluşturmaktadır. Çok yıllık kolonilerini sürdürmek için az ya da çok sabit bir besin kaynağına güvenen tümsosyal arılar için, uzun süren kuraklık dönemleri ve buna eşlik eden çevredeki çiçek kaynaklarının kıtlığı, koloninin hayatta kalması için bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, yiyecek kıtlaştığında, tropik bal arıları (*Apis mellifera scutellata* ve Batı ve Afrika bal arısı alt türlerinin bir melezi olan Afrikalı bal arıları) yuvalarını terk eder ve kaynak bolluğu daha fazla olan alanlara göç ederler. Ancak iğnesiz arılar çok daha az esnektir. Çiftleşen

kraliçeler uçamadığından, koloniler yuvayı terk ederken kraliçelerini geride bırakmak zorunda kalacaklardır. Tümtoplumsal arılar için büyük ölçüde elverişsiz çevresel koşullar nedeniyle, bitişik biyomlardaki büyük arı çeşitliliğine rağmen tropik kuru ormanlarda yalnızca birkaç iğnesiz arı türü bulunur. Yalnızca birkaç süper genelci, komşu habitatlardan sınırı geçmeyi başarabilmektedir (Hrncir ve ark., 2019).

3. Kuraklığın diğer bazı böceklere etkisi

Kuraklığın sıklığı ve şiddetinin artmasının, bitki-böcek etkileşimlerinde ağaç ölüm oranlarını artırabilecek kritik değişikliklere yol açması beklenmektedir. Bitkilerdeki su stresini böcek performansına bağlayan mekanizmalar tam olarak anlaşılamamıştır. Beslenme zamanı ve konakçının özgüllüğü önemli hususlardır. Bazı böcekler, beslenme loncasına bakılmaksızın, yaprak genç dokularıyla beslenmeyi tercih ederken, diğerleri ciddi şekilde stres altındaki ağaçların yaşlanan dokularıyla beslenmeye adapte olmuşlardır (Gely ve ark., 2020).



Şekil 1. Kaplan böceği (*Cicindela hybrida*), sürüklenen kumların ilk aşama avcılarından biridir. Bacaklarında ve alt kısımlarda metalik renklenme ve uzun beyaz tüylerle ısıya ve kuraklığa karşı korunurlar (fotoğraf: Marijn Nijssen)

Kaynak: Nijssen ve Siepel, 2010

Akarsu böcekleri neredeyse tüm akarsularda merkezi ekolojik rol oynar. Akarsu içi, nehir kıyısındaki ve taşkın ovasındaki besin ağlarını desteklerler, organik maddeyi işlerler ve enerjiyi akarsu kanalları boyunca, taşkın ovasına yanal olarak ve hatta akarsu yatağına dikey olarak taşırlar. Örneğin, birçok ormanlık akarsuda suda yaşayan böcekler yaprak döküntülerinin parçalanmasına aracılık ederek nehre ve komşu ekosistemlere besin, karbon ve enerji sağlar. Faaliyetleri çeşitli ölçeklerde su kalitesini ve biyolojik etkileşimleri sıklıkla topluluk yapısı üzerinde önemli yansımalara sahiptir. Nehir süreçlerinde o kadar yaygın ve temel olan su böcekleri vardır ki, bunların bileşimleri akan suların 'sağlığının' bir göstergesi olarak değerlendirilir. Kuraklık gibi doğal bozucu etkiler hemen hemen tüm akan suları ve sudaki biyotayı etkiler

ve su kalitesini değiştirir. Kuraklığın neden olduğu akış bozulması, akarsulardaki hidrolojik bağlantılarda ve ıslak habitatta bir dizi değişikliğe neden olur ve bu da birçok akarsu böceğinin sudaki (ve potansiyel olarak karadaki) aşamalarını etkiler. Kuraklığın ciddiyeti ve yoğunluğunun yanı sıra nehrin büyüklüğü ve şekline bağlı olarak, akış ve hacimde kademeli bir azalma önce yanal ve daha sonra boylamsal hidrolojik bağlantıyı kesecektir ve sonuçta nehir yatağının tamamen kurumasına neden olacaktır. Kuruma sırasında, özellikle dere yatağı boyunca kalan havuzlarda su kalitesi genellikle bozulur. Bu kelme habitatlarında biriken yaprak döküntüleri pH ve çözünmüş oksijendeki düşüşleri hızlandırır, doğrudan havayı soluyabilen akarsu böcekleri (rn. ditisid böcekler ve korixid böcekler) dışında havuzları yaşanmaz hale getirir (Boulton & Lake, 2008).

4. Böcek-orman-kuraklık ilişkisi

Ormanlar dünyanın kara yüzey alanının %30'unu kaplar, insan toplumlarına çok sayıda ekosistem hizmeti sağlar ve küresel biyojeokimyasal döngülerde merkezi bir rol oynar. Böcek salgınlarıyla birlikte meydana gelen ısınma ve kuraklık, birçok bölgede ağaç ölümleriyle ilişkilendirilmiştir. Orman ölümlerine yol açan mekanizmalar karmaşıktır ve bitkilerin iklime verdiği fizyolojik tepkileri, iklimin böcek zararlıları ve patojenler üzerindeki etkilerini ve bunların etkileşimlerini içerir. Bununla birlikte, iklime bağlı orman ölümlerini modelleme çabaları çoğunlukla ağaçların kuraklığa verdiği fizyolojik tepkilere (arza göre buharlaşma ve terleme nedeniyle olağandışı derecede büyük veya kalıcı su talebi fazlalığı) ve çok nadiren ağaçların böcek saldırısına verdiği tepkilere odaklanmaktadır. Ağaç

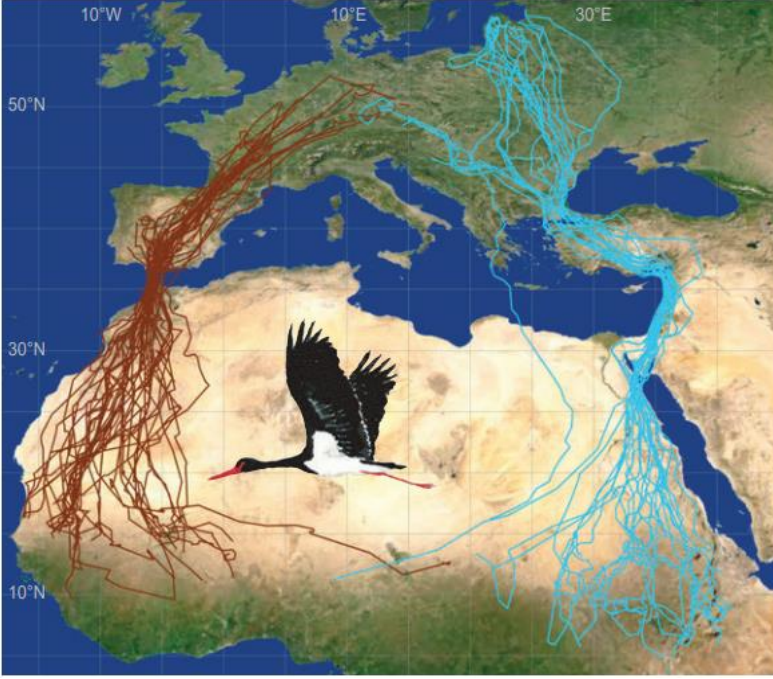
tepkileri üzerine yapılan araştırmalar, hidrolik sistemin suyu iletmedeki başarısızlığına ve mevcut karbonhidratlardaki azalmalara odaklıdır. Böcek salgınları genellikle konakçı ağaçları strese sokan kuraklıktan ve aynı zamanda birçok başka faktörden kaynaklanmaktadır. Sıcaklık, popülasyon başarısını artıran gelişim oranları ve hayatta kalma yoluyla böcekleri doğrudan etkiler. Ev sahibi ağaçların bolluğu, yoğunluğu, boyutu ve fizyolojisi gibi özelliklerin ve bunların arazideki mekansal desenlerinin, böcek popülasyonunun büyüme ve yayılma kapasitesini etkilediği bilinmektedir. Topluluk ortakları (örneğin doğal düşmanlar ve simbiyotik ortaklar) popülasyon salgınlarını ve ardından gelen ağaç ölümlerini etkiler ve aynı zamanda iklimden de etkilenirler (Anderegg ve ark., 2015).

Genellikle ağaç kabuğu böcekleri ve ağaç delicileri şiddetli kuraklıktan yararlanır. Özsü emen böcekler aynı zamanda su stresi altındaki ağaçlarda, en azından orta dereceli stres koşullarında daha iyi performans gösterirken, kuraklığın harita böcekleri üzerindeki etkisi ve yaprak çiğneyenlerin ve gal böceklerinin durumu daha belirsizdir. Belirli bir ağaç türü içinde ölen ağaçların alt kümesi rastgele değildir; bunun yerine, genellikle büyüklük ve güç ile tanımlanan bazı ağaç alt popülasyonları, tipik olarak diğerlerine göre kuraklıktan daha fazla ölüm oranına maruz kalır. Bu savunmasız alt popülasyonların genel olarak a) ağaçların maruz kaldığı doğrudan fizyolojik stresin büyüklüğü (hidrolik bozulma veya karbon açlığı gibi), b) biyotik ajanların (böcekler ve patojenler) saldırısı veya c) her ikisi tarafından belirlendiği düşünülmektedir. Stres tek başına her zaman hangi ağaçların öleceğini işaret etmez, bazı böcekler, fizyolojik stres dışında veya buna ek olarak

ağaç özelliklerine dayalı olarak ağaçlara seçici olarak saldırıp onları öldürebilir (Stephenson ve ark., 2019).

5. Kuraklığın kuşlara etkileri

Yağıştaki değişimin ve özellikle kuraklığın kuş faunasını etkileyebileceği çeşitli mekanizmalar vardır. Birincisi, bazı türler yaşam alanı olarak açık suya ihtiyaç duyarken, çoğu da beslenmek için serbest suya ihtiyaç duyar. Yağış aynı zamanda birçok kuş için temel kaynaklar olan bitki örtüsü verimliliğinin, çiçek, tohum ve meyve üretiminin ve böcek bolluğunun da önemli bir etkenidir. Yerel ölçeklerde kuraklık, tür zenginliğini ve bireysel türleri ve bolluğunu azaltabilir. Kuraklık sırasında kuşlar, yetişkin ölümlerinde artışa maruz kalabilir, alternatif habitatları seçebilir, daha az üreme girişiminde bulunabilir veya yeni doğmuşların hayatta kalma oranının azalmasıyla karşılaşır. Kuraklığa duyarlılık ve tepki, farklı yaşam geçmişleri ve davranış özellikleriyle kuş faunası arasında farklılık gösterebilir. Değişen nem koşullarına karşı özellikle hassas olan habitatları kullanan kuşların, insan oryanslarından yararlanan türlere göre kuraklığa daha olumsuz tepki vermesi beklenebilir. Göç alışkanlığı aynı zamanda optimum üreme ortamının seçilmesindeki tepkiyi de etkileyebilir. Bazı organizmalar ve süreçler yılın kritik bir döneminde yağışa duyarlı olduğundan kuraklığın zamanlaması ve süresi önemli hususlardır. Kuş faunasının bölgelerin oluşumu sırasında mı yoksa yuvalamanın en yoğun olduğu dönemdeki koşullara mı daha duyarlı olduğu açık değildir (Albright ve ark., 2010).



Şekil 2. GPS etiketli Kara Leyleklerin İspanya, Fransa, Çek Cumhuriyeti ve Letonya'daki üreme alanlarından Afrika'daki kışlama bölgelerine farklı sezonlardaki (sonbahar ve ilkbahar) göç yolları. Kuşlar, Akdeniz çevresinde batıya (kahverengi) veya doğuya (mavi) doğru dolambaçlı bir rota çizerler.

Kaynak: Bobek ve ark., 2008; Zwarts ve ark., 2023

Aşırı kuraklık kuş bolluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Benzer şekilde tür özellikleri de kuraklığa duyarlılığı etkileyebilir. Kanatlıların soğutma maliyetleri vücut kütlesiyle ilişkilidir, dolayısıyla daha büyük gövdeli kuşlar su kıtlığına karşı daha duyarlı olabilir. Öte yandan, daha küçük gövdeli kuşlar göreceli olarak daha fazla buharlaşma yoluyla su kaybına maruz kalır, bu nedenle aşırı sıcaklar daha küçük türleri daha güçlü şekilde etkileyebilir. Göçmen türler üreme alanlarının seçiminde daha fazla mekansal esnekliğe sahip olabilir ancak fenolojik olarak daha kısıtlı olabilir. Kuraklık olaylarının üreme mevsimine göre zamanlaması, hangi türlerin daha fazla maruz kalacağını belirleyebilir. Daha uygun habitatlara sahip türler, kuraklık

sırasında yeni alanlar aramak için daha iyi donanıma sahip olabilir. Tarım arazileri, özellikle sıcak dönemlerde ve özellikle kuraklığa daha az toleranslı türler için doğal arazilere göre daha küçük popülasyonları destekler. Kuraklığa karşı daha duyarlı olan türler, doğal alanların mevcudiyeti azaldıkça habitat bozulmasına karşı daha savunmasız hale gelebilir. Bulgular, kuşların, kuraklığın etkilerini tamponlamak için meyve bahçeleri veya parklar gibi yapay sulama ve ısıyı tamponlayan mikrohabitat yapısına sahip tarımsal ve gelişmiş arazilerden yararlandığını göstermektedir (Goldstein ve ark., 2024).

6. Kuraklığın memeli hayvanlara etkileri

Afrika savanları, dünyanın en bol ve çeşitli büyük memeli otçul topluluklarına ev sahipliği yapmaktadır. Otçulların bu çeşitliliği, bir arada yaşamalarına katkıda bulunan dramatik beslenme ve vücut büyüklüğü varyasyonları da dahil olmak üzere sergiledikleri fonksiyonel çeşitliliğe yansımaktadır ve savan bitki örtüsü üzerindeki etkilerini şekillendirir. Bununla birlikte, bu otçullar, kuraklık vakalarındaki olası artışlar da dahil olmak üzere küresel değişimin çeşitli yönleriyle tehdit altındadır (Ripple ve ark., 2015). Kuraklık, savanadaki otçullar arasında sıklıkla yaygın ve yıkıcı ölümlere neden olur. Ancak kuraklıklar nadirdir ve önceden tahmin edilemez ve hayvanların kuraklığa tepkilerini arazi ölçeğinde deneysel olarak değerlendirmek imkansızdır. Savanlar normal koşullar altında bile değişken sistemlerdir ve genellikle belirgin kurak ve yağışlı mevsimlerle karakterize edilir (Staver ve ark., 2011). Kurak mevsim, çimenlerin hareketsiz hale gelmesi nedeniyle çim yemi kalitesinde hızlı düşüşlere neden olurken, ağaç türleri yapraklarını tutma eğiliminde olur. Otlayan otçullar özellikle kılığı hafifletmek için

mevsimsel stratejilere bel bağlarlar. İki ana strateji kullanırlar: diyet esnekliği ve göç. Diyet esnekliği durumunda, öncelikle yağışlı mevsimde otlayan karma besin tüketicileri, biyokütle azaldıkça kurak mevsimde otlamaya geçiş yapar (Codron ve ark., 2007). Göç durumunda, mevsimsel kaymalar kompozisyon yerine mekânsaldır ve otlayanların mevsimsel göçü yaygındır. Farklı otçulların kuraklığa tepkisi farklılık gösterir. Karma besin tüketicileri daha fazla ot yiyerek kuraklıkla başa çıkarken, otlayanlar ellerinden geldiğince kuraklıktan daha az etkilenen bölgelere taşınırlar veya daha büyük nüfus düşüşleri yaşarlar. Vücut büyüklüğü, hareket kısıtlamaları, yırtıcılardan kaçınma ve metabolizma yoluyla otobur stratejilerini kısmen belirleyebilir. Vücut büyüklüğü otçul hareketliliğini belirleyebilir: Daha büyük otçullar, arazi engelleri tarafından daha az engellenir ve daha büyük yağ rezervlerini daha verimli kullanabilirler, böylece uzun mesafeleri kat etme konusunda daha yeteneklidirler. Vücut büyüklüğü ayrıca yırtıcılık oranlarını etkilemektedir. Öyle ki daha küçük gövdeli otoburların arazi kullanımları daha büyük olanlara göre daha kısıtlı olabilir (Abraham ve ark., 2019).

Pek çok kurak çevredeki kaynaklar, zaman ve mekan açısından düzensizdir ve bunları kullanan memeli popülasyonları genellikle buna uygun olarak belirgin boyut farklılıkları gösterir. Örneğin zürafa (*Giraffa camelopardalis*) gibi çölde yaşayan büyük memeliler, besin kaynaklarındaki değişiklikleri takip ederken nehir kıyısındaki koridorlar boyunca kapsamlı hareketler yaparlar (Fennessy, 2009). Mavi antilop (*Connochaetes taurinus*), ortaya çıkan taze meralara erişmek için yerel fırtınalar yönünde kısa mesafeler (<25 km) kateder, ancak aynı zamanda

kuraklıktan etkilenen bölgelerden kaçmak için büyük ölçekli yönlü göçler (>100 km) sergileyebilir. Dolayısıyla, bu tür hareketli türlerin nüfusu hem yerel hem de bölgesel çevredeki koşullara, özellikle de gıdanın bulunabilirliğine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir (Ogutu ve OwenSmith, 2003). Çölde yaşayan küçük memeliler, aksine, daha büyük emsallerine göre daha hareketsizdirler ve genellikle yiyecek ve diğer kaynaklardaki yerel eksikliklerle yerinde baş etmek zorunda kalırlar. Avustralya çöl kemirgenlerinin ve keseli hayvanların uzun menzilli hareketlerine dair bazı kanıtlar mevcuttur, ancak en uzununu bile nadiren 10 km'yi aşar. Pek çok tür bunun yerine enerji ve su tasarrufu sağlamak için uyuşukluk gibi fizyolojik mekanizmaları kullanır ve derin yuvalar kullanarak ve koşulların en iyi olduğu zamanlarda ortaya çıkarak kendilerini aşırı iklim koşullarından korurlar (Withers ve ark. 2004). Kaynak kıtlığının kısa vadeli olduğu algılanırsa hayvanlar, faaliyetlerini geçici olarak azaltarak enerji tasarrufu sağlayabilir. Kaynak kıtlığı uzun sürerse hayvanlar üreme faaliyetlerini yavaşlatabilir veya durdurabilir ve alternatif kaynaklardan yararlanmaya başlayabilir. Ayrıca bu kaynakları elde ederken daha fazla risk almaları muhtemeldir; örneğin yırtıcılık riskinin nispeten yüksek olduğu yerlere daha fazla veya daha uzun süreler boyunca girmeyi göze almak gibi. Kaynak edinimini kolaylaştırmaya yönelik hareketler muhtemelen artacak ve nüfus, sosyal organizasyonda değişikliklere uğrayabilecektir (Dickman ve ark. 2011).

Ormanda yaşayan memelilerden bir grup, uçmayan memelilerdir. Bu, Güney Amerika'daki "Kallitrich primatları"nı, Madagaskar'daki "Lemurlar"ı, Afrika'daki "Galago"ları, Güneydoğu Asya'daki "Yavaş

Loris primatları"nı ve Avustralya'daki "Ağaç keselileri"ni içeren heterojen bir gruptur. Bu türlerin ihtiyaç duyduğu bitki ve böcek salgılarının (yani nektar, tatlı özsu, sakız, özsu) mevcudiyetinin, kuraklık sırasında sıcaklık arttıkça ve hava kurudukça bal özsuyu üretimi azalacak ve sonuç olarak kuraklık sırasında bal özsuyunun miktarı önemli ölçüde azalacaktır. Türlerin bitki ve böcek sızıntılarına bağımlılık dereceleri farklılık gösterir ancak bu maddeler bazı türlerin diyetinin %70'inden fazlasını kaplayabilir (Cabana ve ark., 2018).

7. Kuraklığın patojenlere etkileri

Abiyotik faktörler, iklim faktörleri (sıcaklık ve yağış gibi) ve biyotik faktörler (nüfus yoğunluğu ve konakçı toplulukların ve rezervuarların yapısı gibi) bulaşıcı veya paraziter ajanların bulaşmasında temel değişkenlerdir. Mevcut küresel değişiklikler (iklim değişikliği, arazi kullanımı değişikliği, biyolojik istila) epidemiyolojik ortamı sarsmaktadır. Bu değişiklikler, bulaşıcı hastalık salgınlığının yeni oluşumlarından ve dağılımlarından ve ayrıca biyotik ve abiyotik faktörlerin modifikasyonu yoluyla yeni enfeksiyonların ortaya çıkmasından sorumludur (Morand ve Lajaunie, 2018).

Patojenlerin ve eklembacaklı vektörlerin üreme ve hayatta kalma oranları sıklıkla yerel yağış ve sıcaklıktan etkilenir ve bazı vektör kaynaklı hastalıkların salgınları en yaygın olarak belirli hava senaryolarında gözlemlenir. Veba, pire kaynaklı *Yersinia pestis* bakterisinin neden olduğu kemirgenlerle ilişkili bir zoonozdur. Hastalığın, 14. yüzyılda Avrupa'da Kara Ölüm de dahil olmak üzere insanlarda salgınlara neden olduğu bilinir. Vebanın yayılmasını çok

sayıda faktör etkiler ancak hava durumu değişkenlerinin etkileri 100 yıldan beri tartışılmaktadır (Eads ve ark., 2016). Örneğin Kara Ölüm, 14. yüzyılın ilk yarısında Asya'da patlak verdi ve sıcaklıkların ve yağışların artmasıyla batıya doğru Avrupa ve Afrika'ya yayılmıştır. Benzer şekilde, 1800'lerin sonlarında Orta Asya'daki daha sıcak, daha yağışlı iklim koşulları, Modern Pandemi'yi tetiklemiş olabilir ve *Yersinia pestis*'in başka kıtalara ve adalara yayılması için ortam sağlamış olabilir. *Yersinia pestis*'in yaklaşık 1900 yılında ortaya çıktığı Amerika Birleşik Devletleri'nin batısında, veba salgınları (yani hızlı, yaygın salgınlar), ilkbaharların daha yağışlı ve yazların daha serin olduğu yıllarda patlama eğilimi gösterirken, kuraklık sırasında daha az yaygın hale gelir. Kuraklık sırasında epizootiklerin azlığı, sıcaklığın çok yüksek ve nemin çok düşük olması durumunda pirelerin kuruyup öldüğü laboratuvar çalışmaları ile açıklanmıştır. Temel olarak araştırmacılar, kuraklık sırasında pire yoğunluklarının azaldığını, dolayısıyla vebanın bulaşma ve yayılma oranlarının azaldığını öne sürmüşlerdir (Lorange ve ark., 2005).

8. Yabani otların istilası

Küresel çevresel değişikliklerin bitki istilalarını hızlandırması muhtemeldir, ancak bazı yeni istilacı türler için coğrafi aralığın daralması da öngörülebilir. Su mevcudiyeti bitki çeşitliliğini, birincil üretimi ve topluluk istikrarını belirlemede kurak ve yarı kurak ekosistemlerde özellikle önemlidir. "Dalgalandıran kaynak mevcudiyeti" teorisi, kaynak mevcudiyetinde bir artış olduğunda bir bitki topluluğunun istilaya karşı daha duyarlı hale geldiğini öne sürmektedir. Bu, özellikle uzun ömürlü yerli türlere göre kaynakları daha erken, daha

hızlı veya daha büyük ölçüde kullanma becerisine sahip olan tek yıllık istilacı türler için beklenebilir (Lefer ve ark. 2011). Değişken kaynak teorisiyle tutarlı olarak, istilacı tek yıllık bitkiler üzerine yapılan bir dizi çalışma, yağıştaki doğal veya deneysel artışın istilayı kolaylaştırdığını, kuraklığın ise yabancı türlerin başarısını azalttığını göstermiştir. Alternatif olarak, kuraklık, yerleşik doğal bitki örtüsünde bitki ölümlerine neden olduğunda veya kuraklık stresi hafifletildiğinde hemen toparlanamayan yerleşik türlerin büyümesini veya üremesini sınırladığında, hızlı kaynak edinimi olan yabancı türler yaygınlaşır (Jiménez ve ark., 2011). İstilacıların geniş bir ortam yelpazesine yerleşmesine ve yayılmasına olanak tanıyan diğer önemli mekanizma ise fenotipik esnekliktir (yani tek bir genotipin farklı çevresel koşullar altında farklı fenotipleri ifade etme yeteneği) (Clements ve Ditomaso, 2011). İstilacı ve filogenetik olarak istilacı olmayan tür çiftlerinden elde edilen verileri kullanan bir meta-analiz, istilacı türlerin, birlikte ortaya çıkan istilacı olmayanlara göre sürekli olarak daha yüksek fenotipik esnekliğe sahip olduğunu göstermiştir (Davidson ve ark. 2011). Bitkisel biyokütle, tohum biyokütlesi ve sayısı ve bitkinin hayatta kalması gibi doğrudan uygunlukla ilgili özelliklerin esnekliği özellikle önemlidir (Mojzes ve ark., 2020).

9. Kuraklık ve ortama azot yüklemesinin birlikte etkileri

Ötrofikasyon, besin maddelerinin (azot ve fosfor) aşırı birikmesi sonucu yüksek birincil üretkenliğe, ekolojik denge kaybına ve su ekosisteminin giderek bozulmasına neden olan bir süreçtir. Bu sürecin sonucunda alg biyokütlesinde ve bulanıklığında artış, şeffaflığın azalması, suyun renginde ve kokusunda değişiklikler ve çözünmüş

oksijen konsantrasyonunda azalma meydana gelir. Antropojenik faaliyetlerin sonucu olan ötrofikasyon süreci, insan nüfusundaki küresel artışın ve aynı zamanda evsel, endüstriyel ve tarımsal atıkların deşarjının ve su kaynaklarının kötü yönetiminin bir sonucudur. Hidrolojik ve iklimsel faktörler, su seviyelerinde ve suyun kalma süresinde önemli rol oynayarak rezervuarların su kalitesini doğrudan etkilemektedir (Jeppesen ve ark., 2015). Bu değişiklikler trofik durumu değiştirebilir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerdeki su ekosistemlerinde hidrolojik stres etkenleri oluşturur. Yağış değişkenliğinin su kalitesi üzerindeki etkileri iki mekanizmanın birleşiminden kaynaklanabilir: Kuraklık dönemlerinde esas olarak su hacmindeki azalmaya bağlı olarak besin konsantrasyonunun daha yüksek olması; ve ara sıra şiddetli yağmurların olduğu dönemlerde allohton materyalde artış (Nobre ve ark., 2020). Uzun süreli kuraklık olayları su kalitesini olumsuz etkiler. Ayrıca kurak dönemlerde su hacmindeki azalma, potansiyel olarak toksik siyanobakterilerin çoğalmasını kolaylaştırır (Santos ve ark., 2021).

Birçok abiyotik faktör, azotun karasal biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkisini belirli bir miktarda etkiler. Ötrofikasyonun ve rekabetçi dışlamanın baskın mekanizma olduğu sistemler için abiyotik faktörler arasında şunlar öne çıkar: 1) azot sınırlamasının varlığı ve gücü, 2) yeni türlerin istilasası veya mevcut türlerin yayılması için açık alanların varlığı ve 3) diğer potansiyel sınırlayıcı kaynakların bulunabilirliği ve zamanlaması. Abiyotik faktörler aynı zamanda iklim ve katyon mevcudiyeti gibi doğrudan toksisitenin etkisini de etkileyebilir. İkincil stresin (örneğin, kuraklık, don, patojenler, otçullar vb. yoluyla)

ekosistemin azot birikimine verdiği tepkiye hakim olduğu sistemlerde, abiyotik faktörlerin çoğu (örneğin azot sınırlamasının derecesini etkileyen iklim ve toprak) otçullara ve patojenlere karşı yaprak lezzeti) ekosistem duyarlılığını etkileyecek şekilde çalışır (Clark ve ark., 2013).

Pek çok ekosistem, iklim değişikliği, arazi kullanımı değişikliği ve kirlilik gibi sürdürülebilir işleyişi açısından büyük tehditlerle karşı karşıyadır. Özellikle mera ekosistemlerinin bozulması ve kaybı özel bir tehdit oluşturmaktadır. Doğal ve yarı doğal meralar biyolojik çeşitliliğin korunması, karbon tutulması ve yem üretimi gibi önemli ekosistem hizmetleri sağlar. Dünya çapında, otlaklar dünyanın karasal yüzeyinin yaklaşık %40'ını kaplar. Azot yüklemesi ve kuraklık stresi, çayır ekosistemlerinde farklı ölçeklerde (tek bitkiden topluluk düzeyine kadar) ekosistemin işleyişini önemli ölçüde etkileyebilen iki önemli etkendir (Grant ve ark., 2014). Gübre akışı ve çevre kirliliği gibi insan faaliyetleri, ekosistemlerin azot döngüsü üzerinde küresel olarak ciddi bir etkiye sahiptir. Azot yüklemesi nedeniyle bir ekosistemde azot tedariki artık sınırlı olmadığından, başka bir kaynak, rekabet edilecek yeni sınırlayıcı ve anahtar kaynak haline gelebilir. Azot yüklemesi, ışık için rekabet edecek kadar uzun boylu olmak gibi spesifik fonksiyonel özelliklere sahip türlerin lehine olabilir ve diğer türlerin rekabetçi bir şekilde dışlanmasına ve kaybına neden olabilir. Öte yandan, daha yüksek tür çeşitliliğinin otlakların istikrarlı işleyişi için faydalı olduğu bulunmuştur. Azot yükü nedeniyle çeşitliliğin azalması, otlak topluluğunun kuraklık gibi aşırı olaylara karşı duyarlılığını artırabilir. Ekosistem verimliliğinin doğrudan yağışa bağlı olması nedeniyle sık köklü otlaklar özellikle kuraklığın sonuçlarından zarar görmektedir (Leitinger ve ark., 2015).

10. Kuraklığın suda yaşayan organizmalara etkileri

Kuraklığın nehir biyotası üzerindeki etkisi, önemli araştırma alanı olmuştur. Mevcut araştırmalar, kuraklık olaylarının birçok tatlı su türünün büyümesini, hayatta kalmasını, üreme başarısını, bolluğunu ve dağılımını doğrudan etkilediğini ve çoğu zaman sınırlandığını vurgulamaktadır (Lake 2011). Kuraklık aynı zamanda istilacı türlerin dağılımını ve bolluğunu değiştirerek ve sıklıkla genişleterek yerel sucul biyolojik çeşitliliği dolaylı olarak etkileyebilir (Beche ve ark. 2009). Kuraklık olayları doğal seçilimi, genetik sürüklenmeyi ve gen akışını güçlü bir şekilde etkileyebilir (Banks ve ark., 2013). Kuraklık olayları sırasında suda yaşayan organizmalar genellikle nehir ağları boyunca akarsu akışının mekansal boyutuna ve bağlantısına tepki verir (Woodward ve ark. 2015). Bu nedenle, kuraklığın su ekosistemleri üzerindeki sonuçlarını anlamak için akı hızlarından ziyade suyun ağlar arasındaki mekansal dağılımına ve fiziksel özelliklerine (örneğin sıcaklık, çözünmüş oksijen ve derinlik) odaklanan hidrolojik incelemelere ihtiyaç duyulabilir (Magoulick ve Kobza 2003). Kuraklık, temel geçimlik gıda kaynakları veya yerel ekonomilerin itici güçleri olarak somon ve alabalık gibi balıklara bel bağlayan topluluklar ve kabileler için endişe vericidir. Türler fizyolojik, davranışsal ve demografik tepkilerin yanı sıra rekabet, yırtıcılık, hastalık ve parazitler dahil türler arasındaki etkileşimlerden etkilenebilir. Sudaki türler, dağılım, fenotipik esneklik ve doğal seçim yoluyla kuraklıkla ilişkili çevresel değişikliklere uyum sağlama kapasitesi sergileyebilir (Nicotra ve ark. 2015). Ancak kuraklığın kendisi hem fenotipik hem de genetik çeşitliliği değiştirerek uyum sağlama kapasitesini sınırlandırabilir.

İnsanların susuzlaştırması sürecinde akarsu ve nehir parçalanması nedeniyle popülasyonlar küçülebilir ve izole edebilir, böylece popülasyonlarda "akrabalı çiftleşme depresyonu" riski artabilir, aynı zamanda hem genetik hem de yaşam öyküsü varyasyonunu (adaptif kapasite) azaltabilir (Kovach ve ark., 2019).



Şekil 3. Jorf Torba Gölü'ndeki (Güneybatı Cezayir) kuraklık sonucu ortaya çıkan durum (Temmuz, 2022)

Kaynak: Seddiki ve ark., 2023

Fiziksel bozulma su ekosistemlerinin doğal bir bileşenidir. Sudaki organizmalar hem biyotik (örneğin yırtıcılık) hem de abiyotik (örneğin sel) bozulmalardan ve doğal (örneğin kuraklık) ve antropojenik (örneğin kimyasal dökülme) bozulmalardan korunmaya ihtiyaç duyar. Kuraklıkların süresi genellikle aylardan yıllara kadar değişmektedir. Tüm kuraklıklarda iki ana faktörün meydana geldiği görülmektedir; su kütlesinin yüzey alanında/haciminde bir azalma ve su kütlesinin fiziksel içeriğinde (örneğin sıcaklık ve çözünmüş oksijen konsantrasyonları) bir

artış. İlk faktör, mikro habitatlardan havza ölçeklerine kadar habitat kaybına, konsantrasyon etkisinden kaynaklanan balık yoğunluğunun artmasına ve yırtıcılık ve rekabetin artmasına yol açabilir. Zamanla balık türlerinin çeşitliliği azalacak ve en toleranslı taksonlar kalacaktır. Daha büyük balıklar çok sığ suda hayatta kalamayacağından karaya oturma ve ölüm oranının artmasına neden olabilir. Sınırlı hareket ve azalan saklanma seçeneği yırtıcılık baskısının artmasına neden olabilir. Yırtıcılık, habitatın dışından (örneğin, suda yaşayan kuşlar) veya habitatın içinden (örneğin, balık yiyen balıklar, yılanlar, omurgasızlar) kaynaklanabilir. Ek olarak, kuruma süresi boyunca içsel karmaşıklık ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu sıklıkla azalır. Birçok balık hipoksiye su yüzeyinde nefes alarak tepki verir. Tüm bu faktörler avlanma oranlarını daha da artırabilir (Magoulick & Kobza, 2003).

11. Kuraklığın sürüngenlere etkileri

Kuraklığın, memeliler, kuşlar ve sürüngenler dahil olmak üzere çok çeşitli organizmaların hayatta kalma ve üreme başarısını etkilediği gösterilmiştir. Bu nedenle, kuraklığın yalnızca bireysel türleri değil aynı zamanda multitrofik etkileşimleri de nasıl etkilediğine dair anlayışımızı genişletmemiz önemlidir. Kuraklık bitki örtüsünün büyümesini ve hayatta kalmasını önemli ölçüde azaltabilir. Topluluk ekolojisinin aşağıdan yukarıya teorisi, azalan birincil üretkenliğin otobur popülasyonlarını olumsuz yönde etkileyeceğini ve bunun da yırtıcı popülasyonları olumsuz yönde etkileyeceğini öngörmektedir. Hem bitki örtüsünü hem de eklem bacaklıları yiyen küçük memelilerin, büyük olasılıkla hem açlık hem de azalan üreme nedeniyle, kuraklığın ardından sayıları azalmaktadır. Küçük memeliler aynı zamanda birçok yılan

türünün birincil avı olduğundan, küçük memelilerin sayısındaki azalmalar yılan üremesini ve hayatta kalmayı olumsuz yönde etkileyecektir. Sürüngenlerin sayısı dünya çapında azalmaktadır ve iklim değişikliğinin bunun nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir (Sperry & Weatherhead, 2008).

Uzun süreli kuraklığın, hayvanların zaten yüksek derecede su sıkıntısı yaşadığı kurak alanlar da dahil olmak üzere birçok farklı habitattaki hayvanlar üzerinde ciddi etkileri olabilir. Su mevcudiyetindeki mevsimsel veya yıllık değişiklikler, hayvanları davranış, beslenme oranları ve üreme değişiklikleri de dahil olmak üzere çeşitli şekillerde etkileyebilir. Hidrasyon ile bu parametreler arasındaki ilişki üzerine yapılan birçok çalışmada, az suyla uzun süre dayanabilmeleri için sayısız adaptasyonları barındırmaları ve bireylerin vahşi doğada yakalanıp incelenebilme kolaylığı nedeniyle sürüngenler model organizmalar olarak kullanılmıştır. Öne çıkan örnekler arasında yüksek yağışlı yıllarda çöl kaplumbağalarında artan metabolizma hızı, su yılanlarında kurak yıllarda hayatta kalma oranının azalması, ve çöl kaplumbağalarında yağış düzenlerinin hareket ve üreme üzerindeki güçlü etkileri sayılabilir. Omurgalıların çoğu üreme sırasında önemli miktarda enerji harcar. Engerek yılanlarında dişilerin yaz doğumundan önceki sonbahar ve ilkbaharda vücut kütlelerinin yarısından fazlasını vitellogenesis (yumurta sarısı üretimi) ve embriyo üretimine harcadıkları gösterilmiştir (Van Dyke ve Beaupre, 2011). Sürüngenlerde yumurta sarısının su içeriği nispeten yüksektir. Yumurta sarısındaki yüksek su içeriği nedeniyle kuraklık, dişinin üreme yeteneğini etkileyebilir veya üretebileceği yavruların sayısını veya boyutunu sınırlayabilir. Aşırı

kuraklık durumunda, bir yıl daha hayatta kalabilmek ve üremek için üremeden vazgeçmek veya gelişen folikülleri yeniden emmek daha faydalı olabilir. Kuraklık sırasında hayvanların yiyecek bulmak için daha sık ve/veya daha uzun mesafeler kat etmesi gerekebilir. Kuraklık sırasında su aramak yerine, bazı türlerin enerji ve su tasarrufu sağlamak amacıyla hareketsiz kalma olasılığı daha yüksektir. Kuraklığın bir sonucu olarak azalan hareketler, çiftleşme ve yiyecek arama fırsatlarının azalmasına neden olabilir ve bu da olumsuz uyum sonuçlarına neden olabilir (Capehart ve ark., 2016).

12. Kuraklığın yumuşakçalara etkisi

Yumuşakçalar, nehir deşarjının düşük olduğu kıyı bölgeleri veya tüm su kütleleri kuruduğunda kurumaya maruz kalabilir. Nehir yumuşakça toplulukları günümüzde genellikle istilacı yerli olmayan türlerin hakimiyetindedir. Ancak yaz ve kış kuraklıklarından sonra yerli ve yerli olmayan yumuşakça türlerinde ciddi azalmalar tespit edilmiştir (Collas ve ark., 2014). Tatlı su yumuşakçalarının bazı türleri, kış uykusuna yatarak ve/veya daha derin veya daha nemli su bölgelerine göç ederek kuruyana kadar hayatta kalabilmektedir (Paschoal ve ark., 2020).

Sığ su sistemleri topluluk yapısı ve ekosistem işlevinde özellikle dramatik değişikliklere maruz kalabilir. Tatlı su yumuşakçaları genellikle göllerin içindeki, değişen su seviyelerine karşı en savunmasız alanlar olan sığ kıyı bölgelerinde yaşar. Ayrıca hareket kabiliyeti sınırlı olan organizmalar için su kaybı durumunda göç mümkün olmayabilir, bu da yerel olarak yok olma riskini artırmaktadır (Glasheen ve ark., 2017).

Gelişmekte olan embriyoların üreme kanalında tutulması şeklindeki ebeveyn bakımı, kara salyangozları arasında yaygın fakat baskın olmayan bir üreme stratejisidir. Kuluçkalama embriyonik gelişimin sonuna kadar sürebilir veya embriyonik gelişimin yalnızca bir kısmı meydana geldikten sonra yumurtlanan yumurtalarla daha kısa süreli olabilir. Kuluçka, yumurtalara ve yavrulara savunmasız oldukları bir aşamada koruma sağlar. Kara salyangozlarında kuruma ve av olma (erken kuluçkadan çıkan yavruların yumurta yamyamlığı dahil) yumurtaların hayatta kalmasına yönelik ciddi tehditlerdir (Sulikowska-Drozd & Maltz, 2014).

Tüketici-bitki etkileşimleri, ototroflar ve heterotroflar arasındaki enerji transferine aracılık eder ve bu nedenle, dünyadaki hemen hemen her ekosistemde bitki üretimi, topluluk bileşimi ve besin ağı yapısındaki kalıpları düzenler. Tüketicilerin bitki topluluklarını şekillendirme derecesi, ya doğrudan tüketim yoluyla ya da açık yaraları enfekte eden bakteri ve mantarları kolaylaştırarak bitki dokusunu koparma yeteneklerine bağlıdır. Bu eylemler, tüketicinin otlama aparatıyla bir bitkiyi ısırmasını, kazımalarını, delmesini veya başka şekilde zarar vermesini gerektirir. Karşılıklı olarak bitkiler, tüketicilere aktardıkları besin kaynaklarının ve yaralarını enfekte eden mikropların miktarı ve kalitesi aracılığıyla tüketici topluluklarını şekillendirir. Hem tüketici otlatma faaliyetleri hem de bitki savunma mekanizmaları çevresel koşullara duyarlı olma eğilimindedir. Tüketici-bitki etkileşimlerinin iklimsel strese nasıl tepki verdiği, hem tüketicinin hem de bitkinin fonksiyonel tepkisine bağlıdır (Atkins ve ark., 2015). Çevre koşulları stresli hale geldikçe tüketiciler otlatma faaliyetlerini azaltabilir veya

artırabilir ve/veya sığınak arayabilir. Bu davranışsal ayarlamalar tüketicinin hareketliliğine ve strese karşı duyarlılığına bağlıdır ve daha stresli alanlarda yukarıdan aşağıya kontrolü hafifletme ve sığınaklarda bunu yoğunlaştırma potansiyeline sahiptir. Eş zamanlı olarak, koşullar daha sıcak, daha kuru veya daha stresli hale geldikçe bitkiler kimyalarını, fizyolojilerini, ikincil bileşiklerin üretimini ve büyümelerini değiştirebilir; bu etkiler otlayanların onlara zarar vermesini ve/veya mikropların yaralarını enfekte etmesini zorlaştırabilir. Bunlar, bitkide kimyasal olarak uyarılan ve otlayanları caydıran koruyucu proteinler ve enzimlerin yanı sıra trikomların, dikenlerin ve mumsu kütiküllerin gelişimi gibi morfolojik adaptasyonları içerir. Örneğin, kemirgenler kuraklık sırasında çalı büyümesini daha güçlü bir şekilde baskılar çünkü çalıların kemirgen otlatma hasarını telafi etme yetenekleri sınırlıdır. Tüketiciler ise iklim değişikliğine tepki olarak otlatma aparatlarının (örneğin dişler, alt çeneler, diller) morfolojisini değiştirebilir veya bu yapılarda daha fazla veya daha az aşınma yaşayabilir (Chalifour ve ark., 2019).

KAYNAKÇA

- Abraham, J. O., Hempson, G. P., & Staver, A. C. (2019). Drought-response strategies of savanna herbivores. *Ecology and evolution*, 9(12), 7047-7056.
- Albright, T. P., Pidgeon, A. M., Rittenhouse, C. D., Clayton, M. K., Flather, C. H., Culbert, P. D., ... & Radeloff, V. C. (2010). Effects of drought on avian community structure. *Global Change Biology*, 16(8), 2158-2170.
- Amundrud, S. L., & Srivastava, D. S. (2016). Trophic interactions determine the effects of drought on an aquatic ecosystem. *Ecology*, 97(6), 1475-1483.
- Anderegg, W. R., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., ... & Zeppel, M. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674-683.
- Atkins, R. L., Griffin, J. N., Angelini, C., O'Connor, M. I., & Silliman, B. R. (2015). Consumer–plant interaction strength: importance of body size, density and metabolic biomass. *Oikos*, 124(10), 1274-1281.
- Bêche, L. A., Connors, P. G., Resh, V. H., & Merenlender, A. M. (2009). Resilience of fishes and invertebrates to prolonged drought in two California streams. *Ecography*, 32(5), 778-788.
- Bobek, M., Hampl, R., Peške, L., Pojer, F., Šimek, J., & Bureš, S. (2008). African Odyssey project–satellite tracking of black storks *Ciconia nigra* breeding at a migratory divide. *Journal of Avian Biology*, 39(5), 500-506.
- Boulton, A. J., & Lake, P. S. (2008). Effects of drought on stream insects and its ecological consequences. *Aquatic insects: Challenges to populations*, 2008, 81-102.
- Bourne, A. R., Cunningham, S. J., Spottiswoode, C. N., & Ridley, A. R. (2020). Hot droughts compromise interannual survival across all group sizes in a cooperatively breeding bird. *Ecology Letters*, 23(12), 1776-1788.
- Burkle, L. A., & Runyon, J. B. (2016). Drought and leaf herbivory influence floral volatiles and pollinator attraction. *Global Change Biology*, 22(4), 1644-1654.
- Cabana, F., Dierenfeld, E. S., Wirdateti, Donati, G., & Nekaris, K. A. I. (2018). Exploiting a readily available but hard to digest resource: A review of exudativorous mammals identified thus far and how they cope in captivity. *Integrative zoology*, 13(1), 94-111.
- Capehart, G. D., Escallón, C., Vernasco, B. J., Moore, I. T., & Taylor, E. N. (2016). No drought about it: effects of supplemental hydration on the ecology, behavior, and physiology of free-ranging rattlesnakes. *Journal of Arid Environments*, 134, 79-86.

- Chalifour, B., Hoogveld, J. R., Derksen-Hooijberg, M., Harris, K. L., Urueña, J. M., Sawyer, W. G., ... & Angelini, C. (2019). Drought alters the spatial distribution, grazing patterns, and radula morphology of a fungal-farming salt marsh snail. *Marine Ecology Progress Series*, 620, 1-13.
- Clark, C. M., Bai, Y., Bowman, W. D., Cowles, J. M., Fenn, M. E., Gilliam, F. S., ... & Throop, H. L. (2013). Nitrogen deposition and terrestrial biodiversity. In *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition* (pp. 519-536). Elsevier Inc..
- Clements, D. R., & Ditommaso, A. (2011). Climate change and weed adaptation: can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted?. *Weed research*, 51(3), 227-240.
- Codron, D., Codron, J., Lee-Thorp, J. A., Sponheimer, M., De Ruiter, D., Sealy, J., ... & Fourie, N. (2007). Diets of savanna ungulates from stable carbon isotope composition of faeces. *Journal of Zoology*, 273(1), 21-29.
- Collas, F. P., Koopman, K. R., Hendriks, A. J., van der Velde, G., Verbrugge, L. N., & Leuven, R. S. (2014). Effects of desiccation on native and non-native molluscs in rivers. *Freshwater biology*, 59(1), 41-55.
- Cravens, A. E., McEvoy, J., Zoanni, D., Crausbay, S., Ramirez, A., & Cooper, A. E. (2021). Integrating ecological impacts: perspectives on drought in the Upper Missouri Headwaters, Montana, United States. *Weather, Climate, and Society*, 13(2), 363-376.
- Davidson, A. M., Jennions, M., & Nicotra, A. B. (2011). Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis. *Ecology letters*, 14(4), 419-431.
- Dickman, C. R., Greenville, A. C., Tamayo, B., & Wardle, G. M. (2011). Spatial dynamics of small mammals in central Australian desert habitats: the role of drought refugia. *Journal of mammalogy*, 92(6), 1193-1209.
- Eads, D. A., Biggins, D. E., Long, D. H., Gage, K. L., & Antolin, M. F. (2016). Droughts may increase susceptibility of prairie dogs to fleas: incongruity with hypothesized mechanisms of plague cycles in rodents. *Journal of Mammalogy*, 97(4), 1044-1053.
- Fennessy, J. (2009). Home range and seasonal movements of *Giraffa camelopardalis angolensis* in the northern Namib Desert. *African Journal of Ecology*, 47(3), 318-327.
- Gallagher, M. K., & Campbell, D. R. (2017). Shifts in water availability mediate plant–pollinator interactions. *New Phytologist*, 215(2), 792-802.
- Gely, C., Laurance, S. G., & Stork, N. E. (2020). How do herbivorous insects respond to drought stress in trees?. *Biological Reviews*, 95(2), 434-448.

- Glasheen, P. M., Calvo, C., Meerhoff, M., Hayes, K. A., & Burks, R. L. (2017). Survival, recovery, and reproduction of apple snails (*Pomacea* spp.) following exposure to drought conditions. *Freshwater Science*, 36(2), 316-324.
- Glenny, W. R., Runyon, J. B., & Burkle, L. A. (2018). Drought and increased CO₂ alter floral visual and olfactory traits with context-dependent effects on pollinator visitation. *New Phytologist*, 220(3), 785-798.
- Goldstein, B. R., Furnas, B. J., Calhoun, K. L., Larsen, A. E., Karp, D. S., & de Valpine, P. (2024). Drought influences habitat associations and abundances of birds in California's Central Valley. *Diversity and Distributions*, 30(5), e13827.
- Grant, K., Kreyling, J., Dienstbach, L. F., Beierkuhnlein, C., & Jentsch, A. (2014). Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186, 11-22.
- Hoover, D. L., Knapp, A. K., & Smith, M. D. (2014). Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes. *Ecology*, 95(9), 2646-2656.
- Hrncir, M., Maia-Silva, C., da Silva Teixeira-Souza, V. H., & Imperatriz-Fonseca, V. L. (2019). Stingless bees and their adaptations to extreme environments. *Journal of Comparative Physiology A*, 205, 415-426.
- Jeppesen, E., Brucet, S., Naselli-Flores, L., Papastergiadou, E., Stefanidis, K., Nøges, T., ... & Beklioglu, M. (2015). Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia*, 750, 201-227.
- Jiménez, M. A., Jaksic, F. M., Armesto, J. J., Gaxiola, A., Meserve, P. L., Kelt, D. A., & Gutiérrez, J. R. (2011). Extreme climatic events change the dynamics and invasibility of semi-arid annual plant communities. *Ecology letters*, 14(12), 1227-1235.
- Kovach, R. P., Dunham, J. B., Al-Chokhachy, R., Snyder, C. D., Letcher, B. H., Young, J. A., ... & Muhlfeld, C. C. (2019). An integrated framework for ecological drought across riverscapes of North America. *BioScience*, 69(6), 418-431.
- Kuppler, J., Wieland, J., Junker, R. R., & Ayasse, M. (2021). Drought-induced reduction in flower size and abundance correlates with reduced flower visits by bumble bees. *AoB Plants*, 13(1), plab001.
- Lake, P. S. (2011). *Drought and aquatic ecosystems: effects and responses*. John Wiley & Sons.
- Leffler, A. J., Monaco, T. A., & James, J. J. (2011). Nitrogen acquisition by annual and perennial grass seedlings: testing the roles of performance and plasticity to explain plant invasion. *Plant Ecology*, 212, 1601-1611.

- Leitinger, G., Ruggenthaler, R., Hammerle, A., Lavorel, S., Schirpke, U., Clement, J. C., ... & Tappeiner, U. (2015). Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology*, 8(8), 1600-1613.
- Lopezaraiza-Mikel, M., Quesada, M., Álvarez-Añorve, M., Ávila-Cabadilla, L., Martín-Rodríguez, S., Calvo-Alvarado, J., ... & Vázquez-Ramírez, A. (2013). Phenological patterns of tropical dry forests along latitudinal and successional gradients in the neotropics. In *Tropical dry forests in the Americas* (pp. 119-146). CRC Press.
- Lorange, E. A., Race, B. L., Sebbane, F., & Joseph Hinnebusch, B. (2005). Poor vector competence of fleas and the evolution of hypervirulence in *Yersinia pestis*. *The Journal of infectious diseases*, 191(11), 1907-1912.
- Magoulick, D. D., & Kobza, R. M. (2003). The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis. *Freshwater biology*, 48(7), 1186-1198.
- Miller-Struttmann, N. E., & Galen, C. (2014). High-altitude multi-taskers: bumble bee food plant use broadens along an altitudinal productivity gradient. *Oecologia*, 176, 1033-1045.
- Minckley, R. L., Roulston, T. A. H., & Williams, N. M. (2013). Resource assurance predicts specialist and generalist bee activity in drought. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1759), 20122703.
- Mojzes, A., Ónodi, G., Lhotsky, B., Kalapos, T., & Kröel-Dulay, G. (2020). Experimental drought indirectly enhances the individual performance and the abundance of an invasive annual weed. *Oecologia*, 193(3), 571-581.
- Morand, S., & Lajaunie, C. (2018). Loss of biological diversity and emergence of infectious diseases. *Biodiversity and health*, 29.
- Nam, W. H., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Tadesse, T., & Wilhite, D. A. (2015). Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management*, 160, 106-117.
- Nicotra, A. B., Beever, E. A., Robertson, A. L., Hofmann, G. E., & O'Leary, J. (2015). Assessing the components of adaptive capacity to improve conservation and management efforts under global change. *Conservation Biology*, 29(5), 1268-1278.
- Nijssen, M., & Siepel, H. (2010). The characteristic fauna of inland drift sands. In *Inland drift sand landscapes* (pp. 255-278). KNNV Publishing.
- Nobre, R. L. G., Caliman, A., Cabral, C. R., de Carvalho Araújo, F., Guerin, J., Dantas, F. D. C. C., ... & Carneiro, L. S. (2020). Precipitation, landscape properties and

- land use interactively affect water quality of tropical freshwaters. *Science of the Total Environment*, 716, 137044.
- Ogutu, J. O., & Owen-Smith, N. (2003). ENSO, rainfall and temperature influences on extreme population declines among African savanna ungulates. *Ecology Letters* 6:412–419.
- Paschoal, L. R., Andrade, D. P., Pimpao, D. M., Torres, S., & Darrigran, G. (2020). Massive mortality of the giant freshwater mussel *Anodontites trapesialis* (Lamarck, 1819)(Bivalvia: Mycetopodidae) during a severe drought in a Neotropical reservoir. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92, e20180811.
- Pyke, G. H. (1982). Local geographic distributions of bumblebees near Crested Butte, Colorado: competition and community structure. *Ecology*, 63(2), 555-573.
- Ripple, W. J., Newsome, T. M., Wolf, C., Dirzo, R., Everatt, K. T., Galetti, M., ... & Van Valkenburgh, B. (2015). Collapse of the world's largest herbivores. *Science advances*, 1(4), e1400103.
- Sadiqi, S. S. J., Hong, E. M., Nam, W. H., & Kim, T. (2022). An integrated framework for understanding ecological drought and drought resistance. *Science of The Total Environment*, 846, 157477.
- Santos, D. F. D., Silva, J. M. D., & Becker, V. (2021). Increase in eutrophication symptoms during a prolonged drought event in tropical semi-arid reservoirs, Brazil. *Rbrh*, 26, e39.
- Seddiki, L. S., Seddiki, F., Kamel, T., Seddiki, A., & Seddiki, S. (2023). The Otter in an Arid Zone-Lake Jorf Torba, Southwest Algeria: Ecology, Diet and Behaviour. *IUCN Otter Spec. Group Bull*, 40(2), 72-79.
- Sperry, J. H., & Weatherhead, P. J. (2008). Prey-mediated effects of drought on condition and survival of a terrestrial snake. *Ecology*, 89(10), 2770-2776.
- Staver, A. C., Archibald, S., & Levin, S. A. (2011). The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *science*, 334(6053), 230-232.
- Steinhauer, N. A., Rennich, K., Wilson, M. E., Caron, D. M., Lengerich, E. J., Pettis, J. S., ... & Bee Informed Partnership. (2014). A national survey of managed honey bee 2012–2013 annual colony losses in the USA: results from the Bee Informed Partnership. *Journal of Apicultural Research*, 53(1), 1-18.
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Ampersee, N. J., Bulaon, B. M., & Yee, J. L. (2019). Which trees die during drought? The key role of insect host-tree selection. *Journal of Ecology*, 107(5), 2383-2401.

- Sulikowska-Drozd, A., & Maltz, T. K. (2014). Experimental drought affects the reproduction of the brooding clausiliid *Alinda biplicata* (Montagu, 1803). *Journal of Molluscan Studies*, 80(3), 265-271.
- Thomson, D. M. (2016). Local bumble bee decline linked to recovery of honey bees, drought effects on floral resources. *Ecology letters*, 19(10), 1247-1255.
- Withers, P. C., Cooper, C. E., & Buttemer, W. A. (2004). Are day-active small mammals rare and small birds abundant in Australian desert environments because small mammals are inferior thermoregulators?. *Australian Mammalogy*, 26(2), 117-124.
- Woodward, G., Bonada, N., Brown, L. E., Death, R. G., Durance, I., Gray, C., ... & Pawar, S. (2016). The effects of climatic fluctuations and extreme events on running water ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1694), 20150274.
- Zwarts, L., Bijlsma, R. G., & van der Kamp, J. (2023). The Gap of Chad, a dearth of migratory birds in the central Sahel. *Ardea*, 111(1), 207-226.

BÖLÜM 6

KURAKLIKTA BİTKİLERDE KÖK VE KSİLEM DEMETİ MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ¹
Doç. Dr. Yelda EMEK¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759183>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. iyavas@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6863-9631

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Aydın, Türkiye. yelda@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1095-3908

GİRİŞ

Sıcaklık, kuraklık, tuzluluk, ağır metal, ışık, pestisit ve soğuk gibi başlıca abiyotik stresler, gıda ve çevre güvenliği için en büyük tehditlerdir (Hossain ve ark., 2022). Kuraklık, ürün verimliği üzerine diğer tüm çevresel streslere kıyasla daha fazla negatif etkisi olan çevresel stres olarak kabul edilir (Lambers ve ark., 2008). Kuraklık stresine tepki olarak bitkilerde çeşitli morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal değişiklikler meydana gelmekte dolayısıyla bitki büyümesi ve gelişimi büyük ölçüde etkilenmektedir (Anjum ve ark., 2011). Bitkiler kuraklığa çeşitli şekillerde tepki vermektedir. Bunlar arasında daha kısa boy, daha küçük yaprak boyutu, daha az sayıda yaprak, daha az meyve/tohum/biyokütle verimi ve üreme sürecindeki değişiklikler yer almaktadır (Hossain ve ark., 2022).

Kuraklık genel olarak tarımsal ürünlerin büyümesi, gelişimi ve verimine ciddi şekilde zarar vermektedir. Bununla birlikte, bazı türlerde, örneğin yer fıstığında erken dönemde meydana gelen kuraklık stresi, verime ciddi şekilde zarar vermekten ziyade verimin artışına neden olabilmektedir (Puangbut ve ark., 2009).

Kurak koşullarda kök uzunluğu, kök çapı, yüzey alanı, doku yoğunluğu, biyokütle ve dal sayısı etkilenmektedir. Bununla birlikte, kökler, toprakta suyun sınırlı olduğu ve büyümenin engellendiği koşullarda su alımını sürdürmek için toprakta derinlere doğru uzama eğilimindedir. Bu nedenle, kuraklık stresi kök biyokütlesi, kök uzunluğu, kök sayısı gibi genel kök özelliklerini olumsuz etkilese de, kök sisteminin belirli kısımları nispeten iyi gelişmiş bir kök sistemi oluşturacak şekilde büyümeyi sürdürmektedir. Kurak koşullarda, su

temin etmek ve bitkilerin kuraklık stresine adaptasyonunu iyileştirmek için daha derin bir toprak katmanından yararlanmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle ideal bir kök sistemine ulaşmak için, tohumdan çıkan ve çevreyle temas eden ilk kök dokusu olan primer kök, çeşitli bitkilerin apikal bölgelerinde hücre uzamasını sürdürerek sürgün büyümesini devam ettirmektedir (Kang ve ark., 2022).

Kuraklık ilerledikçe kökler, daha derin katmanlardaki kaynakları alabilmek için toprağın daha derinlerine doğru büyüme eğilimindedirler. Sürgün, yaprak ve diğer bitki kısımların tepkisi de kök tarafından kontrol edilmektedir. Çünkü kök, topraktaki su heterojenliğine göre çeşitli metabolik tepkileri düzenlemektedir (Kalra ve ark., 2024).

KURAKLIKTAN KAÇINMA VE KURAKLIĞA DAYANIKLILIK (TOLERANS)

Kuraklıktan kaçış, bitkinin kuraklık stresi başlamadan önce yaşam döngüsünü tamamlayabilme yeteneğidir. Kuraklıktan kaçınma, su emilimini artırarak ve/veya buharlaşmayı azaltarak bitkilerin stres dönemlerinde yüksek su durumunu korumasına yardımcı olmaktadır. Kuraklığa dayanıklılık (veya tolerans) terimi ise kuraklık stresini tolere etmelerini sağlayan uyarlanabilir özelliklere sahip bitki türleri için kullanılan geniş anlamli bir terimdir. Kuraklık toleransı bitkilerin düşük su potansiyelinde bile turgoru koruması ve hücrelerde metabolizmayı sürdürmesi anlamına gelmektedir. Bu durum temel olarak protoplazmik tolerans, osmolit sentezi ve/veya uyumlu çözünen maddelerle ilişkilidir. Kuraklığa dayanıklı bazı bitki türleri, stoma kapanmasını teşvik ederek, yaprak ve gövde büyümesini azaltarak, kök uzamasını

koruyarak/artırarak kuraklık stresini tolere edebilir veya önleyebilir. Kuraklığa tolerans, stres altındaki bitkilerde çeşitli adaptif mekanizmaların hücresel, fizyolojik ve moleküler ekspresyonu yoluyla bitkilerin uygun su dengesini sürdürme yeteneğidir. Kuraklık stresi, bitki veriminin yanı sıra gelişimi de olumsuz yönde etkileyen çok çeşitli morfofizyolojik ve biyokimyasal değişikliklere neden olmaktadır. Stresin etkileri bitki türüne ve genotipine, bitkinin yaşına ve büyüklüğüne, ayrıca stresin süresine ve şiddetine bağlıdır. Genel olarak kuraklık stresi, bitki boyunu, yaprak kuru ağırlığını, yaprak alanı indeksini, boğum sayısını, lif kalitesini ve kök gelişimini etkileyerek bitki büyüme ve gelişimini de ciddi şekilde sınırlamaktadır (Meshram ve ark., 2022).

Kurak koşullarda yetişen bitkilerin bu olumsuz koşullardan kaçınmaları genellikle imkansızdır. Bu nedenle, bu tür ortamlardaki bitkiler, belirli biyokimyasal veya morfolojik adaptasyonlar ve hücre hasarının önlenmesi yoluyla su stresine dayanma yeteneği kazanmışlardır. Kuraklığa tolerans mekanizması, ozmotik ayarlama yoluyla turgor basıncının korunmasını, hücrelerde elastikiyetin artmasını ve protoplazmik dirençle hücre boyutunun küçülmesini de içermektedir (Azhar ve Rehman, 2018).

KURAKLIK TOLERANSI: KÖK YAPISI VE SU ALIM MEKANİZMALARI

Tohum çimlenmesi ve erken fide büyümesi, kuraklık stresi açısından potansiyel olarak en kritik aşamalardır (Ahmad ve ark, 2009). Azalan çimlenme oranı ve zayıf fide gelişimi kuraklık stresinin en erken belirtileridir. Çimlenme, hücre bölünmesi ve uzama gibi süreçler,

organik bileşiklerin sentezi, fotosentez, solunum ve bir takım diğer fizyolojik ve biyokimyasal süreçler gibi metabolik faaliyetler için bitkilerin suya ihtiyacı vardır (da Silva ve ark., 2013).

Su stresi koşullarında plumulanın uzaması engellenir, bu da koleoptillerin daha kısa olmasına ve zayıf fide oluşumuna neden olur. Bu nedenle, daha uzun koleoptilli genotiplerin kullanılması, daha iyi fide oluşumunun sağlanması için uygun bir yoldur. Kuraklık sürecinde tohum canlılığını kaybetmekte, bu da özellikle RNA, DNA ve protein yapılarında hasara ve değişikliklere neden olan reaktif oksijen türleri (ROS) gibi çok sayıda biyokimyasal değişiklik, membran yırtılmaları, solunum aktivitesinde azalma ve dolayısıyla verimde düşüş ile ilişkilidir (Anjum ve ark., 2017).

Suyun kısıtlı olduğu ortamlarda (kuraklığa dayanıklılık) bir bitkinin verimini belirlemede köklerin rolü tartışmalıdır. Çünkü su alımına yönelik bireysel kök özellikleri, bir kök sisteminin toprak suyunu yakalamada etkili olduğunu garanti etmemektedir. Kuraklığa karşı dayanıklılığı arttırmada derin veya sığ kök sistemlerine mi, daha çok veya daha az sayıda köklere mi, yüksek veya düşük kök direncine mi, etkin kök dallanmasına mı yoksa sınırlı dallanmaya mı, su eksikliğine karşı yüksek hassasiyete mi yoksa düşük hassasiyete mi ihtiyaç duyulduğu henüz netlik kazanmamıştır (Palta ve Turner, 2019).

Kuraklık stresi, bitkileri moleküler olarak birçok düzeyde de etkilemektedir (Bhargava ve Sawant, 2013). Kuraklığa verilen tepkiler arasında fotosentezde ve yaprak genişlemesinde azalma, stoma kapanması, reaktif oksijen türlerinin oluşumunun artması, erken yaprak yaşlanması, asimilat translokasyonunun azalması ve buna bağlı olarak

bitki gelişiminin olumsuz etkilenmesi yer almaktadır (Wang ve ark., 2017). Ayrıca kuraklık koşullarının yarattığı stres, su kullanım etkinliği, nisbi nem içeriği, yaprak su potansiyeli, stoma direnci ve terleme oranını da etkilemektedir. Su stresine verilen bu fizyolojik tepkilerin çoğu, kök sistemi ile ilişkili olup, bazı durumlarda su kapasitesinin artması ile birlikte iyileşme göstermektedir (Lynch, 2007).

Kök sistemi iki ve bazen üç ana kök türünden oluşmaktadır. Odunsu kökler, mevsim boyunca bitkiyi toprağa bağlama, karbonhidrat ve besin maddelerini depolama ve taşınmada önemli rol oynamaktadır. Otsu bitkilerin odunsu kökleri, tipik olarak genel kök sistemi mimarisini oluşturur, nihai köklenme derinliğini ve bitkilerin sıkıştırılmış toprak katmanlarına nüfuz etme yeteneğini kontrol eder. İnce (veya yanal) kökler ise, su alımında kök sisteminin en aktif kısmını oluşturur (Rewald ve ark., 2011).

Suyun kök yüzeyinden kök ksilemine taşınması çeşitli şekillerde olmaktadır. Genç köklere giren suyun önce epidermal hücre katmanına geçmesi gerekmektedir. Bu tür hücrelerden çıkan kök tüyleri, mikorizal mantarların hifleri gibi, su ve besin alımı için yüzey alanını artırır. Su daha sonra ya hücre duvarlarında (apoplastik yol) ya da hücrelerin içinden (simplastik yol) hareket ederek kök korteksi boyunca hareket eder. Simplastik yoldaki hücreler, plazmodesmata ile birbirine bağlanır ve su, plazma zarının diğer kısımları boyunca hücreden hücreye hareket edebilir. Endodermiste çoğu hücrenin radyal duvarları suberin (Kapsari şeridi olarak adlandırılır) ile doyurulur ve dolayısıyla bloke edilir, bu da su ve çözünen maddelerin endodermal hücrelerin sitoplazmasına doğru

hareket etmesine neden olur. Endodermisi geçtikten sonra su ksilemin iletken hücrelerine girebilir. Dikotillerin daha eski kökleri için, hücre duvarları sıklıkla suberin ve lignin içeren periderm katmanları vasküler dokunun dışında oluşur ve diğer dış hücre katmanları bozulabilir. Öncelikle suberin nedeniyle suyun bu tür eski kökler boyunca radyal hareketi, özellikle kurak koşullar altında azalır (Nobel, 2017).

Derin kök sistemi, birçok tarla bitkisinde kuraklığa karşı direncin artırılmasında önemli bir mekanizma olarak tanımlanmıştır (Beebe ve ark., 2010). Kuraklığa toleransla ilişkili kök özellikleri, bitkilerin kuraklığa dayanıklılık mekanizmaları açısından önemlidir. Kök uzunluğu, yoğunluğu, kök derinliği ve kök dağılımı gibi kök özelliklerinin kuraklığa dayanıklılığı oluşturan faktörler olduğu tespit edilmiştir (Matsui ve Singh, 2003). Bir bitkinin daha derin toprak suyundaki kök dağılımını değiştirme yeteneği kuraklıktan kaçınmada önemli bir mekanizmadır (Songsri ve ark., 2008).

Köklerin büyüklüğü, derinliği ve mimarisinin bir sonucu olarak su alımının artması, küçük taneli tahıllarda artan kuraklık toleransı ile ilişkilendirilmiştir (Lopes ve Reynolds, 2010). Kuraklık stresi altında buğdayda, kök sayısı, kök uzunluğu, kökün spesifik yüzey alanı, kök-sürgün oranı, kök büyüme potansiyeli, kök su potansiyeli ve kök damar çapı önemli ölçüde değişmektedir (Awad ve ark., 2018). Kuraklık stresi, kök morfolojik indekslerinin yanı sıra, kök özsuyu, kök solunum hızı, kök plazma membranı geçirgenliği, membran lipid peroksidasyon seviyesi ve koruyucu enzim aktivitesi gibi köklerin bazı fizyolojik göstergeleri üzerinde de önemli etkilere sahiptir (Kaul, 1966). Büyüme mevsimi boyunca toprak altındaki konumlarından dolayı kökleri zarar

vermeden gözlemleyebilmek oldukça zordur. Bu nedenle birçok kök çalışması, hidroponik ortamda ya da serada kök tüpleri içerisinde yetiştirilen bitkilerde gözlenmektedir (Awad ve ark., 2018).

Kuraklık koşullarında toprak üst yüzeyinde yeterli suyun bulunmadığı durumlarda derin kök yapısı, uzun süre toprak altı suyundan faydalanmayı kolaylaştırmanın en etkili yollarından biri olarak düşünülmüştür. Ancak daha derin bir kök sistemi her zaman daha yüksek kuraklık direnciyle ilişkili bulunmamaktadır. Bitkinin kuraklık stresi altında hayatta kalmasını sağlayan biyolojik kuraklığa dayanıklılık, tarımsal üretimde faydalı etkilere sahip olmayabilir (Bandurska, 2022). Önceleri bitkinin kuraklığa dayanıklılığını artırmak için derin köklere ihtiyaç duyulduğu düşünülmekteydi (Gowda ve ark., 2011). Ancak derin kökler ile kuraklığa dayanıklılık arasında tutarsız bir ilişki söz konusudur. Derin kök sistemi ile, yüksek miktarda fotosentetik ürün tüketen büyük bir biyokütleye sahip olunabilir ve bu durum da verim kaybına neden olabilir. Genel olarak derine inen kökler, toprağın derinliklerinden bitkinin suyu almasına olanak tanır, bu da kanopinin soğutulmasına, yaprak yeşilliğinin korunmasına ve tane veriminin artmasına yardımcı olur (Fang ve ark., 2017).

Dik kök açılı fenotipler, terminal kuraklık sırasında su elde etmede daha iyidir (Ho ve ark., 2005). Belirli bir ortamda yetiştirilecek uygun bitki türlerinin seçilebilmesi için tarımsal açıdan kök özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak çoğu durumda tarladaki bitkinin kök yapısı çevresel koşullardan o kadar etkilenir ki, belirli bir türün veya genotipin kök yapısının tanımlanması bazen neredeyse imkansız hale gelir. Genel olarak, serin mevsimde baklagil bitkilerinin

toplam kök uzunluğunun, aynı alandaki tahıl bitkilerinin kök uzunluğundan yaklaşık 5 ila 10 kat daha küçük olduğu öne sürülmektedir. Baklagillerin kök sistemi büyüme dönemi boyunca artıyor gibi görünse de dane dolumu başladıkça artış hızı yavaşlamaktadır (Abdelhamid, 2010).

Kuru koşullara adapte olmuş hem odunsu hem de otsu bitkilerin daha büyük spesifik kök uzunluğuna sahip daha küçük çaplı ince köklere sahip olmaktadır (Henry ve ark., 2012). Kök dokusu yoğunluğunun öncelikle çeşitli çim türleri arasında spesifik kök uzunluğunu ve spesifik yüzey alanındaki farklılıkları kontrol etmektedir (Wahl ve Ryser, 2000). Kök korteksindeki aerenkima oluşumu kök dokusu yoğunluğunu azaltarak spesifik kök uzunluğunu ve yüzey alanını artırabilir. Örneğin mısırda kurak koşullarda bitki performansını arttırmak için kök aerenkimasının uyarılması önerilmiştir (Zhu ve ark., 2010).

Kök tüyleri toprak kurudukça köklerin toprak parçacıklarıyla temasını destekleyebilir ve böylece köklerin toprak suyunu elde etmesine yardımcı olabilir. Su alımının temel bölgeleri genç kök uçlarıdır. Kök çapına ek olarak ksilem çapı da kök hidrolik iletkenliğini ve kuraklık koşullarda bitki verimini etkilemektedir. Bir yetiştirme stratejisi olarak, kök ksilem çapındaki azalma, iyi sulanan koşullar altında bitkinin toplam hidrolik iletkenliğini azaltabilir ve bitkinin maksimum büyüme potansiyelini sınırlayabilir (Comas ve ark., 2013).

Kök hidrolik iletkenliği kuraklık, tuzluluk, anoksi (su altında kalma ile oksijen yetersizliği), düşük sıcaklık ve besin bulunabilirliği gibi çevresel uyaranlardan etkilenmektedir (Vandeleur ve ark., 2009).

Kök hidrolik iletkenliğindeki değişim (kök yüzey alanına normalize edilmiş hidrolik iletkenlik), suyun üç şekilde ksileme doğru radyal olarak hareket edebildiğini göstermektedir. Bunlar: apoplastik, simplastik ve transselüler yollardır. Simplastik ve transselüler yolların deneysel olarak ayrılması zordur ve toplu olarak hücreden hücreye şeklinde kabul edilir. Apoplastik akış ise, kaspari bantları ve suberin lamelleri dahil olmak üzere anatomik değişikliklerle geri döndürülemez şekilde değiştirilebilir (Allewa et al., 2006).

Aquaporinler, bitki hücrelerinin plazmasında ve hücre içi zarlarında bulunan kanal proteinleridir; burada su ve/veya küçük nötr çözünen maddelerin (üre, borik asit, silisik asit) veya gazların (amonyak, karbondioksit) taşınmasını kolaylaştırmaktadırlar. Aquaporinler, hem hidrostatik hem de ozmotik gradyanlar altında köklerde ve yapraklarda radyal su taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Maurel et al., 2008). Farklı çalışmalar, aquaporinlerle su taşınmasının, türlere bağlı olarak toplam su taşınmasının %20 ila %85'ini oluşturduğunu göstermektedir (Parent et al., 2009). Su alımının geçişini düzenleyen aquaporinlerin artışı ve iletkenliği, sürgün talebini karşılamak ve azalan kök yüzey alanını telafi etmek için kök hidrolik iletkenliğini (kök uzunluğu başına iletkenlik) artırabilir (Laur et al., 2013). Hücreden hücreye iletkenlik, büyük ölçüde membran dizisi içindeki aquaporinlerin aktivitesiyle belirlenir; bu da iletkenlikte nispeten hızlı ve geri dönüşümlü değişikliklerle sonuçlanır. *Arabidopsis*'in genomik dizisinde 35 aquaporin tanımlanmıştır. Aquaporinlerin su geçirgenliği sitozolik pH, fosforilasyon, büyük basınç darbeleri ve ozmotik çözünen maddeler ile düzenlenebilir

(Allema ve ark., 2006).

KÖKLERİN KURAK KOŞULLARDA TOPRAKLA ETKİLEŞİMİ

Toprak stres faktörleri kimyasal, fiziksel ve biyolojik faktörleri içermektedir. En önemli kimyasal faktörlerden biri pH'tır. Düşük toprak pH'sının doğrudan etkisine ek olarak, temel sorunlar çözünabilir alüminyum iyonlarının toksisitesi ve toprak asitliği ile ilişkili fosfor eksikliğidir. Buna karşılık, toprak pH'sının yüksek olması durumunda, kuru tarım ve çölleşme ile ilgili olarak alkalilik-tuzluluk sorunları ortaya çıkmaktadır. Fiziksel faktörlere örnek olarak toprak nemi, toprak havası, toprak sıcaklığı ve toprak kuvveti verilebilir. Biyolojik faktör ise kök sistemi morfolojisini ve fonksiyonunu da etkilediği bilinen toprak mikroorganizmalarını içermektedir. Toprak stresıyla ilgili araştırmalar değerlendirildiğinde, bu tür stresin bitki köklerinin gelişimi üzerindeki etkilerine çok az değinilmiştir. Kuraklığa maruz kalan bitkiler genellikle küçük bir kök sistemi konfigürasyonu sergilemekte ve kök boyutundaki azalma su stresinin büyüklüğüyle doğru orantılı olarak meydana gelmektedir. Örneğin tahıllarda şiddetli su stresi koşullarında köklerde uzama, iyi sulanan koşullara göre çok daha yavaştır. Kuraklık stresinde kök uzunluğundaki azalmanın, kök ucunun birkaç milimetre gerisindeki kortikal katmanlardaki hücre beslenme oranında önemli bir azalmadan kaynaklandığı bildirilmektedir. Hafif düzeydeki su stresinde kök büyümesi etkilenmemekte, çoğunlukla kök/sürgün oranını arttırmaktadır (Abdelhamid, 2010).

Yüksek verim ve yaprak hastalıklarına karşı dayanıklılık için 17 adet kışlık buğday çeşidinin dane verimi ile ilgili kök özelliklerinin

tarihsel gelişimi 60 yıl boyunca incelenmiştir. Sonuçlar, modern çeşitlerin yüzeysel derinlikte daha fazla kök biyokütlesi verdiği, ancak artan derinlikle beraber daha yüksek plastisiteye sahip olduğu, bunun da verim ve değişen toprak suyu mevcudiyetine uyumu artırmaya katkıda bulunduğu gözlenmiştir (Qin ve ark., 2019).

Kurak koşullarda verime katkı sağlayacak kök sistemi özellikleri, yağışın miktarına ve dağılımına; bunun yanı sıra toprağın dokusu, derinliği ve su tutma kapasitesine göre değişmektedir. Kuraklığa dayanıklılığı artıran kök özelliklerinin genetik ifadesi bir takım faktörlere ve bunların etkileşimlerine bağlı olması nedeniyle kök sistemi ile kuraklığa dayanıklılık arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır.

Birçok çalışma, yüksek tahıl verimi, su ve azot kullanım etkinliği için 'ideotip' kök mimarisini önermektedir (Meister ve ark., 2014). İdeotip kök mimarisi, bitkilerin optimum verim ve adaptasyon sağlamak için sahip olmaları gereken ideal kök özelliklerini tanımlayan bir kavramdır. Bu kavram, bitkilerin kök sistemlerinin şekil, yapı ve işlev açısından en verimli hale getirilmesi amacını taşımaktadır.

Kök mimarisini ve fonksiyonunu iyileştirdiği varsayılan veya kanıtlanmış farklı önemli ideotiplere katkıda bulunacak kök özelliklerinde farklı araştırmacılar tarafından hedeflenen değişiklikler şunlardır: 1) Nodal kök sayısının artması, 2) Kök çapının artması, 3) Kök yenilenme hızının azalması, 4) Fide kök kuvveti, 5) Yan köklerin uzun olması, 6) Rizosfer pH'sı, 7) Geliştirilmiş kök-mikrop etkileşimleri, 8) Kök çoğalması, 9) Kökten sızıntılar, 10) Artan yan kök sayısı, 11) Kök açısı ve gravitropizm, 12) Kortikal aerenkima, 13) Uzun kök tüyleri, 14) Kök tüy ömrünün artması, 15) Kök uzunluğu

yoğunluğunun artması (Meister ve ark., 2014).

Güçlü bir bitki kök sistemi, vejetatif ve generatif uygunluk için önemli bir faktör olsa da, bitki verimini artıracak bir özellik olarak kök sistemi mimarisinin kullanılmasındaki ilerlemeler yavaş olmuştur. Yapılan çalışmalar, topraktaki mineral kaynaklarının alımını artırarak bitki verimliliğini artırmaya uygun kök ideotiplerini ele almaktadır. Başka bir ideotip, bitkilerin besin ve su için toprakta besin aramasına olanak tanıyan ve aynı zamanda yeni kökler yetiştirmenin metabolik maliyetini kök fonksiyonu ve aktivitesini sürdürme maliyetiyle dengeleyen "*hastalıklı kökler*"dir (White ve ark., 2013).

Dik-derin-ucuz ideotip, belirli koşullar altında yetiştirilen mahsullerde azot ve su kullanım etkinliğini artırmak için önerilmiştir. Bu model, nitrat geri kazanımı için uygun kök açılarını, su ve besin alımı için derin köklenmeyi ve kök bakımının karbon maliyetini azaltmak için aerenkim gelişimi yoluyla kök kortikal hücrelerinin azaltılmasını hedeflemiştir (Lynch, 2013).

Köklerin karbon kullanımını azaltmak için başka bir paradigma, kök çapının azaltılmasını, yan kök ve kök tüy uzunluğunun artırılmasını ve artan yan kök/kök tüy sayısı ve yoğunluğuna kıyasla kök ömrünün arttırılmasını hedeflemektedir (Brown ve ark., 2013).

Yağışa dayalı olarak ve sulu tarımda tekrarlanan toprak kuruma ve yeniden ıslanma döngüleri meydana gelmektedir. Bu döngülerinin yoğunluğu ve sıklığı, hem mikrobiyal fizyolojiyi hem de toprağın fiziksel süreçlerini düzenlemektedir. Böylece toprak besin maddelerinin mineralizasyonunu ve immobilizasyonunu ve bunların

biyoyararlanımını etkilemektedir (Wang ve ark., 2017).

Kuraklık, sıcaklık, tuz, metaller ve hatta hastalıklar dahil olmak üzere çeşitli streslere karşı konakçı bitkiye tolerans kazandıran mantar ortak yaşamlarının (mikobiyontlar) çok sayıda raporu da vardır. Kuraklık stresi koşullarında, kuraklık stresinden kaynaklanan hasarı azaltmak için toprak mikroorganizmalarının kullanımının bitkisel üretim için sürdürülebilir çözümler olduğunu göstermektedir. Arbusküler mikoriza oluşumu sırasında, mantar hifleri köklerin epidermal, ekzodermal ve kortikal hücre katmanlarına girerek iç kortekse ulaşır. Mantarlar ayrıca bitkinin dışında hifler oluşturarak kök-toprak ara yüzeyini genişleterek fosfat ve su gibi besin maddelerinin alımını kolaylaştırır. Arbusküler mikorizal mantarlar (AMF), konakçı ve mantar arasındaki bir dizi karmaşık iletişim aracılığıyla, konakçı bitkinin, kuraklık da dahil olmak üzere biyotik ve abiyotik stres koşulları altında bile kendisini yerleştirmesini ve daha verimli bir şekilde büyümesini sağlar. Kökler ve arbusküler mikorizal mantarlar arasındaki ilişkilerin, kuraklık koşulları altında bitki kökleri tarafından alınan fosfor (P) miktarını arttırdığı gösterilmiştir. Artan P alımının bir sonucu olarak, mikoriza ile aşılanan bitkiler, arbusküler mikorizal mantarı olmayanlara göre sıklıkla daha yüksek verim üretmektedirler (Gholamhoseini ve ark., 2013).

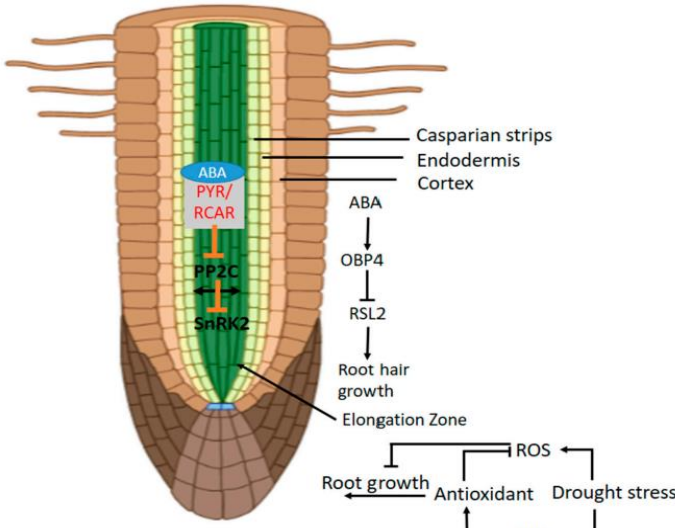
Ormandaki ağaçların kök sistemleri, morfolojik ve büyüklük bakımından farklılık göstermesi nedeniyle otsu bitkilerle karşılaştırıldığında oldukça karmaşıktır. Ağaçların kökleri, stresten kaçınmalarını ve stresi tolere etmelerini sağlayan çeşitli stratejiler yoluyla kuraklığa tepki verme yeteneğine sahiptir. Ağaç kök sistemleri

orman ekosistemlerinin temel bileşenleri olup, su ve besin maddesi alımından sorumludurlar, Ağaçlar fiziksel stabilizasyon sağlarlar, besin maddeleri ve karbonhidratları depolayıp, toprağa karbon ve besin maddeleri sağlarlar. Toplamda köklerin, ağaçların biyokütlesinin %20-40'ını oluşturduğu tahmin edilmektedir (Brunner ve ark., 2015). Kaba kökler (çapı >2 mm) ağaçların toprağa tutunmasından sorumludur ve suyun daha derin toprak katmanlarından taşınmasını sağlayan organlar olarak görev yaparlar. İnce kökler (çapı <2 mm) su ve besin alımı için önemlidir ve tipik olarak biyokütle, yaşam süresi, spesifik kök uzunluğu, C/N oranı ve lignin içeriği gibi çeşitli farklı özelliklerle tanımlanırlar. İnce kökler yenilendikleri için toprağa karbon ve besin sağlarlar ve dolayısıyla karbon tutumu ve döngüsünde önemli bir rol oynarlar (Brunner ve Godbold, 2007).

İkincil büyüme nedeniyle ağaçlar, damar dokularını değiştirerek düşük su koşullarına tepki verme yeteneğine sahiptir. Absisik asit (ABA), yapraklarda olduğu gibi köklerde de üretilmekte ve her iki bitki kısmındaki seviyeler kuraklığa maruz kalma durumunda artmaktadır. Kurak koşullarda artan ABA konsantrasyonları büyümeyi engellemektedir. ABA'nın genellikle büyümeyi sınırlayan bir stres hormonu olduğu düşünülmektedir. Absisik asit köklerden yapraklara taşınır, burada stomaların kapanmasını tetikleyen uzun mesafeli bir sinyal görevi görür ve ABA biyosentezi genlerinin ekspresyonunu tetikler ve böylece yapraklardaki ABA içeriği artar (Christmann ve ark., 2007). Stoma kapanmasını tetiklemek için her iki mekanizmanın da gerekliliği muhtemeldir. Bununla birlikte, elektriksel ve hidrolik kök sinyallerini ABA'nın stoma kapanmasındaki rolü fonksiyonel olarak

önermektedir (Schachtman ve Goodger, 2008).

ABA, değişen ortamlara yanıt olarak kök büyümesini ve mimarisini modüle eder (Şekil 1). ABA'nın orta seviyesi, kurak koşullarda kök gelişimini daha derine inerek su aramaya teşvik eder. Yüksek düzeydeki ABA, kök büyümesini ve yanal kök oluşumunu engeller. ABA, diğer bitki hormonları ve sinyalleriyle antagonistik veya sinerjistik olarak hareket edebilir. ABA'nın kök büyümesindeki rolü ABA konsantrasyonuna bağlıdır ve bitki türleri arasında farklılık gösterebilir



Şekil 1. ABA, değişen ortamlara yanıt olarak kök büyümesini ve mimarisini modüle eder. Kaspari şeridi (casparian strips), endodermis, korteks, kök tüyü büyümesi (root hair growth), uzama bölgesi (elongation zone), reaktif oksijen türleri (ROS), absisik asit (ABA).

Kaynak: Ali ve ark., 2020.

Topraktaki bulunan kısıtlı su kaynağı kökler tarafından algılanmakta ve bitkinin terlemesinin zamanında ayarlanmasına izin vermek için sürgüne iletilmektedir. Mevcut anlayışa göre ABA, su stresini kökten gövdeye ileten uzun mesafeli sinyaldir. Fakat domates filizlerinin ABA biyosentezi eksikliği olan kök stokları üzerine aşılınması deneyleri, kök tarafından üretilen ABA'nın gerekli olmadığını veya alternatif olarak sürgünden kaynaklanan ABA'nın köklerdeki ABA eksikliğini telafi edebileceğini göstermiştir (Holbrook ve ark., 2002). ABA'nın, su eksikliğini kökten gövdeye ileten uzun mesafeli bir sinyal olarak işlevi halen net değildir (Christmann ve ark., 2007).

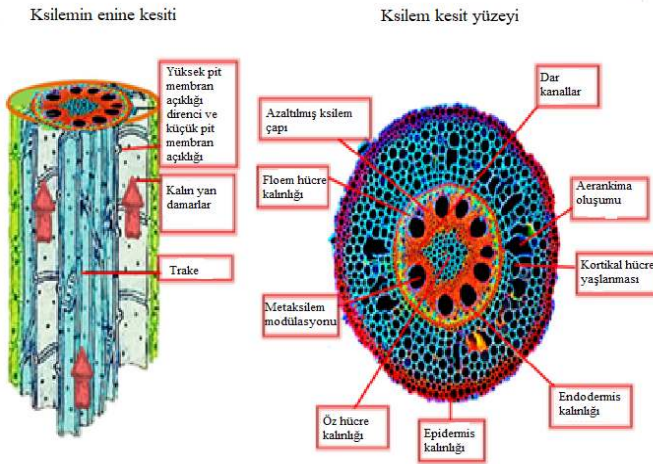
Sürgünlerin ve köklerin strese tepkilerini mobil sinyaller kullanarak nasıl senkronize ettiği yeni ortaya çıkan bir araştırma alanıdır. Ksilem ve floemden oluşan bitki damar sistemi, bitki gövdesini desteklerken aynı zamanda birçok sinyal molekülünü sürgünlerden köklere ve köklerden sürgünlere taşır. Bitki büyüme düzenleyicisi olan absisik asit, oksin, gibberellinler, sitokininler ve jasmonik asit ve benzerlerinin damar sistemi boyunca hareket ettiği ve uzak dokularda etki gösterdiği bilinmektedir. Yakın zamanlarda, birkaç küçük peptit, protein ve RNA molekülünün ksilem veya floemde hareketli olduğu ve besin alımını ve stres tepkilerini koordine ettiği bulunmuştur (Li ve ark., 2021).

KURAKLIKTA SUYUN BİTKİ İLETİM DEMETLERİNDE TAŞINIMI

Ksilem, floem ve kambiyumla birlikte vasküler dokunun temel bileşenidir. Başlıca görevleri, bitki-toprak arayüzünden kaynaklanan su

ve çözünen maddeleri gövdelere ve yapraklara taşımak ve mekanik destek ve depolama sağlamaktır. Ksilem, açık tohumlular ve kapalı tohumlular da dahil olmak üzere tüm damarlı bitkilerde bulunmaktadır (Ruzicka ve ark., 2015).

Ksilem hücre tipleri, farklı bitki grupları arasında, türden türe ve hatta aynı bitki türlerinde bile büyük farklılıklar göstermektedir. Olgun ksilemin önemli kısmı trake elementleri (TE'ler) adı verilen iletken hücre kalıntılarından oluşur. Ek olarak ksilem dokusu lifler ve ksilem parankimini de içerir. Ksilem parankim hücreleri, besin rezervlerini nişasta formunda depolar, kısa mesafeli taşımada işlev görür ve verimli bir su iletim sistemi oluşturmak için ksilem lignifikasyonuna katkıda bulunur (Menard ve Pesquet, 2015).



Şekil 2. Kuraklık stresinde gelişmiş hidrolitik iletkenlik için kök hücre ve doku düzeyindeki değişiklikler

Kaynak: Mohammadi ve ark., 2023

Ksilem dokusu, genellikle prokambiyum ve kambiyum olarak adlandırılan meristematik hücrelerden türetilmektedir. Bitki

hormonlarının vasküler dokuların başlatılmasında ve ksilem oluşumunda kilit rol oynadığı uzun yıllardan beri bilinmektedir. Özellikle oksin ve sitokinin, vasküler doku spesifikasyonunu tetikleyen kritik belirleyiciler olarak görev yapmaktadır. Model bitki *Arabidopsis* yapraklarında, ana damarın oluşumu gövdeden yaprak primordiyumunun tepesine kadar akropetal olarak ilerlemekte ve ikincil damarlar daha sonra orta damardan yaprak kenarlarına doğru ortaya çıkmaktadır. Kenardan orta damara doğru distal üçüncül ve daha yüksek dereceli damarlar daha sonra oluşmakta ve ksilem farklılaşması meydana gelmektedir. Oluşumlarının ardından ksilem hücreleri olgunlaşmak için bir gelişim programına tabi tutulmaktadır. Birincil büyüme sırasında ksilem, diğer dokular gibi hücre uzamasına, endoreduplikasyona ve büyük bir merkezi koful oluşumuna maruz kalmaktadır (Takahashi ve ark, 2013).

Bir bitkinin içindeki suyun taşınması, toprağın suya erişilebilirliği ve iklimsel buhar basıncı eksikliği tarafından kontrol edilen, hücreler içinde turgor basıncı oluşturan gerilim altında gerçekleşir. Değişen ekolojik koşullar altında turgor basıncını sürdüren fizyolojik değişiklikler önemlidir. Köklerdeki suyun taşınması, kök yapıları, suya erişilebilirlik ve topraktaki tuzlar gibi farklı durumlardan etkilenmektedir. Ayrıca seçilmiş küçük çözünen maddeleri ve suyu hareket ettirmek için kanal görevi gören gerekli katman proteinleri olan akuaporinler de etkili olmaktadır (Hossain ve ark., 2022).

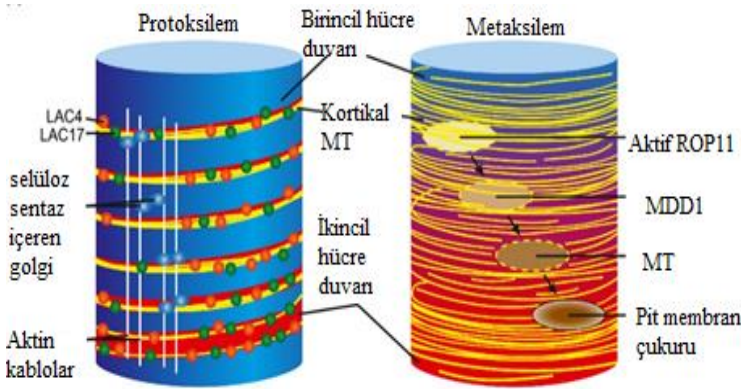
Ksilem yoluyla suyun taşınması, parankim plazmodesmata yoluyla suyun taşınmasından bir milyon kat daha etkilidir. Su ksileme ulaştığında, damarların iletken elemanlarına girmekte ve gövdeden

yapraklara doğru yukarı doğru akmaktadır. Ksilemin kanal çapı bitki boyu uzadıkça küçülüp, daralmakta, bu da ksilem anatomisinin bitkinin tepe noktasından tabanına doğru genişlediğine işaret etmektedir. Kesit alanı başına artan sayıda ksilem kanalına sahip olan bitkiler hidrolik iletkenliği koruyabilirler. Kanalların programlanmış hücre ölümü yoluyla oluşturulduğu süreç olan ksilojeniz, bir su boru hattı görevi gören, cansız hücrelerden oluşan uzun mesafeli, düşük dirençli bir yol ile sonuçlanmaktadır (Iakimova ve Woltering, 2017).

Bir çalışmada, kuraklığa tepki olarak ölen adi meşe (*Quercus robur* L.) ağaçlarının ksilem damar çapı, hayatta kalan ağaçlara göre daha büyük olarak tespit edilmiştir. Bu anatomik özellikler kuraklığa duyarlılığı artırabilir. Ayrıca, iklim değişikliğine bağlı bitki örtüsü değişimleri daha fazla ekolojik kuraklığa yol açmakta ve yeni çevredeki bitkileri ve damar sistemlerini etkileyebilmektedir. Hidrolik iletkenliği etkileyen bir diğer anatomik özellik ise hücre duvarının lignin içeriğidir. İletken elementlerde ikincil hücre duvarları, yapısal destek için gerekli olan ve su taşınımını etkileyen önemli miktarda lignin içermektedir. Ayrıca yağlı bir polimer olan suberin, farklılaşmış kapsari şeridi katmanlarının bulunduğu köklerde kontrolsüz su hareketini önleyerek suyun hareketini etkileyebilir (Meyer ve Peterson, 2011). Bu bantların oluşması apoplastik yol boyunca yatay su akışını engellemektedir. Bunların birikmesi son derece spesifik olup, çevresel faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Aşırı sıcaklık ve kuraklık gibi çevresel faktörler sürdürülemez seviyede ksilem gerilimi oluşturduğunda hidrolik iletkenlik bozulabilir (Şekil 2) ve bu durum kavitasyon (su sütununun kırılması) adı verilen bir sürece yol açar. Bu

durum, havanın sudan ayrılmasına neden olur ve sonuçta kanalı tıkayan ve suyun hareketini önleyen bir gaz kabarcığı ortaya çıkar (Jingmin ve ark., 2012).

Gerilime bağlı tıkanmanın yanı sıra donma-çözülme olayları da tıkanmaya yol açabilir; bu durumda donmuş sıvı içinde küçük gaz kabarcıkları oluşur. Ayrıca özsu kimyasındaki değişiklikler de (örn. patojen enfeksiyonu nedeniyle) bu durumu tetikleyebilir. Tüm bu stres koşulları sıklığı arttırarak, bitki veriminin azalmasına yol açar. Bitkiler bu durumla baş edebilmek için suyu yakındaki başka ksilem kanalı vasıtasıyla yeniden yönlendirebilir, yeni ksilem oluşturabilir veya hava kabarcıklarını suda çözünmeye zorlamak için damarları yeniden doldurabilir. Aquaporinler aynı zamanda yeniden dolum sırasında çözüm olarak önemli rol oynarlar (Qaderi ve ark., 2019).



Şekil 3. *Arabidopsis*'te protoksilem ve metaksilemde ikincil hücre duvarı (SCW) desenlemesi.

Kaynak: Ruzicka ve ark., 2015

Protoksilemde ikincil hücre duvarı oluşumunun konumu, daha sonra bölünen ve genişleyen ikincil hücre duvarının kenarlarında

lokalize olan kortikal mikrotübül demetleri tarafından belirlenir (Şekil 3). Selüloz sentaz içeren golgi cisimcikleri aksenal aktin kabloları boyunca hareket eder ve enine aktin kabloları ve kortikal mikrotübüller (MT) tarafından tanımlanan ikincil hücre duvarı oluşumu pozisyonlarında durur (Ruzicka ve ark., 2015).

Su taşınması birçok noktada hem biyotik hem de abiyotik faktörlerden dolayı kesintiye uğrayabilir. Kök patojenleri (hem bakteri hem de mantarlar) topraktaki emici yüzey alanını tahrip edebilir ve benzer şekilde yaprak patojenleri, buharlaşan yaprak yüzeylerini ortadan kaldırabilir, stoma fonksiyonunu değiştirebilir veya kütikülün bütünlüğünü bozabilir. Diğer organizmalar (yani böcekler ve nematodlar), suyun taşınmasında görev alan toprak üstü ve toprak altı bitki kısımlarında benzer bozulmalara neden olabilir. Ksilem kanallarındaki akışın durmasından sorumlu olan biyotik faktörler, patojenik organizmalar ve bunların kanalları tıkayan yan ürünleri; patojen istilasına tepki olarak üretilen bitki kaynaklı jeller ve zamlar; yaralanma veya patojen istilasından sonra damarı kapatmak için bir damarı çevreleyen canlı bitki hücrelerinin ilave büyümeleri sayılabilir (McElrone ve ark., 2013).

Sürgünler, ksilem dokusu aracılığıyla suyun bitki gövdesi boyunca hareketinin ana kanalıdır. Sürgün sistemi, bitkinin su ihtiyacını karşılamak için suyun topraktan emilmesini kolaylaştıran kök sistemine tamamen bağımlıdır. Su eksikliği koşullarında, kök özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, onu stres koşullarına daha da uyumlu hale getirir, dolayısıyla bitkileri kuraklığa karşı dayanıklı hale getirir. Otsu bitkilerin çoğunun kökleri, suyun emilimi için derine

nüfuzu artıran ince yan köklere sahip lifli bir sisteme sahiptir. Kuraklık stresi durumunda sürgün uzunluğuna göre kök uzunluğunda artış gözlenir. Kuraklık koşullarında sürgün bölgelerinin büyümesi azalır ve kökler genişleyerek bitkinin daha fazla su almasına yardımcı olur. Dolayısıyla bitkiler şiddetli kuraklık koşullarıyla karşı karşıya kaldığında kök:gövde oranının arttığı gözlemlenir (Nejad, 2011).

BİTKİLERDE KURAKLIK STRESİNİN AZALTILMASINDA MİNERAL MADDELERİN ROLÜ

Su eksikliği, besin maddelerinin köklerden alınması ve sürgünlere taşınmasında da önemli bir etkiye sahiptir. Toprağın su miktarının azalması genel olarak sınırlı besin alımına ve bitkilerde besin maddelerinin doku konsantrasyonlarının azalmasına neden olur (Rouphael ve ark., 2012).

Mineral elementlerin difüzyonu, toprak çözeltisi ile kök yüzeyi arasındaki konsantrasyon gradyanı ile belirlenir. Kök çoğalması ve uzaması olayları, toprak hacminden yararlanma, difüzyon ve kütle akışı için yol uzunluğunu azaltma ve mineral elementlerin alımı için geniş bir yüzey alanı sağlama açısından önemlidir. Bir mineral elementin kök yüzeyine kütle akışı, toprak çözeltisindeki konsantrasyonuna ve terlemeye ile sürüklenen su hareketine bağlı faktörler ile etkilenir (White ve Greenwood, 2013). Mineral elementin toprak çözeltisindeki konsantrasyonu arttıkça, kütle akışı ile kök yüzeyine taşınan miktar da artar. Bitkilerin transpirasyon yoluyla suyun köklerden çekilmesi sırasında çözünmüş mineral elementler de kök yüzeyine taşınır. Bu nedenle, transpirasyon hızı mineral elementlerin kökler tarafından

alınma hızını doğrudan etkiler. Mineral elementlerin alımını etkileyen kök özellikleri şunlardır: 1) Kök uzama hızı, yan kök üretimi, kılcak kök özellikleri, kök uzunluğu yoğunluğu (kök uzunluğu/toprak hacmi) ve toprak nüfuzu, 2) farklı toprak derinliklerinden yararlanma yeteneğini etkileyen kök büyümesinin gravitropizmi, 3) yüksek konsantrasyonlarda mineral element içeren toprak parçalarında köklerin çoğalması, 4) kılcak köklerin parçalanıp yeniden oluşturulması, 5) spesifik kök uzunluğu (uzunluk/kütle) ve aerenkim oluşumu, 6) toprak çözeltisindeki mineral elementlerin konsantrasyonlarını etkileyen pH ve organik çözünen maddeler ve enzimler, 7) mikorizal ilişkiler veya mikroplarla yakından etkileşimler nodülasyon veya rizosferdeki patojenik olanların atılması (White ve ark., 2013).

Kurak koşullarda suyun azalması genel olarak toplam besin alımının azalmasına ve sıklıkla bitkilerde mineral besin konsantrasyonlarında azalmaya neden olur. Su eksikliğinin en önemli etkisi besin maddelerinin köke taşınması, kökün büyümesi ve uzaması üzerinedir. İnorganik besinlerin emiliminin azalması, besin alımı ve boşaltma mekanizmasının ve terlemenin azalmasından kaynaklanabilir. Ancak bitki türleri ve tür içindeki genotiplerin su stresi altında mineral alımına verdikleri tepkiler farklılık göstermektedir. Genel olarak nem stresi, azot (N) seviyelerinde belirgin bir artışa, fosfor (P) seviyesinde kesin bir düşüşe ve potasyum (K) seviyesinde değişken etkilere neden olmaktadır. Besin ve su gereksinimlerinin yakın ilişkili olması, gübre uygulamasının, bitkilerin mevcut suyu kullanma etkinliğini arttırması nedeniyle toprak nem eksiklikleri ile besin alımı arasındaki etkileşim büyük önem taşımaktadır (Garg, 2003).

Bitkilerin kuraklık stresine karşı iç direnci olmasına rağmen, mineral besin maddelerinin bitkiye yeterli ve dengeli sağlanması durumunda kuraklığın zararlı etkileri en aza indirilebilir. Bitkilerin mineral-besin durumu, kuraklık stresine karşı bitki direncinin artırılmasında kritik bir rol oynar. Topraktaki düşük besin konsantrasyonları altında, bitkilerin metabolizmaları için aynı miktarda mineral besin maddesini alabilmeleri için, topraktan aldıklarından daha fazla su emmeleri gerekmektedir. Öte yandan, toprak nemi eksikliği koşullarında bitkiler besin maddelerini optimum miktarda alamazlar, bu da bitkilerin özellikle büyümeleri ve tohum/meyve kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturur. Azot (N), çoğu toprakta, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde eksik olan temel makro besin maddesidir. Bitki kökleri tarafından emilen toplam besin maddelerinin %80'i N'dir. Daha iyi bitki büyümesi için amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) kaynaklarının bir kombinasyonu tercih edilir. Gübre olarak veya başka şekillerde uygulanan azot, bitki köklerinin topraktan su emme yeteneği ile yakından ilgilidir. Kuraklığın neden olduğu azot eksikliği, su eksikliği altında büyümenin engellenmesine yol açmaktadır (Waraich ve ark., 2011).

Fosfor (P), topraklarda N ve K'ye göre daha az miktarda bulunur. Yüzey topraklarındaki toplam P konsantrasyonu %0,005 ile 0,15 arasında değişmektedir. N'den sonra en fazla noksan olan ikinci bitki besin maddesidir. Fosfat seviyeleri, kuru toprak koşulları veya bozulmuş kök alımı nedeniyle düşük olabilir ve her iki stres türü koşulunda da bitkiye tedarik edilmelidir. Bağlı yaprak büyüme hızı, fosfor eksikliğine karşı en hassas parametrelerden biridir ve birim alan

başına fotosentetik oranı etkiler. Fosfor eksikliğinin ayrıca nitratların alım hızını ve nitrat redüktaz tarafından asimilasyonunu azalttığı da bilinmektedir. Kurak bölgelerdeki topraklar genellikle kireçlidir ve yüksek pH değerlerine sahiptir. Yarı kurak tropik bölgelerde topraklar genellikle alüminyum ve demir oksitler açısından zengindir ve pH'lar düşüktür. Bu toprak türlerinin her ikisi de P sabitlenmesine yönelik güçlü bir eğilim göstermektedir. Kuru toprak koşullarında bitkiler tarafından P alımının azaldığı genel olarak kabul edilmektedir. Örneğin, P'nin sürgünlere translokasyonu, nispeten hafif kuraklık stresi altında bile ciddi şekilde sınırlıdır. P eksikliği, toprakta yetişen bitkilerde hafif ila orta dereceli kuraklık stresinin en erken etkilerinden biridir. Fosforlu gübrenin uygulanması kuraklık koşullarında bitki büyümesini önemli ölçüde artırabilir (Garg ve ark., 2004).

Fosfor alımını artırmaya yönelik önemli bir yaklaşım, kökler ve mikoriza arasındaki simbiyozdan faydalanmayı içerir; mikoriza, kuraklığa maruz kalan bitkilerin hem büyümesini hem de direncini ve aynı zamanda P, Zn, Cu, Mn ve Fe alımını artırır (Bagayoko ve ark., 2000). Fosfor kök gelişimini iyileştirir ve yaprağın yüksek su potansiyelini korur. Geliştirilmiş kök büyümesi, gelişmiş su ve besin alımıyla sonuçlanır ve kuraklık koşullarında nitratın asimilasyonunu geliştiren nitrat redüktaz aktivitesini artırır (Waraich ve ark., 2011).

Potasyum (K), çevresel stres koşullarında bitkilerin hayatta kalmasında önemli bir rol oynar. Kuraklık gibi çevresel streslerden muzdarip olan bitkilerin K'ya daha büyük bir iç gereksinim duyduğuna dair kanıtlar gün geçtikçe artmaktadır. Kuraklık stresinin neden olduğu fotosentezdeki azalma özellikle düşük K ile beslenen bitkilerde

yüksektir ve K yeterli olduğunda minimum düzeydedir. Baklagillerde yeterli K temini ile kuraklık stresinin, özellikle fotosentez üzerindeki zararlı etkilerinin hafifletildiği belirtilmiştir (Sangakkara ve ark., 2000).

Baklagillerdeki biyolojik azot fiksasyonu etkinliği kuraklıktan olumsuz etkilenmektedir. Kuraklığın bitki ve mikro ortam yaşam üzerindeki etkisi yoğunluğa, süreye ve bitkinin gelişim aşamasına bağlıdır. Rizobial büyüme ve simbiyoz sürecinin işleyişi kuraklık stresinden olumsuz etkilenmektedir. *Rhizobium* türleri, kuraklığın neden olduğu ozmotik stres altında yaşayamaz hale gelmektedir. Böylece kök enfeksiyonu nodülasyon sürecini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca kuraklık stresi mevcut kök nodüllerinin gelişimini ve fonksiyonunu da kısıtlamaktadır. Aslında uygun bir rizosfer ortamı, baklagil-*Rhizobium* etkileşimi ve simbiyoz için hayati öneme sahiptir. Bununla birlikte, çöl topraklarında faal nodüllerin gelişmesi, bazı suşların sınırlı nem seviyelerine sahip topraklarda aşırı koşulları tolere edebildiğini göstermektedir. Baklagiller, nodül oluşum sürecini bozmanın yanı sıra kuraklık altında su potansiyelinde ciddi bir düşüş gösterme eğilimindedir. Kuraklık stresinin nodül oluşumu ve işleyişinin tüm aşamalarını etkilediği bilinmektedir. Kuraklık altında azalan su potansiyeli, sukroz hidrolizinde yer alan çeşitli enzimleri inhibe etmekte ve bu da bakteroidler için karbon eksikliğine yol açmaktadır. Daha sonra nitrojenaz inhibisyonu, nodül geçirgenliğini azaltacak şekilde O₂ birikimine yol açmaktadır. O₂ sınırlaması, nodül büyümesindeki azalma ve çok sayıda küçük nodülün oluşmasıyla telafi edilmekte, fakat dış ortamla temas alanının artmasıyla nodüllere O₂ girişi kolaylaşmaktadır. Kuraklık stresi, biyolojik azot fiksasyonu

sürecinde yer alan hayati enzimlerin (nitrat redüktaz) fonksiyonlarını ve sentez hızını değiştirmektedir (Islam ve ark., 2021).

Kronik kuraklık uygulaması, K sınırlamasıyla sonuçlanmış ve bitki örtüsünün kuraklık stresine karşı hassasiyetini artırmıştır. Kuraklık nedeniyle toprakta S birikimi, bitki-toprak sisteminden S kaybı riskini artırabilmektedir. Kuraklık koşullarında, bazı iz elementler (özellikle Mn, V ve Cd) artan ekstraksiyon yeteneği sergileyerek bitki sağlığı ve bu elementlerin sulara karışması açısından potansiyel risk oluşturmaktadır. Gelecekte meydana gelecek daha kurak koşullarda mineral element konsantrasyonlarındaki değişiklikler Akdeniz Havzasında ekosistem bozulmasını ve kirlilik durumunu artırabileceğini göstermektedir. Bu değişiklikleri anlamak ve tahmin etmek, etkili ekosistem yönetimi, bitki sağlığı ve su kalitesi üzerindeki olası olumsuz etkilerin azaltılması için oldukça önemlidir (Mu ve ark., 2023).

KURAKLIK SIRASINDA KÖKLERDEKİ GENLERİN FAALİYETLERİ

Bitki büyümesi ve gelişimi, topraktaki nem eksikliğinden kaynaklanan morfolojik ve fizyolojik tepkilerdeki değişikliklerden büyük ölçüde etkilenir. Stres tepkilerinin sürekli aktivasyonu metabolik olarak pahalıdır ve bu nedenle bitkiler, normal büyüme ve gelişme sırasında ve ayrıca stres koşulları sırasında bunu sıkı kontrol altında tutmak için negatif gen düzenleme mekanizmaları geliştirmiştir (Kazan, 2006).

Kuraklık nedeniyle köklerde güçlü bir şekilde yukarı düzenlenen

3.000 gen arasında çeşitli transkripsiyon faktörleri (TF), reseptör benzeri kinazlar, kalsiyum sinyal bileşenlerinin yanı sıra jasmonat ve ABA biyosentetik genleri de bulunmaktadır. Kuraklık stresi sırasında, çeşitli metabolitlerin, fitohormonların, sinyalleme ve transkripsiyonel düzenleyici basamakların işlevi, bitkilerin büyümesini, gelişmesini ve nihai hayatta kalmasını sürdürmek için modüle edilir. Prolin, glisin betain, trehaloz ve mannitol gibi kuraklığa duyarlı metabolitlerin biyosentezi, ozmotik dengeyi düzenlemekte ve su eksikliği koşullarında oksidatif stresi en aza indirmektedir (Kulkarni ve ark., 2017).

Oksin, toprağın nem seviyesi gibi dış uyaranlara tepki vermekte ve spesifik hücre tiplerinin transkripsiyon planlarını değiştirmektedir. Absisik asit ve oksin aracılı sinyallemede yer alan serin/treonin-protein fosfatazlar ve oksine duyarlı polipeptitler, kök su eksikliği koşullarında önemli roller oynamaktadır (Singh ve ark., 2022).

Kuraklık stresine yanıt olarak herhangi bir transkripsiyonel değişiklik meydana gelmeden önce bitkinin öncelikle topraktaki su eksikliğini algılaması gerekir. Ozmotik stres durumunda *Arabidopsis thaliana*'nın köklerinde AtHK1 geninin, kavak köklerinde HK1 gen ekspresyonunun hızlı tepki verdiği bulunmuştur (Chefdor ve ark., 2006).

Reaktif oksijen türleri (ROS), neredeyse tüm streslerde rol oynayan önemli sinyal molekülleridir. Ana sinyal rolü, en kararlı ROS molekülü olan hidrojen peroksite atanmıştır (Kar, 2011). Stres altında bulunan köklerin sinyal iletiminde aktif olarak yer alıp almadıkları bilinmemektedir, ancak dolaylı olarak böyle bir olasılığa işaret eden

bulgular vardır. Kök transkriptom çalışmalarının çoğunda, ROS metabolizmasında yer alan genlerin ifadesinde bir değişiklik olduğu rapor edilmiştir. ROS ile ilişkili transkriptomda kapsamlı değişiklikler mısırd, pamukta, nohutta ve çam köklerinde su stresi altında görülmüştür (Lorenz ve ark., 2011). Bu gen grubu tarafından kodlanan proteinler, çok çeşitli peroksidazlar, monooksijenazlar, NADPH oksidaz, katalaz, oksalat oksidaz ve katalaz (CAT), askorbat (APX), glutatyon redüktaz (GR) ve süperoksitten antioksidanla ilgili proteinlerin üyelerinden oluşur. Kuraklık stresindeki rolleri genellikle ROS temizlemeye atfedilir; ancak ROS metabolizma kategorisindeki bazı üyeler ROS sinyalleşmesine de dahil olabilir (Janiak ve ark., 2016).

Son birkaç yılda, kuraklık stresine yanıt veren köklerde çok sayıda TF kodlayan gen tanımlanmıştır. Bunlardan bazıları ABA uygulaması ile ifade edilir, dolayısıyla kuraklıkla ilişkili TF'ler geleneksel olarak ABA'dan bağımsız ve ABA'ya bağımlı faktörler olarak gruplandırılır ve bitkilerin kuraklığa tepkisinin iki genel yolunu temsil eder. DREB1 (Drought responsive element binding 1) sınıfından genlerin, bazı bitki türlerinin köklerinde kuraklık tarafından ekspresyonlarının düzenlendiğine dair kanıtlar olmasına rağmen, kuraklığa tepkiden ziyade soğuğa daha fazla dahil olduğu düşünülmektedir. DREB1 terimi, bitkilerde kuraklık gibi stres koşullarına yanıt veren bir transkripsiyon faktörünü ifade eder. DREB1, bitkilerin kuraklık, soğuk ve tuz stresi gibi çevresel koşullara karşı adaptasyonunu düzenleyen genlerin ekspresyonunu kontrol eder. Bu transkripsiyon faktörü, bitkilerin stres koşullarına karşı dayanıklılığını

artıran çeşitli genleri aktive ederek bitkilerin stres koşullarında hayatta kalmasını destekler. DREB1 genlerinin yukarı regülasyonu, su eksikliği altındaki çam köklerinde ve kurumaya maruz kalan soya fasulyesi köklerinde de bulunmuştur (Ha ve ark., 2015). DREB1 genleri, ABA'dan bağımsız ve ABA'ya bağımlı kuraklık tepkileri arasında bir köprü görevi görebilir.

DREB genlerinin ikinci sınıfı olan DREB2 üyelerinin de köklerdeki kuraklık stresine tepkide rol oynadığı bilinmektedir (Janiak ve ark., 2016). DREB2 proteinleri, strese yanıt veren promotor bölgelerinde bulunan belirli DNA dizilerine bağlanarak hedef genlerin transkripsiyonunu başlatır. Bu genler, bitkilerin su kaybını azaltan, hücredeki su dengesini koruyan ve protein stabilitesini artıran çeşitli mekanizmaları harekete geçirir. DREB2 tarafından yukarı doğru düzenlenen transkript grupları arasında metalotiyonein proteini, piruvat dekarboksilaz ve oligopeptit taşıma proteini genleri bulunur (Sakuma ve ark., 2006). Bazı etilen cevap faktörleri (Etylene Response Factors, ERF) genleri ile yapılan aşırı ekspresyon deneyleri, bunların köklerdeki kuraklık tepkisini etkileyebileceğini ortaya çıkarmıştır, ancak bu süreçteki rollerine ilişkin henüz net bir sonuç mevcut değildir (Zhang ve ark., 2009).

TGA faktörleri, patojenlerin geliştirilmesinde ve savunmasında yer alan bir bZIP TF (Basic leucine zippers transcription factors) kategorisinin üyeleridir. Patogenezle ilişkili (PR) genlerin destekleyicilerine bağlanırlar ve salisilik asit (SA) sinyalleme yolunda hareket ederler. Çoğu PR geninin ayrıntılı işlevi henüz bilinmiyor ancak PR-10 gen dizisinin PYR/PYL/RCAR ABA reseptörüne oldukça

benzer olduğu bildirilmiştir. PR-10, stres altındaki köklerde yüksek ekspresyon sergiler. Bazı TGA'ların köklerdeki PR-10 geninin ekspresyonunu düzenleyip düzenleyemediği henüz keşfedilmeyi beklemektedir. Bunların kuraklık altındaki köklerde ekspresyon düzenlemesine katılımları, küresel bir transkriptom analizinden tahmin edilebilir, çünkü bu alt ailenin bazı temsilcileri, kuraklık stresinden sonra pamuk, fasulye ve kavak köklerinde yukarı doğru düzenlenmiştir (Recchia ve ark., 2013).

Arabidopsis thaliana'da frd3 mutantının kökten türetilen uzun mesafe sinyallerinin yapraklarda ABA sentezini tetiklediği ve kuraklığa karşı direnci arttırdığı, bitkilerin kuraklık tepkisinde kökten sürgünlere uzun mesafe sinyalleşmesi için yeni kanıtlar sağladığını göstermiştir (Liu ve ark., 2024).

KAYNAKÇA

- Abdelhamid, M. T. (2010). Efficient root system in legume crops to stress environments. Climate change and management of cool season grain legume crops, Springer, Dordrecht, 229-242.
- Ahmad, S., Ahmad, R., Ashraf, M.Y., Ashraf, M. & Waraich E.A. (2009). Sunflower (*Helianthus Annuus* L.) response to drought stress at germination and seedling growth stages. Pak J Bot. 2009;41:647–654.
- Ali, S., Hayat, K., Iqbal, A., & Xie, L. (2020). Implications of abscisic acid in the drought stress tolerance of plants. Agronomy, 10(9), 1323.
- Allewa, K., Niemietz, C. M., Sutka, M., Maurel, C., Parisi, M., Tyerman, S. D., & Amodeo, G. (2006). Plasma membrane of *Beta vulgaris* storage root shows high water channel activity regulated by cytoplasmic pH and a dual range of calcium concentrations. Journal of Experimental Botany, 57(3), 609-621.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Iftikhar Ali, I. A., ... & Usman Nazir, U. N. (2017). Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agricultural Research, 6(9), 2026-2032.
- Awad, W., Byrne, P. F., Reid, S. D., Comas, L. H., & Haley, S. D. (2018). Great plains winter wheat varies for root length and diameter under drought stress. Agronomy Journal, 110(1), 226-235.
- Azhar, M. T., & Rehman, A. (2018). Overview on effects of water stress on cotton plants and productivity. In Biochemical, physiological and molecular avenues for combating abiotic stress tolerance in plants (pp. 297-316). Academic Press.
- Bagayoko, M., George, E., Römheld, V., & Buerkert, A. (2000). Effects of mycorrhizae and phosphorus on growth and nutrient uptake of millet, cowpea and sorghum on a West African soil. The Journal of Agricultural Science, 135(4), 399-407.
- Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: coping strategy and resistance. Plants, 11(7), 922.
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. Frontiers in Physiology, 4, 35.

- Bhargava, S., & Sawant, K. (2013). Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding*, 132(1), 21-32.
- Brown, L. K., George, T. S., Dupuy, L. X., & White, P. J. (2013). A conceptual model of root hair ideotypes for future agricultural environments: what combination of traits should be targeted to cope with limited P availability?. *Annals of Botany*, 112(2), 317-330.
- Brunner, I., & Godbold, D. L. (2007). Tree roots in a changing world. *Journal of Forest Research*, 12(2), 78-82.
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M., & Sperisen, C. (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6, 152207.
- Chefdor, F., Bénédicti, H., Depierreux, C., Delmotte, F., Morabito, D., & Carpin, S. (2006). Osmotic stress sensing in *Populus*: components identification of a phosphorelay system. *FEBS Letters*, 580(1), 77-81.
- Christmann, A., Weiler, E. W., Steudle, E., & Grill, E. (2007). A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. *The Plant Journal*, 52(1), 167-174.
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442.
- da Silva, E. C., de Albuquerque, M. B., de Azevedo Neto, A. D., & da Silva Junior, C. D. (2013). Drought and its consequences to plants—From individual to ecosystem. *Responses of Organisms to Water Stress*, 18-47.
- Fang, Y., Du, Y., Wang, J., Wu, A., Qiao, S., Xu, B., ... & Chen, Y. (2017). Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of winter wheat. *Frontiers in Plant Science*, 8, 672.
- Garg, B. K. (2003). Nutrient uptake and management under drought: nutrient-moisture interaction. *Current Agriculture*, 2003, 27, No. 1/2, 1-8
- Garg, B. K., Burman, U., & Kathju, S. (2004). The influence of phosphorus nutrition on the physiological response of moth bean genotypes to drought. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(4), 503-508.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E., & Khodaei-Joghan, A. (2013). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*, 117, 106-114.

- Gowda, V. R., Henry, A., Yamauchi, A., Shashidhar, H. E., & Serraj, R. (2011). Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field Crops Research*, 122(1), 1-13.
- Ha, C. V., Watanabe, Y., Tran, U. T., Le, D. T., Tanaka, M., Nguyen, K. H., ... & Tran, L. S. P. (2015). Comparative analysis of root transcriptomes from two contrasting drought-responsive Williams 82 and DT2008 soybean cultivars under normal and dehydration conditions. *Frontiers in Plant Science*, 6, 551.
- Henry, A., Cal, A. J., Batoto, T. C., Torres, R. O., & Serraj, R. (2012). Root attributes affecting water uptake of rice (*Oryza sativa*) under drought. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), 4751-4763.
- Ho, M. D., Rosas, J. C., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2005). Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional plant biology*, 32(8), 737-748.
- Holbrook, N. M., Shashidhar, V. R., James, R. A., & Munns, R. (2002). Stomatal control in tomato with ABA-deficient roots: response of grafted plants to soil drying. *Journal of Experimental Botany*, 53(373), 1503-1514.
- Hossain, A., Pamanick, B., Venugopalan, V. K., Ibrahimova, U., Rahman, M. A., Siyal, A. L., ... & Aftab, T. (2022). Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress-induced oxidative stress. In *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture* (pp. 1-72). Academic Press.
- Iakimova, E. T., & Woltering, E. J. (2017). Xylogenesis in zinnia (*Zinnia elegans*) cell cultures: unravelling the regulatory steps in a complex developmental programmed cell death event. *Planta*, 245, 681-705.
- Islam, M. S., Fahad, S., Hossain, A., Chowdhury, M. K., Iqbal, M. A., Dubey, A., ... & Sabagh, A. E. (2021). Legumes under drought stress: plant responses, adaptive mechanisms, and management strategies in relation to nitrogen fixation. In *Engineering Tolerance in Crop Plants Against Abiotic Stress* (pp. 179-207). CRC Press.
- Janiak, A., Kwaśniewski, M., & Szarejko, I. (2016). Gene expression regulation in roots under drought. *Journal of Experimental Botany*, 67(4), 1003-1014.
- Jingmin, L., Chong, L., Zheng, X., Kaiping, Z., Xue, K., & Liding, W. (2012). A microfluidic pump/valve inspired by xylem embolism and transpiration in plants. *PLoS One*, 7(11), e50320.
- Kalra, A., Goel, S., & Elias, A. A. (2024). Understanding role of roots in plant response to drought: Way forward to climate-resilient crops. *The Plant Genome*, 17(1), e20395.

- Kang, J., Peng, Y., & Xu, W. (2022). Crop root responses to drought stress: molecular mechanisms, nutrient regulations, and interactions with microorganisms in the rhizosphere. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9310.
- Kar, R. K. (2011). Plant responses to water stress: role of reactive oxygen species. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1741-1745.
- Kaul, R. (1966). Effect of water stress on respiration of wheat. *Canadian Journal of Botany*, 44(5), 623-632.
- Kazan, K. (2006). Negative regulation of defence and stress genes by EAR-motif-containing repressors. *Trends in Plant Science*, 11(3), 109-112.
- Kulkarni, M., Soolanayakanahally, R., Ogawa, S., Uga, Y., Selvaraj, M. G., & Kagale, S. (2017). Drought response in wheat: key genes and regulatory mechanisms controlling root system architecture and transpiration efficiency. *Frontiers in Chemistry*, 5, 106.
- Lambers H, Chapin FS, Pons TL (2008) *Plant physiological ecology*, 2nd edn. Springer, New York
- Laur, J., & Hacke, U. G. (2013). Transpirational demand affects aquaporin expression in poplar roots. *Journal of Experimental Botany*, 64(8), 2283-2293.
- Li, H., Testerink, C., & Zhang, Y. (2021). How roots and shoots communicate through stressful times. *Trends in Plant Science*, 26(9), 940-952.
- Liu, Q. Q., Xia, J. Q., Wu, J., Han, Y., Zhang, G. Q., Zhao, P. X., & Xiang, C. B. (2024). Root-derived long-distance signals trigger ABA synthesis and enhance drought resistance in *Arabidopsis*. *Journal of Genetics and Genomics*, 51(7), 749-761.
- Lopes, M. S., & Reynolds, M. P. (2010). Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. *Functional Plant Biology*, 37(2), 147-156.
- Lorenz, W. W., Alba, R., Yu, Y. S., Bordeaux, J. M., Simões, M., & Dean, J. F. (2011). Microarray analysis and scale-free gene networks identify candidate regulators in drought-stressed roots of loblolly pine (*P. taeda* L.). *BMC Genomics*, 12, 1-17.
- Lynch, J. P. (2007). Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55(5), 493-512.
- Lynch, J. P. (2013). Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany*, 112(2), 347-357.

- Matsui, T., & Singh, B. B. (2003). Root characteristics in cowpea related to drought tolerance at the seedling stage. *Experimental Agriculture*, 39(1), 29-38.
- Maurel, C., Verdoucq, L., Luu, D. T., & Santoni, V. (2008). Plant aquaporins: membrane channels with multiple integrated functions. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 595-624.
- McElrone, A. J., Choat, B., Gambetta, G. A., & Brodersen, C. R. (2013). Water uptake and transport in vascular plants. *Nature Education Knowledge*, 4(5), 6.
- Meister, R., Rajani, M. S., Ruzicka, D., & Schachtman, D. P. (2014). Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. *Trends in Plant Science*, 19(12), 779-788.
- Menard, D., & Pesquet, E. (2015). Cellular interactions during tracheary elements formation and function. *Current Opinion in Plant Biology*, 23, 109-115.
- Meshram, J. H., Singh, S. B., Raghavendra, K. P., & Waghmare, V. N. (2022). Drought stress tolerance in cotton: progress and perspectives. *Climate Change and Crop Stress*, 135-169.
- Meyer, C. J., & Peterson, C. A. (2011). Casparian bands occur in the periderm of *Pelargonium hortorum* stem and root. *Annals of Botany*, 107(4), 591-598.
- Mohammadi A. S., Zahra, N., Hajiaghaei Kamrani, M., Asgari Lajayer, B., Nobaharan, K., Astatkie, T., ... & Farooq, M. (2023). Role of root hydraulics in plant drought tolerance. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(10), 6228-6243.
- Mu, Z., Asensio, D., Sardans, J., Ogaya, R., Llusà, J., Filella, I., ... & Peñuelas, J. (2023). Chronic drought alters extractable concentrations of mineral elements in Mediterranean forest soils. *Science of The Total Environment*, 905, 167062.
- Nejad, T. S. (2011). Effect of drought stress on shoot/root ratio. *World Acad. Sci. Eng. Technol*, 81, 598-600.
- Nobel, P. S. (2017). Basic Water Relations. *Encyclopedia Appl. Plant Sci.* 1, 105-109.
- Palta, J. A., & Turner, N. C. (2019). Crop root system traits cannot be seen as a silver bullet delivering drought resistance. *Plant and Soil*, 439, 31-43.
- Parent, B., Hachez, C., Redondo, E., Simonneau, T., Chaumont, F., & Tardieu, F. (2009). Drought and abscisic acid effects on aquaporin content translate into changes in hydraulic conductivity and leaf growth rate: a trans-scale approach. *Plant Physiology*, 149(4), 2000-2012.

- Puangbut, D., Jogloy, S., Vorasoot, N., Akkasaeng, C., Kesmala, T., Rachaputi, R. C., ... & Patanothai, A. (2009). Association of root dry weight and transpiration efficiency of peanut genotypes under early season drought. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1460-1466.
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., & Dixon, S. L. (2019). Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. *Plants*, 8(3), 65.
- Qin, X., Feng, F., Wen, X., Siddique, K. H., & Liao, Y. (2019). Historical genetic responses of yield and root traits in winter wheat in the yellow-Huai-Hai River valley region of China due to modern breeding (1948–2012). *Plant and soil*, 439, 7-18.
- Recchia, G. H., Caldas, D. G. G., Beraldo, A. L. A., Da Silva, M. J., & Tsai, S. M. (2013). Transcriptional analysis of drought-induced genes in the roots of a tolerant genotype of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7155-7179.
- Rewald, B., Ephrath, J. E., & Rachmilevitch, S. (2011). A root is a root is a root? Water uptake rates of Citrus root orders. *Plant, Cell & Environment*, 34(1), 33-42.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Schwarz, D., Franken, P., & Colla, G. (2012). Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. *Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features*, 171-195.
- Ruzicka, K., Ursache, R., Hejátko, J., & Helariutta, Y. (2015). Xylem development—from the cradle to the grave. *New Phytologist*, 207(3), 519-535.
- Sakuma, Y., Maruyama, K., Osakabe, Y., Qin, F., Seki, M., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2006). Functional analysis of an *Arabidopsis* transcription factor, DREB2A, involved in drought-responsive gene expression. *The Plant Cell*, 18(5), 1292-1309.
- Sangakkara, U. R., Frehner, M., & Nösberger, J. (2000). Effect of soil moisture and potassium fertilizer on shoot water potential, photosynthesis and partitioning of carbon in mungbean and cowpea. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185(3), 201-207.
- Schachtman, D. P., & Goodger, J. Q. (2008). Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends in Plant Science*, 13(6), 281-287.
- Singh, P. K., Indoliya, Y., Agrawal, L., Awasthi, S., Deebe, F., Dwivedi, S., ... & Tripathi, R. D. (2022). Genomic and proteomic responses to drought stress and biotechnological interventions for enhanced drought tolerance in plants. *Current Plant Biology*, 29, 100239.

- Songsri, P., Jogloy, S., Vorasoot, N., Akkasaeng, C., Patanothai, A., & Holbrook, C. C. (2008). Root distribution of drought-resistant peanut genotypes in response to drought. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(2), 92-103.
- Takahashi, N., Kajihara, T., Okamura, C., Kim, Y., Katagiri, Y., Okushima, Y., ... & Umeda, M. (2013). Cytokinins control endocycle onset by promoting the expression of an APC/C activator in Arabidopsis roots. *Current Biology*, 23(18), 1812-1817.
- Vandeleur, R. K., Mayo, G., Shelden, M. C., Gilliam, M., Kaiser, B. N., & Tyerman, S. D. (2009). The role of plasma membrane intrinsic protein aquaporins in water transport through roots: diurnal and drought stress responses reveal different strategies between isohydric and anisohydric cultivars of grapevine. *Plant physiology*, 149(1), 445-460.
- Wahl, S., & Ryser, P. (2000). Root tissue structure is linked to ecological strategies of grasses. *New Phytologist*, 148(3), 459-471.
- Wang, J. Y., Xiong, Y. C., Li, F. M., Siddique, K. H., & Turner, N. C. (2017). Effects of drought stress on morphophysiological traits, biochemical characteristics, yield, and yield components in different ploidy wheat: A meta-analysis. *Advances in agronomy*, 143, 139-173.
- Waraich, E. A., Ahmad, R., & Ashraf, M. Y. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian journal of crop science*, 5(6), 764-777.
- White, P. J., George, T. S., Dupuy, L. X., Karley, A. J., Valentine, T. A., Wiesel, L., & Wishart, J. (2013). Root traits for infertile soils. *Frontiers in plant science*, 4, 50349.
- White, P. J., & Greenwood, D. J. (2013). Properties and management of cationic elements for crop growth. *Soil conditions and plant growth*, 160-194.
- Zhang, G., Chen, M., Li, L., Xu, Z., Chen, X., Guo, J., & Ma, Y. (2009). Overexpression of the soybean GmERF3 gene, an AP2/ERF type transcription factor for increased tolerances to salt, drought, and diseases in transgenic tobacco. *Journal of experimental botany*, 60(13), 3781-3796.
- Zhu, J., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2010). Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant, cell & environment*, 33(5), 740-749.

BÖLÜM 7

KURAKLIKTA BİTKİLERDE YAPRAK MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ¹, Doç. Dr. Yelda EMEK ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759226>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. iyavas@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6863-9631

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Aydın, Türkiye. yelda@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1095-3908

GİRİŞ

Bitkiler sürgünden kökten alım yoluyla yerine koyabilecekleri miktardan daha fazla su kaybetmeye devam ederse, çeşitli dokularında solgunluğa, hücre zarlarında hasara ve sonuçta hücre ölümüne neden olabilecek bir su eksikliği yaşarlar. Ancak bazı türler kuraklığı tolere edebilir veya önleyebilir. Bunun mekanizmaları: 1) Stomaların kapanması; 2) yaprak ve gövde büyüme oranlarının azalması; 3) kök uzama oranlarının korunması/artışları; 4) kök ve sürgün hidrolik iletkenliğinde artışlar; 5) yaşlı yaprakların dökülmesi; 7) vejetatif büyümeden generatif büyümeye geçiş; 8) yaşlanmanın tetiklenmesi; 9) hücre turgorunun korunmasında rol oynayan ozmotik olarak aktif çözünen maddelerin sentezi; 10) antioksidan proteinlerin sentezi vb. (Wilkinson ve Davies, 2010).

Bitkiler ya köklere su temini zorlaştığında ya da terleme oranı çok yükseldiğinde kuraklık stresi yaşarlar. Kuraklığın bitki gelişimi üzerindeki çeşitli sonuçları arasında, kısıtlı besin ve su alımı yaygın olarak kabul edilmektedir (Manivannan ve ark., 2008). Kuraklıkta bitkiler su içeriğini kaybederse bu durum büyüme ve gelişmeyi olumsuz etkiler. Kuraklığın zararlı etkisi sadece şiddetine değil, aynı zamanda olduğu bitki gelişme aşamasına da bağlıdır (Jongdee ve ark., 2002). Su stresinin bitki boyu, dal sayısı, boğum arası uzunluk, bitki örtüsü ve bitki biyokütlesi gibi parametreler üzerinde yaptığı olumsuz etki, büyümenin sürdürülmesi amacıyla su ve besin ihtiyacını dengelemek için büyümenin kısıtlandığını açıkça göstermektedir. Aslında su stresi, diğer birçok abiyotik stres gibi, bitkinin stres altında hayatta kalması için adaptif bir özellik olarak bitki örtüsünün ve

biyokütlenin daha yavaş büyümesini gerektirir (Yadav ve ark., 2014).

Kuru ortamlarda yaşamak için birçok bitki, düşük nem ile baş edecek mekanizmalar geliştirmiştir. Bu mekanizmalar klasik olarak iki farklı kategoriye ayrılır: Kuraklıktan kaçınma ve kuraklığa tolerans. Kaçınmanın bazı örnekleri arasında yaprak kıvrılması ve dökülmesi, yaprak alanı ve anatomisindeki değişiklikler, stoma ve kütiküler dirençteki artış ve belirli bir toprak neminde yüksek su potansiyeli yer alır. Kaçınma aynı zamanda, kuru ortamın büyümeyi engellemesinden veya ölümle sonuçlanmasından önce bitkilerin yaşam döngülerini tamamladığı kuraklıktan kaçışı da kapsamaktadır (Timmerman, 2015).

Yaprak su potansiyeli, yaprak turgor potansiyeli ve ozmotik ayarlama bitkilerde kuraklığa toleransın iyileştirilmesinde önemli bileşenler olarak kabul edilir ve birbirleriyle yakından ilişkilidir. Yaprak su potansiyeli, tüm bitki su durumu için bir indeks olarak kabul edilmektedir. Ozmotik ayarlama, hücre içi çözünenlerin kaybını önlemek için hücre özsuyundaki ozmotik potansiyelin azalması olarak tanımlanır. Bitki hücrelerinde turgorun korunması, daha düşük bir yaprak su potansiyeli altında bitki biyosentezi için en önemli faktördür. Şiddetli kuraklık koşullarında yüksek ozmotik düzenleme, bir bitkideki düşük yaprak su potansiyeline rağmen turgorun ve hücre hacminin korunmasına yardımcı olabilir. Ayrıca bitkilerde kuraklık stresi koşullarında su kayıpları açısından stoma düzenlemesinin baskın bir rol oynadığı düşünülmektedir. Stoma düzenlemesi ile yaprak turgor potansiyeli arasındaki bağlantı, toprağın nem derecesi gibi çevresel farklılıklara bağlı olarak değişebilir (Kusaka ve ark., 2005).

YAPRAK SU POTANSİYELİ

Yaprak su potansiyelinin sürdürülmesi çok sayıda mekanizmanın etkileşimi ile belirlenir. Bunlar arasında toprak suyuna erişim ve toprak suyunun kökler tarafından alım şekli, stoma iletkenliği tarafından kontrol edilen atmosfer kaybı, güneşlenme, yaprak kıvrılması ve ölümü ve su taşınmasına karşı olası iç direnç yer alır (Jongdee ve ark., 2002). Bitki su potansiyelinin düzenlenmesi, yalnızca kuraklık ve diğer stres faktörlerine karşı bitki tepkilerini belirlemedeki rolü nedeniyle değil, aynı zamanda turgor güdümlü hücre genişlemesi yoluyla bitki büyümesi de dahil olmak üzere metabolik süreçler üzerindeki etkisi nedeniyle de önemlidir (Martínez-Vilalta ve ark., 2017).

İzohidrik türler kuraklık sırasında stomaları daha erken kapatır ve bu nedenle solunum, osmoregülasyon veya savunma için devam eden karbon taleplerini karşılamak için karbonhidrat rezervlerine daha fazla bağımlı olurlar. Anizohidrik türler ise, daha düşük su potansiyellerine maruz kalma pahasına stomaları daha geç kapatır; bu da onları hidrolik arızalara karşı daha savunmasız hale getirir (Mitchell ve ark., 2013). Kuraklık stresinin bitkilerde vejetatif dönemdeki zararlı etkileri yaprak sayısında ve alanında kademeli azalma, yaprak solması, yapraklarda hücre uzaması ve yaprak yaşlanmasında artıştır. Sonuçta toplam bitki boyunda azalma olur. Bitki boyundaki bu azalma, farklı bitki organlarının morfolojisini etkiler. Bitki yaprakları terlemenin temel organıdır ve su eksikliği durumunun bir göstergesi olarak görev yapar. Yaprak kalınlığı, doku yoğunluğu gibi yapısal özelliklerini değiştirerek kuraklığa uyum sağlama ve alanı azaltma yeteneğine sahiptir (Patmi & Pitoyo, 2020).

Bitkilerin kuraklığa ilk tepkisi hücrelerin ozmotik basıncının değişmesidir. Turgor basıncı azaldıkça hücre su potansiyeli azalır ve hücre genişlemesi sınırlanır, bu durum bitkinin morfolojik özelliklerine de yansır ve ilk etkilenen organ yapraktır. Spesifik yaprak alanı değişimi bitkinin kuraklık stresine verdiği morfolojik tepkilerden biridir. Spesifik yaprak alanı bileşenleri fotosentezde önemli rol oynamaktadır. Bunlar yapraklar içindeki fotonların akışını ve dağılımını belirleyip, özellikle stres koşulları altında mezofilde kloroplastlardaki karboksilasyon bölgelerine CO₂ difüzyonunu sınırlamaktadır (Velikova ve ark., 2020).

Şiddetli kuraklıklarda, bazı bitkilerin yaprakları üzerinde kalın bir film bulunur ve kıvrılma hareketi, doğrudan güneş ışığı altında su kaybını azaltmaya yardımcı olur. Yaprak morfolojisi bitki büyüme ve gelişmesinde önemli olduğundan bitki verimini önemli ölçüde etkiler. Kuraklığa tepki olarak yapraklarda gözlenen belirtiler çeşitlerin anatomik adaptasyonunda önemli olup çeşit seçiminde kullanılmaktadır (Gunnula ve ark., 2022).

Yaprakların kuraklık stresine verdiği tepkiler, yaprak yüzeyindeki bulliform hücreler, epidermal hücreler ve stoma büyüklüğü gibi yaprağın anatomik özelliklerine bakılarak değerlendirilebilir. Kuraklık stomaların kapanmasına neden olarak yaprak mezofil hücrelerinin dehidrasyonunu etkiler ve fotosentetik organlarda hasara neden olur. Suyla ilgili morfolojik değişiklikler, büyüme modellerindeki değişiklikler içerir (Bachle ve ark., 2022).

Yaprak seviyesindeki bu karmaşık değişiklikler kuraklığa dayanıklılığın bir göstergesidir. Bitkiler büyüme durumlarını değiştirebilir ve strese tepki veren genleri açığa çıkarabilir. Bitkiler, su stresi ile başa çıkmanın yanı sıra, çeşitli adaptasyonlar sayesinde uzun vadeli dayanıklılıklarını ve koşullar iyileştiğinde toparlanma kapasitelerini de koruyabilirler (Yavas ve ark., 2024).

YAPRAKLARDAKİ BEKÇİ HÜCRELERİ VE STOMALAR

Bitkilerden su buharının kaybı olan terleme olayı fiziksel bir süreçtir. Güneş radyasyonu terleme için enerji kaynağı sağlar. Genel olarak terleme hızı, bitki içindeki su kaynakları ile atmosfer arasındaki su buharı konsantrasyonundaki gradyan ve bitkinin su buharı difüzyonuna karşı toplam direnci ile orantılıdır. Su kaybının çoğu yapraklardan olmakta ve stomalar büyük ölçüde yaprak terlemesini kontrol etmektedir. Stoma açıklığının düzenlenmesi oldukça karmaşıktır. Çünkü stomalar ışık, nem, sıcaklık, CO₂ konsantrasyonu gibi çeşitli çevresel faktörler, kök ve yaprak hormon üretimi ve salınımı ile yaş gibi endojen faktörlere tepki göstermektedir. Bitki dokusunun su buharı kaybına karşı direncindeki azalma, yaprak azalması gibi diğer eşzamanlı etkilerle telafi edilmektedir. Terleme ve topraktan buharlaşma nedeniyle su buharının göreceli kayıpları, bitki türüne ve yoğunluğuna göre değişmektedir (Pallardy, 2008).

Stomalar, yaprakların yüzeyinde bulunan ve fotosentez için gerekli olan karbondioksitin içeri girmesine ve oksijen ile su buharının dışarı çıkmasına izin veren küçük açıklıklardır. Bekçi hücreleri (guard cells) ise, stomaların her iki tarafında bulunan ve stomaların açılıp

kapanmasını kontrol eden özelleşmiş hücrelerdir. Bu hücrelerin şekli ve hacmi değiştiğinde, stoma açılır veya kapanır, bu da bitkinin su kaybını ve gaz alışverişini düzenler. Bekçi hücreleri yaprak epidermisinde stoma gözenekleri oluşturarak bitkilerin fotosentez için CO₂ alımını ve terleme yoluyla su kaybını dengelemesini sağlar. Yaprak ile dış atmosfer arasındaki gaz alışverişinin kontrolü stoma iletkenliği tarafından yönetilir. Ksilem ve yaprak su potansiyelleri tartışmasız bitkilerin su durumunu belirleyen en önemli değişkenler olduğundan ekolojik etkileri büyüktür (Bhaskar ve Ackerly, 2006).

Düşük (negatif) su potansiyelleri, ksilem embolisi ve ekstraksiler dokulardaki benzer süreçler, toprak-bitki-atmosfer sürekliliği boyunca hidrolik direnci artırma eğiliminde olduğundan, bitkinin hidrolik taşıma sistemini stres altına sokar. Su potansiyelleri çok düşük hale gelirse, su taşınması tamamen durabilir ve sonuçta tamamen kurumaya ve bitki ölümüne yol açabilir. Bitkilerin, yapısal ve fizyolojik ayarlamalar da dahil olmak üzere, hidrolik arızayı önlemek için su taşınımını düzenleyebileceği çeşitli mekanizmalar vardır. Ancak kısa zaman dilimlerinde stomaların kapanması, bitkilerin terleme kayıplarını sınırladığı ve dolayısıyla su potansiyellerini tolere edilebilir sınırlar içinde tuttuğu ana mekanizmadır (Martínez-Vilalta ve ark., 2017).

Bekçi hücreleri, bitkilerdeki erken sinyal iletim mekanizmalarını anlamak için güçlü tek hücreli model sistemidir. Işık, CO₂, patojen enfeksiyonu ve bitki hormonları gibi çeşitli çevresel uyaranları bu hücreler otonom bir şekilde algılayabilir ve bunlara hızla yanıt verebilirler. Kuraklığa tepki olarak bitkiler, stomaların kapanmasına neden olan fitohormon absisik asidi (ABA) sentezler ve böylece

terleme yoluyla su kaybını azaltırlar (Munemasa ve ark., 2015). Türler arasında stoma kontrolü ile su potansiyeli düzenlemesi arasındaki bağlantıyı karmaşıklaştıran en az üç konu bulunmaktadır. Bunlardan ilki: Birçok tür izohidri ve anizohidri iki uç davranışı arasında bir yerde yer alır. İkinci olarak, bitkideki su potansiyeli eğimindeki değişikliklerin yalnızca stoma tepkilerine bağlı olmayıp aynı zamanda terlemenin ve bitki hidrolik iletkenliğinin azalan su mevcudiyetine karşı göreceli duyarlılığına da bağlıdır. Bu durum, gaz değişimi ve hidroliğin türler arasında farklı bir şekilde koordine edilmesi gerçeğiyle daha da karmaşık hale gelmektedir. Üçüncü olarak, farklı stoma davranışlarının karbon ekonomisi üzerindeki etkilerini değerlendirirken belirli bir kuraklık altında stomaların ne kadar süre kapalı kaldığıdır (Mitchell ve ark., 2013).

Stomalar, terleme yapan bitki ile atmosfer arasındaki gaz değişimini düzenler, gelişimi ve açılması çevresel uyaranlardan oldukça etkilenir. Bitkiler stoma açıklığını ayarlayarak su kaybıyla CO₂ alımını optimize eder. Stoma yoğunluğu ve boyutu gibi stoma özellikleri, bitkilerin verimi ve hayatta kalması açısından önemli sonuçlara sahiptir. Stomalar yaprağın abaksiyel (alt) tarafında veya adaksiyel (üst) yaprak tarafında veya her iki tarafta yerleşmiş olabilir. Stomalar yaprağın sadece alt epidermisinde yer alıyorsa yaprak hipostomatik, üst epidermesinde yer alıyorsa yaprak epistomatik ve hem alt hem de üst epidermisinde yer alıyorsa yaprak amfistomatik olarak adlandırılmaktadır. Stomaların yaprak yüzeyinde yerleşim şekli hem anatomik hem de çevresel değişikliklere tepkileri açısından farklılıklar nedeniyle önemlidir. İlk olarak, adaksiyel yaprak yüzeyleri

genellikle abaksiyel yaprak yüzeyinden daha düşük stoma yoğunluğuna sahiptir. İkinci olarak, abaksiyal ve adaksiyel stomaların çevresel ipuçlarına yanıt olarak bağımsız davrandığı rapor edilmiştir (Richardson ve ark., 2017). Kuraklığın stoma yoğunluğu ve büyüklüğü üzerindeki etkisi, özellikle kaynakların verimli kullanımı açısından ekolojik ve ekonomik açıdan önemlidir (Driesen ve ark., 2023).

Xu ve Zhou (2008), monokotil çok yıllık bir çimen türü olan *Leymus chinensis*'de su eksikliği nedeniyle abaksiyal stoma büyüklüğünün azaldığını, stoma yoğunluğunun arttığını bulmuşlardır. Ancak Hamanishi ve ark. (2012), *Populus balsamifera*'nın (dikotil bitki) iki genotipinde bunun tersini bulmuştur. Su eksikliği koşullarında üretilen yapraklar, iyi sulanan koşullar altında üretilen yapraklara kıyasla daha düşük stoma indeksleri göstermiştir. Otsu bitkilerin, yüksek ışık koşulları altında ışık alımını gaz değişimi ile en iyi şekilde dengelemelerine yardımcı olmak için amfistomiye tercih ettikleri varsayılmıştır (Muir, 2018). İnce yapraklar nedeniyle abaksiyel ve adaksiyel yolların zaten kısa olduğu otsu bitkilerde amfistoma, gaz değişimi için her iki yaprak yüzeyini kullanarak yaprak sınır tabakası direncini etkili bir şekilde yarıya indirdiğinden yaprak-atmosfer gaz değişim kapasitesini artırır (Drake ve ark., 2019).

Stomaların kapanması üzerine terlemenin azalması hafif dehidrasyonun ilk etkisidir. Atmosfere su kaybının sınırlandırılması sürgünün su durumunu stabilize eder (Tardieu ve ark. 2018). Dehidrasyon üzerine stomaların kapanmasına absisik asidin sentezi, translokasyon, hücre içi ve hücre altı yeniden dağılımına aracılık eder. Stoma düzenlemesinin sinyal yolları ve mekanizması, reaktif oksijen

türlerini (reactive oxygen species, ROS), reaktif azot türlerini, protein kinazları ve bazı iyon taşıyıcıları içerir. Nitrat redüktaz tarafından üretilen nitrik oksit (NO), stoma kapanmasına katılır. Hızlı stoma hareketleri su kullanım etkinliğini artırmak için faydalıdır. Su stresinde stomaların kapanması ve yeniden sulama koşulları ile yeniden açılmasının kapsamı bitki biyokütle üretiminde su etkinliğini belirler (Lawson ve Vialet-Chabrand, 2019). ABA'nın etkili bir şekilde yukarı regülasyonu, su kıtlığı koşullarında hayatta kalma oranının artmasına yardımcı olur, ancak iyi sulanan tarla koşullarında verimi düşürebilir (Dietz ve ark., 2021).

YAPRAK TURGOR POTANSİYELİ

Kuraklığa tolerans, bitki türlerinin dağılımını şekillendirir ve esas olarak tam turgordaki ozmotik potansiyel ve turgor kayıp noktasındaki su potansiyeli tarafından belirlenir (Petrizzellis ve ark., 2019). Solma veya turgor kaybı noktasındaki yaprak su potansiyeli, yaprakların kuraklık stresine karşı toleransının bir belirleyicisidir ve bitkide fizyolojik kuraklık toleransına katkıda bulunur. Bu bitkinin fonksiyonel özelliği, solmaya neden olan yaprak suyu potansiyelini temsil eder (Marechaux ve ark., 2015). Kuraklık sırasında yapraklardaki hücre turgorunun korunması, bitkilerin gaz değişimini ve büyümeyi sürdürme yeteneği açısından kritik öneme sahiptir. Son yıllardaki çalışmalar aynı zamanda yaprak turgor kaybının stoma kapanmasını yönlendirmedeki fonksiyonel rolünü ve artan su stresine yanıt olarak yaprak hidrolik iletkenliğindeki düşüşü göstermiştir (Blackman, 2018).

OZMOTİK AYARLAMA

Bitkilerde kuraklık veya su stresıyla başa çıkmak için pek çok adaptif strateji geliştirilmiştir; bunların arasında osmoregülasyon, bitkinin kuraklık toleransının önemli faktörlerinden biridir. Bitkiler, büyük miktarlarda osmolit biriktirerek su alımını, hücre turgorunu ve stoma fonksiyonlarını korumaya yardımcı olabilecek ozmotik ayarlama gibi bir dizi stratejiyi benimserler (Zivcak ve ark., 2016). Ozmotik ayarlama, bitki ortamındaki su potansiyelinin azalmasına yanıt olarak bitki hücreleri içindeki çözünen maddelerin net aktif birikimidir. Bu birikim, hücrenin su potansiyelini azaltır, bu da suyu hücreye çeker ve turgor basıncını koruma eğilimindedir. Turgor kaybı, stoma aktivitesinin ve hücre metabolizması ve büyümesi gibi süreçlerin kaybıyla sonuçlanır. Bu nedenle ozmotik ayarlama, su mevcudiyetinin azalmasına rağmen hayatta kalmayı sağlayan kritik süreçlerin sürdürülmesine yardımcı olur. Ozmotik uyum, buğday, pirinç, sorgum, arpa dahil olmak üzere birçok türde karakterize edilmiştir. Metabolit analizi diğer bitkilerdeki ozmotik düzenlemeyi karakterize etmiş ve osmolitleri birkaç ortak kategoriye ayırmıştır; şekerler, polioller vb. prolinin aynı zamanda hem uyumlu bir çözünen madde hem de reaktif oksijen temizleyici olarak ozmotik ayarlama rol oynadığı gösterilmiştir (Timmerman, 2015).

Prolin, glisin betain, trehaloz, sukroz vb. gibi çözünebilir şekerler dahil olmak üzere pek çok madde kuraklığa dayanıklılık için bitki osmoregülasyonunda önemli rol oynamaktadır (Du ve ark., 2004). Metabolizmanın devam edebilmesi ve bitkinin yaşayabilmesi için bitki hücrelerinde yüksek su basıncının korunması sağlanmaktadır. Aynı

zamanda hücresel bütünlüğün korunmasına, zar ve organellerin zarar görmesini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır (Timmerman, 2015).

Bitkinin kuraklığa karşı direncinin derecesi, bitki türü ve çeşitlerine, bitkinin fenolojik aşamalarına ve bitkinin strese maruz kalma süresine göre değişir. Düşük su potansiyeli altındaki bitkilerde osmoregülasyon, çözünür proteinler, şekerler ve şeker alkoller, kuaterner amonyum bileşikler ve prolin gibi amino asitler osmoprotektanların veya osmolitlerin sentezine ve birikmesine dayanır (Öztürk ve ark., 2021).

Düşük çimlenme ve zayıf fide oluşumu kuraklığın bitkiler üzerindeki temel etkilerindendir. Bitki gelişimi temel olarak hücre bölünmesi yoluyla sağlanır. Kuraklık, mitozu ve hücre uzamasını engeller, bu da zayıf gelişime neden olur (Hussain ve ark., 2019). Kurak koşullardaki bitkiler daha sonra ozmotik ayarlama için gerekli olan metabolitleri harekete geçirerek koruyucu bileşikler sentezler. Osmoregülatör süreçler membran bütünlüğünü korur ve hücreye su girişinin yanı sıra şekerler, kuaterner amonyum bileşikler (glisin betain ve alanin betain), hidrofilik proteinler (geç embriyogenezde bol miktarda bulunan proteinler), çözünür proteinler ve amino asitler gibi organik çözünenlerin (prolin) birikmesini sürdürür (Hossain ve ark., 2022).

Prolin ve arginin (osmoprotektanlar), stres durumlarında ozmotik basıncın düzenlenmesinde rol oynayan iki amino asittir. Bir amino asit olan argininin yapraklardaki stres tolerans seviyelerini iyileştirmek için uygun olduğu keşfedilmiştir. Hiperosmotik koşullar altında, arginin

üretiminde rol oynayan enzimler artırılır (Ashraf ve Foolad, 2007). Hücreler aktif maddeleri (prolin, sorbitol ve glisin betain) depo organellerinde (koful) biriktirir. Bu depolama bileşikleri hücrelerdeki su kaybını azaltır (Kebede ve ark., 2019). Bitkilerin hasardan korunması amacıyla bazı spesifik çözünenlerin birikmesi ve reaktif oksijen türlerinin temizlenmesi protein yapısının ve fonksiyonunun korunmasına yardımcı olur ve bitkilerin stres toleranslarını artırır. Tepki bitkinin türüne, yetiştirme bölgesine, bitkinin gelişim aşamasına, büyüme evresine, maruz kalınan stresin şiddetine ve süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Cramer ve ark., 2011).

KURAKLIKTA FOTOSENTEZDE AZALMA

Kuraklık stresinin hem yaprak alanını hem de birim yaprak alanı başına fotosentez oranını azaltarak fotosentezi azalttığı bilinmektedir. Azalan fotosentetik oran esas olarak stoma kapanması veya metabolik bozukluktan kaynaklanmaktadır. Sınırlı hücre içi CO₂ konsantrasyonu altında kuraklık stresi sırasında devam eden fotosentetik ışık reaksiyonları, moleküler oksijeni potansiyel olarak azaltabilen ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimine yol açabilen azaltılmış fotosentetik elektron taşıma bileşenlerinin birikmesiyle sonuçlanır. ROS fotosentetik aparatta ciddi hasara neden olabilir. Bitkilerin fotosentezde kuraklığın neden olduğu hasarı azaltmak için geliştirdikleri adaptif tepkiler arasında ışık enerjisinin termal dağılımı, ksantofil döngüsü ve ışık toplayan komplekslerin fotosentetik reaksiyon merkezlerinden ayrışması yer alır. Kuraklık stresi sırasındaki metabolik bozulma esas olarak fotosentetik karbon metabolizmasındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Lawlor ve Cornic, 2002).

Kuraklık stresi altında fotosentezin biyokimyasal etkinliği esas olarak ribuloz-1,5-bisfosfat (RuBP) rejenerasyonuna ve ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz (RuBisCO) aktivitesine bağlıdır. Bitkilerin kuraklık stresine fotosentetik adaptasyonu, hormonlar, ROS, şekerler ve diğer metabolik olayların karmaşık bir etkileşimini içerir. Kuraklığın neden olduğu klorofil tükenmesinin uzun süredir pigment fotooksidasyonu ve klorofil bozulmasının bir sonucu olduğu düşünülmüyordu. Kuraklık stresi, kuraklığın uzunluğuna ve şiddetine bağlı olarak değişen klorofil içeriğinde azalmaya neden olmaktadır (Hossain ve ark., 2022).

Klorofil floresansı aynı zamanda genotiplerin fotosentetik etkinliğini dolaylı olarak ölçmek için yaygın olarak kullanılan özelliklerden biridir. Esas olarak fotosistem II (PSII) fonksiyonunun göstergesi olarak kullanılır. Bitki strese maruz kaldığında PSII etkinliği düşer ve dolayısıyla toleranslı genotiplere kıyasla daha düşük değer gösterir (Venkatesh ve ark., 2022). Fotosentez dünyadaki en önemli kimyasal reaksiyonlardan biridir ve fotosentetik etkinliği artırmak her zaman bitki verimini artırmanın en temel yolu olmuştur (Xu ve ark., 2022).

Fotosentetik etkinin büyük bir bölümünü kapsayan ışığa bağımlı reaksiyonlar üzerine kuraklık stresinin önemli bir etkisi bulunmaktadır. Işık reaksiyonları kloroplastların tilakoid membranlarında gerçekleşmekte ve sırasıyla fotosistemler II (PS II) ve I (PS I) yoluyla ATP ve NADPH üretmek için klorofil tarafından emilen ışık enerjisini kullanmaktadır. Işık reaksiyonları büyük ölçüde suya bağlı olduğundan, kuraklık genellikle bu reaksiyonları önemli ölçüde etkilemektedir. Işık

reaksiyonlarının bozulması, bitki verimliliğine zarar veren çeşitli istenmeyen etkilere yol açmakta ve bu durum, çalışmayı kritik bir husus haline getirmektedir. İlk olarak kuraklık stresi, su eksikliğine aşırı duyarlılığı nedeniyle özellikle PS II'yi etkilemektedir. PSII stabilitesini ve kurak koşullarda etkinliğini kaybeder, bu da ışık enerjisi dönüşümünün etkinliğinde önemli düşüşe neden olur. Fotosentetik elektron taşıma zincirinin bir parçası olarak PSII'nin D1 proteini, oksidatif strese ve kuraklık altında üretilen ROS'un verdiği hasara eğilimlidir. Bu da, oksijen oluşumunu azaltmakta ve sudan plastokinon havuzuna elektron transferini kısıtlayarak fotokimyasal etkinliği azaltmakta ve burayı fotoinhibisyon ve fotohasara karşı savunmasız hale getirmektedir (Prasil ve ark., 1996; Sharma ve Zheng, 2012; Qiao ve ark., 2024).

PSII'nin aksine, PSI genellikle kuraklıktan etkilenmemektedir. Fakat PSII bozulması nedeniyle fotosistemler arasındaki elektron akışı azalmaktadır. Sonuç olarak, elektron taşıma zincirinin redoks durumu dengesizleşmekte, bu da PSI elektron alıcılarının aşırı azalmasına ve aşırı ROS üretimine neden olmaktadır. Kuraklığın neden olduğu ışık reaksiyonu hasarı doğrusal elektron akışının engellemektedir. Normal koşullar altında doğrusal elektron taşınması, PSII, sitokrom b6f kompleksi, PSI ve tilakoid membran boyunca bir proton gradyanını kullanarak elektronları sudan NADP^+ 'ya aktarmaktadır. Kuraklık bu bileşenlere zarar vermekte, zarın uyarılma enerjisi içeriğini artırmaktadır. Bu, güvenli bir şekilde dağıtılmazsa, fotohasar ve fotosentetik inaktivasyon yoluyla PSI ve PSII'ye zarar verebilmekte ve verimliliği azaltmaktadır (Lawlor ve Tezara, 2009; Liu ve ark., 2018;

Qiao ve ark., 2024).

Fotosentezin karanlık reaksiyonları, daha spesifik olarak Calvin döngüsü de, kuraklık stresinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Calvin döngüsü, kloroplastların stromasında meydana gelen ve ışık reaksiyonlarının ürünlerini, ATP ve NADPH'yi kullanarak karbonun sabitlenmesine ve şekerlerin sentezlenmesine hizmet eden bir dizi reaksiyondur. Kurak koşullar Calvin döngüsünü çeşitli yollarla bozmaktadır. Bunlar arasında enzim aktivitesinde karbon ve fiksasyonunda azalma ile fotosentetik ürünlerin kloroplastlardan sitoplazmaya aktarılmasında zorluklar yer almaktadır. Kuraklığın Calvin döngüsü üzerindeki ana etkilerinden biri enzimlerin aktivitesinin azalmasıdır. Karbon fiksasyonunun ilk reaksiyonunu katalize eden enzim olan Ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz (Rubisco), Calvin döngüsü için kritik öneme sahiptir. Rubisco kuraklığa karşı oldukça hassastır ve stres koşulları karboksilasyon etkinliğini azaltmaktadır. Bunun nedeni, ribuloz-1,5-bisfosfat (RuBP) ve CO₂'nin kullanılabilirliğinin azalmasıdır. Kurak koşullarda stoma iletkenliği azalmakta, bu da CO₂ alımının azalmasına neden olmakta, CO₂ konsantrasyonunu azaltmakta ve enzimi inhibe etmektedir. Kuraklık ayrıca Rubisco'nun sentezini ve aktivasyonunu etkileyen ve karboksilasyon aktivitesini sınırlayan oksidatif strese de neden olmaktadır (Parry ve ark., 2002; Qiao ve ark., 2024).

Rubisco aktivaz kuraklık stresinden etkilenen bir diğer önemli enzimdir. Termal kararsızlığı ve kuraklığa duyarlılığı Rubisco aktivazın inhibisyonuna yol açmakta, bu da Rubisco'nun inhibitör şeker fosfatlarının uzaklaştırılmasını teşvik ederek döngüyü substratlarla

sağlama yeteneğini sınırlamaktadır. Ayrıca Calvin döngüsünde yer alan diğer enzimlerin aktivitesi de daha düşüktür. RuBP'nin rejenerasyonunda ve 3-fosfoglisaratın gliseraldehit-3-fosfata indirgenmesinde rol oynayan enzimler olan fosforibulokinaz (PRK) ve gliseraldehit-3-fosfat dehidrojenaz (GAPDH), kuraklık stresinde daha düşük aktiviteye sahiptir. Kuraklık stresi aynı zamanda fotosentetik ürünlerin kloroplasttan sitoplazmaya geçişini de bozmaktadır. Gliseraldehit-3-fosfat ve dihidroksiaseton fosfat gibi trioz fosfatların sentezi, ATP ve NADPH'nin sınırlı mevcudiyeti nedeniyle kurak koşullarda azalmaktadır. Bu trioz fosfatlar, daha fazla metabolizma ve depolama için sitoplazmaya aktarılması gereken temel ara ürünlerdir. Trioz fosfatların azalan dağılımı, bu ara maddelerin kloroplastta birikmesine yol açmakta, bu da Calvin döngüsünü geri beslemeli olarak inhibe etmekte ve karbon sabitleme etkinliğindeki azalmayı şiddetlendirebilmektedir. Ayrıca fotosentetik ürünlerin aktarımındaki bozulma, bitki içindeki genel metabolik dengeyi etkilemektedir. Sitoplazmada şeker miktarının azalması, büyüme ve gelişme için hayati önem taşıyan sakkaroz, nişasta ve diğer karbonhidratların sentezini sınırlamaktadır. Bu metabolik dengesizlik biyokütle birikiminde bir azalmaya yol açmakta ve hücre duvarı sentezi, enerji depolama ve stres tepkileri dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik süreçleri etkilemektedir. Fotosentetik ürünlerin aktarımının bozulması aynı zamanda bitkinin kuraklık stresine tepkisini düzenleyen sinyal yollarını da etkileyerek bitkinin su eksikliği koşullarına uyum sağlama yeteneğini daha da tehlikeye sokmaktadır (Lawlor ve Cornic, 2002; Paul ve Pellny, 2003; Flexas ve ark., 2004; Sharkey ve ark., 2007; Ayre, 2011; Wu ve ark., 2021; Qiao ve ark., 2024).

YAPRAK ALANI

Yaprak alanı, bitkinin karbon birikimini ve azot depolama kapasitesini belirlemede önemli bir faktör olarak kabul edilir ve sonuçta bitki verimini etkiler. Yaprak alanı gelişimine yol açan yaprak genişlemesinin topraktaki su eksikliğine duyarlı olduğu iyi bilinmektedir. Su stresi altında yaprak genişlemesinin kontrol edilmesinde su ilişkilerinin rolü tartışmalıdır. Bazı çalışmalar yaprak genişlemesinin güçlü bir şekilde hücre turgoru tarafından yönlendirildiğini vurgularken, diğerleri ise köklerden gelen sinyallerin rolünü vurgulamıştır (Devi ve ark., 2015).

Yaprak alanı indeksi (LAI, Leaf Area Index), bitki büyüme simülasyon modellerinde en önemli fizyolojik parametrelerden biri olmuştur. Yaprak alanı indeksi, bitki topluluğunun büyüme kalitesini tanımlamak için önemli bir parametredir. LAI değeri, ışık dağılımını, radyasyon kullanım etkinliğini, yaprak terlemesini, toprağın buharlaşmasını, kuru madde birikimini ve bitki verimini önemli ölçüde etkileyebilir (Jiang ve ark., 2020).

Yaprak büyümesinin engellenmesi, kısıtlı suya verilen en erken tepkilerden birisi olup, terlemenin azalmasına ve su tasarrufuna yol açmaktadır. Hücresel düzeyde, bir bitkinin büyüme bölgelerindeki bölünme ve genişleme, kuraklığa karşı organ ve bitki düzeyindeki büyüme tepkilerini belirler. Yaprak alanının azalması kuraklığa toleransı artırarak kuraklığa uyum sağlar (Avramova ve ark., 2015). Yaprak, kuraklığa en duyarlı bitki organlarından biridir. Daha geniş bir yaprak alanı ışık emilimini, kaynak birikimini ve bitkilerin hızlı

büyümesini teşvik eder, ancak aynı zamanda terlemeyi ve su kaybını da artırarak su stresini artırır. Toplam yaprak alanı, yaprak sayısına ve bireysel yaprak alanına göre belirlenir. Yaprak biyokütlesi yaprak su içeriği ve kuru kütleden oluşur. Su içeriği yaprağın metabolik aktivitesini yansıtır (Ma ve ark., 2021).

Bitki yaprakları fotosentez ve terleme için kritik alanlardır. Spesifik yaprak alanı, çevresel değişikliklere yanıt olarak bitki stratejilerini tahmin etmek için önemli bir fonksiyonel özellik ve göstergedir. Bitkiler, yaprak kalınlığı, yaprak alanı, stoma ve mezofil yoğunluğu gibi yaprak fonksiyonel özelliklerinin esnekliği yoluyla karbondioksit asimilasyonunu ve besin emme kapasitelerini düzenleyebilirler. Spesifik yaprak alanı, yaprak alanının kuru kütleye oranı olarak tanımlanır. Spesifik yaprak alanı önemli bir yaprak özelliğidir ve su kullanım stratejisi veya hayatta kalma stratejisiyle yakından bağlantılıdır. Üstelik spesifik yaprak alanı, dış ortam değişikliklerine yanıt olarak güçlü bir esnekliğe sahiptir. Kaynak açısından zengin ortamlarda yetişen bitkilerin, fotosentetik kapasiteyi ve etkinliğini artırmak için daha büyük spesifik yaprak alanı stratejisini kullandıklarına ve zayıf ortamlarda stres direncini ve rekabet yeteneğini geliştirmek için daha küçük spesifik yaprak alanı stratejisini uyarladıklarına genel olarak inanılmaktadır. Yaprak yaşı ve bitki boyutu, yaprağın fonksiyonel özelliklerini etkileyen temel faktörlerdir. Çok yıllık türlerle karşılaştırıldığında, tek yıllık türler daha büyük spesifik yaprak alanına sahip olma ve daha fazla esnekliğe sahip olma eğilimindedir. Su stresine maruz kalan bitkiler, yaprak kalınlığını artırarak spesifik yaprak alanını azaltma eğilimindedir; bu, buharlaşma

yoluyla su kaybını önlemek için daha kalın hücre duvarları ve daha sıkı bağlantılarla sonuçlanır (Zhou ve ark., 2020).

YAPRAK KALINLIĞI

Yaprak kalınlığının belirli çevresel faktörlere tepki olarak hızlı bir şekilde değişiklik gösterebileceği kanıtlanmıştır. Örneğin toprağın nem içeriği belirli bir eşiğin altına düşerse yaprak kalınlığı genellikle bir ila birkaç saat içinde azalır. Bu etkiden yararlanılarak yaprak kalınlığının sürekli ölçümü sulamayı kontrol etmek için kullanılabilir. Bu yöntem çok büyük miktarlarda sulama suyundan tasarruf etme potansiyeline sahiptir. Ayrıca yaprak kalınlığının, hava sıcaklığı ve hava nemindeki dalgalanmalara tepki olarak hızlı bir şekilde, yani birkaç dakika içinde değişebileceği de gösterilmiştir. Böylece yaprak kalınlığının, yaprak dokusunun su içeriğindeki değişikliklere bir şekilde tepki verdiği görülmektedir. Yaprak yaralanmasına tepki olarak yaprak kalınlığı neredeyse anında değişebilir. Bir yaprak yaralandığında, yaprağın veya bitkinin diğer bölgelerine bir miktar su dağıtılarak buralarda yaprak kalınlığında artış olur. Bu prensibe hidrolik dağılım denir. Yapılan çalışmalar, yaprak kalınlığının toprağın nem içeriğine, hava sıcaklığına ve hava nemine bağlı olarak saatler veya dakikalar içinde önemli ölçüde değişebileceğini belgelemiştir. Toprak iyi sulandığında veya bitki üzerinde hafif bir su eksikliği stresi oluştuğunda, yaprak kalınlığı genellikle oldukça sabittir. Toprağın nem içeriği belirli bir eşiğin altına düşerse yaprak kalınlığı bir ila birkaç saat içinde tam anlamıyla çökebilir. Fakat bitki çok gecikmeden sulanırsa oldukça hızlı bir şekilde normal durumuna dönebilir. Gündüz saatlerinde, ortam havasının bağıl nemi arttığında yaprak kalınlığı

artma eğilimindedir, ortam havasının buhar basıncı açığı arttıkça ise azalma eğilimindedir (Seelig ve ark., 2015).

Kurak koşullarda, çeltik yaprağında kuraklığa tepki olarak daha küçük bulliform hücreler (%36.8), daha kalın epidermis (%10.98), daha küçük damar demetleri (%7.41) ve daha küçük demet kını hücreleri (%11.95) gözlenmiştir (Gunnula ve ark., 2022).

YAPRAK KIVRILMASI

Yaprakların, gövdelerin ve köklerin büyümesi ve gelişmesi su stresinden ciddi şekilde etkilenebilir. Kuraklık stresi yaprak sayısının azalmasına, yaprak uzamasının azalmasına, yaprak kıvrılmasına, yeşil yapraklarda renk bozulmasına ve yaprak ölümünün hızlanmasına neden olur (Dien ve ark., 2017).

Şiddetli dehidrasyon sırasında yapraklardan su kaybını en aza indirmek için yaprak kıvrılması meydana gelir (Şekil 1). Yaprakta kıvrılma, fotosentetik etkinliği artırmaya, terleme oranını azaltmaya ve bitkide verimi artırmaya yardımcı olan önemli bir özelliktir. Ancak şiddetli kuraklık koşullarında aşırı yaprak kıvrılması, bitkinin büyümesinde ve veriminde gecikmeye neden olur. Transkripsiyon faktörlerinin yaprak kıvrma olayını uyardığı ve güçlendirdiği, bitkileri su eksikliği koşullarına daha uyumlu hale getirdiği rapor edilmiştir (Yang ve ark., 2014).

Bitkilerde yaprak kıvrılması, terlemeyi, güneş radyasyonuna maruz kalmayı ve dehidrasyonu azaltan bir mekanizmadır. Kuraklık stresi koşullarında yaprak hareketinde gecikme yaşayan bitkiler, su

alımını artırarak veya ozmotik düzenleme yoluyla yaprak turgorunu koruma yeteneği göstermektedir. Yaprak kıvrılmasının daha erken yaşanması, bitkilerin kuraklık stresine karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Şiddetli kuraklık stresi koşullarında yaprak kıvrılması, stomaların kapanması yoluyla güneş radyasyonuna ve terlemeye maruz kalmanın azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, stomaların kapanması yoluyla terlemenin azaltılmasının, yaprak sıcaklığının artması ve kloroplastlara zarar verebilecek reaktif oksijen türlerinin oluşumunu tetikleme üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bitkiler, köklerin topraktan su emme durumunu ve yaprağın su içeriğini yüksek tutarak yaprak sıcaklığının artışını bastırmaktadır (Effendi ve ark., 2019).



Şekil 1. Kuraklık stresi altında *Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense* melezinin yaprak kıvrılma özelliği

Kaynak: Rauf ve ark., (2016).

YAPRAK YAŞLANMASI, SOLMASI VE KURUMASI

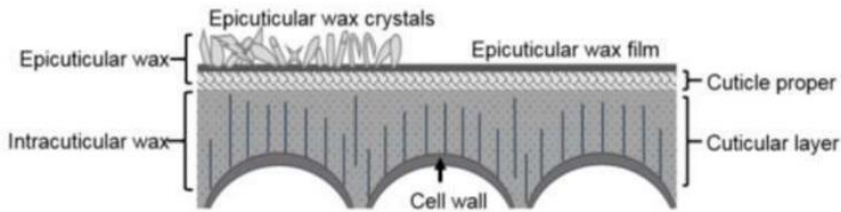
Bir bitkinin kökleri tarafından emilen suyun %99'undan fazlası terleme yoluyla atmosfere dağılır. Bu, fotosentez için CO₂'nin yapraklara difüzyonuna izin vermenin kaçınılmaz bir sonucudur, fakat aynı zamanda yaprakların soğuması ve bitki besin maddesi alımı için de gereklidir. Yaprakların etrafındaki dalgalanan mikro ortamlar günlük ve mevsimsel zaman çizelgelerinde terleme talebini değiştirdiğinden, su gereksinimleri bitkinin ve yaprağın ömrü boyunca değişir. Birçok türde yaprak yaşı arttıkça buharlaşma ve stoma iletkenliğinin azaldığı bilinmektedir. Bir bitkinin karbon ihtiyacı ve fotosentetik kapasitesi de gelişim boyunca değişir. Yapraklar tam genişlemeye ulaştıktan sonra, büyüme mevsimi boyunca fotosentez sıklıkla azalır (Locke ve Ort, 2014).

Yaprak solması ve solma için gereken gün sayısı gibi kuraklığa toleransla doğrudan ilişkisi olan morfolojik özellikler, kuraklığa toleransın genetik varyasyonunu incelemek için çok yararlı özelliklerdir. Bu özellik, bitkilerin uzun süreli su kıtlığını tolere etme yeteneğini ölçer ve kuraklığa toleransı iyileştirmeye yönelik bir yetiştirme programında seçim için çok etkilidir (Ahmed ve ark., 2021). Yaprak yeşilliği, klorofil konsantrasyonuyla ilişkili yeşil rengin yoğunluğuna göre yaprağın rengini karakterize eden genel bir terimdir. Kuraklık stresi altında yaprak yeşilliğinin korunması, klorofil bozulmasının azaldığını gösterdiği için genellikle olumlu bir özellik olarak kabul edilir. Yaprak yaşlanması, klorofil ve yaprak proteinlerinin benzer oranlarda bozulma eğiliminde olduğu oldukça organize ve iyi düzenlenmiş bir süreçtir. Su kısıtlaması altında,

yaşlanmanın gecikmesi (veya yeşil kalma), karbon ürünlerinin bitkinin hasat edilen organlarına yeniden mobilizasyonu sırasında fotosentetik aktivitenin korunmasını yansıtabilir ve bu da daha yüksek bir verime yol açabilir. Yaşlılığın zamanlaması, yetiştiriciler tarafından kolaylıkla manipüle edilebilecek kalıtsal bir özelliktir (Rolando ve ark., 2015).

KÜTİKÜL VE MUM BİRİKİMİ

Kütikül, odunsu bitkilerin gövdeleri dışındaki vasküler bitkilerin hava yüzeylerindeki epidermal hücrelerin dış yüzeyinde bulunur, toplu olarak hidrofobik bir tabaka oluşturan kütin ve mumlardan oluşur. Kütin, uzun zincirli hidroksil yağ asitlerinin çözünmeyen polyesteridir; mumlar ya kütin matrisinin içine intrakütiküler mumlar şeklinde gömülür ya da epikütiküler bir film olarak dış yüzeyde biriktirilir. Kütikül, stoma dışı su kaybını kısıtlayan başlıca terleme bariyeridir ve bitkinin kuraklık toleransı ile yakından ilişkilidir. Kütiküler terleme bariyerini hangi faktörlerin şekillendirdiği hala tartışmalıdır (Chen ve ark., 2020).



Şekil 2. Bitki kütikülünün enine kesitinin şeması; epikütiküler mum (epicuticular wax), intrakütiküler mum (intracuticular wax), epikütiküler mum kristalleri (epicuticular wax crystals), epikütiküler mum film (epicuticular wax film), hücre çeperi (cell wall), kütikül bölgesi (cuticle proper), kütikül tabakası (cuticular layer).

Kaynak: Huang, 2018.

Kütiküler mum, bitki abiyotik ve biyotik stres toleransında önemli rol oynar ve yoğun ultraviyole radyasyona, yüksek sıcaklığa, bakteriyel ve fungal patojenlere, böceklerle, yüksek tuzluluğa ve düşük sıcaklığa karşı savunma mekanizmalarında rol oynar. Kütikülün önemli bir bileşeni olan kütiküler mum, kontrolsüz stomatal olmayan bitki gaz değişimini sınırlamak için bir bariyer görevi gören en dıştaki hidrofobik katmandır. Test edilen tüm kara bitkilerinin yüzeylerinde kütiküler mumun olduğu rapor edilmiştir. Kütikül, sürgünlerde, kökçüklerde, meyvelerde, çiçeklerde ve yapraklarda meydana gelerek bitki yüzeyinde yaygın olarak bulunur. Ancak kutikula kalınlığı bitkinin yaşadığı ortamlarla ilişkilidir, kurak ortamlarda yaşayan bitkilerde (kserofit) kalın bir kutikula tabakası bulunurken nemli ortamlarda yaşayan bitkilerde (higrofit) ise bu tabaka çok incedir. Kütiküler mum genellikle üç boyutlu kristalli karmaşık mikro yapılar oluşturur. Genel olarak bitki kütiküler mumunun iki fiziksel katmanı vardır: '*intrakütiküler mum*' ve '*epikütiküler mum*'. Birincisi kütin polimeri içinde dağılır ve ikincisi dış yüzeyde biriktirilir. Farklı bitki türlerinin yanı sıra farklı doku ve organlarda kütiküler mumların yapısı ve bileşimi çok çeşitlidir. Kütiküler mumun biyosentezi karmaşık bir süreçtir. Endoplasmik retikulum'da sentezlenen kütikül mumunun bileşenlerinin kütiküle taşınması gerekir (Xue ve ark., 2017).

Epidermal hücre duvarlarının dış uzantısı olarak gelişen bitki kütikülü, tüm bitki organlarının hava yüzeylerini kaplayan sürekli bir hidrofobik tabakadır ve bitkilerin çeşitli biyotik ve abiyotik faktörlerle etkileşimlerinde bir arayüz görevi görür. Kütikül, stomalarla uyum içinde bitkinin su durumunu kontrol eden ve bitkilerin kuraklık altında

hayatta kalmasına yardımcı olan çok önemli bir bariyerdir (Javelle ve ark., 2011). Organik çözücülerdeki çözünürlüğe bağlı olarak kütikül bileşenleri, çözünmeyen kütin ve çözünür kütiküler mumlara ayrılır. Mumlar tipik olarak yağ asitleri, alkanlar, aldehitler, ketonlar ve birincil ve ikincil alkolleri içeren çok uzun zincirli doymuş alifatiklerin türevlerinin karmaşık bir karışımıdır. Kilit enzimleri kodlayan kütikül ile ilgili genler ve düzenleyici transkripsiyon faktörleri de dahil olmak üzere, kütikül biyosentez yollarının birçok unsuru, öncelikle *Arabidopsis*, domates, pirinç, mısır ve arpada kütikül mutantlarının karakterize edilmesiyle ortaya çıkarılmıştır (Lee ve Suh, 2015).

Kütikülün ana fizyolojik rolünün su kaybının azaltılması olduğu öne sürülmektedir. Kütikül, kuraklık altında hücresel dehidrasyon stresinin başlangıcını geciktirir ve bu nedenle kuraklıktan korunmanın önemli bir bileşeni olarak kabul edilir. Su eksikliği sırasında stomalar kapanır ve kütikülden geçen nano ölçekli difüzyon yolları bitki su kaybının birincil yolu haline gelir. Bitki yüzeylerinde epikütiküler mumların birikmesi sıklıkla, yoğun şekilde dağılmış epikütiküler mum kristaloidlerinin görünür bir formu olan, mavimsi beyaz bir renklenmeye neden olur. Parlaklık radyasyon yansımalarını artırır ve yaprak sıcaklıklarını ve terlemeyi azaltır, böylece su stresi altında yaprakların hayatta kalma durumunu artırır (Bi ve ark., 2017).

TRİKOMLAR

Trikomlar bitkinin dış epidermal hücre dokusundan kaynaklanan ve birçok bitkinin yüzeyinde bulunan morfolojik olarak çeşitli uzantılardır. Trikomlar, bitkiler ile biyotik veya abiyotik stresler

arasındaki etkileşimde tamponlayıcı bir rol oynayabilir. Bitki trikomları sadece epidermisin kalınlığını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda dış istilaya karşı fiziksel bir bariyer görevi görür (Ishida ve ark., 2008). Bitkinin büyümesi ve gelişmesi için gerekli değildir; ancak bitkide ısı kaybını azaltmak, bitkilerin soğuğa ve kuraklığa karşı direncini arttırmak, bitki dokularını ultraviyole ışıktan ve böceklerden korumak gibi birçok önemli biyolojik fonksiyona sahiptirler. Trikomlar, kök tüyleri gibi epidermal hücrelerden farklılaşmakta fakat toprak üstü aksamda gelişmektedirler. Trikomlar glandüler trikomlar ve glandüler olmayan trikomlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir (Bilgin F.D., 2023)

Trikomlar çoğu karasal bitkinin yüzeyini kaplayan önemli epidermal yapılardır. Bitkiler, hareketsiz doğaları nedeniyle çeşitli streslerle karşı karşıyadır ve trikomlar, otçullar, yüksek radyasyonlu güçlü ışık ve ultraviyole ışık gibi çevresel stres faktörlerine karşı savunmada önemli rol oynar. Bugüne kadar, trikom oluşumu başlatma, farklılaştırma, çok boyutlu hücre büyümesi ve dallanmasını düzenleyen genler dahil olmak üzere 100'den fazla genin trikom gelişiminde rol oynadığı bilinmektedir. Bu genlerin çoğu, trikom gelişimini pozitif veya negatif olarak düzenleyen transkripsiyon faktörlerini kodlamaktadır (Zhang ve ark., 2021).

Bitki epidermal hücrelerinde özel bir yapı olan trikomların terleme oranını azaltarak su kaybını azaltmada etkili bir rol oynadığı bilinmektedir. Trikom yoğunluğu, aşırı terlemeyi ve fotoinhibisyonu azaltan CO₂ ve H₂O değişiminin etkisine karşı bariyer etkisi nedeniyle kuraklığa karşı esnektir (Ning ve ark., 2016). Trikomlar ayrıca bitkinin

güneş radyasyonu emilimini azaltabilir ve yaprak yüzeyi sınır katmanını artırarak sıcaklığını düşürebilir, böylece bitkiyi kuraklıktan da koruyabilir (Schreuder ve ark. 2001). Trikom gelişiminin ana düzenleyicileri pozitif ve negatif düzenleyicileri içerir. Pozitif düzenleyiciler üç protein sınıfından oluşur. Bu pozitif ve negatif düzenleyicilerin etkileşimi, trikomların başlatılması ve geliştirilmesiyle sonuçlanır (Ning ve ark., 2016).

Yaprak trikomları bitkileri otçullara ve kuraklığa karşı koruyabilmektedir. Ancak mevsimsel değişiklikler ve çevresel koşullar, glandüler trikomların büyümesini ve gelişimini etkileyerek, glandüler trikomların morfolojisi, türleri ve yoğunluklarında farklılıklara yol açabilir (Abbasi ve ark., 2024).

KURAKLIKLA İLİŞKİLİ YAPRAK GENLERİ VE HORMONLAR

Pek çok gen kuraklığa transkripsiyonel düzeyde yanıt verir. Bunların ürünlerin kuraklığa tolerans ve yanıtta işlev gördüğü düşünülmektedir. Abiyotik stres tepkilerinde yüzlerce genin yer aldığı ve bunların bir kısmının iyi karakterize edilmesine rağmen çoğunluğu bilinmemektedir ve muhtemelen henüz keşfedilmeyi bekleyen daha çokça gen vardır (Huang ve ark., 2008).

Çeşitli çalışmalardan elde edilen kuraklığa neden olabilen gen listelerinin karşılaştırılması sonucu, yalnızca 27 genin yaygın olarak uyarıldığını ortaya çıkarmıştır. Fonksiyonel sınıflandırma, bu genleri altı farklı kategoriye (hücrel metabolizması, hücrel taşıma, sinyal iletimi, transkripsiyonel düzenleme, hidrofilik-ısıda çözünebilen

proteinler ve bilinmeyen işlevi olan gen ürünleri) yerleştirir. En fazla sayıda gen, hidrofilik proteinler kategorisindedir. Genel olarak aşağı regüle edilen genlerin sayısı daha da azdır. Bu genlerin, azalan su içeriğine tepkinin bir parçası olan büyümenin engellenmesinde rol oynaması muhtemeldir. Toprak-su eksikliği stresine adaptasyonu kontrol eden moleküler mekanizmaları netleştirmek için, bireysel genlerin değiştirilmesinin etkisine ilişkin fizyolojik çalışmalarla birlikte, saha koşullarında çok sayıda çalışma yapılarak gen ekspresyonunun karşılaştırılması gerekmektedir (Bray, 2004).

Kuraklığa duyarlı genler temel olarak iki gruba ayrılabilir. Birinci grup, bitkilere osmotolerans ve koruma sağlayan, dolayısıyla strese karşı toleransta doğrudan görev yapan genleri oluştururken, ikinci grup, gen ifadesinin düzenlenmesinin yanı sıra sinyal iletiminde de rol oynayan genleri içerir (Lata ve ark., 2015).

Kuraklığa tolerans, birçok gen tarafından kontrol edilen karmaşık niceliksel bir özelliktir; bu genlerin bazıları küçük etkilere sahipken diğerleri büyük etkilere sahiptir. Genom çapında ilişkilendirme çalışmaları (Genome-Wide Association Studies, GWAS), hedef özelliklerle ilişkili alelleri tanımlamak için kullanılan bu tekniklerden biridir. Her bir belirteç ile farklı bir popülasyondaki ilgilenilen bir fenotip arasındaki ilişkiyi hesaplar. Ayrıca karmaşık özelliklerin genetik mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırır ve bu özelliklere neden olan faktörleri belirler. GWAS analizinde kullanılabilecek yaygın moleküler belirteç türleri, basit dizi tekrarı (Simple Sequence Repeats, SSR), güçlendirilmiş parça uzunluğu polimorfizmi (AFLP), tek nükleotid polimorfizmi (SNP) ve çeşitlilik dizileri teknolojisi

(DARt) belirteçleridir (Ahmed ve ark., 2021).

Bitki savunmasının düzenlenmesinde birincil sinyaller ABA (Absisik asit), JA (Jasmonik) ve SA (Salisilik asit) 'nın önemli rolü iyi bilinmektedir. Bu hormonlar, bitkinin strese karşı fizyolojik adaptasyonundan sorumlu bir dizi olaya yol açan bir sinyal iletim ağı oluşturur. Absisik asit (ABA), çevresel olumsuzlukları bitkilerin gelişim programlarıyla bütünleştirmedeki düzenleyici rolü nedeniyle iyi bilinen bir hormondur. Embriyo ve tohum gelişimi, kuruma toleransı ve uyku halinin kazanılması, çiçeklenme ve organogenez gibi farklı gelişim aşamalarındaki çok çeşitli süreçleri etkiler. ABA ayrıca stresli olmayan koşullar altında bitki büyümesini destekler ve çeşitli organlarda bitkisel büyüme için gerekli olduğu gösterilmiştir. Sürekli sentez, taşıma ve bozunma, bitki hücrelerinde ABA seviyelerini dinamik olarak korur. Su eksikliği stresine tepki olarak ABA içeriğindeki bir artış, ABA biyosentezindeki bir artıştan ve/veya ABA parçalanmasında bir azalmadan kaynaklanabilir. ABA'nın dışarıdan uygulanması bitkilerin veya bitki hücrelerinin kuraklığa karşı toleransını artırır (Lu ve ark., 2009). Bununla birlikte stres toleransı ile artan ABA içeriği arasındaki doğrudan ilişki her zaman mevcut değildir. Su eksikliği olan ortamlarda ABA'nın köklerde biriktiği ve daha sonra diğer bitki kısımlarına taşındığı bilinmektedir (Kang ve ark., 2022). Stomaların kapanmasında, kök-gövde iletişiminde ve kök oluşumunun düzenlenmesinde rol oynamaktadır (Kalra ve ark., 2024). Kurak koşullarda endojen ABA seviyesinin artması stomaların kapanmasına neden olur. Bu durum su eksikliğinin ilk belirtilerinden birini oluşturur ve stoma iletkenliğinin artması veya azalması olarak

kaydedilir. Terleme yoluyla su kaybını en aza indirmek için stomaların kapanması gerçekleşir ve ABA bu süreçte temel bir rol oynar. Bu nedenle stoma direnci, farklı türlerdeki ve büyüme koşullarındaki su eksikliğinin yoğunluğunu karşılaştırmak için bir referans olarak kullanılır (Medrano ve ark., 2002).

Kurak koşullarda stomaların kapanması, topraktaki su eksikliğinin bir sonucu olarak köklerde sentezlenen, artan endojen ABA düzeylerine bir tepkidir. Stoma kapanması sırasında ABA algılama ve sinyalleme ilk adımları, koruyucu hücrelerdeki ABA reseptörlerinin lokalizasyonu ile ilgilidir. Absisik asit reseptörlerinden ikisi hücrenin içinde bulunmakta fakat üçüncüsü hücre yüzeyindedir (Liu ve ark., 2007). Bu sayede bitki hücresi hem hücre dışı hem de hücre içi ABA konsantrasyonlarını algılayabilir. Kurak koşullarda bitki özsuyunun pH'sındaki artış nedeniyle stoma kapanmasında artış meydana gelmektedir. Bu durum, hücre dışı ABA'nın, plazma zarı üzerindeki reseptörler aracılığıyla bekçi hücreler tarafından algılandığını göstermektedir. Son on yılda, ABA kaynaklı stoma kapanmasında hidrojen peroksit (H_2O_2) ve nitrik oksit (NO) de rol oynadığı tespit edilmiştir (Bright ve ark., 2006).

Abiyotik stres koşullarında, bitki hücresinde reaktif oksijen türleri (ROS) üretilir ve bu, etkilenen bitkilerin fizyo-biyokimyasal süreçlerini değiştirir ve sonuçta bitkilerin olağan büyüme ve gelişimini engeller. Toleranslı bitkiler ROS'un (hidroksil iyonları, süperoksit iyonları, hidrojen peroksit ve diğer serbest radikaller) üretimini engelleyerek abiyotik stresin neden olduğu oksidatif stresi önlemek için çeşitli büyüme düzenleyicilerini (jasmonatlar, salisilatlar, bitki hücrelerinde

brassinosteroidler, nitrik oksit, hidrojen sülfür, poliaminler, glisin-betain, oligosakaritler, strigolaktonlar, melatonin, karrikinler, şekerler, serotonin, turgorinler, miyo-inositoldeki sistem vb.) kullanırlar. Bunlar arasında prolin, glisin-betain, poliaminler ve şekerler (mannitol, sorbitol, galaktinol, trehaloz vb.) abiyotik streslere karşı bitki adaptasyonunda önemli role sahip olan osmolitler olarak bilinmektedir. Çeşitli genler, abiyotik streslerin neden olduğu oksidatif strese karşı hayatta kalma yeteneğini arttırmak için bu büyüme düzenleyicilerinin biyosentezinde de önemli bir rol oynar. Olumsuz ekolojik koşullar sırasında hem osmolitlerin hem de bitki hormonlarının önemli rol oynadığı bilinmektedir (Hossain ve ark., 2022).

Biyotik ve abiyotik uyaranlara yanıt olarak reaktif oksijen türlerinde (ROS) bir artış olduğu iyi bir şekilde belgelenmiştir. ABA, kuraklığa duyarlı çok sayıda genin transkripsiyonel düzenlemelerinde rol oynar. Kuraklığa neden olabilen bazı genler, hem ABA'dan bağımsız hem de ABA'ya bağımlı düzenleyici sistemler tarafından düzenlenebilir (Aimar ve ark., 2011). Salisilik asit, oksinler, gibberellinler, sitokinler ve ABA bitki büyümesine yardımcı olur ve bitkinin kuraklığa karşı tepkilerini düzenler (Farooq ve ark., 2009).

Daha az su ile verimi sürdürebilen türler ve çeşitler önemlidir. Su stresi de dahil olmak üzere çevresel streslere karşı en sürdürülebilir ve çevre dostu seçenek, hassas sulama uygulamalarını tercih edip bunları yüksek su kullanım etkinliğine sahip bitkilerle tamamlamaktır (Driesen ve ark., 2023).

Kalsiyum ve absisik asit, salisilik asit, jasmonik asit, oksin,

gibberellin, etilen, brassinosteroidler, peptid molekülleri gibi fitohormonlar kuraklık stresiyle başa çıkmak için önemli mekanizmalardır. Karakteristik lokusların sayısı, transgenik yöntemler ve dışarıdan nitrik oksit, (C₂₈H₄₈O₆) 24-epibrassinolit, prolin ve glisin betain gibi maddelerin uygulanması da bitkilerin kuraklığa direncini arttırmak için aynı derecede önemlidir (Iqbal ve ark., 2022).

Bitkilerin kuraklığa toleransı/hassasiyeti, fitohormon homeostazisine ve aralarındaki çapraz iletişime bağlıdır. Antioksidan mekanizmalar, uyumlu çözünen maddeler, iyon homeostazisi, farklı organlara biyomas gönderimi ve diğer birçok faktör, bitkilerin fitohormon durumundan etkilenmektedir. Oksin, sitokininler, etilen, poliaminler, jasmonatlar ve salisilatların kuraklık toleransı/duyarlılığı üzerindeki düzenleyici rolleri bildirilmiş olmasına rağmen, ABA stoma kapanmasındaki rolü nedeniyle ön plana çıkmıştır. ABA, çevresel stres koşullarında meydana gelmekte, endojen bir sinyal olarak işlev görmektedir, çeşitli fizyolojik ve gelişimsel tepkileri değiştirmekte, bu da stres koşullarına uyumla sonuçlanmaktadır (Aliniaefard ve ark., 2023).

KAYNAKÇA

- Abbasi, S., Houshmand, S., & Ahmadi, T. (2024). Volatile compositions and glandular trichomes of *Zataria multiflora* in different phenological stages under normal and drought stress conditions. *BMC Plant Biology*, 24(1), 483.
- Ahmed, A. A., Mohamed, E. A., Hussein, M. Y., & Sallam, A. (2021). Genomic regions associated with leaf wilting traits under drought stress in spring wheat at the seedling stage revealed by GWAS. *Environmental and Experimental Botany*, 184, 104393.
- Aimar, D., Calafat, M., Andrade, A. M., Carassay, L., Abdala, G. I., & Molas, M. L. (2011). Drought tolerance and stress hormones: From model organisms to forage crops. *Plants and Environment*, 10(6), 137-164.
- Aliniaiefard, S., Rezayian, M., & Mousavi, S. H. (2023). Drought stress: involvement of Plant hormones in perception, Signaling, and response. In *Plant Hormones and Climate Change* (pp. 227-250). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Avramova, V., Abdelgawad, H., Zhang, Z., Fotschki, B., Casadevall, R., Vergauwen, L., ... & Beemster, G. T. (2015). Drought induces distinct growth response, protection, and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. *Plant Physiology*, 169(2), 1382-1396.
- Ayre, B. G. (2011). Membrane-transport systems for sucrose in relation to whole-plant carbon partitioning. *Molecular Plant*, 4(3), 377-394.
- Bachle, S., Zaricor, M., Griffith, D., Qui, F., Still, C. J., Ungerer, M. C., & Nippert, J. B. (2022). Physiological responses to drought stress and recovery reflect differences in leaf function and anatomy among grass lineages. *BioRxiv*, 2022-07.
- Bhaskar, R., & Ackerly, D. D. (2006). Ecological relevance of minimum seasonal water potentials. *Physiologia Plantarum*, 127(3), 353-359.
- Bilgin F.D. (2023). Emerging Trends in Agriculture and Veterinary Sciences. Chapter name: Glandular & Non-Glandular Trichomes in Crops. Iksad International Publishing House, Editor: Dr. Feyza Döndü BİLGİN.
- Bi, H., Kovalchuk, N., Langridge, P., Tricker, P. J., Lopato, S., & Borisjuk, N. (2017).

- The impact of drought on wheat leaf cuticle properties. *BMC Plant Biology*, 17, 1-13.
- Blackman, C. J. (2018). Leaf turgor loss as a predictor of plant drought response strategies. *Tree Physiology*, 38(5), 655-657.
- Bray, E. A. (2004). Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2331-2341.
- Bright, J., Desikan, R., Hancock, J. T., Weir, I. S., & Neill, S. J. (2006). ABA-induced NO generation and stomatal closure in *Arabidopsis* are dependent on H₂O₂ synthesis. *The Plant Journal*, 45(1), 113-122.
- Chen, M., Zhu, X., Zhang, Y., Du, Z., Chen, X., Kong, X., ... & Chen, C. (2020). Drought stress modify cuticle of tender tea leaf and mature leaf for transpiration barrier enhancement through common and distinct modes. *Scientific Reports*, 10(1), 6696.
- Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., & Shinozaki, K. (2011). Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. *BMC Plant Biology*, 11, 1-14.
- Devi, M. J., Taliercio, E. W., & Sinclair, T. R. (2015). Leaf expansion of soybean subjected to high and low atmospheric vapour pressure deficits. *Journal of Experimental Botany*, 66(7), 1845-1850.
- Dien, D. C., Yamakawa, T., Mochizuki, T., & Htwe, A. Z. (2017). Dry weight accumulation, root plasticity, and stomatal conductance in rice (*Oryza sativa* L.) varieties under drought stress and re-watering conditions. *American Journal of Plant Sciences*, 8(12), 3189-3206.
- Dietz, K. J., Zörb, C., & Geilfus, C. M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893.
- Drake, P. L., De Boer, H. J., Schymanski, S. J., & Veneklaas, E. J. (2019). Two sides to every leaf: water and CO₂ transport in hypostomatous and amphistomatous leaves. *New Phytologist*, 222(3), 1179-1187.
- Driesen, E., De Proft, M., & Saeys, W. (2023). Drought stress triggers alterations of adaxial and abaxial stomatal development in basil leaves increasing water-use efficiency. *Horticulture Research*, 10(6), uhad075.
- Du, J., Chen, X., Li, W., & Gao, Q. (2004). Osmoregulation mechanism of drought stress and genetic engineering strategies for improving drought resistance in

- plants. *Forestry Studies in China*, 6, 56-62.
- Effendi, R., Priyanto, S. B., Aqil, M., & Azrai, M. (2019). Drought adaptation level of maize genotypes based on leaf rolling, temperature, relative moisture content, and grain yield parameters. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 270 (1), 012016). IOP Publishing.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable Agriculture*, 153-188.
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, 6(03), 269-279.
- Gunnula, W., Kanawapee, N., Somta, P., & Phansak, P. (2022). Evaluating anatomical characteristics associated with leaf rolling in northeastern *Thai rice* cultivars during drought by decision tree. *Acta Agrobotanica*, 75(1). <https://doi.org/10.5586/aa.7510>
- Hamanishi, E. T., Thomas, B. R., & Campbell, M. M. (2012). Drought induces alterations in the stomatal development program in *Populus*. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), 4959-4971.
- Hossain, A., Pamanick, B., Venugopalan, V. K., Ibrahimova, U., Rahman, M. A., Siyal, A. L., ... & Aftab, T. (2022). Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress-induced oxidative stress. In *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture* (pp. 1-72). Academic Press.
- Huang, D., Wu, W., Abrams, S. R., & Cutler, A. J. (2008). The relationship of drought-related gene expression in *Arabidopsis thaliana* to hormonal and environmental factors. *Journal of Experimental Botany*, 59(11), 2991-3007.
- Huang, H. (2018). Comparative investigation of the chemical composition and the water permeability of fruit and leaf cuticles (Doctoral dissertation, Universität Würzburg).
- Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., ... & Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Scientific Reports*, 9(1), 3890.
- Iqbal, S., Wang, X., Mubeen, I., Kamran, M., Kanwal, I., Díaz, G. A., ... & Fahad, S. (2022). Phytohormones trigger drought tolerance in crop plants: outlook and

- future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 12, 799318.
- Ishida, T., Kurata, T., Okada, K., & Wada, T. (2008). A genetic regulatory network in the development of trichomes and root hairs. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 365-386.
- Jiang, T., Dou, Z., Liu, J., Gao, Y., Malone, R. W., Chen, S., ... & He, J. (2020). Simulating the influences of soil water stress on leaf expansion and senescence of winter wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108061.
- Javelle, M., Vernoud, V., Rogowsky, P. M., & Ingram, G. C. (2011). Epidermis: the formation and functions of a fundamental plant tissue. *New Phytologist*, 189(1), 17-39.
- Jongdee, B., Fukai, S., & Cooper, M. (2002). Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *Field Crops Research*, 76(2-3), 153-163.
- Kalra, A., Goel, S., & Elias, A. A. (2024). Understanding role of roots in plant response to drought: Way forward to climate-resilient crops. *The Plant Genome*, 17(1), e20395.
- Kang, J., Peng, Y., & Xu, W. (2022). Crop root responses to drought stress: Molecular mechanisms, nutrient regulations, and interactions with microorganisms in the rhizosphere. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9310. <https://doi.org/10.3390/ijms23169310>
- Kebede, A., Kang, M. S., & Bekele, E. (2019). Advances in mechanisms of drought tolerance in crops, with emphasis on barley. *Advances in Agronomy*, 156, 265-314.
- Kusaka, M., Lalusin, A. G., & Fujimura, T. (2005). The maintenance of growth and turgor in pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] Leeke) cultivars with different root structures and osmo-regulation under drought stress. *Plant Science*, 168(1), 1-14.
- Lata, C., Muthamilarasan, M., & Prasad, M. (2015). Drought stress responses and signal transduction in plants. *Elucidation of Abiotic Stress Signaling in Plants: Functional Genomics Perspectives*, 2, 195-225.
- Lawlor, D. W., & Tezara, W. (2009). Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*, 103(4), 561-579.

- Lawlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 275-294.
- Lawson, T., & Vialet-Chabrand, S. (2019). Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytologist*, 221(1), 93-98.
- Lee, S. B., & Suh, M. C. (2015). Advances in the understanding of cuticular waxes in *Arabidopsis thaliana* and crop species. *Plant Cell Reports*, 34, 557-572.
- Liu, X., Yue, Y., Li, B., Nie, Y., Li, W., Wu, W. H., & Ma, L. (2007). AG protein-coupled receptor is a plasma membrane receptor for the plant hormone abscisic acid. *Science*, 315(5819), 1712-1716.
- Liu, J., Guo, Y. Y., Bai, Y. W., Camberato, J. J., Xue, J. Q., & Zhang, R. H. (2018). Effects of drought stress on the photosynthesis in maize. *Russian Journal of Plant Physiology*, 65, 849-856.
- Locke, A. M., & Ort, D. R. (2014). Leaf hydraulic conductance declines in coordination with photosynthesis, transpiration and leaf water status as soybean leaves age regardless of soil moisture. *Journal of Experimental Botany*, 65(22), 6617-6627.
- Lu, S., Su, W., Li, H., & Guo, Z. (2009). Abscisic acid improves drought tolerance of triploid bermudagrass and involves H₂O₂-and NO-induced antioxidant enzyme activities. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(2), 132-138.
- Ma, X., Zhou, G., Li, G., & Wang, Q. (2021). Quantitative evaluation of the trade-off growth strategies of maize leaves under different drought severities. *Water*, 13(13), 1852.
- Medrano, H., Escalona, J. M., Bota, J., Gulías, J., & Flexas, J. (2002). Regulation of photosynthesis of C₃ plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 89(7), 895-905.
- Marechaux, I., Bartlett, M. K., Sack, L., Baraloto, C., Engel, J., Joetzjer, E., & Chave, J. (2015). Drought tolerance as predicted by leaf water potential at turgor loss point varies strongly across species within an Amazonian forest. *Functional Ecology*, 29(10), 1268-1277.
- Martínez-Vilalta, J., & García-Fórner, N. (2017). Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant, Cell & Environment*, 40(6), 962-976.

- Manivannan, P., Jaleel, C. A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2008). Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Comptes Rendus. Biologies*, 331(6), 418-425.
- Mitchell, P. J., O'Grady, A. P., Tissue, D. T., White, D. A., Ottenschlaeger, M. L., & Pinkard, E. A. (2013). Drought response strategies define the relative contributions of hydraulic dysfunction and carbohydrate depletion during tree mortality. *New Phytologist*, 197(3), 862-872.
- Muir, C. D. (2018). Light and growth form interact to shape stomatal ratio among British angiosperms. *New Phytologist*, 218(1), 242-252.
- Munemasa, S., Hauser, F., Park, J., Waadt, R., Brandt, B., & Schroeder, J. I. (2015). Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture. *Current Opinion in Plant Biology*, 28, 154-162.
- Ning, P., Wang, J., Zhou, Y., Gao, L., Wang, J., & Gong, C. (2016). Adaptional evolution of trichome in *Caragana korshinskii* to natural drought stress on the Loess Plateau, China. *Ecology and Evolution*, 6(11), 3786-3795.
- Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2021). Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1321-1335.
- Pallardy, S. G. (2008). *Transpiration and Plant Water Balance*, Editor(s): Stephen G. Pallardy, *Physiology of Woody Plants* (Third Edition), Academic Press, Pages 325-366, ISBN 9780120887651
- Parry, M. A., Andralojc, P. J., Khan, S., Lea, P. J., & Keys, A. J. (2002). Rubisco activity: effects of drought stress. *Annals of Botany*, 89(7), 833-839.
- Patmi, Y. S., & Pitoyo, A. (2020). Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng cultivar mutant rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1436, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Paul, M. J., & Pellny, T. K. (2003). Carbon metabolite feedback regulation of leaf photosynthesis and development. *Journal of Experimental Botany*, 54(382), 539-547.
- Petrizzellis, F., Savi, T., Bacaro, G., & Nardini, A. (2019). A simplified framework for fast and reliable measurement of leaf turgor loss point. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 395-399.

- Prasil, O., Kolber, Z., Berry, J.A. 1996. Falkowski, P.G. Cyclic electron flow around Photosystem II *in vivo*. Photosynth. Res. 48, 395–410.
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of Drought on Photosynthesis in Major Food Crops and the Related Mechanisms of Plant Responses to Drought. *Plants*, 13(13), 1808.
- Rauf, S., Al-Khayri, J. M., Zaharieva, M., Monneveux, P., & Khalil, F. (2016). Breeding strategies to enhance drought tolerance in crops. *Advances in plant breeding strategies: agronomic, abiotic and biotic stress traits*, 397-445.
- Richardson, F., Brodribb, T. J., & Jordan, G. J. (2017). Amphistomatic leaf surfaces independently regulate gas exchange in response to variations in evaporative demand. *Tree Physiology*, 37(7), 869-878.
- Rolando, J. L., Ramírez, D. A., Yactayo, W., Monneveux, P., & Quiroz, R. (2015). Leaf greenness as a drought tolerance related trait in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 110, 27-35.
- Schreuder, M. D., Brewer, C. A., & Heine, C. (2001). Modelled influences of non-exchanging trichomes on leaf boundary layers and gas exchange. *Journal of Theoretical Biology*, 210(1), 23-32.
- Seelig, H. D., Wolter, A., & Schröder, F. G. (2015). Leaf thickness and turgor pressure in bean during plant desiccation. *Scientia Horticulturae*, 184, 55-62.
- Sharkey, T. D., Bernacchi, C. J., Farquhar, G. D., & Singsaas, E. L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant, Cell & Environment*, 30(9), 1035-1040.
- Sharma, P., Zheng, B. 2012. Reactive oxygen species generation and signaling in plants. *Plant Signal. Behav*, 7:1621–1633.
- Tardieu, F., Simonneau, T., & Muller, B. (2018). The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach. *Annual Review of Plant Biology*, 69, 733-759.
- Timmerman, C. (2015). Osmoregulation in response to drought stress (Doctoral dissertation).
- Velikova, V., Arena, C., Izzo, L. G., Tsonev, T., Koleva, D., Tattini, M., ... & Loreto, F. (2020). Functional and structural leaf plasticity determine photosynthetic performances during drought stress and recovery in two *Platanus orientalis* populations from contrasting habitats. *International Journal of Molecular*

Sciences, 21(11), 3912.

- Venkatesh, K., Senthilkumar, K. M., Mamrutha, H. M., Singh, G., & Singh, G. P. (2022). High-temperature stress in wheat under climate change scenario, effects and mitigation strategies. In *Climate Change and Crop Stress* (pp. 209-229). Academic Press.
- Wilkinson, S., & Davies, W. J. (2010). Drought, ozone, ABA and ethylene: new insights from cell to plant to community. *Plant, Cell & Environment*, 33(4), 510-525.
- Wu, Y., Fang, W., Peng, W., Jiang, M., Chen, G., & Xiong, F. (2021). Sucrose transporter in rice. *Plant Signaling & Behavior*, 16(11), 1952373.
- Xu, Q., Liu, X., Zhang, C., Du, W., Guan, Y., & Yang, W. (2022). Insights into soybean with high photosynthetic efficiency. In *Advances in Botanical Research* (Vol. 102, pp. 121-151). Academic Press.
- Xu, Z., & Zhou, G. (2008). Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass. *Journal of Experimental Botany*, 59(12), 3317-3325.
- Xue, D., Zhang, X., Lu, X., Chen, G., & Chen, Z. H. (2017). Molecular and evolutionary mechanisms of cuticular wax for plant drought tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 8, 258957.
- Yadav, R. K., Sangwan, R. S., Sabir, F., Srivastava, A. K., & Sangwan, N. S. (2014). Effect of prolonged water stress on specialized secondary metabolites, peltate glandular trichomes, and pathway gene expression in *Artemisia annua* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 74, 70-83.
- Yang, C., Li, D., Liu, X., Ji, C., Hao, L., Zhao, X., ... & Zhu, L. (2014). OsMYB103L, an R2R3-MYB transcription factor, influences leaf rolling and mechanical strength in rice (*Oryza sativa* L.). *BMC Plant Biology*, 14, 1-15.
- Yavas, I., Jamal, M. A., Ul Din, K., Ali, S., Hussain, S., & Farooq, M. (2024). Drought-induced changes in leaf morphology and anatomy: Overview, implications and perspectives. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(2).
- Zhang, H., Liu, P., Wang, B., & Yuan, F. (2021). The roles of trichome development genes in stress resistance. *Plant Growth Regulation*, 95(2), 137-148.
- Zhou, H., Zhou, G., He, Q., Zhou, L., Ji, Y., & Zhou, M. (2020). Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes.

Environmental and Experimental Botany, 171, 103932.

Zivcak, M., Brestic, M., & Sytar, O. (2016). Osmotic adjustment and plant adaptation to drought stress. Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 1: Physiology and Biochemistry, 105-143.

BÖLÜM 8

KURAKLIKTA BİTKİLERDE YUTAK İLE FLOEM MORFOLOJİSİ FİZYOLOJİSİ VE BİYOKİMYASI

Doç. Dr. İlkay YAVAŞ¹, Doç. Dr. Yelda EMEK ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759266>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. iyavas@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6863-9631

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Aydın, Türkiye. yelda@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1095-3908

GİRİŞ

Ekilebilir arazi ekosistemleri en önemli karasal sistemler arasında yer almaktadır ve dünyadaki arazi alanının %37'sini kaplarlar. Ekilebilir arazi ekosistemi, sulak alan ekosistemi ve orman ekosistemiyle birlikte üç büyük karasal ekosistemden biridir. Yoğun tarımda üretim, sentetik gübrelerin, özellikle de azotlu gübrelerin yaygın kullanımı söz konusudur. Gübreleme bitki büyümesi için bitkisel ortamı iyileştirir ve biyokütleyi artırır, topraktaki mikroorganizmaların popülasyonunu, miktarını ve aktivitesini etkiler. Sulama, toprağın ve bitkinin su durumunu etkiler, uygun toprak nemi kök solunumunu ve mikrobiyal aktiviteleri artırır (Liu ve ark., 2022).

Bitkiler, büyümelerini dış ve iç sinyallere göre ayarlamak için çok sayıda strateji geliştirmiştir ki birbirine bağlı metabolik ve fitohormonal sinyal ağları, değişen çevre ve gelişim koşullarına uyum sağlamaya olanak tanır ve türlerin değişken ortamlarda hayatta kalmasını sağlar. Tarımsal ekosistemlerde bu adaptif tepkilerin çoğu gerekli değildir ve hatta bitkilerin tam potansiyellerini gerçekleştirmelerini engellediğinden ürün verimini sınırlayabilir. Kaynak ve yutak faaliyetlerini maksimuma çıkararak, önemli verim artışları sağlanabilir ve bu durum verim açığını potansiyel olarak kapatabilir. Bunu yapmak için metabolik ve gelişimsel süreçler arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılması gereklidir. Geçmişte bu süreçler birbirinden bağımsız olarak ele alınıyordu ancak kaynak-yutak ilişkilerini anlamak ve dolayısıyla bitki verimini optimize etmek için birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Ferne ve ark., 2020).

Küresel ölçekte büyük alanlar kaplayan yarı kurak ekosistemlere ise çoğunlukla çayırlar, çalılıklar ve savanlar hakimdir. Yarı kurak ekosistemlerin suyun sınırlı olduğu ortamlarda bulunması, onları özellikle kuralığa karşı hassas hale getirmektedir (Ma ve ark., 2016a).

KURAKLIKTA ÇİÇEKLENME

Çiçeklenmenin optimal zamanlaması ve çiçeklenme süreci bitki veriminin belirlenmesinde önemli olan özelliklerdir ve bunlar kök bölgesindeki su sınırlamasına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Detaylı morfolojik analizler göstermektedir ki, hem erkek hem de dişi üreme organlarının gelişimi kuraklıktan etkilenmekte, bunun sonucunda yumurtalıklar dökülmekte, çiçekler açılmamakta, anormal anter gelişimi ve filamentlerin ve stigmatik papilla hücrelerinin uzamasının gecikmesi olabilmektedir (Ma ve ark., 2014). İyi sulanmış ve şiddetli kuraklık koşulları altında bitkilerde çiçeklenme transkriptomlarının incelenmesi, şiddetli kuraklık sırasında çiçek transkriptomunun çarpıcı bir şekilde yeniden programlandığını göstermektedir (Jin ve ark., 2013).

Çeşitli çalışmalar, mayoz bölünme aşamasında su eksikliği nedeniyle geçici olarak strese giren buğday bitkisinde histolojik ve fizyolojik değişiklikleri ortaya çıkarmıştır. Erkek gametofitler bozulduğunda dahi dişi gametofit verimli kalabilmektedir. Polen gelişimi kuraklık stresine karşı daha savunmasızdır. Bu nedenle kurak koşullarda erkek gamet gelişimi dişi gamet gelişimine göre daha fazla ilgi görmüştür. Mayotik aşamada kısa bir süre orta derecede su stresine maruz kalan toprakta yetiştirilen çeltik bitkileri kromozom

anormallikleri sergilemektedir. Su stresi, mayoz aşamasının yanı sıra, çiçek gelişiminin erken veya geç aşamasında da dane üretimini etkilemektedir (Nguyen ve ark., 2010).

Kuraklığa dayanıklı mısır hibriti ile kuraklığa duyarlı mısır hibritinin kullanıldığı bir çalışmada optimal koşullarda, dane dolumun döneminde ve çiçek optimallenmede su eksikliğine maruz bırakılan bitkileri değerlendirildiğinde (Şekil 1) kuraklığa dayanıklı hibritin verimi optimal, dane doldurma ve çiçeklenme dönemi su stresi uygulamaları için sırasıyla 1930, 1120 ve 1070 g/m² olduğu bulunmuştur Kuraklığa duyarlı hibritin verimi optimal, dane doldurma ve çiçeklenme dönemi stresi uygulamaları için sırasıyla 1810, 980 ve 120 g/m² olmuştur (Messina ve ark., 2022).



Şekil 1. Kuraklığa dayanıklı (a,c,e) mısır hibriti ile kuraklığa duyarlı (b,d,f) mısır hibriti karşılaştırması: (a,b) optimal koşullarda; (c,d) dane dolumun döneminde uygulanan su eksikliğiyle yetiştirilen;(e,f) çiçeklenmede su stresi uygulaması altında.

Kaynak: (Messina ve ark., 2022)

Karbonhidrat metabolizması ve şeker taşınması polen gelişimi için kritiktir. Anormal polen danelerinde nişasta birikiminin olmaması yaygın bir özelliktir. Yetersiz nişasta sentezi ve durdurulan polen gelişimi, azalmış invertaz aktivitesi ve/veya mayotik aşamadaki su eksikliğinin neden olduğu anter karbonhidrat metabolizmasındaki değişikliklerle ilişkilendirilmiştir (Zhang ve ark., 2010b). Fotosentetik olmayan bir erkek üreme organı olarak anter, polen gelişimini ve olgunlaşmasını desteklemek için esas olarak kaynak organlardan fotosentetik asimilatlar tedarik eder. Polen gelişiminin erken aşamaları, anterdeki aktif büyüme ve yüksek metabolik aktivite ile karakterize edilir. Böylece, gelişen çiçekte anterleri ve erken gelişmeyi desteklemek için büyük miktarlarda şeker anterlere doğru harekete geçirilir. Geç aşamalarda polen olgunlaşması, çimlenme için bir enerji rezervi işlevi gören ve dolayısıyla polen olgunluğunun bir belirtisi olarak hizmet eden nişasta birikimini gerektirir. Anterdeki şeker boşaltma ve metabolizmadaki bozukluklar polen gelişimini önemli ölçüde bozabilir ve erkek kısırlığına neden olabilir (Oliver ve ark., 2007).

Yumurtanın strese duyarlılığı çiçeklenme sırasında ve dane dolumunun erken aşamalarında ortaya çıkar. Olgunlaşma ve dehidrasyon üzerine polenler anterlerden düzenli bir şekilde atılır (anter açılması). Polen daha sonra uyumlu bir dişi organın tepesiğine gelmekte, yumurtalığa ulaşana kadar stilus boyunca polen tüpü oluşturmaktadır. Anter ve polen danesi fonksiyonlarına ek olarak, pistil-polen etkileşimlerini içeren pistil (stigma, stil, yumurtalık) gelişimi ve fonksiyonları ile embriyo gelişimi ve tohum dolumu da

abiyotik streslere karşı oldukça hassastır. Ancak son derece koordineli bu aşamaların tümü tamamlandıktan sonra olgun bir tohum oluşabilir. İşlevsel tohumların (tahıllar ve baklagiller söz konusu olduğunda verim) oluşumuyla sonuçlanan süreçlerin çoğu ısıya, su eksikliğine ve/veya ısı ve suya karşı oldukça duyarlıdır. Ayrıca, bazı bitkiler kendi kendine tozlaşabildiğinden (tozlaşma açılmamış çiçek tomurcuklarında meydana gelir) ve/veya tozlaşma için böcek veya rüzgar vektörlerine ihtiyaç duyduğundan (çapraz tozlaşma), farklı çevresel koşullar ve stresler (örneğin kuraklık, sıcak hava dalgaları veya değişen böcek popülasyonlarıyla birleştiğinde) farklı bitkileri farklı şekilde etkileyebilir (Sinha ve ark., 2021).

FLOEMDE TAŞINIM VE KURAKLIK

Karbon fiksasyonu yapraklarda (kaynak) meydana gelmekte ve biyokimyasal olarak fotosentez tarafından yönlendirilmektedir. Esas olarak sukroz formundaki sabit karbon, mezofil hücrelerinden floeme doğru hareket etmekte ve burada uzun damarlar boyunca yutak dokularına taşınmaktadır. Gün boyunca yaprak taşıma kapasitesini aşan miktardaki asimile edilen karbonhidratlar geçici olarak kloroplastlarda nişasta olarak ve kofulda sakkaroz olarak depolanır ve daha sonra gece boyunca sürekli olarak hedef dokularına doğru harekete geçirilir. Yapraklarda (kaynak) asimile edilmiş karbon, tamamen simplastik (sitoplazmik) bir yolla floem içine hareket etmekte veya floem arkadaş hücrelerine ve/veya kalbur içine aktarılmadan önce ilk olarak floemi çevreleyen apoplasta (hücre duvarı alanı) gönderilmektedir (Bihmidine ve ark., 2013).

Tüm yüksek yapılı bitkiler, bitki organlarını birbirine bağlayan çok gelişmiş bir damar ağına sahiptir. Bu ağ hem organik hem de inorganik maddelerin aktarımı için gereklidir. Bu damar ağı ayrıca organların fonksiyonlarını koordine eden bir sinyal ağıdır. Ksilem, suyun köklerden alınması ve gövdeye aktarılmasının yanı sıra topraktan emilen mineral iyonları ve köklerde sentezlenen çeşitli organik bileşiklerden de sorumludur. Floem ise, karbondhidratların uygun yapraklardaki sentez yerlerinden kullanım (büyüme ve solunum) ve depolama bölgelerine ve ayrıca yapraktan diğer kısımlara aktarılması ve mineral iyonların geri dönüşümü için ana yoldur. Genellikle bu iki akış arasında bir etkileşim vardır (Minchin ve Lacoite, 2005).

Floem yüklemesinin pasif olmadığının farkına varılmasından, ilgili protein taşıyıcılarının tanımlanmasına kadar, floem taşınmasında yer alan süreçlerin anlaşılmasında önemli ilerlemeler olmuştur (Lalonde ve ark., 2003). Moleküler biyoloji teknikleri, hücre zarlarındaki şeker, su ve iyon taşıyıcıları hakkında ayrıntılı bir bilgi patlamasına yol açmıştır. Floem yüklemesinin artık karbondhidrat sentezi bölgesi ile uzun mesafeli taşımada yer alan kalbur boruları arasında apoplastik veya simplastik bir adımı veya bunların bir kombinasyonunu içerdiği anlaşılmaktadır. Apoplastik yükleme, yaprak parankiminden vasküler doku yakınındaki apoplastik boşluğa karbondhidratın, genellikle de sakkarozun akışını içerir. Buradan hücre zarı boyunca aktif olarak kalburlu-tüp arkadaş-hücre kompleksine alınır. Simplastik yükleme ile parankim dokusundan kalburlu-tüp arkadaş-hücre kompleksine karbondhidrat akışı, difüzyonla yönlendirilen bir membranın geçişini gerektirmeden tamamen

plazmodezmata yoluyla gerçekleşmektedir (Minchin ve Lacointe, 2005).

Floem taşınmasının durdurulması, bitki ölümlerinin ilerleyişini anlamanın çözümü olabilir çünkü floem taşıma başarısızlığı, karbonhidrat rezervlerinin açlık çeken dokulara yeniden dağıtılmasını engelleyerek karbon açlığını teşvik edebilir (Sala ve ark., 2010). Günümüze dek mevcut floem taşıma çalışmalarının çoğunluğu iyi sulanan koşullar altında yürütülmüştür ve kuraklık denemelerinin çoğunluğu ksilemin kavitasyona, stoma kontrolüne ve dokuya karşı hassasiyeti üzerine odaklanmıştır. Bu nedenle kuraklığın floem taşınımını nasıl etkilediğine dair ampirik kanıtlar çok sınırlıdır ve çoğunlukla dolaylıdır. Klasik görüş olarak, floem taşınmasına ilişkin şu anda en çok kabul edilen teori Münch hipotezi'dir (Münch, 1930; Knoblauch ve Peters, 2010). Buna göre floem taşıma sistemi üç bölümden oluşur: kaynak, taşıma yolu ve hedef (yutak). Ozmotik olarak kanallara çekilen su, floem taşınması ile su durumu açısından yakın bir ilişki bulunduran ksilemden kaynaklanır. Ksilem su gerilimi ne kadar yüksek olursa (bitki ne kadar kuru olursa), suyu ksilemden floeme çekmek için gereken ozmotik potansiyel de o kadar yüksek olur. Bu nedenle kuru koşullarda floem taşınmasını sürdürmek güçlü bir kaynak gerektirmektedir (Sevanto, 2014).

KURAKLIKTA KAYNAK-YUTAK İLİŞKİSİ

Bitkiler fotosentez sırasında kloroplastlarda karbondioksiti özümser. Asimile edilmiş karbon daha sonra bitki bünyesinde dağıtılır. Genel olarak, iki tür organ ayırt edilebilir; olgun yeşil yapraklar ve

depolama organları (kökler, çiçekler, küçük yapraklar ve yumrular). Bu organlar içerisinde, ilgili işlevlerine göre farklı doku tipleri gelişmiştir ve her iki doku tipinin hücreleri de bölümlendirilmiştir. Fotoasimilatlar, tüm organlarda bu dokuların farklı bölümlerine gönderilmekte ve bu bölümler arası transfere aracılık eden bir dizi metabolit taşıyıcı gerekmektedir. Fotoasimilatların genel rotası kısaca şöyle açıklanabilir: Mezofil hücrelerinin kloroplastlarında karbondioksitin sabitlenmesi üzerine, trioz fosfatlar ya esas olarak sakaroz oluşumu için sitozole girerler ya da gece boyunca parçalanan ve daha sonra metabolize edilmek üzere maltoz veya glikoz olarak sitozole giren geçici olarak depolanmış nişastayı oluşturmak için kloroplastların stromasında kalırlar. Her iki durumda da, sukroz uzun mesafeli taşıma için floeme girer veya kofulda geçici olarak depolanır veya kofulda da depolanabilen heksozlara indirgenebilir. Bitki türlerinin çoğunda sükroz, apoplast yoluyla floeme aktif olarak yüklenir. Uzun mesafeli taşımanın ardından, karbon ve enerji kaynağı olarak hücrelere girdiği yutak organlarına salınır. Depolama organlarında sakkaroz depolanabilir veya sakkarozdan türetilen karbon, plastidlerde nişasta olarak veya yağ gövdelerinde yağ olarak veya - azotla kombinasyon halinde - protein depolama boşluklarında ve protein gövdelerinde protein olarak depolanabilir (Ludewig ve Flügge, 2013).

Bitki verimi, sulama, gübreleme ve haşere kontrolü gibi tarımsal uygulamalardan ve aynı zamanda bitkilerin ışığı yakalama, enerjisini karbonu asimile etmek için kullanma ve bu karbonu diğer organlara tahsis etme kapasitesinden etkilenmektedir. Uygun olmayan tarımsal uygulamalar, karbon asimilasyonu fizyolojisi gereği, bitki verimliliği

çoğu zaman maksimum potansiyeline ulaşmaktan uzaktır. Yeni gelişen yapraklar, kendi büyümeleri için yeterli besin maddesini özümseyemedikleri için karbon yutakları olarak başlarlar, ancak geliştikçe, büyüyen diğer bitki organlarına aktarılan fazla karbonu özümseyerek karbon kaynağı haline gelirler. Gelişmenin ilerleyen aşamalarında veya besin eksikliği koşullarında, yapraklar yaşlanmaya başlayabilir ve yalnızca kaynak olarak hareket ederek şekerleri ve diğer besin maddelerini bitkinin kalan organlarına aktarabilir (Rodrigues ve ark., 2019).

Fotosentezdeki PSII'nin kuantum etkinliği genellikle şiddetli kuraklık nedeniyle azalmaktadır. Kuraklık stresi aynı zamanda Ribulaz-1,5-bisfosfat karboksilaz-oksijenaz (Rubisco), fruktoz-1,6-bisfosfataz (FBP), Benson-1,5-bisfosfataz-oksijenaz gibi fotosentetik Calvin döngüsü enzimlerinin faaliyetlerinde önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Bir bitki büyüme regülatörü olan melatonin, tohum çimlenmesi, köklenme, bitkisel büyümenin desteklenmesi ve çiçeklenme gibi bitki büyümesi ve gelişiminin düzenlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bununla birlikte, melatonin çeşitli abiyotik streslere karşı toleransı da arttırmaktadır. Çeşitli çalışmalar melatoninin kuraklık stresinin azaltılmasındaki yararlı rolünü fotosentezi teşvik etmesine, hücrel redoks homeostazisinin iyileştirilmesine ve antioksidan aktivitenin artırılmasına bağlamaktadır (Liang ve ark., 2019).

Kuraklığın terleme, dokuların boyutu, floem yüklemesi, asimilat translokasyonu, kuru madde sevki, tozlaşma ve tohum oluşumu üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle besinlerin alınımı, translokasyonu ve metabolizması azalmaktadır. Su eksikliği, özellikle

yüksek ışık yoğunluğu altında veya diğer streslerle birlikte, fotosentezi bozmakta ve fotorespirasyonu artırmakta ve hücrelerin normal iç dengesini değiştirmektedir (Miller ve ark., 2010).

Kaynak-yutak (source-sink) ilişkisi, mahsullerdeki kuru madde birikimini belirleyen önemli bir fizyolojik süreçtir. Kaynak, fotosentez kapasitesini ifade eder. Yutak, fotosentezin ürünlerinin depolanma veya kullanılma kapasitesinin gösteresidir. Örneğin buğday bitkisi için: yaprak, gövde ve kının dahil olduğu fotosentetik kısımlar kaynaktır. Yutak ise ikiye ayrılarak üretilen yeni dokuları ve daneleri ifade eder. Buğdayda çiçeklenme döneminden sonra dane verimi sadece kaynak sınırlamalarından değil, aynı zamanda yutak sınırlamalarından ve bunların kombinasyonlarından da etkilenir. Tahılların asimilatları biriktirme kapasitesi, verim potansiyelini belirlemede asimilat tedarikinden (kaynağın kuvveti) daha önemlidir. Fotosentatların üretimi, sevki (translokasyonu), dağıtılması ve depolanması, kaynak/yutak ilişkisiyle ilgili karmaşık fizyolojik süreçlerdir. Kuraklık stresi ise, fotoasimilatların birikimini ve taşınmasını bozar-değiştirir ve bu durum buğday genotipleri arasında farklılık gösterir (Gui ve ark., 2024). Tahıllarda dane verimi için bitkide kaynak/yutak ilişkisi incelenince ana sapta üstteki iki yaprak birincil kaynaktır ve çiçekler fotosentez için birincil yutaktır (Peleg ve ark., 2011).

Kuraklık stresi farklı ürün çeşitlerinin depolama yeteneğini farklı derecelerde azaltabilir ve sonuçta verimin azalmasıyla sonuçlanabilir (Amini ve ark., 2023). Kuraklık, bitkinin fotosentetik kaynak dokularında erken yaşlanmayı tetikleyerek ve asimilatların bunlar arasında taşınmasını ve kullanımını etkileyerek hasat edilebilir yutak

organlarının sayısını ve büyümesini azaltarak, sonuçta verim düşüşüne sebep olabilmektedir. Kaynak-yutak (source-sink) ilişkilerinde stresin neden olduğu değişiklikler aynı zamanda bitkinin hayatta kalmasından verim stabilitesine kadar ürün verimliliğini etkileyen, fotoasimilatların yeniden tahsisindeki adaptif değişiklikleri de içerir. Bitkinin hayatta kalması su durumunun korunmasını, yaprak yaşlanmasının geciktirilmesini (dolayısıyla kaynak aktivitesinin sürdürülmesini), generatif organlardaki yutak aktivitesinin korunmasını veya artırılmasını, asimilatların kaynak yapraklardan taşınmasını gerektirir. Olumsuz koşullar altında bitki verimliliğinin sürdürülmesi, hem kaynak dokulardaki asimile üretiminin hem de yutak ve hasat edilebilir dokulara taşınmasının ve buralarda kullanılmasının sürdürülmesini zorunlu olarak gerektirir (Albacete ve ark., 2014).

Kuraklık stresıyla verim azalması, gereken asimilat tedarikinin sürdürememesinden dolayı, yutak organların sayısı ve boyutunda azalmaya bağlıdır. Bitki ölümü nedeniyle verim kaybı ise sadece şiddetli stres durumlarında yaşanır. Stres altında verim stabilitesi, fizyolojik ve morfolojik açıdan dinamik bir optimizasyon gerektirir. İdeal olarak, bu optimizasyon son derece esnek olmalı ve şiddetli stres koşulları altında bitkinin hayatta kalmasından (çoğunlukla büyüme olmadan kaynak aktivitesini koruyarak), verim stabilitesine kadar stresin ciddiyeti ile bağlantılı olmalıdır (Albacete ve ark., 2008).

Büyüme genellikle çevresel strese karşı en hassas süreç olup, fotosentez veya diğer süreçler kuraklıktan etkilenmeden önce engellenmektedir. Yapısal olmayan karbonhidratlar aynı zamanda turgoru sürdürmek için gerekli ozmotik koruyucuları sağladıkları için

bitkinin su dengesinin de önemli düzenleyicileridir (Sapes ve ark., 2021). Yapısal olmayan karbonhidratlar gelecekteki streslere veya rahatsızlıklara karşı dayanıklılık sağlayan bir sigorta gibi hareket eder. Bunula birlikte, yapısal olmayan karbonhidratlar kuraklık sonrasında toparlanma için yapı taşlarını sağlar ve belirsizlik durumunda riskten korunma stratejisi olarak büyüme ve diğer süreçler yerine karbon tahsisi sağlar (Galiano ve ark. 2017). Örneğin ağaçlarda orantısız miktardaki kaynağın yapısal olmayan karbonhidrat depolamasına neden ayrıldığı sorusunun cevabı, tam olarak optimize edilmemiş bir sürecin kalan yan ürünü olabileceğidir (Resco de Dios ve Gessler, 2021).

Kaynak ve yutak ilişkileri çevresel değişikliklere karşı oldukça hassas olup, özellikle kurak koşullara hassastır. Su stresi altında, farklı fizyolojik süreçler ve yutak organları arasındaki karbon rekabeti, bitki büyümesini ve ürün verimini derinden etkiler. Bitki veriminin azalmasına, ilk olarak büyümenin ve asimilat tüketen yutak organların sayısının ve ardından fotosentetik olarak aktif kaynak dokulardaki asimilat üretiminin azalması neden olmaktadır. İnvertazlar, sükrozun glikozidik bağının bölünmesini katalize eden yutak organlara enerji sağlanmasında anahtar enzimlerdir ve biyotik ve abiyotik stres tepkilerinde, özellikle hücre duvarı invertazında önemli roller oynadığı bulunmuştur. Su stresi altında karbonhidrat birikimindeki farklılıklar şeker profillerindeki, invertaz genlerinin ekspresyonundaki ve fruktan biyosentezi seviyelerindeki farklılıklarla ilişkilidir. Sükroz metabolizmasının hormonal düzenlenmesi, bitki fizyolojisi ve verimi üzerindeki pratik sonuçlarından dolayı şu anda çok fazla ilgi çekmektedir (Romero-Munoz ve ark., 2022). Bu bağlamda, birçok

çalışma, bitki büyümesinin, yutak kuvvetinin ve fotoasimilat paylaşımının düzenlenmesinde hormonal kontrolü ortaya koymuştur. Yutak ile ilgili süreçlerde bitki hormonları ile bunların invertaz gen ekspresyonu üzerindeki etkileri arasında doğrudan bir etkileşim mevcuttur (Yu ve ark., 2015).

Çeltik ve buğday üzerinde yapılan çalışmalar, ABA biyosentezinin ve sinyal düzenleyicilerinin aşırı ekspresyonunun kaynak ve yutak kapasitesini arttırdığını, dolayısıyla fotosentetik etkinliği koruduğunu, verimi ve kuraklık toleransını iyileştirdiğini belirtmiştir (Rodrigues ve ark., 2019).

Bir organ aynı zamanda belirli bir besin maddesinin kaynağı olabileceği gibi, başka bir besin maddesinin de yutağı olabilir. Bu, aynı zamanda hem karbon kaynağı hem de köklerden alınan inorganik azotu yutan, tamamen gelişmiş yapraklar için söz konusu olabilir (Chang ve Zhu, 2017). Besinlerin ihtiyaç duyulan organlara ulaşmasını sağlamak için kaynak-yutak taşımacılığının sıkı bir şekilde düzenlenmesi gerekir. Artan yutak talebi kaynak organlarda fotosentezi teşvik ederken, azalan yutak gücü ise kaynak organlarda şekerlerin birikmesine neden olarak fotosentezle ilişkili genlerin ve fotosentezin aşağı regülasyonuna yol açar. Bu durum şunu gösterir: yutak organlarından gelen karbon gereksinimlerinin aynı zamanda kaynak yaprakların aktivitesini de etkilediğini göstermektedir. Dolayısıyla, genel olarak kaynak gücü (karbon asimilasyonu ve ihracatı) ile yutak gücü (şeker ithalatı ve kullanımı) arasında yüksek pozitif bir korelasyon vardır (Muller ve ark., 2011).

Kaynak ve yutak mukavemetleri çevresel değişikliklere oldukça duyarlıdır ve özellikle su eksikliği koşullarına karşı hassastır. Hafif su eksikliği durumunda, fotosentez performansı hala korunurken bitki büyümesi zaten ciddi şekilde bozulur. Su eksikliğinin en erken aşamalarında, kökün su alımında bir azalma olur, bu da bitki içindeki su hareketinin bozulmasına, hücre turgor basıncının azalmasına ve sonuç olarak stomaların kapanmasına neden olur. Eş zamanlı olarak absisik asit (ABA) hormonunun endojen seviyeleri de artar ve stomaların daha da kapandığının sinyalini verir. Bu sayede bitkiler yapraklardan daha az su kaybederken aynı zamanda fotosentezde kullanmak için daha az karbon elde ederler. Uzun vadede, asimilasyon için mevcut CO₂'deki azalma, Calvin döngüsünün yavaşlamasına, fotosistem II'nin aşırı yavaşlamasına, ardından hücresel hasara neden olan reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimine yol açar ve sonuç olarak kaynak gücü azalır. Kaynak aktivitesini azaltan bu mekanizmalara rağmen, kaynak gücünün kuraklığa karşı dayanıklı olduğuna dair pek çok kanıt vardır (Bechtold ve ark., 2016).

Örneğin çeltik ve tilki kuyruğu darısında (*Setaria italica* (L.) P.Beauv.), fotosentezle ilgili genler, su eksikliği koşullarında toleranslı çeşitlerde yukarı doğru düzenlenirken, hassas çeşitlerde aşağı doğru düzenlenir. Toleranslı bitkilerde fotosentezle ilgili genlerin bu şekilde düzenlenmesinin, su eksikliği sırasında fotosentez oranında daha düşük bir azalmaya yol açtığı ve bir kuraklık tolerans stratejisi olabileceği düşünülmektedir. Artan fotosentez hızı, fotosentezle ilgili genlerin yukarı regülasyonu ile ilişkilidir; bu, stresin hafifletilmesi durumunda bitkileri hızlı bir şekilde yanıt vermeye hazırlamanın bir yolu olabilir.

Su eksikliği koşullarında fotosentezle ilişkili genlerin ve proteinlerin ya aşağı ya da yukarı regüle edildiği çok sayıda örnek vardır (Ma ve ark., 2016b; Nelissen ve ark., 2018). Gen ifadesindeki bu değişiklikleri düzenleyen moleküler mekanizmaların hala araştırılması gerekmektedir, ancak su eksikliği seviyesinden, bitki türlerinden, gelişim aşamasından ve kuraklık toleransı seviyesinden etkilenmektedir (Rodrigues ve ark., 2019).

Bitki hücreleri, genellikle bitki hormonlarına ve dış streslere tepki olarak hücreyel bileşenlerin (yani hücre duvarı) ve diğer metabolitlerin üretimi için karbon iskeletleri olarak şekerleri alma yeteneğine sahiptir. Glikoz, enerji için karbonun en önemli formu ve hayvanlarda taşınan form iken, disakkarit sakkaroz, bitkilerde uzun mesafeli taşıma için karbonun ana formudur. Transmembran proteinlerini kodlayan Sükroz Taşıyıcıları (SUT'lar), TIE DYED ve H⁺-ATPase gibi çeşitli genlerin, sükrozun floem yüklenmesi için önemli olduğu gösterilmiştir. Bu genlerdeki mutasyonlar yapraklarda aşırı karbon birikmesine ve büyümenin azalmasına veya gecikmesine neden olur (Slewinski ve ark., 2009).

PROGRAMLANMIŞ HÜCRE ÖLÜMÜ

Programlanmış hücre ölümü (Programmed Cell Death, PCD), çoğu organizmada genetik olarak kontrol edilen temel bir süreçtir. Normal koşullar altında organın gelişimi sırasında ve ayrıca stresli koşullara karşı savunma veya adaptasyon sırasında hücreyel homeostazı korumak için hasarlı veya istenmeyen hücre ve organların seçici olarak ortadan kaldırılmasından sorumludur. Bitkilerde programlanmış hücre

ölümü yolaklarının anlaşılmasına odaklanan çalışmalar önemli ölçüde ilerlemiştir ancak moleküler temeline ilişkin bilgiler hala çok sınırlıdır. Bitkilerdeki programlanmış hücre ölümü, organ gelişimi ve farklılaşmasında görev yapmak üzere gelişimsel olarak kontrol edilir (endojen faktörler) ve ayrıca bitkinin stres koşulları altında hayatta kalmasına yardımcı olmak için çevresel olarak uyarılır (eksojen uyaranlar) (Ebeed ve El-Helely, 2021).

Programlanmış hücre ölümü hayvanlarda, mayalarda ve bitkilerde önemli bir hücre intihar sürecidir. Çok hücreli organizmalarda hücre homeostazisinin korunmasında, doku farklılaşmasında, hasar görmüş veya enfekte olmuş hücrelerin uzaklaştırılmasında ve iklime tepkide önemli bir rol oynamaktadır. Hücre içeriğinin şişmesi, parçalanması ve sızması yoluyla ilerleyen nekrotik ölümün aksine, programlanmış hücre ölümü oldukça düzenlenmiş ve organize bir süreçtir. Hücrenin bu kontrollü parçalanması, hem sitoplazmanın hem de çekirdeğin yoğunlaşmasını, büzülmesini ve parçalanmasını içerir. Bitkilerde gelişimsel ve çevresel kaynaklı iki ana programlanmış hücre ölümü kategorisi bulunmaktadır. Birincisi, bazı doku ve organların gelişiminde önemli rol oynayan, genetik olarak kodlanmış bir süreçtir. Ksilem farklılaşması sırasında trake elementlerinin formülasyonunda rol oynar. Trake elementleri, su ve mineral tuzlarını taşıyan ve damarlı bitkilerde yapısal destek görevi gören uzun hücrelerdir. Bunların oluşumu ikincil duvar sentezinden sonra meydana gelir ve merkezi kofulun çökmesi ve litik enzimlerin salınması ile başlar, bunu hücrel içeriğin bozulması takip eder (Wituszynska ve Karpinski, 2013).

Gelişimsel olarak indüklenen programlanmış hücre ölümünün bir başka örneği, aynı bitki üzerinde her iki cinsiyetin generatif organlarını taşıyan, monoik türlerde (örneğin mısır) tek cinsiyetli çiçeklerin oluşmasıdır. Bu türlerde cinsiyetin belirlenmesi, biseksüel çiçek meristemi içindeki dişi ya da erkek primordia organlarından birinin gelişimsel olarak durdurulmasını içerir. Karmaşık yaprak şekillerinin üretiminde de sıklıkla programlanmış hücre ölümü kullanılır. Hücrelerin bazı kısımlarında ölüm tetiklenme eğilimindedir ve dolayısıyla yaprak üzerinde belirgin delikler oluştururlar (Gunawardena, 2008).

Gelişimsel programlanmış hücre ölümü, iç faktörler tarafından tetiklenir ve belirli bir zamanda ve özellikle bitki dokusunda meydana gelir. Aksine, çevresel kaynaklı programlanmış hücre ölümü, patojen enfeksiyonundan çevresel faktörlere kadar farklı uyaranlar tarafından tetiklenmektedir. Bitki yapraklarının patojenler tarafından enfeksiyonu sırasında, spesifik bir gen-için-gen (avr-R) etkileşimi savunma tepkilerini tetikler. Böyle bir bitki-mikrop etkileşimi üzerine hücre ölümü, aşırı duyarlı tepki (HR) adı verilen bir biçimi alır ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) patlamasını içerir. Aşırı duyarlı tepki, çevredeki sağlıklı hücrelerden açıkça ayrılmış bir lezyonun oluşmasına yol açar ve böylece patojenin bitki dokusu boyunca yayılmasını önler. Programlanmış hücre ölümü, aşırı ışınlama, ozon, ultraviyole radyasyon, sıcak, soğuk, kuraklık veya su baskını gibi abiyotik uyaranlara karşı savunma tepkileriyle ilişkili temel hücresel bir süreçtir. Programlanmış hücre ölümünün mekanizması, aspartik asit kalıntılarından sonra hedef proteinlerini parçalayan kaspazlar adı

verilen bir sistein proteaz ailesine bağlıdır. Kaspazlar hücrede inaktif öncüler (procaspazlar) olarak sentezlenir. Kaspazlar etkinleştirildikten sonra diğer prokaspazları böler ve etkinleştirir, bu da kendi kendini güçlendiren bir kaskadla sonuçlanır. Ayrıca nükleer laminler veya DNA parçalayıcı enzimleri inaktif formda tutan proteinler gibi diğer proteinleri de parçalayabilirler ve DNA'yı kesmek için DNazları serbest bırakabilirler. Yıkıcı proteaz kademesi geri döndürülemez, bu nedenle kaspaz aktivitesinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekir (Wituszynska ve Karpinski, 2013).

Bitkilerdeki programlanmış hücre ölümünün pek çok ayırt edici özelliği, sitoplazma büzülmesi, kromatin yoğunlaşması ve DNA bölünmesi, mitokondriyal şişme, organellerin bozulması ve plazma zarının çökmesi gibi değişimler hayvanlardakine benzerdir. Kloroplastların, ROS gibi savunma sinyal molekülleri, reaktif azot türleri (RNS) ve salisilik asit (SA) ve jasmonik asit (JA) gibi savunma hormonlarının önemli bir kaynağını oluşturmaları nedeniyle hücre ölümü tepkileri sırasında önemli role sahiptirler. Oksidatif patlama, abiyotik ve biyotik uyaranlara karşı en erken ve en yaygın bitki tepkilerinden biridir (Torres ve Dangl, 2005).

Örneğin metil viyolojen (parakuat) gibi kloroplast hedefli, ROS üreten herbisitlerin uygulanması, tipik apoptotik özelliklere sahip hücre ölümünü tetiklemektedir. Olumsuz koşullar altında hücre ölümünün düzenlenmesinde farklı bitki hormonları rol oynamaktadır. Bunlardan en önemlilerinden biri, patojen enfeksiyonu veya çeşitli abiyotik streslerden sonra hücrelerde yoğun olarak üretilen SA'dır. Yüksek konsantrasyonlarda SA, diğer sinyallerle iş birliği içinde hücre ölümü

indükleyicisi olarak işlev görür. Aynı zamanda sentez bölgesinin ötesine de taşınabilir, bir sinyal molekülü olarak görev yapar ve sistemik kazanılmış dirence aracılık eder; bu, bitkiyi başka bir enfeksiyona hazırlayan tüm bitki direnç tepkisidir (Alvarez, 2000).

Başka bir hücre ölümü sinyal molekülü olan nitrik oksidin (NO), patojen enfeksiyonu sırasında SA biyosentezindeki temel adımları düzenlediği de gösterilmiştir. Ek olarak NO'nun hücre ölümünü indüklemeye ROS ve SA ile iş birliği yaptığı kanıtlanmıştır. Stres koşullarında hücre ölümünü düzenleyen diğer fitohormonlar JA, gibberellik asit (GA), absisik asit (ABA) ve etilendir (ET). Etilen aynı zamanda ROS birikiminin devamı için de gereklidir; hücre ölümü sırasında dışarıdan ET sağlanması ROS üretimini artırır ve hücre ölümünün hızla yayılmasına neden olur. JA, yara tepkisindeki rolüyle en iyi bilinen bir bitki sinyal molekülüdür, aynı zamanda çeşitli biyotik ve abiyotik stress koşullarında da üretilir. ROS ve ET'ye bağlı lezyon yayılımının inhibisyonunda rol oynar (Turner ve ark., 2002).

Metil jasmonat (MeJA) gibi JA türevleri de bitki bağışıklık tepkilerinin düzenlenmesinde rol oynar. Strese maruz kalma durumunda MeJA üretilir ve ROS oluşumunun indüksiyonu, mitokondriyal dinamiklerde değişiklikler ve fotosentetik çöküş yoluyla PCD'nin aktivasyonuna neden olur. Başka bir fitohormon olan GA'nın ROS ile iş birliği içinde hücre ölümünü teşvik ettiği kanıtlanmıştır, oysa ABA, GA'nın neden olduğu PCD'yi geciktirir. Bu hormonların bu tür karşıt rolleri, ROS temizleyici enzimlerin ekspresyonu üzerindeki etkileriyle ilgilidir. ABA'nın ayrıca çeltik epidermal hücrelerinde ET ve GA kaynaklı hücre ölümünü geciktirdiği de gösterilmiştir (Steffens ve

Sauter, 2005).

Overmyer ve ark., (2003) oksidatif stresin tetiklediği PCD sırasında şu olaylar dizisini önermişlerdir: Lezyonun başladığı yerde ROS'un etkisi güçlenir. SA ile birlikte artan ROS birikimi hücre ölümüne neden olur. JA sinyali SA ve ET tarafından engellenir. Bu arada, başlangıç bölgesinden gelen ET patlaması çevredeki hücrelere dağılır ve lezyonun yayılmasını teşvik eden ROS üretimini güçlendirir. Bu, programlanmış hücre ölümüne (PCD) karşı dengeleyici tepkileri tetikleyecek sinyaldir. Hücre ölümü, oksidatif hücre ölümü döngüsünün negatif düzenleyicisi olarak görev yapan JA'nın üretimiyle sonuçlanır. JA, SA biyosentezi/sinyallemesinin baskılanması ve ET duyarlılığının zayıflatılması yoluyla lezyonun yayılmasını engeller.

Programlanmış hücre ölümü sırasındaki sinyalleşme esas olarak reaktif oksijen türlerinin düzenlenmesi yoluyla ilerler. ROS, kloroplastlarda, mitokondride ve peroksizomlarda lokalize olan çeşitli yolların yan ürünleri olarak sürekli olarak üretilir. Serbest radikaller olarak oluşabilirler: süperoksit radikali ($O_2^{\cdot-}$), hidroksil radikali ($OH^{\cdot}$), perhidroksil radikali (HO_2), alkoksi radikali (RO) veya radikal olmayan formlarda (singlet oksijen ve hidrojen peroksit). Abiyotik stres faktörlerinin çoğu, bitki dokularında ROS'un aşırı üretimine neden olmaktadır. Yüksek reaktiviteleri nedeniyle ROS, proteinlerin, lipidlerin, karbonhidratların ve nükleik asitlerin zarar görmesine neden olabilir ve sonuçta hücre ölümüne yol açabilir. ROS üretimi aynı zamanda aerobik solunumun kaçınılmaz bir sonucudur. Normal solunum koşullarında ortaya çıkar ancak biyotik ve abiyotik strese yanıt olarak artabilir. Mitokondride üretilen ROS'un programlanmış hücre

ölümü düzenlemesinde önemli olduğu kabul edilmektedir (Lam ve ark., 2001).

ROS tarafından tetiklenen DNA hasarı, replikasyon hatalarına ve genomik kararsızlığa neden olduğundan hücre için özellikle tehlikelidir. Bitki hücreleri kendilerini toksik oksijen ara maddelerine karşı korumak için geniş bir antioksidan sisteme sahiptir. Stres kaynaklı ROS birikimi, hem enzimatik hem de enzimatik olmayan antioksidanlar tarafından dengelenir. Enzimatik ROS temizleyicileri arasında süperoksit dismutazlar (SOD), katalazlar (CAT), askorbat peroksidazlar (APX), glutatyon redüktazlar (GR), monodehidroaskorbat redüktazlar (MDHAR), dehidroaskorbat redüktazlar (DHAR), glutatyon peroksidazlar (GPX) ve glutatyon-S-transferazlar (GST) bulunur. Düşük moleküler, enzimatik olmayan antioksidanlar arasında askorbik asit (AsA), glutatyon (GSH), prolin, α -tokoferol, karotenoidler ve flavonoidler yer alır (Mittler ve ark., 2004).

Metalloenzim SOD, tüm hücre altı bölmelerde her yerde bulunan en etkili enzimatik antioksidandır. Biyotik veya abiyotik stresin tetiklediği oksidatif stres sırasında SOD'ların düzenlenmesi, olumsuz koşulların üstesinden gelinmesinde ve bitkinin hayatta kalmasında kritik bir role sahiptir. Pek çok rapor, farklı SOD'ların aşırı ekspresyonunun, abiyotik strese dayanıklı bitkilerin (örneğin Mn-SOD'un aşırı ekspresyonu) oluşmasına yol açtığını göstermektedir. Redoks homeostazisinin korunmasına katılan enzimlerin yanı sıra bitkiler, antioksidan görevi gören çok sayıda enzimatik olmayan bileşiğe de sahiptir. Askorbik asit (C vitamini) tüm bitki dokularında bulunur ancak özellikle fotosentetik olarak aktif organlarda,

meristemlerde ve bazı meyvelerde yüksek düzeyde bulunur. Prolin, bir başka önemli antioksidan ve programlanmış hücre ölümünün potansiyel inhibitörü olarak kabul edilir. Ozmoprotektan ve protein stabilize edici bir madde olarak görev yaptığı iyi bilinmektedir. Ancak aynı zamanda O_2^- , ve OH^- temizleyicisi ve LPO inhibitörü olduğu da kanıtlanmıştır (Ashraf ve Foolad, 2007).

Artan prolin konsantrasyonu da, çeşitli abiyotik streslere karşı artan tolerans ile ilişkilendirilmiştir. Kuraklık, yüksek tuzluluk, ağır metaller, yüksek ışık, UV radyasyonu, yüksek/düşük sıcaklık veya patojen saldırısı gibi farklı abiyotik ve biyotik stresler, ROS üretimi ve temizleme arasındaki dengeyi bozabilir. Ayrıca ROS, NO ve SA, JA ve ET gibi hormonlar dahil olmak üzere diğer birçok sinyal yolu ile etkileşime girer. Bu tür etkileşimler ve ROS/hormonal denge, hücrenin hayatta kalıp kalmayacağına ya da programlanmış hücre ölümü yoluna mı gireceğini belirler (Overmyer ve ark., 2003). Son olarak, stres sinyallerinin iletimini ve olumsuz çevresel koşullara sistemik alışmayı tetiklediği için haberci molekül olarak ROS'un rolü göz ardı edilemez (Szechynska-Hebda ve ark., 2010).

BİTKİNİN BESLENME DURUMUNUN ETKİSİ

Yaprak stomaları kuraklık stresine karşı özellikle hassastır. Yaprak stoma iletkenliği, yaprak su potansiyelindeki azalmalarla birlikte keskin bir şekilde azalır, bu da fotosentez ve radyasyon kullanım etkinliğini azaltır. Kuraklık bitki büyümesini ve gelişimini ciddi şekilde etkilemektedir. Bu tepkiler kuru madde üretimini ve sonuç olarak dane verimini azaltmaktadır (Dien ve ark., 2017).

Biyokütle üretiminin yapı taşları olan amino asitler ve karbon iskeletlerinin gerekli miktarlarda ve zamanda mevcut olmasını sağlamak için karbon asimilasyonu azot asimilasyonu ile koordine edilir ve ilgili taşıma süreçleri, bu temel kaynakların bulundukları yerlerden taşınmasını sağlar. Metabolit taşınması, yalnızca farklı organellerdeki ve hücreler arasındaki yolların kusursuz koordinasyonunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tüm bitki boyunca enerji tedarikini ve kullanımını da dengeler. Bitki metabolitlerinin taşınması muazzam bir esneklik gösterir. Bitki hücreleri, büyüme, biyokütle üretimi ve savunma için birincil ve ikincil metabolitleri ve bunların yapı taşlarını sentezler. Şekerler ve amino asitler gibi metabolitler, farklı hücresel bölümlerdeki süreçlerin koordinasyonunda merkezi pozisyonları işgal ederler. Ek olarak sükroz ve nitrat gibi metabolitler, mevcut çevresel koşullara göre besin akışlarını optimize etmek için gen ifadesini düzenleyen sinyaller olarak görev yaparlar. Organeller, hücreler, kaynak ve yutak dokular arasındaki metabolit taşınması sadece yol koordinasyonunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kaynak mevcudiyetine ilişkin bilgilerin iletilmesinde tüm bitki iletişimini de kolaylaştırır. Karbon kazanımına yol açan karbon metabolizmasının verimli çalışması, özünde azot ve fosfor başta olmak üzere diğer besin maddelerinin başarılı bir şekilde alınmasına bağlıdır. Tarımın sürdürülebilir olması için, mevcut ve tercihen düşük düzeyde toprak gübrelemesi ile daha fazla verim kazanımının sağlanması çok önemlidir. En çok kullanılan ve dışarıdan tedarik edilen kaynak azottur ve bitkilerin azot kullanım etkinliği (NUE, Nitrogen use efficiency), N alım etkinliğini (NUpE, N uptake efficiency) ve N asimilasyon etkinliğini (NUE, N assimilation efficiency) içeren oldukça karmaşık

bir özelliktir (Griffiths ve ark., 2016).

Hücrel şeker durumu normal büyüme koşullarında korunmakta fakat çeşitli çevresel bozulmalar sırasında olumsuz etkilenmektedir. Kuraklık, karbonun şekerlere fotosentetik olarak sabitlenmesini engelleyen ve hücrel ozmotik potansiyeli düşürerek bunların taşınmasını etkileyen olumsuz çevre koşullarından birisidir. Hücrel şekerin taşınması, şeker taşıyıcıları olarak bilinen spesifik bir dizi protein tarafından kolaylaştırılır. Bu taşıyıcı proteinler, bitki büyümesini ve gelişim sürecini destekleyen çeşitli şekerlerin ve bunların metabolit ara ürünlerinin giriş/çıkışının temel belirleyicisidir. Abiyotik stres ve özellikle kuraklık stresinin aracılık ettiği hasar, hücrel ve hücre altı bölümlerde şeker dağılımının yeniden programlanmasıyla sonuçlanır (Kaur ve ark., 2021).

Kloroplastlar ve mitokondri, karbon, azot ve kükürtün fotosentetik asimilasyonu, yağ asitleri ve ikincil bileşiklerin sentezi veya karbonhidratların mitokondriyal işlenmesi dahil çok çeşitli metabolik süreçleri barındırmaktadır. Aslında, her iki organelin ana görevlerinden birisi, metabolik reaksiyonlar için enerji sağlamak üzere fotofosforilasyon veya oksidatif fosforilasyon yoluyla ATP üretmektir. Her iki organelin iç zarında yer alan çeşitli taşıyıcılar, stroma (kloroplastlar), matriks (mitokondri) ve çevredeki sitozol arasındaki metabolizmanın birbirine bağlanmasına hizmet eder. Kloroplastların iç zarındaki kilit mekanizmalar, esas olarak sükröz biyosentezi için (karbonun günlük geçişi), kloroplastlardan trioz fosfatlar formunda fotosentetik olarak sabitlenmiş karbonu ihraç eden trioz fosfat/fosfat translokatorüdür (TPT, triose phosphate/phosphate translocator)

(Flügge ve ark., 2011). Trioz fosfat/fosfat translokatorü, glukoz ve maltoz taşıyıcıları, plastidler ve sitozol arasındaki karbon transferinin önemli araçlarıdır (Griffiths ve ark., 2016).

KANOPİDE BİYOKÜTLE BİRİKİMİ VE HASAT İNDEKSİ

Bitkilerde depolama organları fotosentez sonucu elde edilen karbonhidratları biriktiren yapılardır. Bunlar meyveleri, tohumları, kökleri ve/veya gövdeleri içermektedir. Depolama organı olarak görev yapan bir gövde örneği, büyük miktarlarda nişasta depolayabilen metamorfoze olmuş patates yumrusudur. Diğer örnekler tatlı sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ve şeker kamışı gibi otsu bitkilerdir. Olgunlaşan şeker kamışı saplarında, sükroz taşınması, floemden parankima hücrelerine geçerken ağırlıklı olarak simplastik bir yol izlemektedir. Tatlı sorgumla karşılaştırıldığında, daneli sorgum gövdede çok az sakaroz biriktirir ve üretilen karbonhidratların çoğu tohumlarda depolanır (Bihmidine ve ark., 2013).

Kanopi biyokütle birikimi, kuraklığa dayanıklı genotiplerin belirlenmesinde yararlı olan bitki özelliği olarak değerlendirilmiştir (Rosales-Serna ve ark., 2004). Kanopi mimarisi, güneş ışınımının kesilmesi ve buharlaşma-terleme yoluyla yaprakların ve gövdelerin miktarı, dağılımı ve alanları ile ilgili olduğundan, bitkilerin çevreleriyle etkileşimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Schittenhelm ve ark., 2006).

Bitki büyüme hızı, bitki türleri arasında önemli ölçüde farklılık gösterir. Daha hızlı büyüme oranı, olgunluğa kadar geçen süreyi kısaltabilir. Büyüme aynı zamanda bitki boyu ve boyutunun artmasına

da yol açar, bu da fotosentetik olarak aktif radyasyona (PAR, Photosynthetically active radiation), suya, besin kaynaklarına erişimi doğrudan kolaylaştırır. Potansiyel olarak hızlı büyüme sağlayabilecek birçok özellik yalnızca yüksek PAR ortamlarında faydalıdır. Fotosentetik yüzey alanının artırılması daha hızlı büyümeye yol açmalıdır, diğer her şey eşit kalmalıdır. Bununla birlikte, artan yaprak alanı aynı zamanda daha fazla kendini gölgelemeye ve birim yaprak alanı başına daha düşük net CO₂ asimilasyon oranına da yol açmaktadır. Bu nedenle, "daha yapraklı" kanopilere veya birim yaprak alanı başına daha yüksek fotosentetik kapasiteye yatırım yapan bitki türleri, yüksek PAR ortamlarında, gölgeli ortamlara göre daha fazla avantaj elde edebilir (Gleason ve ark., 2018).

Bitki büyüklüğü bitki büyümesinde ve fizyolojik faaliyetlerinde çok önemli bir rol oynar. Kurak koşullarda karbon alımının azalmasıyla karbon dengesi negatif hale gelebilir. Bitki bünyesinde biriktirilmiş yapısal olmayan karbonhidratlar, kurak koşullarda bitki metabolizmasını sürdürmek için kritik öneme sahiptir. Küçük bitkilerdeki yapısal olmayan karbonhidrat eksikliği bitki büyümesini, solunumu ve diğer metabolik süreçleri etkileyecektir (Wang ve ark., 2021). Birçok çalışma odunsu bitkilerin gövde çapının gün içinde dalgalandığını göstermiştir. Bitkilerin su durumu, doğrudan gövde çapındaki değişiklikler ölçülerek tahmin edilebilmektedir (Ohashi ve ark., 2006).

Nişasta, bitkilerin abiyotik zorluklara tepki verme eğiliminde kilit bir moleküldür. Stres sonucu fotosentezin engellenmesi durumunda bitkiler, büyüme ve gelişme için enerji kaynağı olarak nişastadan

yararlanırlar (Krasensky ve Jonak, 2012). Nişasta, mısır danelerine giriş yapan asimilatların önemli bir son ürünü olmasına rağmen, embriyo skutellumunda depolanan yağ da öyledir (Bihmidine ve ark., 2013). Mısır danesi dünyada et, yumurta, süt ve yakıt üretiminin en önemli hammaddesidir. Mısır danesinin yaklaşık %65'i hayvanların beslenmesinde kullanılmaktadır. Yüksek yağlı mısır, hayvan yemi denemelerinde normal yağlı mısırdan daha yüksek yem verimliliği göstermektedir çünkü yağın kalori içeriği, ağırlık bazında nişastanınkinden 2.25 kat daha fazladır (Shen ve ark., 2010). Mısır danesine nişasta, lipit ve protein birikimi, küresel gıda arzının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu tohum yapıları ve depolama bileşenleri arasındaki asimilat paylaşımı üzerine yapılan çalışmalar, bunların düzenlenmesinin, gelişim sırasında gen ekspresyonu ve metabolizmanın karmaşık bir etkileşimini içerdiğini göstermektedir. Ana endosperm bölmelerine ve embriyoya aktarılan sükroz endosperm içinde kısmen paylaşılır ve yeniden sentezlenir. Şekerler daha sonra nişasta depolamasının başlatıldığı üst endosperme doğru hareket eder. Endospermdeki nişasta biyosentezi sıklıkla sükroz sentaz aktivitesi ile, embriyodaki lipit biyosentezi, invertaz ve heksokinaz aktivitesi ile daha yakından ilişkili görünmektedir. Glikoliz, sitrat döngüsü, nişasta, protein ve lipid biyosentezi enzimlerinin hem endospermde hem de embriyoda koordineli bir şekilde bulunduğu rapor edilmiştir. Aktiviteleri, yutak gücünü belirlemektedir (Rolletschek ve ark., 2005). Mısır, C₄ metabolizması nispeten düşük bir terleme hızı ile birlikte yüksek bir fotosentetik oran sağlamasına rağmen, su eksikliğine karşı en hassas türlerden birisidir. Ek olarak mısır yaprak su potansiyelini su eksikliği altında yüksek değerlerde tutan ve böylece yaprak

dehidrasyonunu önleyen ilginç bir izohidrik davranışa sahiptir. Mısırın kuraklığa oldukça duyarlı olmasının nedeni özellikle çiçeklenmeden yaklaşık bir hafta öncesinden bir hafta sonrasına kadar geçen süre boyunca, yutak gücünü belirleyen generatif dönemdir. Bu generatif dönemi sınırlamanın üstesinden gelmek için kapsamlı ıslah programları yürütülmüş ve su eksikliği ile birlikte Çiçeklenme-Püskül Çıkarma Döngüsü (ASI, Anthesis-Silking Interval)'nde seleksiyon yapılmıştır. Bu ıslah stratejisi, örneğin su eksikliği altında verimin, sekiz seleksiyon döngüsü boyunca döngü başına %3 arttığı bir CIMMYT programında oldukça etkili olmuştur. Sonuç olarak, eski hibritlerle karşılaştırıldığında yeni piyasaya sürülen hibritlerde çiçeklenme döneminde su eksikliğine karşı duyarlılığın azaldığı görülmektedir (Welcker ve ark.,2007).

Hasat indeksi, farklı çeşitler veya benzer bitki türleri arasında farklılık göstermektedir. Bunun nedeni, bitkiler arasında büyüme aşamasındaki farklılık, olgunlaşma dönemi veya meyve tutumundaki farklılık olabilir. Kök ve yumru bitkilerinin hasat indeksi (HI), tahıl bitkilerinin HI'sından ve karpuzun (*Citrullus vulgaris*) HI'sından daha büyük $\geq 0,9$ 'dur (Ismail, 1993). Tahıllarda 0.3- 0.6 HI değerleri hakimdir (Hay, 1995). Hasat indeksi, yetiştiricinin belirli bir bitkinin verimini iyileştirmesi için seçim kriteri olarak kullanılabilir. Hatlar arasındaki verim farklılıklarını tanımlamada faydalıdır. En yüksek tohum verimi genellikle yüksek hasat indeksi ile ilişkilendirilir ve bu daha sonra bitki ıslahında önemli bir seçim kriteri haline gelir. Hasat indeksinin daha kapsamlı anlaşılması ve farklı genotipler arasında hasat indeksindeki farklılıkların elde edilmesinin temeli, gıda üretim

sistemlerine önemli avantajlar sağlayacaktır. Daha yüksek hasat indeksi ifade eden genotipler, verimliliği artırmak amacıyla seleksiyon için ideal materyaller olarak kabul edilebilir ve bu nedenle, bitki ıslahçısının hedefi olarak hasat indeksi dahil edilebilir (Asefa, 2019).

BİYOJENİK UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLER

Bitki örtüsünden atmosfere çok çeşitli uçucu, metan olmayan organik bileşiklerin (biyojenik uçucu organik bileşikler, BVOC'ler) yayıldığı günümüzde iyi bilinmektedir. Bitki örtüsünden kaynaklanan metan dışı organik bileşiklerin emisyonları büyük ölçüde reaktif C-C bağları içeren bileşiklerden oluşur (Atkinson ve Arey, 2003). Bitkiler tarafından üretilen biyojenik uçucu organik bileşikler, bitki büyümesinde, gelişmesinde, üremesinde ve savunmasında rol oynar. Ayrıca bitki toplulukları içinde, bitkiler arasında ve bitkilerle böcekler arasında iletişim ortamı olarak da işlev görürler (Laothawornkitkul ve ark., 2009).

Bitki topluluklarını şekillendiren en önemli faktörlerden biri, ışık, besin maddeleri ve su gibi çevresel faktörlerin kullanılabilirliğini etkileyen, bitkiler arasındaki rekabettir. Bu çevresel parametrelere tepki olarak bitkiler birçok farklı biyojenik uçucu organik bileşiğin emisyonunu ayarlar. BVOC'ler ayrıca komşu bitkilerde tepkiler ortaya çıkarabilir, böylece bitki-bitki etkileşimleri için bir platform oluşturabilir. Son zamanlardaki ilerlemeler, BVOC'lerin hem allelokimyasallar hem de komşu tespit sinyalleri olarak hareket edebildiğini göstermektedir. BVOC'lerin, komşu rakipler hakkında kimlikleri veya büyüme oranları gibi klasik komşu tespit sinyallerinin

sağlayamadığı bilgileri sağladığı öne sürülmektedir (Kegge ve Pierik, 2010).

Biyojenik uçucu organik bileşikler içerisinde monoterpenler öne çıkan bir gruptur. Monoterpenlerin tanımlanan ekolojik işlevleri, örneğin bitkiler arasındaki iletişim süreçleri, otçullara veya mantarlara karşı savunma ve avcılarının veya tozlaştırıcıların çekiciliği ve bunların atmosferdeki kimyasal süreçler üzerindeki etkileridir. Biyojenik uçucu organik bileşiklerin emisyonlarının miktarı abiyotik ve biyotik faktörlere bağlıdır. Monoterpen havuzları ve salınımı ile reçine içeren yapılara sahip ağaç ve yaprak yapılarının örneğin böcekler tarafından hasar görmesi, rüzgar, diğer mekanik etkiler, ışık, sıcaklık, su ve besin mevcudiyeti, yaprak ve ağaç yaşı, mevsimsellik, fotosentezin azalması, otçullarca yaprakların ve gövdenin tahrip edilmesi gibi abiyotik ve biyotik streslerden etkilenebilir (Lüpke ve ark., 2016).

Hafif kuraklık stresi, izopren ve monoterpenlerin ışığa bağımlı emisyonunu etkilememekte ya da yalnızca orta derecede azaltmaktadır. Ancak güçlü, uzun süreli kuraklık izoprenoid emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Genel olarak, yaz kuraklığının yıllık izoprenoid emisyonu üzerindeki etkisi sıklıkla gözlemlenmiştir (Grote ve ark., 2010). İzopren biyosentezinin kloroplast içinde meydana geldiği bilinmektedir. İzopren biyosentezi ışığa bağlıdır ve içerdiği karbonun yaklaşık %70-90'ı yakın zamanda asimile edilmiş fotosentetik ara maddelerden kaynaklanır ve geri kalan karbon alternatif kaynaklardan elde edilir. Bununla birlikte, su stresinin izopren emisyonunu fotosentezden ayırdığı bilinmektedir. Su stresi altındaki bitkilerde izoprendeki karbonun yaklaşık %40'ı fotosentez dışındaki kaynaklardan

elde edilmektedir (Brilli ve ark., 2007).

BİTKİLERİN KURAKLIĞI HATIRLAMASI

Kuraklık stresinin devam etmesi ve ROS birikiminin antioksidanlar tarafından söndürülmemesi, protein oksidasyonu, membran lipid peroksidasyonu, DNA, RNA ve hormonal aktivitelerin inhibisyonu ile sonuçlanarak hücrenin “oksidatif stres” olarak adlandırılan duruma dönüşmesine ve hatta bitkilerin ölümüne neden olmaktadır. Çeşitli bitki türlerinde yapılan bazı yeni çalışmalar, çevresel strese önceden maruz kalan bitkilerin, daha sonraki stres olaylarına tepki olarak savunma sistemlerinin daha hızlı ve daha güçlü bir aktivasyon gösterme potansiyeline sahip olabileceğini ortaya çıkarmıştır (Abid ve ark., 2016). Örneğin, erken kuraklık dönemi yaşayan *Arrhenatherum elatius* bitkileri, ikinci bir kuraklık olayında, önceden maruz kalmayan bitkilere kıyasla gelişmiş bir foto-koruma ve daha yüksek biyokütle göstermiştir (Walter ve ark., 2011). Benzer şekilde, vejetatif dönemdeki çeltik bitkilerinin ölümcül olmayan sıcaklık stresine önceden maruz bırakılması, dane dolumu sırasında strese karşı sıcaklık toleransını arttırmıştır. Bu faydalı stres, tütünde, turpta ve bazı çim türlerinde de rapor edilmiştir. Erken aşamadaki sıcaklık stresine maruz kalan buğday bitkileri, terminal yüksek sıcaklık stresine karşı gelişmiş bir antioksidatif kapasite ve daha yüksek tahıl verimi sergilemiştir. Orta derecede kuraklık stresine önceden maruz bırakılan buğday bitkilerinin, çiçeklenme sonrası şiddetli kuraklık stresine karşı daha hızlı ve daha etkili bir stres temizleme mekanizmasını tetikleyen uzun süreli bir kuraklık stres hafızasını koruduğu sonucuna varılmıştır (Abid ve ark., 2016).

KAYNAKÇA

- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Y., Cui, Y., Zahoor, R., ... & Dai, T. (2016). Improved tolerance to post-anthesis drought stress by pre-drought priming at vegetative stages in drought-tolerant and-sensitive wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 106, 218-227.
- Albacete, A., Ghanem, M. E., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sánchez-Bravo, J., Martínez, V., ... & Pérez-Alfocea, F. (2008). Hormonal changes in relation to biomass partitioning and shoot growth impairment in salinized tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Journal of Experimental Botany*, 59(15), 4119-4131.
- Albacete, A. A., Martínez-Andújar, C., & Pérez-Alfocea, F. (2014). Hormonal and metabolic regulation of source-sink relations under salinity and drought: from plant survival to crop yield stability. *Biotechnology Advances*, 32(1), 12-30.
- Alvarez, M. E. (2000). Salicylic acid in the machinery of hypersensitive cell death and disease resistance. *Programmed Cell Death in Higher Plants*, 185-198.
- Amini, A., Majidi, M. M., Mokhtari, N., & Ghanavati, M. (2023). Drought stress memory in a germplasm of synthetic and common wheat: antioxidant system, physiological and morphological consequences. *Scientific Reports*, 13(1), 8569.
- Asefa, G. (2019). The role of harvest index in improving crop productivity. *Journal of Natural Science Research*, 9(6), 24-28.
- Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Atkinson, R., & Arey, J. (2003). Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 197-219.
- Bechtold, U., Penfold, C. A., Jenkins, D. J., Legaie, R., Moore, J. D., Lawson, T., ... & Mullineaux, P. M. (2016). Time-series transcriptomics reveals that AGAMOUS-LIKE22 affects primary metabolism and developmental processes in drought-stressed Arabidopsis. *The Plant Cell*, 28(2), 345-366.
- Bihmidine, S., Hunter III, C. T., Johns, C. E., Koch, K. E., & Braun, D. M. (2013). Regulation of assimilate import into sink organs: update on molecular drivers of sink strength. *Frontiers in Plant Science*, 4, 177.

- Brilli, F., Barta, C., Fortunati, A., Lerdau, M., Loreto, F., & Centritto, M. (2007). Response of isoprene emission and carbon metabolism to drought in white poplar (*Populus alba*) saplings. *New Phytologist*, 175(2), 244-254.
- Chang, T. G., & Zhu, X. G. (2017). Source–sink interaction: a century old concept under the light of modern molecular systems biology. *Journal of Experimental Botany*, 68(16), 4417-4431.
- Dien, D. C., Yamakawa, T., Mochizuki, T., & Htwe, A. Z. (2017). Dry weight accumulation, root plasticity, and stomatal conductance in rice (*Oryza sativa* L.) varieties under drought stress and re-watering conditions. *American Journal of Plant Sciences*, 8(12), 3189-3206.
- Ebeed, H. T., & El-Helely, A. A. (2021). Programmed cell death in plants: Insights into developmental and stress-induced cell death. *Current Protein and Peptide Science*, 22(12), 873-889.
- Fernie, A. R., Bachem, C. W., Helariutta, Y., Neuhaus, H. E., Prat, S., Ruan, Y. L., ... & Sonnewald, U. (2020). Synchronization of developmental, molecular and metabolic aspects of source–sink interactions. *Nature Plants*, 6(2), 55-66.
- Flügge, U. I., Häusler, R. E., Ludewig, F., & Gierth, M. (2011). The role of transporters in supplying energy to plant plastids. *Journal of Experimental Botany*, 62(7), 2381-2392.
- Galiano, L., Timofeeva, G., Saurer, M., Siegwolf, R., Martínez-Vilalta, J., Hommel, R., & Gessler, A. (2017). The fate of recently fixed carbon after drought release: towards unravelling C storage regulation in *Tilia platyphyllos* and *Pinus sylvestris*. *Plant, Cell & Environment*, 40(9), 1711-1724.
- Gleason, S. M., Stephens, A. E., Tozer, W. C., Blackman, C. J., Butler, D. W., Chang, Y., ... & Westoby, M. (2018). Shoot growth of woody trees and shrubs is predicted by maximum plant height and associated traits. *Functional Ecology*, 32(2), 247-259.
- Griffiths, C. A., Paul, M. J., & Foyer, C. H. (2016). Metabolite transport and associated sugar signalling systems underpinning source/sink interactions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1857(10), 1715-1725.
- Grote, R., Keenan, T., Lavoie, A. V., & Staudt, M. (2010). Process-based simulation of seasonality and drought stress in monoterpene emission models. *Biogeosciences*, 7(1), 257-274.
- Gui, Y. W., Batool, A., El-Keblawy, A., Sheteiwy, M. S., Yang, Y. M., Zhao, L., ... & Xiong, Y. C. (2024). Response of source-sink relationship to progressive water

- deficit in the domestication of dryland wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108380.
- Gunawardena, A. H. (2008). Programmed cell death and tissue remodelling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 59(3), 445-451.
- Hay, R.K. (1995). Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annu Appl Biol*, 126, 197-216.
- Ismail (1993). A Critical analysis of harvest index. *Qatar Univ. Sci. J.*, 13: 253 - 263.
- Jin, Y., Yang, H., Wei, Z., Ma, H., & Ge, X. (2013). Rice male development under drought stress: phenotypic changes and stage-dependent transcriptomic reprogramming. *Molecular Plant*, 6(5), 1630-1645.
- Kaur, H., Manna, M., Thakur, T., Gautam, V., & Salvi, P. (2021). Imperative role of sugar signaling and transport during drought stress responses in plants. *Physiologia plantarum*, 171(4), 833-848.
- Kegge, W., & Pierik, R. (2010). Biogenic volatile organic compounds and plant competition. *Trends in Plant Science*, 15(3), 126-132.
- Knoblauch, M., & Peters, W. S. (2010). Münch, morphology, microfluidics—our structural problem with the phloem. *Plant, Cell & Environment*, 33(9), 1439-1452.
- Krasensky, J., & Jonak, C. (2012). Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks. *Journal of Experimental Botany*, 63(4), 1593-1608.
- Lalonde, S., Tegeder, M., Throne-Holst, M., Frommer, W. B., & Patrick, J. W. (2003). Phloem loading and unloading of sugars and amino acids. *Plant, Cell & Environment*, 26(1), 37-56.
- Lam, E., Kato, N., & Lawton, M. (2001). Programmed cell death, mitochondria and the plant hypersensitive response. *Nature*, 411(6839), 848-853.
- Laothawornkitkul, J., Taylor, J. E., Paul, N. D., & Hewitt, C. N. (2009). Biogenic volatile organic compounds in the Earth system. *New Phytologist*, 183(1), 27-51.
- Liang, D., Ni, Z., Xia, H., Xie, Y., Lv, X., Wang, J., ... & Luo, X. (2019). Exogenous melatonin promotes biomass accumulation and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 246, 34-43.
- Liu, X., Wang, S., Zhuang, Q., Jin, X., Bian, Z., Zhou, M., ... & Zhang, Y. (2022). A Review on carbon source and sink in arable land ecosystems. *Land*, 11(4), 580.

- Ludewig, F., & Flüggé, U. I. (2013). Role of metabolite transporters in source-sink carbon allocation. *Frontiers in Plant Science*, 4, 231.
- Lüpke, M., Leuchner, M., Steinbrecher, R., & Menzel, A. (2016). Impact of summer drought on isoprenoid emissions and carbon sink of three Scots pine provenances. *Tree Physiology*, 36(11), 1382-1399.
- Ma, X., Sukiran, N. L., Ma, H., & Su, Z. (2014). Moderate drought causes dramatic floral transcriptomic reprogramming to ensure successful reproductive development in *Arabidopsis*. *BMC Plant Biology*, 14, 1-16.
- Messina, C. D., Van Eeuwijk, F., Tang, T., Truong, S. K., McCormick, R. F., Technow, F., ... & Cooper, M. (2022). Crop improvement for circular bioeconomy systems. *Journal of the ASABE*, 65(3), 491-504.
- Miller, G. A. D., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., & Mittler, R. O. N. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell & Environment*, 33(4), 453-467.
- Minchin, P. E. H., & Lacointe, A. (2005). New understanding on phloem physiology and possible consequences for modelling long-distance carbon transport. *New Phytologist*, 166(3), 771-779.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9(10), 490-498.
- Muller, B., Pantin, F., Génard, M., Turc, O., Freixes, S., Piques, M., & Gibon, Y. (2011). Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *Journal of Experimental Botany*, 62(6), 1715-1729.
- Münch, E. (1930). Die stoffbewegungen in der pflanze (Gustav Fischer, jena). *Curr. Opin. Plant Biol*, 43, 36-42.
- Nelissen, H., Sun, X. H., Rymen, B., Jikumar, Y., Kojima, M., Takebayashi, Y., ... & Inzé, D. (2018). The reduction in maize leaf growth under mild drought affects the transition between cell division and cell expansion and cannot be restored by elevated gibberellic acid levels. *Plant Biotechnology Journal*, 16(2), 615-627.
- Nguyen, G. N., Hailstones, D. L., Wilkes, M., & Sutton, B. G. (2010). Drought stress: role of carbohydrate metabolism in drought-induced male sterility in rice anthers. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(5), 346-357.

- Ohashi, Y., Nakayama, N., Saneoka, H., & Fujita, K. (2006). Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. *Biologia Plantarum*, 50, 138-141.
- Oliver, S. N., Dennis, E. S., & Dolferus, R. (2007). ABA regulates apoplastic sugar transport and is a potential signal for cold-induced pollen sterility in rice. *Plant and Cell Physiology*, 48(9), 1319-1330.
- Overmyer, K., Brosché, M., & Kangasjärvi, J. (2003). Reactive oxygen species and hormonal control of cell death. *Trends in Plant Science*, 8(7), 335-342.
- Peleg, Z., Reguera, M., Tumimbang, E., Walia, H., & Blumwald, E. (2011). Cytokinin-mediated source/sink modifications improve drought tolerance and increase grain yield in rice under water-stress. *Plant Biotechnology Journal*, 9(7), 747-758.
- Resco de Dios, V., & Gessler, A. (2021). Sink and source co-limitation in the response of stored non-structural carbohydrates to an intense but short drought. *Trees*, 1-4.
- Rodrigues, J., Inzé, D., Nelissen, H., & Saibo, N. J. (2019). Source–sink regulation in crops under water deficit. *Trends in Plant Science*, 24(7), 652-663.
- Rolletschek, H., Koch, K., Wobus, U., & Borisjuk, L. (2005). Positional cues for the starch/lipid balance in maize kernels and resource partitioning to the embryo. *The Plant Journal*, 42(1), 69-83.
- Romero-Munoz, M., Gálvez, A., Martínez-Melgarejo, P. A., Piñero, M. C., del Amor, F. M., Albacete, A., & López-Marín, J. (2022). hydromulching enhances the growth of artichoke (*Cynara cardunculus* var. scolymus) plants subjected to drought stress through hormonal regulation of source–sink relationships. *agronomy*, 12(7), 1713.
- Rosales-Serna, R., Kohashi-Shibata, J., Acosta-Gallegos, J. A., Trejo-López, C., Ortiz-Cereceres, J., & Kelly, J. D. (2004). Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. *Field Crops Research*, 85(2-3), 203-211.
- Sala, A., Piper, F., & Hoch, G. (2010). Physiological mechanisms of drought-induced tree mortality are far from being resolved. *The New Phytologist*, 186(2), 274-281.
- Sapes, G., Demaree, P., Lekberg, Y., & Sala, A. (2021). Plant carbohydrate depletion impairs water relations and spreads via ectomycorrhizal networks. *New Phytologist*, 229(6), 3172-3183.

- Schittenhelm, S., Sourell, H., & Löpmeier, F. J. (2006). Drought resistance of potato cultivars with contrasting canopy architecture. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 193-202.
- Sevanto, S. (2014). Phloem transport and drought. *Journal of Experimental Botany*, 65(7), 1751-1759.
- Shen, B., Allen, W. B., Zheng, P., Li, C., Glassman, K., Ranch, J., ... & Tarczynski, M. C. (2010). Expression of ZmLEC1 and ZmWRI1 increases seed oil production in maize. *Plant Physiology*, 153(3), 980-987.
- Sinha, R., Fritschi, F. B., Zandalinas, S. I., & Mittler, R. (2021). The impact of stress combination on reproductive processes in crops. *Plant Science*, 311, 111007.
- Slewinski, T. L., Meeley, R., & Braun, D. M. (2009). Sucrose transporter1 functions in phloem loading in maize leaves. *Journal of experimental botany*, 60(3), 881-892.
- Steffens, B., & Sauter, M. (2005). Epidermal cell death in rice is regulated by ethylene, gibberellin, and abscisic acid. *Plant physiology*, 139(2), 713-721.
- Szechynska-Hebda, M., Kruk, J., Górecka, M., Karpińska, B., & Karpiński, S. (2010). Evidence for light wavelength-specific photoelectrophysiological signaling and memory of excess light episodes in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 22(7), 2201-2218.
- Torres, M. A., & Dangel, J. L. (2005). Functions of the respiratory burst oxidase in biotic interactions, abiotic stress and development. *Current opinion in plant biology*, 8(4), 397-403.
- Turner, J. G., Ellis, C., & Devoto, A. (2002). The jasmonate signal pathway. *The Plant Cell*, 14, S153-S164.
- Walter, J., Nagy, L., Hein, R., Rascher, U., Beierkuhnlein, C., Willner, E., & Jentsch, A. (2011). Do plants remember drought? Hints towards a drought-memory in grasses. *Environmental and Experimental Botany*, 71(1), 34-40.
- Wang, N., Li, Q., Liu, X., Yi, S., Zhao, M., Sun, X., ... & Wang, R. (2021). Plant size plays an important role in plant responses to low water availability and defoliation in two woody Leguminosae species. *Frontiers in Plant Science*, 12, 643143.
- Welcker, C., Boussuge, B., Bencivenni, C., Ribaut, J. M., & Tardieu, F. (2007). Are source and sink strengths genetically linked in maize plants subjected to water deficit? A QTL study of the responses of leaf growth and of anthesis-silking interval to water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 339-349.

- Wituszynska, W., & Karpinski, S. (2013). Programmed Cell Death as a Response to High Light, UV and Drought Stress in Plants. InTech. doi: 10.5772/53127
- Yu, S. M., Lo, S. F., & Ho, T. H. D. (2015). Source–sink communication: regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling. *Trends in Plant Science*, 20(12), 844-857.
- Zhang, H., Liang, W., Yang, X., Luo, X., Jiang, N., Ma, H., & Zhang, D. (2010). Carbon starved anther encodes a MYB domain protein that regulates sugar partitioning required for rice pollen development. *The Plant Cell*, 22(3), 672-689.

BÖLÜM 9

KURAKLIKTA BİTKİLERDE VERİM FİZYOLOJİSİ

Prof. Dr. Tahir POLAT¹
ZYM Muhammed İzzet TÜRKOĞLU²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759310>

¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Urfa, Türkiye.
tahirpolat@harran.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-5754-9684

² Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Urfa, Türkiye.
muhammedizzet1@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-9891-5166

1. Giriş

Kuraklık bitki büyümesini ve verimini sınırlayan en ciddi faktörlerden biridir. Kuraklık stresinin bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkileri doğrudan verimle bağlantılıdır (Bhaskarla ve ark. 2020). Örneğin kuraklık stresinde mısırdaki tohum/ovül oranının azalması ve mısırın çiçeklenme-püskül çıkarma aralığının artması meydana gelebilmektedir (Semagn ve ark. 2013). Bitkiler kuraklık stresine maruz kaldığında fotosentez ciddi şekilde engellenir. Genellikle kuraklık koşullarında bitkiler, daha gelişmiş kök sistemleri ve daha yüksek kök/sürgün oranı oluşturmak için çeşitli süreçleri tetikler. Örneğin kuraklıkta yoncanın (*Medicago sativa*) kökleri 2 m derinliğe kadar uzanır ve bitkiler böylece üst toprağın kurumasına kolayca dayanabilir (El-Ramady ve diğerleri, 2020). Su kıtlığı koşulları su kaybını azaltmak için stomaların kapanmasına neden olur, bu da kuraklık stresi altında bitkinin hayatta kalması için faydalıdır. Stomaların kapanması CO₂ emilimini ve fotosentezi engeller, fakat bu gelişimsel adaptasyona yardımcı olmaz (Li ve ark., 2021).

Verimin su kıtlığına duyarlılığı, kazık kök, sürgün, yaprak, meyve veya tohum gibi hasat edilen tarım ürünlerinin türüne bağlıdır. Mahsul gelişiminin belirli aşamalarındaki kuraklığın verim üzerinde özellikle güçlü etkileri olabilir. Güvenli bir mahsul verimi için, yalnızca topraktaki su kıtlığının süresi değil, aynı zamanda bitkinin genetik döngüsü içinde kuraklığın meydana geldiği zaman noktası da önemlidir. Büyüme dönemindeki su eksikliği vejetatif ve generatif verimi azaltırken, çimlenme ve fide oluşumu sırasındaki kıtlık ise çimlenmeyi, fotosentezi ve fide büyümesini geciktirir veya engeller (Farooq ve ark.,

2009). Bu, güçlü bitkilerin sayısını azaltır. Çiçeklenmenin kritik aşamalarındaki kuraklık, tohum ve meyvelerin sayısı ve büyüklüğünü düşürerek verimi tehdit eder. Bitkilerin vejetatif gelişimi sırasında suyun çekilmesi, gövde içindeki dane dolumunda kullanılacak karbonhidrat rezervlerinin seviyesini azaltır, dolayısıyla tohum kütlelerinde de bir azalmaya neden olur (Blum, 2017).

Erken tohum gelişimi sırasında meydana gelen kuraklık, gelişmekte olan tanelerin kaybına sebep olabilir, bu da tohum tutumunun azalmasına veya tohumların küçülmesine neden olarak verim ve kalite kayıplarına yol açabilir (Zörb ve ark., 2017). Polen tüpü büyümesi, muhtemelen karbonhidrat mobilizasyonunun azalması nedeniyle kuraklık altında engellenir (Hu ve ark. 2019). Başakçık içerisindeki tohumlar arasındaki, sınırlı karbon kaynakları için rekabet, kuraklık stresi altında tohumların dökülmesini teşvik eder (Shen ve ark. 2020). Başarısız tozlaşma ve tohum oluşumu veya floem tarafından sağlanan asimilatlar için rekabet, çiçek dökülmesine neden olabilir (Patrick & Stoddard 2010). Başarılı tozlaşma ve tohum oluşumunun ardından tohum dolumu ve meyve gelişimi, asimilatların etkili bir şekilde dağıtılmasına bağlıdır. Durdurulan fotosenteze ve değişen asimilat paylaşımı ile ilgili sınırlı asimile mevcudiyeti, kuraklık stresi altında bitkinin büyüme tepkisini belirler. Kuraklık stresi tane doldurma ve olgunlaşma sürelerini kısaltır ve dolayısıyla verimi ciddi şekilde azaltır (Dietz ve ark., 2021).

Mısır ve çeltiğin ardından üç ana tahıl ürününden biri olan buğday, geniş çapta araştırılmış ve kuraklık stresinin bir sonucu olarak fizyolojik parametrelerde ve verimde meydana gelen değişiklikler kapsamlı bir

şekilde rapor edilmiştir. Su kaynakları sınırlı olduğunda bitkinin yaşam döngüsü kısalır, bu da tahıllarda yaprak, kardeş, başak gibi organların boyutunu, başakçık sayısını ve başak kuru ağırlığının toplam kuru ağırlığa oranını azaltır ve fizyolojik ve biyokimyasal değişiklikleri değiştirir ve düşük verimle sonuçlanır. Erken büyüme sırasındaki kuraklık, çimlenmeyi ve fide çıkışını azaltır ve kardeş sayısını, bitki boyunu ve yaprak alanını azaltırken, çiçeklenme ve tane dolumu sırasında kuraklık, muhtemelen azalan tozlaşmanın bir sonucu olarak, verimli başakçık yüzdesini ve tane sayısını azaltır. Tane dolumu sırasında su stresi aynı zamanda tanelerdeki nişasta ve protein birikimini de etkileyerek tane boyutunu küçültür ve tane verimini ve kalitesini etkiler. Kuraklık stresi, buğdayda iyi sulanan bitkilere kıyasla tane verimini, verim bileşenlerini, hasat indeksini (HI), bitki boyunu, yaprak alanını ve kuru ağırlığı önemli ölçüde azaltır (Wang ve ark., 2017).



Şekil 1. Uç bölgesinde zayıf tane gelişimi gösteren, kuraklık stresindeki mısır koçanı

Kaynak: Ferreira & Brown, 2016

Kuraklık ve yüksek sıcaklığın etkileri, bitki kütlesindeki birikimin azalması, boğum aralarının kısalması, kardeşlenmenin artması, erken yaşlanma ve erken ölüm ve çeşitli bitkilerde meyve renginin değişmesi ve zarar görmesi şeklindedir. Taze bitki biyokütlesiyle

karşılaştırıldığında kuru biyokütlenin su eksikliğine tepkisi nispeten daha düşüktür ve bu nedenle kuru kütle/taze kütle oranı bitki düzeyinde bir stres parametresi olarak kullanılır (Zlatev ve Lidon, 2012). İyi sulanan bitkilerle karşılaştırıldığında su stresi altında olan bitkiler, muhtemelen hücre duvarı sertliğindeki artıştan ziyade tam turgorda daha düşük çözünen madde potansiyeli nedeniyle maksimum yaprak kütlesi elastik modülünde daha yüksek bir değer gösterir (Lipiec ve ark., 2013).

Bir bitkinin yaşadığı stres düzeyini ve ilgili dane verimini ölçmek için farklı endeksler kullanılır. Bunlar hem bitki hem de toprak suyu durumuna dayanırlar. Abayomi ve ark. (2012) tahıl veriminin su stresi indeksi (WSI) ile ilişkili olduğunu, Rizza ve ark, (2004) kuraklığa duyarlılık indeksi (DSI) ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Su stresi indeksi WSI, büyüme mevsimi boyunca bitkinin mevcut toprak suyu içeriğini (toprak suyu içeriği eksi kalıcı solgunluktaki su içeriği) entegre eder. Kuraklığa duyarlılık indeksi DSI, su stresi altındaki ve normal toprak nemi altındaki tane verimi oranlarına dayanır (Golabadi ve ark., 2006). Her iki endeks de arpa ve mısırın tane verimi ile su stresi arasında önemli bir negatif ilişki olduğunu göstermiştir (Lipiec ve ark., 2013).

Hasat indeksi, bitkilerin vejetatif ve generatif organlar arasındaki biyokütle paylaşımının önemli bir göstergesidir. Kuraklık tohum protein içeriğini artırır. Bu artış, genel tohum suyu içeriğindeki bir azalmayı ve/veya nişasta içeriğindeki azalmayı telafi eden bir mekanizmayı yansıtmaktadır. Kuraklık genellikle tohum sayısında ve tohum ağırlığında bir azalmaya neden olur, ancak bitkiler önemli bir telafi potansiyeli gösterebilir ve farklı stres koşulları altında daha az sayıda ancak daha büyük tohumlar üretebilir (Griffiths ve ark. 2015). Stresin

tohum sayısı ve tohum ağırlığı üzerindeki etkisi, bu iki parametreyi etkileyen birincil süreçlerle ilişkili generatif aşamaya göre stresin zamanlamasından güçlü bir şekilde etkilenir (Cohen ve ark., 2021).

Bitkilerin çevrelerindeki değişikliklere alışması, farklı hücresel bölümlerde bulunan çoklu yollar arasındaki hassas dengeyle elde edilen yeni bir hücresel homeostaz durumunu gerektirir. Ancak bu koordinasyon, su ve tuz stresi sırasında, özellikle hücre veya bitkinin tamamı su potansiyelinde hızlı bir düşüşe maruz kaldığında veya ek çevresel parametreler söz konusu olduğunda bozulabilir (Miller ve ark. 2010). Sistem biyolojisi ve omics, stres altındaki genom, metabolom, transkriptom ve proteomun dinamikleri hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamıştır. Kuraklığın hücresel homeostazda neden olduğu değişikliklere karşı koymak için hücre sistemi içinde çeşitli hücresel süreçler ve antioksidan mekanizmalar çalışır. Her ne kadar kuraklığa tepki veren mekanizmaların tetiklenmesini daha iyi anlamak için bitkiler üzerinde kapsamlı araştırmalar yapılmış olsa da, bu niceliksel özelliğin karmaşık doğası nedeniyle süreç hala tam olarak anlaşılamamıştır (Shah ve ark., 2017).

2. Kuraklıkta net asimilasyon oranı-verim ilişkisi

Çayırılar, yalnızca tarımsal olarak kullanılmayan, aynı zamanda örneğin çok dik konumlarda veya orman sınırlarının üzerinde başka amaçlarla kullanılamayan alanları da kapsayan önemli bir ekosistem türüdür. Kuraklık altında bitki performansının günlük desenleri önem taşır. Çayırılarda asimilasyon hızı ve stoma iletkenliğinin fotosentetik olarak aktif radyasyonu (PAR, photosynthetically active radiation) ile

paralel olduğu bulunmuştur. Ulaşılabilir maksimum değerlerin kuraklık döneminde azaldığı bildirilmiştir, ancak en yüksek asimilasyon oranları hala öğle vakti gözlemlenir. Fakat kuraklık etkileri tüm türler için PAR ile benzer şekilde ilişkili değildir. Daha az şiddetli bir kuraklık olayının etkileri çoğunlukla fiziksel sınırlamaları veya gen ifadesinde hızlı değişiklikleri içerirken, biyokimyasal aygıtta geri döndürülemez değişiklikler yalnızca daha şiddetli stres sırasında ortaya çıkar. Bu nedenle, bireysel türlerin genel otlak net fotosentezine göreceli katkısının gün boyunca değişmesi gerekir (Bollig & Feller, 2014).

Büyüme, bitkiler için büyük bir ekolojik öneme sahiptir; çünkü hayatta kalmaları, üremeleri ve rekabetçi etkileşimleri bireysel boyuta bağlıdır. Bitkiler, hem habitatlar içinde hem de habitatlar arasında göreceli büyüme hızı (RGR) açısından büyük farklılıklar gösterir ve bunun topluluk yapısı ve dinamikleri üzerinde sonuçları vardır. Işınım ve su kaynakları, metre veya santimetre ölçeğinde bile büyük ölçüde farklılık gösterebilir, bu da farklı türlerin bir arada yaşamasına neden olabilir. Farklı doğal sistemlerde, ışınım ve su kaynakları birbirinden bağımsız olarak değişiklik gösterebilir veya pozitif ya da negatif bir korelasyona sahip olabilir. Bu karmaşıklık göz önüne alındığında, bitkilerin kuraklığa verdiği tepkilerin ışınımlara göre nasıl değişebileceğini anlamamız gereklidir (Quero ve ark., 2008). Bazı araştırmacılar kuraklığın etkisinin yoğun gölge koşullarında daha güçlü olması gerektiğini öne sürmüşlerdir (Aranda ve ark., 2005). Ancak çalışmalar, yaprak seviyesindeki fizyoloji ve mutlak bitki büyümesi ve hayatta kalması açısından kuraklığın etkisinin genellikle gölgede azaldığını göstermiştir (Sack, 2004).

3. Kuraklıkta radyasyon kullanım etkinliği-verim ilişkisi

Radyas Radyasyon yakalama etkinliği, yonun yakalanmasının verimliliği, bitkilerin yaprak alanı, yaprak şekli ve ayrıca fotosentez ve terleme hızını etkileyen yaprak dekorasyonunun doğrusal bir fonksiyonudur. Bitkilerde üretilen toplam kuru madde, radyasyonların biyokütleye dönüşüm verimliliği ve radyasyon kullanım etkinliği (RUE, radiation use efficiency) ile pozitif yönde ilişkilidir (Liu ve ark., 2012). Bitki büyümesindeki ciddi azalma, öncelikle kuraklık stresi altında fotosentezdeki düşüş yoluyla RUE'deki azalma nedeniyle meydana gelir. Su eksikliği bitki yapraklarının kıvrılmasından dolayı PAR tutulmasını azaltır. Uzun süreli su eksikliği koşullarında yaprak sayısı ve toplam alanı azalır, sonuçta bitkinin radyasyonu yakalama yeteneği azalır. Toplam kuru madde üretimindeki değişime ek olarak kuraklık stresi, bitkilerde yaprak iletkenliğini de etkiler; bununla birlikte büyüme solunumu ve bakım solunumu oranlarındaki bozulma nedeniyle net fotosentezi azaltır. Aynı zamanda bitki köklerinde ve sürgünlerinde karbon birikmesinin ana nedenidir, bu da sürgün büyümesini kök büyümesinden daha fazla azaltır ve sonuçta kuraklık stresindeki bitkilerde RUE'nin azalmasına yol açar (Randhawa ve ark., 2017).

Su kullanım etkinliğinin (WUE, water use efficiency) ve radyasyon kullanım etkinliğinin (RUE, radiation use efficiency) maksimuma çıkarılması, kurak alan tarım sistemlerinde bitkisel üretiminin iyileştirilmesi için hayati öneme sahiptir. Karasal ekosistemler tarafından karbon tutulmasının önemli bir belirleyicisi olan RUE, bir bitkinin 400-700 nm dalga boyunda emilen fotosentetik olarak aktif radyasyonu (PAR, photosynthetically active radiation) biyokütle

dönüştürme etkinliğini gösterir. Yüksek su kullanım etkinliğinin olası kuraklık altındaki düşük radyasyon kullanım etkinliği ile ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Buna karşılık, WUE ve RUE, optimal büyüme koşulları altında doğrudan orantılıdır. WUE ve RUE kanopi iletkenliğiyle ters ilişkilidir. Ek olarak, kanopi yapısındaki değişiklikler örneğin, yaprak açısı, bitki boyu, yaprak alanı indeksi (LAI) gibi, hem ışık geçirgenliğini hem de su stresi koşulları altında yansımayı gösterir. LAI, bitki örtüsü işlevi ve yapısının birincil tanımlayıcısıdır ve işlevsel olarak bitki örtüsü ile atmosfer arasındaki su ve enerji değişimiyle ilgilidir (Zhou ve ark., 2021).

Türlerin fotosentetik performans açısından karşılaştırılması, C₄ türlerinin C₃ türlerine göre daha yüksek RUE'ye sahip olduğunu ve C₃ türleri içerisinde baklagil olmayan C₃ türlerinin baklagil türlerine göre daha yüksek RUE'ye sahip olduğunu göstermektedir. RUE, çeşitli gelişimsel, morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri daha yüksek bitki fonksiyonları düzeyinde birleştiren radyasyona dayalı bitki büyüme modellerinin önemli bir bileşenidir. Bu nedenle RUE, farklı mevsim ve iklim koşullarında ürün performansını ve verim sınırlamalarını değerlendirmek için kullanılabilir (Tesfaye ve ark., 2006).

4. Kuraklıkta su yönetimi-verim ilişkisi

Su yönetimi ve özellikle sulama yönetimi kurak bölgelerdeki verim kaybını azaltabilir. Su-verim ilişkileri, verimli su yönetiminin temelini oluşturur. Stres koşulları altında tane verimini etkileyen birçok fenolojik, morfolojik ve fizyolojik özellik arasında su kullanım etkinliği (WUE, water use efficiency) kuraklığa toleransla ilgili önemli ve

karmaşık bir fizyolojik özelliktir (Kharel ve ark., 2011). Su kullanım etkinliği, tane veriminin mevsimsel evapotranspirasyona oranı olarak tanımlanır. Su eksikliği durumunda WUE normal koşullara göre daha yüksek olabilir. Alım etkinliği temel olarak bir bitkinin topraktan su emme ve toprak yüzeyinden buharlaşmayı azaltma yeteneği ile ilgilidir (Siahpoosh ve ark., 2012).

Su eksiklikleri bitkilerde bazı uyarlanabilir fizyolojik eylemleri teşvik edebilir. Burada dane veriminin havaya atılan suya oranı olarak tanımladığımız su kullanım etkinliği, nihai performans açısından bitkilerin kuraklık stresine tepkisinde yer alan önemli bir fizyolojik özelliktir. Kuru maddenin buharlaşan suya oranı olarak tanımladığımız buharlaşma-terleme etkinliği, yaşam döngüsü boyunca ve farklı büyüme aşamalarında bitkilerin su teminine verdiği reaksiyonların göstergesidir. Stres altında daha istikrarlı performansa sahip çeşitlerin değerlendirilmesine yönelik basit ama konuyla ilgili diğer bir kriter, kuraklığa duyarlılık indeksi (DSI, drought susceptibility index)'dir. Kuraklığa duyarlılık indeksi, stres ve optimum koşullar arasındaki verim farkından faydalanarak hesaplama yapar. Bu özellik, suyun sınırlı olduğu koşullar altında verim stabilitesine sahip genotiplerin tanımlanması için kullanılmaktadır (Grzesiak ve ark., 2003; Siahpoosh ve ark., 2011).

Terleme etkinliğinin (TE, transpiration efficiency) artırılması kaçınılmaz bir seçimdir. Bazı çalışmalar, bitkilerde terleme etkinliğinin genotip ve toprak nemine göre değiştiğini ve fizyolojik araştırmaların yüksek terleme etkinliğine sahip bitkilerin seçimine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu öne sürmüştür (Sankar ve ark. 2008). Ancak

terleme verimliliğinin fizyolojik ve moleküler düzenlemesinin anlaşılmaması, yapılan ıslah çalışmalarında terleme etkinliğinin artırılması ve bu özellik açısından üstün bitki çeşitlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir kısıtlama teşkil etmektedir (Changhai ve ark., 2010).

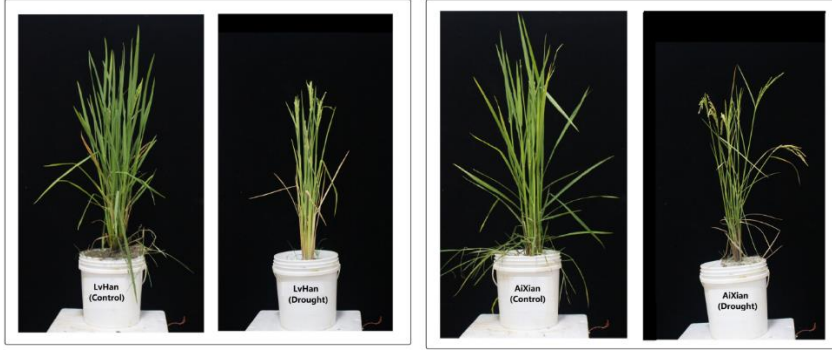
Artan sulama suyu kıtlığı nedeniyle tehdit altında olan küresel gıda güvenliği için NUE (nitrogen use efficiency, azot kullanım etkinliği), WUE ve RUE'nin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir (Ullah ve ark., 2019). Kök kuru ağırlığı ve spesifik yaprak alanı, uzun vadeli kuraklık altında WUE ile ilgili önemli özelliklerdir ve kök kuru ağırlığı ve spesifik yaprak alanı, uzun vadeli kuraklık altında yüksek WUE için yararlı seçim kriterleridir (Songsri ve ark., 2009).

Daha yüksek verimli pamuk, buğday ve çeltik genotipleri, kuraklık stresi altında daha fazla stoma iletkenliğine ve terlemeye sahiptir (Izanloo ve ark., 2008). Bu nedenle, yüksek bitki verimi, farklı koşullar altında birim arazi alanı başına daha fazla CO₂ sabitlenmesine izin vermek için zaman içinde yüksek stoma iletkenliği gerektirir. Bu, terleme için maksimum toprak suyu kullanımı anlamına gelir. Büyüme süresinin beklenen veya tahmin edilen mevsimsel toprak nem kaynağı ile senkronize edilmesi, suyun sınırlı olduğu ortamlarda yetiştiricilikte genellikle ilk ve en önemli adımdır. Bu açıdan iki husus önemlidir:

- Kısa büyüme süresi, orta derecede su kullanımını ve terminal (generatif aşama) kuraklık stresinden kaçış
- Uzun büyüme süresi

Geççi genotipler genellikle daha fazla su kullanımına ve derin

toprak nemi ekstraksiyonuna izin veren daha büyük ve daha derin kök sistemlerine sahiptir (eğer gerçekten derin toprak nemi varsa) (Blum, 2009).



Şekil 2. Kuraklık stresinin iki farklı çeltik çeşidi üzerindeki etkileri: AiXian (kuraklığa duyarlı, sağ 2 fotoğraf) ve LvHan (kuraklığa dayanıklı, sol 2 fotoğraf)

Kaynak: Hassan ve ark., 2023

Yaprak geçirgenliği çok önemlidir. Yapraklar kütikül yoluyla su kaybedebilir. Stomatal olmayan bu "sızıntı", CO₂ fiksasyonunda herhangi bir fayda sağlamadan bitkinin terlemesini artırır. Örneğin, çeltik oldukça iletken bir kütikül içerirken, kuraklığa dayanıklı sorgum nispeten geçirimsiz bir kütikül içerir. Geceleri stoma sızıntısı, CO₂ asimilasyonunda herhangi bir avantaj sağlamadan su kaybına da katkıda bulunabilir. Gece terlemesi önemli olabilir (Caird ve ark., 2007). Hızlanmış yaprak kuruması ve ölümü, bitkilerin kuraklık stresi altında su ihtiyacını azaltmasının bir yoludur. Alt yapraklar genellikle üst yapraklardan daha iyi bir su içeriğine sahip olmasına rağmen, bitki yaprakları alt (yaşlı) yapraklardan üst (genç) yapraklara doğru ilerleyen bir şekilde kurur (Blum, 2009).

5. Kuraklıkta azot kullanım etkinliği-verim ilişkisi

Kuraklık stresinin neden olduğu sınırlı besin alımı sonucu azotun yanı sıra diğer besin elementlerinin eksikliğine de rastlanabilir. Ancak azot sıklıkla erken aşamada uygulanır ve bitki uzamasından önce bitirilir. Bu nedenle erken büyüme döneminde su stresi nedeniyle azot alımı ve azot kullanım etkinliği (NUE) azalabilir. Mısırdaki kuraklığa dayanıklı çeşitler sürekli olarak daha yüksek verim üretir çünkü bu çeşitlerin azot alımı ve azot kullanım etkinliği yüksektir (Kamara ve ark., 2014). Tatlı sorgumunda da, su stresi altında gelişmiş su ve azot kullanım etkinliğinin, kuraklığa karşı yüksek derecede fizyolojik adaptasyona katkıda bulunabileceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, daha yüksek NUE, su kaynağı kıtlığında bir stratejidir (Dinh ve ark., 2017).

Şiddetli kuraklık stresi ve optimum sıcaklığın belirli bir süre aşılması, bitki büyüme ve gelişmesi üzerinde geri dönüşü olmayan olumsuz etkilere neden olacaktır. Bitkilerde, sıcaklık ve kuraklık gibi stres faktörlerinin sınırlandırılması ve bunların büyüme ve fotosentez ile etkileşimi, bitkinin azot durumundaki değişikliklerle ilişkilidir (Urban ve ark., 2018). Önceki çalışmalar hem sıcaklık hem de kuraklık stresinin azot metabolizması enzim aktivitelerini önemli ölçüde baskıladığını ve bitki azot birikimini azalttığını bildirmiştir (Prasad ve ark., 2008). Nitrat redüktaz (NR) ve glutamin sentetaz (GS), amonyumun organik bileşiklere asimile edilmesinde rol oynayan ana enzimlerdir. Artan azot (N) uygulaması genellikle yeşil yaprak alanını artırabilir, fotosentezi geliştirebilir ve azot birikimini teşvik edebilir. N uygulaması belirli bir aralıkta olduğunda, artan N uygulamasıyla birlikte ürün verimi ve WUE artar (Ru ve ark., 2022).

Su stresi, N açığı ve düşük sıcaklık RUE'yi azaltabilir. Ancak yaprak genişlemesi genellikle su ve besin stresine yaprak fotosentezinden daha duyarlıdır. Dolayısıyla su ve besin stresinin bitki biyokütlesi üzerindeki ilk olumsuz etkisi genellikle RUE'ye göre daha fazla yakalanan radyasyonun azalmasıyla ilgilidir (Miralles ve ark., 2021). Azot eksikliği dallanmayı azaltabilir ve bitki yapısını değiştirebilir ve çiçek üreten boğumların nihai sayısını azaltabilir. Erken N eksikliği yaprak çıkış hızını ve bitki yaprak alanını azaltır. Alt yaprak N içeriği fotosentezi ve RUE'yi azaltır. Fenolojik ve morfolojik tipler, çevresel ve yönetim faktörleriyle birlikte, gölgelik yapısında ve kaynakların yakalanmasında büyük farklılıklara katkıda bulunur (Lake ve ark., 2021).

Su ve azot yönetiminin optimize edilmesi, çevresel riskleri azaltırken verimliliği artırmak için kritik bir adımdır. Su ve azot, bitki büyümesini sınırlayan başlıca faktörlerdir ve aynı zamanda yaygın ekilen tarım ürünlerinin verimindeki farklılıkları daraltmada da önemlidir. Eş-sınırlama ilkeleri, su ve azotun her ikisi de eşit derecede mevcut olduğunda verimin en yüksek olduğunu belirtir (Riar ve ark., 2016). Aşırı azot tedariki, suyun verimsiz tüketimine neden olur ve daha yüksek su girişi, yıkanma ve denitrifikasyon yoluyla N kayıplarını da artırır (Li ve ark., 2015). Bu eğilimin dengelenmesi için, su kullanım etkinliği (WUE) ve azot kullanımı etkinliğini iyileştirmeye yönelik etkin yönetim önlemleri alınmalıdır (Du ve ark., 2021).

6. Isı şok proteinleri

Bitkiler de dahil olmak üzere tüm organizmaların hücreleri, ısı şok

proteinleri (HSP, heat-shock proteins) olarak adlandırılan bir dizi polipeptitin sentezi yoluyla streslere etkili bir şekilde yanıt verir. Bu proteinlerin üretilmesi tüm canlılarda yaygın bir olgudur. Bu proteinler bitkilerde moleküler ağırlıklarına göre beş sınıfa ayrılır:

- Hsp100
- Hsp90
- Hsp70
- Hsp60
- Küçük ısı şoku proteinleri (sHsps)

Bu stres tepkisi proteinlerinin bitkilerde hem normal hem de stres koşullarında önemli bir rol oynadığına dair önemli kanıtlar vardır. Aslında Hsps'in artık genomu ve sonuçta bariz olan özellikleri kontrol etmede önemli bir işlev oynayarak sinyalleşme mekanizmasına, konakçı savunma mekanizmalarına, translasyona, karbonhidrat metabolizmasına ve amino asit metabolizmasına aracılık ettiği anlaşılmaktadır (Augustine, 2016).

Isı şoku proteinleri, hem normal hem de aşırı koşullar altında hayatta kalmada önemli bir rol oynayan, yüksek düzeyde korunmuş polipeptitler olarak tanımlanır (Kotak ve ark. 2007). Isı şoku proteinlerinin çoğu, güçlü sitoprotektif etkiler gösterir ve proteinleri fonksiyonel konformasyonlarında tutarak, doğal olmayan proteinlerin toplanmasını engelleyerek, denatüre olanların yeniden düzgün katlanmasını sağlayarak ve stres koşullarında ortaya çıkan zararlı polipeptitlerin uzaklaştırılmasını önleyerek hücrel homeostazisi sağlar (Timperio ve ark. 2008). Isı şoku proteinlerinin üretimi aynı zamanda

termotoleransın önemli bir bileşenidir. HSP'lerin sentezi bir eşik sıcaklığının üzerinde artar. Bu sıcaklık farklı bitki türleri arasında değişiklik gösterir. Çoğu ısı şoku proteininin indüksiyonu 35°C'de meydana gelir. Buğday bitkileri, doku sıcaklığı 32–33°C 'yi aştığında HSP'leri sentezlemeye başlar (Grigorova ve ark., 2011). Bitkiler yüksek sıcaklıklara, kuraklık stresine, oksidatif strese, soğuğa alışmaya, tuzlara (Sun ve ark., 2001) ve ABA uygulamasına maruz kaldıklarında önemli miktarda ısı şoku proteinleri sentezler (Sato ve Yokoya 2008; Hu ve ark., 2010).

Farklı abiyotik streslerin birleşiminin bir sonucu olarak, pek çok kültür bitkisinde dramatik bir verim kaybı yaşanmaktadır. Isı stresine maruz kaldıklarında bu HSF'ler trimerler oluşturur ve promotör dizilerindeki ısı stresi elemanlarında (HSE'ler) DNA'ya yüksek afiniteyle bağlanır (Chauhan ve ark., 2013). Dehidrasyon stresi aynı zamanda normal bitki proteinlerinin miktarını ve kalitesini de etkiler ve bunun sonucunda HSP'ler de dahil olmak üzere stresle ilişkili proteinler uyarılır. HSP'lerin nohut, kavak ve Kentucky bluegrass'ta hassas olanlarla karşılaştırıldığında kuraklığa dayanıklı çeşitlerde yüksek oranda eksprese edildiği gösterilmiştir. Proteomik çalışmaları, hücre dışı matristeki nükleer ve HSP'lerin her ikisinin de kuraklık stresine karşı yukarı doğru düzenlendiğini ortaya çıkarmıştır (Xu ve Huang, 2010).

KAYNAKÇA

- Abayomi, Y. A., Awokola, C. D., & Lawal, Z. O. (2012). Comparative evaluation of water deficit tolerance capacity of extra-early and early maize genotypes under controlled conditions. *Journal of Agricultural Science*, 4(6), 54.
- Aranda, I., Castro, L., Pardos, M., Gil, L., & Pardos, J. A. (2005). Effects of the interaction between drought and shade on water relations, gas exchange and morphological traits in cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings. *Forest ecology and management*, 210(1-3), 117-129.
- Augustine, S. M. (2016). Function of heat-shock proteins in drought tolerance regulation of plants. *Drought stress tolerance in plants*, vol 1: physiology and biochemistry, 163-185.
- Bhaskarla, V., Zinta, G., Ford, R., Jain, M., Varshney, R. K., & Mantri, N. (2020). Comparative root transcriptomics provide insights into drought adaptation strategies in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International journal of molecular sciences*, 21(5), 1781.
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field crops research*, 112(2-3), 119-123.
- Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, cell & environment*, 40(1), 4-10.
- Bollig, C., & Feller, U. (2014). Impacts of drought stress on water relations and carbon assimilation in grassland species at different altitudes. *Agriculture, ecosystems & environment*, 188, 212-220.
- Caird, M. A., Richards, J. H., & Hsiao, T. C. (2007). Significant transpirational water loss occurs throughout the night in field-grown tomato. *Functional Plant Biology*, 34(3), 172-177.
- Chauhan, H., Khurana, N., Agarwal, P., Khurana, J. P., & Khurana, P. (2013). A seed preferential heat shock transcription factor from wheat provides abiotic stress tolerance and yield enhancement in transgenic *Arabidopsis* under heat stress environment. *PLoS One*, 8(11), e79577.
- Changhai, S., Baodi, D., Yunzhou, Q., Yuxin, L., Lei, S., Mengyu, L., & Haipei, L. (2010). Physiological regulation of high transpiration efficiency in winter wheat under drought conditions. *Plant, Soil and Environment*, 56(7), 340-347.

- Cohen, I., Zandalinas, S. I., Huck, C., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*, 171(1), 66-76.
- Dietz, K. J., Zörb, C., & Geilfus, C. M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893.
- Dinh, T. H., Watanabe, K., Takaragawa, H., Nakabaru, M., & Kawamitsu, Y. (2017). Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. *Plant Production Science*, 20(4), 412-422.
- Du, Y., Niu, W., Zhang, Q., Cui, B., Zhang, Z., Wang, Z., & Sun, J. (2021). A synthetic analysis of the effect of water and nitrogen inputs on wheat yield and water-and nitrogen-use efficiencies in China. *Field Crops Research*, 265, 108105.
- El-Ramady, H., Abdalla, N., Kovacs, S., Domokos-Szabolcsy, E., Bákonny, N., Fari, M., & Geilfus, C. M. (2020). Sustainable biorefinery and production of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Egyptian Journal of Botany*, 60(3), 621-639.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable agriculture*, 153-188.
- Ferreira, G., & Brown, A. N. (2016). Environmental factors affecting corn quality for silage production. *Advances in silage production and utilization*, 39-51.
- Golabadi, M., Arzani, A. S. A. M., & Maibody, S. M. (2006). Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 1(5), 162-171.
- Griffiths, S., Wingen, L., Pietragalla, J., Garcia, G., Hasan, A., Miralles, D., ... & Reynolds, M. (2015). Genetic dissection of grain size and grain number trade-offs in CIMMYT wheat germplasm. *PloS one*, 10(3), e0118847.
- Grigorova, B., Vaseva, I. I., Demirevska, K., & Feller, U. (2011). Expression of selected heat shock proteins after individually applied and combined drought and heat stress. *Acta physiologiae plantarum*, 33, 2041-2049.
- Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Filek, W., & Stabryła, J. (2003). Evaluation of physiological screening tests for breeding drought resistant triticale (x *Triticosecale* Wittmack). *Acta physiologiae plantarum*, 25, 29-37.

- Hassan, M. A., Dahu, N., Hongning, T., Qian, Z., Yueming, Y., Yiru, L., & Shimei, W. (2023). Drought stress in rice: morpho-physiological and molecular responses and marker-assisted breeding. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1215371.
- Hu, W., Liu, Y., Loka, D. A., Zahoor, R., Wang, S., & Zhou, Z. (2019). Drought limits pollen tube growth rate by altering carbohydrate metabolism in cotton (*Gossypium hirsutum*) pistils. *Plant Science*, 286, 108-117.
- Hu, X., Li, Y., Li, C., Yang, H., Wang, W., & Lu, M. (2010). Characterization of small heat shock proteins associated with maize tolerance to combined drought and heat stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 455-464.
- Izanloo, A., Condon, A. G., Langridge, P., Tester, M., & Schnurbusch, T. (2008). Different mechanisms of adaptation to cyclic water stress in two South Australian bread wheat cultivars. *Journal of experimental botany*, 59(12), 3327-3346.
- Kamara, A. Y., Ewansiha, S. U., & Menkir, A. (2014). Assessment of nitrogen uptake and utilization in drought tolerant and Striga resistant tropical maize varieties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(2), 195-207.
- Kharel, T. P., Clay, D. E., Clay, S. A., Beck, D., Reese, C., Carlson, G., & Park, H. (2011). Nitrogen and water stress affect winter wheat yield and dough qualities. *Agronomy Journal*, 103(5), 1389-1396.
- Kotak, S., Larkindale, J., Lee, U., von Koskull-Döring, P., Vierling, E., & Scharf, K. D. (2007). Complexity of the heat stress response in plants. *Current opinion in plant biology*, 10(3), 310-316.
- Lake, L., Guillioni, L., French, B., & Sadras, V. O. (2021). Field pea. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops* (pp. 320-341). Academic Press.
- Li, B., Fan, R., Sun, G., Sun, T., Fan, Y., Bai, S., ... & Song, C. P. (2021). Flavonoids improve drought tolerance of maize seedlings by regulating the homeostasis of reactive oxygen species. *Plant and Soil*, 461, 389-405.
- Li, S. X., Wang, Z. H., Li, S. Q., & Gao, Y. J. (2015). Effect of nitrogen fertilization under plastic mulched and non-plastic mulched conditions on water use by maize plants in dryland areas of China. *Agricultural Water Management*, 162, 15-32.
- Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., & Kondracka, K. (2013). Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics*, 27(4).

- Liu, T., Song, F., Liu, S., & Zhu, X. (2012). Light interception and radiation use efficiency response to narrow-wide row planting patterns in maize. *Australian Journal of Crop Science*, 6(3), 506-513.
- Miller, G. A. D., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S. U. L. T. A. N., & Mittler, R. O. N. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, cell & environment*, 33(4), 453-467.
- Miralles, D. J., Abeledo, L. G., Prado, S. A., Chenu, K., Serrago, R. A., & Savin, R. (2021). Barley. In *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 164-195). Academic Press.
- Patrick, J. W., & Stoddard, F. L. (2010). Physiology of flowering and grain filling in faba bean. *Field crops research*, 115(3), 234-242.
- Prasad, P. V. V., Staggenborg, S. A., & Ristic, Z. (2008). Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. Response of crops to limited water: Understanding and modeling water stress effects on plant growth processes, 1, 301-355.
- Quero, J. L., Villar, R., Marañón, T., Zamora, R., Vega, D., & Sack, L. (2008). Relating leaf photosynthetic rate to whole-plant growth: drought and shade effects on seedlings of four *Quercus* species. *Functional Plant Biology*, 35(8), 725-737.
- Randhawa, M. S., Maqsood, M., Shehzad, M. A., Chattha, M. U., Chattha, M. B., Nawaz, F., ... & Zulfiqar, U. (2017). Light interception, radiation use efficiency and biomass accumulation response of maize to integrated nutrient management under drought stress conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(1), 134-142.
- Riar, A., Gill, G., & McDonald, G. (2016). Effect of post-sowing nitrogen management on co-limitation of nitrogen and water in canola and mustard. *Field Crops Research*, 198, 23-31.
- Rizza, F., Badeck, F. W., Cattivelli, L., Lidestri, O., Di Fonzo, N., & Stanca, A. M. (2004). Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions. *Crop science*, 44(6), 2127-2137.
- Ru, C., Hu, X., Chen, D., Song, T., Wang, W., Lv, M., & Hansen, N. C. (2022). Nitrogen modulates the effects of short-term heat, drought and combined stresses after anthesis on photosynthesis, nitrogen metabolism, yield, and water and nitrogen use efficiency of wheat. *Water*, 14(9), 1407.
- Sack, L. (2004). Responses of temperate woody seedlings to shade and drought: do trade-offs limit potential niche differentiation?. *Oikos*, 107(1), 110-127.

- Sankar, B., Jaleel, C. A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2008). Relative efficacy of water use in five varieties of *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. under water-limited conditions. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 62(1), 125-129.
- Sato, Y., & Yokoya, S. (2008). Enhanced tolerance to drought stress in transgenic rice plants overexpressing a small heat-shock protein, sHSP17. 7. *Plant cell reports*, 27, 329-334.
- Semagn, K., Beyene, Y., Warburton, M. L., Tarekegne, A., Mugo, S., Meisel, B., ... & Prasanna, B. M. (2013). Meta-analyses of QTL for grain yield and anthesis silking interval in 18 maize populations evaluated under water-stressed and well-watered environments. *BMC genomics*, 14, 1-16.
- Shah, Z. H., Rehman, H. M., Akhtar, T., Daur, I., Nawaz, M. A., Ahmad, M. Q., ... & Chung, G. (2017). Redox and ionic homeostasis regulations against oxidative, salinity and drought stress in wheat (a systems biology approach). *Frontiers in genetics*, 8, 141.
- Shen, S., Liang, X. G., Zhang, L., Zhao, X., Liu, Y. P., Lin, S., ... & Zhou, S. L. (2020). Intervening in sibling competition for assimilates by controlled pollination prevents seed abortion under postpollination drought in maize. *Plant, Cell & Environment*, 43(4), 903-919.
- Siahpoosh, M. R., & Dehghanian, E. (2012). Water use efficiency, transpiration efficiency, and uptake efficiency of wheat during drought. *Agronomy Journal*, 104(5), 1238-1243.
- Siahpoosh, M. R., Dehghanian, E., & Kamgar, A. (2011). Drought tolerance evaluation of bread wheat genotypes using water use efficiency, evapotranspiration efficiency, and drought susceptibility index. *Crop science*, 51(3), 1198-1204.
- Songsri, P., Jogloy, S., Holbrook, C. C., Kesmala, T., Vorasoot, N., Akkasaeng, C., & Patanothai, A. (2009). Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of peanut under different available soil water. *Agricultural water management*, 96(5), 790-798.
- Tesfaye, K., Walker, S., & Tsubo, M. (2006). Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. *European journal of Agronomy*, 25(1), 60-70.
- Timperio, A. M., Egidi, M. G., & Zolla, L. (2008). Proteomics applied on plant abiotic stresses: role of heat shock proteins (HSP). *Journal of proteomics*, 71(4), 391-411.

- Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A. (2019). Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. *Advances in agronomy*, 156, 109-157.
- Urban, O., Hlaváčová, M., Klem, K., Novotná, K., Rapantová, B., Smutná, P., ... & Trnka, M. (2018). Combined effects of drought and high temperature on photosynthetic characteristics in four winter wheat genotypes. *Field Crops Research*, 223, 137-149.
- Wang, J. Y., Xiong, Y. C., Li, F. M., Siddique, K. H., & Turner, N. C. (2017). Effects of drought stress on morphophysiological traits, biochemical characteristics, yield, and yield components in different ploidy wheat: A meta-analysis. *Advances in agronomy*, 143, 139-173.
- Xu, C., & Huang, B. (2010). Comparative analysis of drought responsive proteins in Kentucky bluegrass cultivars contrasting in drought tolerance. *Crop science*, 50(6), 2543-2552.
- Zhou, H., Zhou, G., Zhou, L., Lv, X., Ji, Y., & Zhou, M. (2021). The interrelationship between water use efficiency and radiation use efficiency under progressive soil drying in maize. *Frontiers in Plant Science*, 12, 794409.
- Zlatev, Z., & Lidon, F. C. (2012). An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(1).
- Zörb, C., Becker, E., Merkt, N., Kafka, S., Schmidt, S., & Schmidhalter, U. (2017). Shift of grain protein composition in bread wheat under summer drought events. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(1), 49-55.

BÖLÜM 10

YONCA (*Medicago sativa* L.) ve KURAKLIK

Dr. Pınar UYSAL¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759471>

¹ Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Çayır Mera ve Yem Bitkileri Bölümü Erzurum, Türkiye. pinar.uyisal@tarimorman.gov.tr, Orcid Id: 0000-0002-0998-4785

Yonca (*Medicago sativa* L.)

İklim değışikliğı nedeniyle artan sıcaklıklar, yağışların azalması ve su kıtlığı, kuraklığa neden olmakta ve dünya çapında giderek artan tehdit edici bir unsur haline gelmektedir. Kuraklık, tuzluluk, ağır metaller vb. çevresel stres faktörleri bitki verimliliğini sınırlandırmaktadır. Bu durum insan toplumunu, sağlığını, ekonomiyi, ekosistemleri ve tarımı etkilemektedir. Özellikle yem bitkileri, üretim ve verim istikrarı kuraklıktan ciddi şekilde etkilenmektedir. İklim değışiklikleri ve su kıtlığı, bitki örtüsünün düşük verimliliğine, yem bitkisi çeşitliliğinin azalmasına ve düşük tohum verimine yol açmıştır. Bu durum kurak ve yarı kurak bölgelerde daha yaygındır. Dünyada, yem değeri çok önemli olan çok sayıda kendiliğinden yetişen yem bitkisi türü bulunmaktadır. Fabaceae familyasına ait Yonca türleri, dünyanın kurak tarım bölgelerinde önemli bir tarımsal rol oynar (Ines ve ark., 2022).

Medicago sativa L. (yonca), Fabaceae familyasına ait, yaygın olarak yetiştirilen serin mevsim çok yıllık bir yem bitkisidir. Geniş uyum kabiliyeti, uzun büyüme mevsimi, çoklu hasat, yüksek verimi, üstün yem kalitesi ve önemli ekonomik değeri vardır (Baral ve ark., 2022). Yonca (*Medicago sativa* L.) halk arasında "Yem Bitkilerinin Kraliçesi" olarak bilinen subtropikal bir bitkidir. Yüksek düzeyde ham protein, ikincil metabolitlerin yanı sıra makro ve mikro mineralleri içeren üstün bir besin profiline sahip, son derece besleyici bir yem bitkisi olmasının yanı sıra hem sıcak hem de soğuk iklimlere son derece uyumlu olması, onu dünyadaki en iyi yem bitkilerinden biri yapar (Suwignyo et al. 2022).

Medicago sativa L. (yonca.), çok farklı iklim ve toprak şartlarına adapte olabilen, kış soğuklarının -50 °C'ye ulaştığı Alaska ve Sibirya gibi soğuk bölgelerden, yaz sıcaklığının 60°C'ye yükseldiği Kaliforniya'nın ölüm vadisine kadar, dünyanın çok farklı ekolojilerinde yetiştirilmekte olan çok yıllık önemli bir yem bitkisidir (Karaköy ve Saraç 2018).

Yonca (*Medicago sativa* L.), yüksek biyokütle verimi ve iyi besin kalitesinin yanı sıra arzu edilen tarımsal özellikleri nedeniyle hayvancılık üretim sistemleri için en önemli çok yıllık yem bitkilerinden biridir. Yonca, agronomik avantajlarının yanı sıra, toprak verimliliğinin artırılması, toprak erozyonuna karşı koruma, biyolojik azot fiksasyonu ve sonraki tahıl mahsulü için azot sağlama kabiliyeti nedeniyle düşük N gübreleme gereksinimleri, enerji ve sera gazı emisyonlarının azaltılması ve bitki ve hayvan biyoçeşitliliğinin korunması açısından çevre üzerinde birçok olumlu etkiye sahiptir (Tucak et al. 2023).

Yüksek yem değeri ve protein içeriği ile dikkat çeken yonca (*Medicago sativa* L.) (Wang et. al 2023; Zhang et. al 2023) otçul hayvancılığın geliştirilmesi için önemli bir yem olup, dünyanın en değerli yem bitkilerinden biridir ve 80'den fazla ülkede 30~35 milyon hektarlık bir alanda kuru ot ve mera olarak ekilmektedir. Dünya genelinde yonca, değişken yağış, sıcaklık ve toprak verimliliği ile çok çeşitli çevresel ve iklimsel koşullar altında yetiştirilmektedir (Wang et. al 2023).

Yonca dünya çapında yaklaşık 30 milyon hektar alanda ekilmektedir ve bunun 9 milyon hektardan fazlası Amerika Birleşik Devletleri ve Arjantin'de ekilirken, Çin'de 5 milyon hektardan daha az

ekilmektedir. Yonca yaprakları, beslenme açısından zengin olup çok sayıda vitamin, amino asit ve protein içerir. (Jing et. al 2023).

Küresel nüfusun 2050 yılına kadar yaklaşık 9,7 milyara ulaşacağı tahmin ediliyor, bu da insan beslenmesinde proteinlere olan ihtiyacın artacağı anlamına geliyor. Yonca yaprağı, şu anda yeterince kullanılmayan, insan tüketimi ve gıda uygulamaları için umut verici, ucuz bir protein kaynağıdır. Yonca, yüksek protein içeriği nedeniyle yaygın olarak hayvan yemi olarak kullanılır. Yonca yaprağı proteinleri, dengeli bir amino asit bileşimine sahip olması ve çeşitli fonksiyonel özellikler sergilemesi nedeniyle gıda formülasyonlarında da kullanılabilir (Hadidi et al.2023).

Yonca neredeyse 2000 yıldır hasat edilmektedir ve öncelikle süt verimi ve bileşimi üzerinde faydalı bir etki ile hayvancılık için protein sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Hadidi et al.2023). Yonca, iyi besin değeri ve lezzetinin yanı sıra aşırı iklim ve tuzluluğa toleransı nedeniyle hayvancılık için önemli bir protein kaynağıdır (Hadidi et al.2023). Ayrıca, potasyum gibi bazı minerallerin yoncadan emilimi (%89) sığırlarda tahıldan (%74-83) daha yüksektir (Hadidi et al.2023). Çeşitli araştırmacılar, yoncanın nutrasötik, farmasötik ve fonksiyonel gıda endüstrilerindeki uygulamalar için umut verici bir bitki bazlı protein kaynağı olabileceğini göstermiştir. Yonca, esansiyel amino asitler, mineraller, vitaminler ve diyet lifi dahil olmak üzere değerli besinler açısından zengindir. Ek olarak, yonca proteinleri dengeli bir amino asit bileşimi içerir ve çok çeşitli gıda formülasyonlarında kullanılabilen sıvı tutma, emülsifiye etme, köpürtme ve jelleştirme özellikleri dahil olmak üzere arzu edilen tekno-fonksiyonel özelliklere sahiptir. Yonca ayrıca

antioksidan özellikleriyle bağlantılı olan diyabet, ateroskleroz ve hiperkolesterolemi gibi bazı bozuklukların sınırlandırılmasında da yararlı olabilir. Ancak yoncanın insan diyetinde bir protein kaynağı olarak yaygın şekilde uygulanması, antibeslenme faktörlerinin varlığı, tohumlarının kahverengi oluşu ve değişken fonksiyonel performansı dahil olmak üzere bir dizi nedenden dolayı şu anda sınırlıdır (Hadidi et al.2023).

Yonca, genellikle yüksek kaliteli yem [kuru madde de ham protein yaklaşık 192 g kg⁻¹ ve kuru maddede toplam sindirilebilir besin maddelerinin yaklaşık 564 g kg⁻¹] üretmekte ve süt ineklerini beslemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yonca, olgunlaştıkça hücre duvarı kalınlaşır ve sindirilebilirlik azalır. Bunun nedeni, bitki hücre duvarlarında yapısal bir role sahip olan ancak rumen mikropları tarafından sindirilemeyen fenilpropan kalıntılarına dayalı karmaşık bir polimer olan lignin konsantrasyonundaki artıştır. Olgunlaşma sırasında yapraklara kıyasla gövdelerde lignifikasyon daha belirgin olduğundan, gövdelerde bulunan nötr deterjan lifleri (NDF) yapraklardakilere kıyasla daha az sindirilebilir. Yoncanın sindirilebilirliği gövde hücre duvarındaki lignin miktarındaki artışa bağlı olarak düşer. Yoncadaki, lif konsantrasyonu ve sindirilebilirlik, genetik varyasyondan etkilendiği için ıslah çalışmaları daha yüksek sindirilebilirliğe sahip yeni çeşitlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Sindirilebilirliği iyileştirmenin yolları arasında, en az sindirilebilir lif olan ligninin konsantrasyonunu azaltmak veya pektinden oluşan nötr deterjanda çözünen liflerin konsantrasyonunu artırmak yer almaktadır (Boucher et al 2023).

Barnes et al. (1995), yüksek mineral maddeye sahip olan yoncanın en az 10 farklı vitamin içerdiğini ve bunlar içerisinde özellikle A vitamini kaynağı olduğunu saptamıştır. Yine birçok tahıllara ve yağlı tohumlu bitkilere göre birim alandan daha fazla protein ürettiğini ve yüksek derecede kurağa dayanıklı bir bitki olduğunu belirtmiştir.

Yonca, dünya çapında değişken yağış ve toprak verimliliğine sahip çok çeşitli ortam ve iklim koşullarında yetiştirilmektedir. Toprağın derinliklerindeki neme ve besin maddelerine erişmesine olanak tanıyan ve kuraklığa tolerans sağlayan, derin bir kazık köke sahip, son derece besleyici çok yıllık bir baklagildir (Humphries et al, 2021).

Dünyada yaklaşık 32 milyon hektar alanda yıllık olarak yaklaşık 211 milyon ton yonca, saman, kuru ot, silaj ve mera için yetiştirilmektedir (Acharya ve ark., 2020). Yonca, kurak ve yarı kurak bölgelere özgü çok yıllık bir bitkidir ve su eksikliği stresi dönemlerinde bile gelişmeye devam eden derin bir kök sistemine sahiptir, bu da hafif kuraklık dönemleriyle başa çıkmasına olanak tanır. Yine de, su kısıtlı koşullar altında yem üretimi sıklıkla azalır. Küresel ısınmaya ilişkin mevcut tahminler ve hayvansal bazlı ürünlere yönelik artan talep göz önüne alındığında, bu tür bölgeler için yonca kritik önem taşır (Hayes ve ark., 2010). Nem stresine maruz kalan yoncadaki fizyolojik ve morfolojik değişiklikler sonuçta yem verimini azaltır. Birçok değişiklik fotosentezdeki dramatik azalmadan kaynaklanmaktadır. Morfolojik değişiklikler yaprak boyutunun, gövde sayısının, gövde çapının ve gövde uzunluğunun azalmasını içerir. Nem stresi altında yapraklar gölgeliğin alt kısımlarından başlayarak yaşlanır. Topraktaki nem eksikliği yoncanın olgunlaşmasını geciktirir, yem verimini azaltır ancak yem kalitesini

arttırabilir (Goplen ve Sheaffer 2024).

Kuraklık, çimlenmeyi engelleyerek ve küçük kök sistemlerine sahip çimlenmiş fideleri strese sokarak yonca tesisini etkiler. Kuru toprağa ekilen tohumlar, yeterli nem mevcut olana kadar canlı kalır ve yağmur yağdığında çimlenebilir. Ancak, çimlenen ve kök çıkışına başlayan tohumlar, yeterli nem mevcut değilse ölür. Fide çıkış yapıp, ilk üç yapraklı yaprak aşamasına ulaşsa bile, yetersiz kök sistemi nedeniyle kuraklığa karşı çok az toleransı vardır. Yoncanın uzun süreli toprak nem eksikliğine dayanabileceği büyüme aşaması henüz belirlenmemiştir, ancak 8 haftalık bitkilerin iyi gelişmiş bir taç ve güçlü gövdeye sahip olması nedeniyle kuraklıktan zarar görme riski en aza iner. Kuraklık ve yüksek sıcaklıklar yerleşik yoncayı öldürmez, ancak dormant durumda kalmasına neden olur. Yonca kuraklığın başlangıcında, dormant halde kalabilmek için taçta depoladığı karbonhidrat miktarını artırır. Su mevcut olduğunda taçtaki tomurcuklardan hızla yeniden büyür. Yonca kuraklığa tahammüllüdür, ancak dayanıklı değildir. Kuraklık stresi altında olan ve hasada hazır olan yonca tarlaları biçilmelidir. Bunun nedeni yaprak kaybı potansiyelidir. Yonca, toprağın derinliklerinden su çekmesini sağlayan geniş bir kök sistemine sahiptir (Şekil 1). Yonca kökleri çoğunlukla toprağın en üst 1.22 m sinde yoğunlaşır, ancak kökleri 4.9 m derinliğe de ulaşabilir. Toprak nem eksikliğine yanıt olarak, yonca kök kütlesini ve uzunluğunu artırır (Goplen ve Sheaffer 2024).



Şekil 1. Mısır, soya fasulyesi ve yoncanın kök uzunluğu, yapısı ve yonca parseli

Kaynak: Fernandez ve ark., 2019

Uzun büyüme mevsimi, yüksek gövde yoğunluğu ve yoğun kanopisi nedeniyle yoncanın su kullanım oranı yüksektir. Yonca günlük 2,5 mm-7,6 mm su kullanır. Su kullanımı, ortama bağlı olarak ton yem başına 101,6 mm -177.8 mm arasında değişir. Günlük su kullanımı bitki büyüme aşaması ve hava sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çevresel faktörlerden etkilenir. Hasattan sonra su kullanımı azalır ve güneş enerjisi ve hava sıcaklıklarının daha düşük olduğu ilkbahar ve sonbaharda daha da azalır (Goplen ve Sheaffer 2024).

Genel olarak su kullanımı ile yem verimi arasında doğrusal bir ilişki vardır, ancak bu ilişkinin yönleri diğer çevresel faktörlere bağlı olarak biraz değişir (Goplen ve Sheaffer 2024). Yoncanın su ihtiyacı,

başlıca tahıl ürünleriyle karşılaştırıldığında nispeten yüksektir çünkü uzun bir büyüme mevsimi, derin kök sistemi ve yoğun bitki örtüsüne sahiptir. Bu nedenle, büyüme mevsiminde düşen yağış miktarı ve toprağın su tutma kapasitesi, ilave sulama olmaksızın yapılan yonca yetiştiriciliğinde önemli etkiye sahiptir (Jia ve ark., 2006; Jun ve ark., 2014).

Verimin yanı sıra, yetersiz toprak nemi besin maddelerinin bulunabilirliğini sınırlayabilir, besinlerin bitkiler tarafından alınımını ve kullanımını bozabilir, protein içeriğini azaltabilir, hücre duvarı kalınlığını ve lignifikasyonu artırabilir ve dolayısıyla yonca yeminin kalite özelliklerini doğrudan etkileyebilir (Liu ve ark., 2018). Yoncanın . etkili kök derinliği 1,2-1,8 m dir. Ancak, kendini yenileme özelliğine sahip, sulu koşullarda 8-10 m, hatta nadiren 39-40 m derinliklere kadar inebilen kazık kök sistemine sahiptir (Uslu ve Kaya 2021). Bu özellik bitkinin daha derin toprak katmanlarındaki suya ve besinlere erişmesini sağlayarak kuraklığa karşı toleransının artmasına katkı sağlar. Yonca sınırlı su koşulları altında iyi bir potansiyel su verimliliğine ($34 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) sahiptir (Fink ve ark., 2022). Derin kök sistemi ayrıca sıkıştırılmış toprağı parçalayarak toprak yapısını ve infiltrasyon oranlarını iyileştirmeye yardımcı olur (Lacefield ve ark., 2009).

Yonca üretimi için gereken su miktarı sıcaklığın, rüzgarın, nemin, ışık miktarı ve yoğunluğunun durumuna göre değişkenlik gösterebilir. Yoncanın sulama gereksinimi yağış miktarına ve ürünün yetiştirildiği toprağın su tutma kapasitesine göre belirlenir. Yaz ortasında mevcut toprak nemi %50'nin altına düştüğünde bitki strese girebilir. Yonca bitkileri kurak stresine karşı dormant hale geçme yeteneğine sahiptir.

Bitkide, yeterli karbonhidrat rezervi varsa, kurak dönem bitene kadar hayatta kalır (Shewmaker ve ark., 2011).

Yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde, su eksikliği stresi altında *Medicago* bitkilerinin bitki biyokütle üretiminin azalmasının %12 - %80 arasında değişebileceği görülmüştür. Tahıllar, baklagillere nazaran kuraklığa daha dayanıklıdır. Genel olarak bitkilerin kuraklığa verdiği tepkiler, çeşitlere, gelişim aşamasına, stresin şiddetine ve süresine göre değişmektedir (Inès ve ark., 2022).

Mediklerde kuraklık toleransının, fotosentetik aktiviteyi sürdürme yeteneği, kök gelişiminin optimizasyonu, su kullanım verimliliği, ozmotik potansiyelin azaltılması yoluyla ozmoregülasyon kapasitesi, mineral veya organik çözünen maddelerin birikimi ve karbonhidrat metabolizmasının çözünür şekerlerin birikimine doğru modifikasyonu gibi özelliklerle ilişkili olduğu bulunmuştur. Su eksikliği stresi, bazı amino asitlerin birikimi ve malondialdehit konsantrasyonlarının azalması yoluyla bir lipid ve protein metabolizması adaptasyonuna neden olur. üreme ve genetik mühendisliği için önerilen hedef özellikler, göreceli su içeriği, su kullanım verimliliği ve kök gelişimi gibi su ilişkileriyle ilgilidir (Ines ve ark., 2022). Kuraklık, tuzluluk, ağır metaller ve beslenme bozuklukları gibi çevresel kısıtlamalar bitki verimliliğini sınırlar (Inès ve ark., 2022).

Sulama suyunun daha iyi yönetilmesi yoluyla aşırı sulamayı da önlemek gerekir. Sulama planlanması, ne zaman sulama yapılacağını ve ne kadar uygulanacağını belirlemeye yardımcı olur. Biçim programı, sulama planlamasındaki en büyük kısıtlamadır. Toprak yüzeyi, biçimden

birkaç gün önce kuru olmalıdır çünkü hasatın ardından balyalama bir hafta sürebilir. Bu, biçimler arasında sulama için yaklaşık 2 haftalık bir aralık bırakır (Shewmaker ve ark., 2011). Uygulanan su miktarına karşılık birim alandan elde edilen yem verimi genellikle ilk biçimde yılın diğer zamanlarındaki biçimlerine göre daha yüksektir. Ayrıca biçim sayısı da ilk biçim ve diğer biçimler arasındaki verimi etkilemektedir. 4 biçimli bir sistemde, ilk biçim genellikle yıllık toplam yem veriminin yaklaşık %35-38'ini oluştururken, 5 biçimli bir sistemde ilk biçim, yıllık toplam yem veriminin yaklaşık %27'sine karşılık gelmektedir (Fransen ve ark., 2001).

Nispeten hassas ve kırılğan bir ekosisteme sahip geniş alanlarda, özellikle yoncanın dahil olduğu otlatma amaçlı yapay mera geliştirme, geleneksel kuru ot üretimine kıyasla yem verimi ve besin kalitesi açısından muazzam avantajlara sahiptir. Otlatma amaçlı suni mera geliştirme, ot hasadı, paketleme ve nakliye ile ilişkili maliyeti düşürebilir, hayvan gübresinin doğrudan mera için gübre etkisi yapması gübreleme masraflarını azaltabilir. Ayrıca su ve toprak kaynaklarını koruma ekolojik işlevine de sahiptir. (Wang ve Zhang, 2023).

Buğdaygil bitkilerinden farklı olarak yoncada büyüme döngüsü genellikle erken çiçeklenme aşamasında sonlanır. Yaz ortası sulama stratejisiyle, erken sezonun nispeten yüksek verimi korunabilir. Yoncanın su ihtiyacı büyüme evrelerine göre farklılık gösterir. Bitkinin su açığına tepkisi dallanma aşamasında en hassastır ve su açığının verim üzerindeki etkisi bu aşamada en önemlidir. Kolay kullanımı, düşük maliyeti ve çiftçilerin geleneksel alışkanlıkları nedeniyle salma (vahşi) sulama hala ana sulama sistemlerinden biridir. Birçok çalışma, yer altı

damla sulama yönteminin sulama akışını, derin sızıntıyı ve toprak buharlaşmasını azaltabileceğini veya ortadan kaldıracabileceğini göstermiştir. Giderek daha fazla kısıtlanan su temini, çiftçileri tarımsal sulamada bazı su tasarrufu sağlayan sistemler kullanmaya zorlamaktadır (Liu ve ark., 2021).

Hayes ve ark., (2010), çok yıllık mera bitkileri ile ılıman ekim bölgesi ortamlarında yonca (*Medicago sativa* L.), phalaris (*Phalaris aquatica* L.), hindiba (*Cichorium intybus* L.), Ehrhata calcycina, otlatma bromu (*Bromus stamineus*), *Plantago lanceolata* L., Rodos otu (*Chloris gayana* Kunth), uzun çayır otu (*Festuca arundinacea* syn. *Lolium arundinaceum*) ve domuz ayrığı (*Dactylis glomerata* L.) bitkilerinin verimi, kalıcılığı ve ot kalitesi, Avustralya'nın Güney Yeni Güney Galler (NSW) ekim bölgesindeki iki zıt ortamda değerlendirilmiştir. Yoncanın, değerlendirilen en üretken tür olduğu ve bir sonraki en üretken tür olan *Phalaris aquatica*'dan %54-85 daha fazla ot ürettiği belirlenmiştir. Yonca ayrıca, deneme süresi boyunca diğer tüm türlerden daha yüksek kalıcılığa sahip tür olmuştur ve ortalama olarak, tüm türler içerisinde yaprak ve gövdesinde en yüksek ham proteine (%22.3) sahip tür olmuştur. Hindiba (*Cichorium intybus*), diğer türlerle karşılaştırıldığında en yüksek kuru madde sindirilebilirliğine (%76.7) ve kül içeriğine (%15.1); en düşük nötr deterjan lifi (%35.4) ve asit deterjan lif içeriğine (%21.8) sahip olmuştur.

Kurak şartlarda sapların büyümesi, yaprak alanı/yaprak boyutu ve yaprak büyüme hızının düşüşünden çok daha fazla azalır. Bu nedenle, yaprak-gövde oranı nem stresi altında daha yüksektir. Gövde azot yüzdesi artarken, yaprak azot yüzdesi azalır, dolayısıyla tüm bitki azotu

(CP) azalabilir, ancak etkisi nem stresinin şiddetine/zamanlamasına göre değişir. NDF genel olarak azalır, ancak etkisi nem stresinin şiddetine/zamanlamasına göre değişir. Bu nedenle, kuraklık stresi altındaki tarlalardan gelen yem genellikle daha düşük verimlidir ancak daha yüksek yem kalitesine sahiptir. Bu, kuraklık stresi altındaki buğdaygil yem bitkileri tarlalarının tam tersidir (Undersander 2013).

Bitkilerin kuraklığa maruz kalması, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi ile antioksidan savunma arasındaki dengenin kaybolmasına yol açar. Gerçekten de, ROS lar proteinler, lipitler ve deoksiribonükleik asitle reaksiyona girerek oksidatif hasara yol açabilir ve dolayısıyla hücrelerin normal işlevlerini bozabilir. Membran lipit peroksidasyonunun bir son ürünü olan malondialdehit (MDA), çeşitli abiyotik stres koşulları altında serbest radikal üretiminin bir göstergesi olarak yaygın olarak kullanılmıştır. Genel olarak, su stresi altında hücre zarlarının bütünlüğünün ve kararlılığının korunmasının bitkilerde kuraklık toleransının önemli bir bileşeni olduğu kabul edilir. Bitkilerin kuraklık stresine dayanmasını sağlayan mekanizmalar arasında görülen, ozmotik ayarlama, bitki ozmo-toleransının temel bir bileşeni olarak kabul edilir. Ozmotik ayarlama, hücrenin ozmotik potansiyelini azaltmasına izin verir, bu da sonuç olarak hücreye su girişi eğiliminin artmasına ve organik ve/veya mineral çözünen maddelerin birikmesi nedeniyle turgorun korunmasına yol açar. Turgor ayarlaması, su eksikliği koşullarında kısmi stoma açıklığının ve fotosentetik üretimin daha uzun süre korunmasını sağlar. Prolin, glisin betain gibi uyumlu çözünenler düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerdir, oldukça çözünürdür ve genellikle yüksek sitozolik konsantrasyonda bile toksik değildir (Inès

ve ark., 2022).

Ozmotik ayarlamadaki rollerine ek olarak, su alımını ve tutulmasını kolaylaştırarak uyumlu çözünen maddeler, reaktif oksijen türlerinin detoksifikasyonu ve membranların ve enzimlerin ve proteinlerin doğal yapılarının stabilizasyonu yoluyla oksidatif stresten muzdarip bitkilerin korunması için faydalıdır. Bu bağlamda, ozmotik stres tepkilerindeki değişkenliğin araştırılması, yalnızca bazı dayanıklı çeşitlerin belirlenmesine değil, aynı zamanda ozmotik stres toleransının genetik olarak iyileştirilmesi için yararlı kriterlerin belirlenmesine de olanak sağlayacaktır. Yonca çeşitleri arasında yaprak kütikül mumu içeriği ile kuraklığa dayanıklılık arasında doğrudan bir ilişki bildirilmemiştir. Kütikül mumunun alkan (parafin) içeriğindeki artış, su stresi altındaki yoncanın kuraklığa dayanıklılığını artırmak için daha önemli olabileceği bildirilmiştir (Inès ve ark., 2022).

KAYNAKÇA

- Acharya, J. P., Lopez, Y., Gouveia, B. T., de Bem Oliveira, I., Resende Jr, M. F., Muñoz, P. R., & Rios, E. F. (2020). Breeding alfalfa (*Medicago sativa* L.) adapted to subtropical agroecosystems. *Agronomy*, 10(5), 742.
- Baral, R., Lollato, R. P., Bhandari, K., & Min, D. (2022). Yield gap analysis of rainfed alfalfa in the United States. *Frontiers in plant science*, 13, 931403.
- Barnes, R.F., D.A. Miller, C.J. Nelson. 1995. Forages. Volume I: An Introduction to Grassland Agriculture. Iowa State University Pres, Ames, Iowa, USA.
- Boucher M-S, Tremblay G. F., Seguin P., Thériault M., Charbonneau É., Laroche J-P., Bertrand A., Claessens A., Bélanger G., & Halde C (2023). Productivity, nutritive value, and profitability of high-digestibility alfalfa cultivars harvested at two stages of development in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science*. 103(6): 572-588. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0025>
- Chapman, R., & Asseng, S. (2001). An analysis of the frequency and timing of false break events in the Mediterranean region of Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52(3), 367-376.
- Fernandez, A.L., Sheaffer, Tautges, C.C., N.E., Putnam, D.H., & M.C. Hunter. (2019). Alfalfa, wildlife, and the environment (2nd ed.). National alfalfa and forage alliance, St. Paul, MN
- Fink, K. P., Grassini, P., Rocateli, A., Bastos, L. M., Kastens, J., Ryan, L. P., ... & Lollato, R. P. (2022). Alfalfa water productivity and yield gaps in the US central Great Plains. *Field Crops Research*, 289, 108728.
- Fransen, S., Kugler, J., Evans, D. W., & Ford, W. P. (2001). Alfalfa irrigation management. Drought Advisory, EM4824, Washington State University Cooperative Extension.
- Goplen, J., & Sheaffer, C. (2024). Alfalfa during drought. UMN Extension <https://extension.umn.edu/growing-forages/alfalfa-during-drought#moisture-stress-reduces-yield-2945860>.
- Hadidi, M., Orellana Palacios, J. C., McClements, D. J., Mahfouzi, M., & Moreno, A. (2023). Alfalfa as a sustainable source of plant-based food proteins Trends in Food Science & Technology. Vol.135, Pages 202-214
- Hayes, R. C., Dear, B. S., Li, G. D., Virgona, J. M., Conyers, M. K., Hackney, B. F., & Tidd, J. (2010). Perennial pastures for recharge control in temperate drought-prone environments. Part 1: productivity, persistence and herbage quality of key species. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(4), 283-302.

- Inès S., Talbi O., Nasreddine Y., Rouached A., Gharred J., Jdey A., Hanana M., & Abdelly, C. (2022) Drought tolerance traits in *Medicago* species: A review, *Arid Land Research and Management*, 36(1), 67-83, DOI: 10.1080/15324982.2021.1936289
- Jia, Y., Li, F. M., Wang, X. L., & Yang, S. M. (2006). Soil water and alfalfa yields as affected by alternating ridges and furrows in rainfall harvest in a semiarid environment. *Field Crops Research*, 97(2-3), 167-175.
- Jing, F.; Shi, S.; A, Y.; Guan, J.; Lu, B.; Wu, B.; Wang, W.; Ma, R. ., & Nan, P. (2023). Analysis of phenotypic and physiological characteristics of plant height difference in alfalfa. *Agronomy* 2023, 13, 1744. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071744>
- Jun, F., Yu, G., Quanjiu, W., Malhi, S. S., & Yangyang, L. (2014). Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China. *Agricultural Water Management*, 138, 10-16.
- Karaköy T., & Saraç H (2018). Sivas Ekolojik Koşullarında Yetiştirilen Yonca Çeşitlerinin Bazı Agronomik ve Kalite Özelliklerinin İncelenmesi . *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi* 5(4): 620–627, 2018 <https://doi.org/10.30910/turkjans.471373>
- Lacefield, G., Ball, D., Hancock, D., Andrae, J., & Smith, R. (2009). Growing alfalfa in the South. St. Paul, MN: National Alfalfa and Forage Alliance.
- Liu, M., Wang, Z., Mu, L., Xu, R., & Yang, H. (2021). Effect of regulated deficit irrigation on alfalfa performance under two irrigation systems in the inland arid area of midwestern China. *Agricultural Water Management*, 248, 106764.
- Liu, Y., Wu, Q., Ge, G., Han, G., & Jia, Y. (2018). Influence of drought stress on alfalfa yields and nutritional composition. *BMC plant biology*, 18, 1-9.
- Pecetti, L., & Piano, E. (2002). Variation of morphological and adaptive traits in subterranean clover populations from Sardinia (Italy). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 49(2), 189-197.
- Shewmaker, G. E., Allen, R. G., & Neibling, W. H. (2011). Alfalfa irrigation and drought. University of Idaho, College of Agricultural and Life Sciences: Moscow, ID, USA.
- Suwignyo, B., Aristia, Rini, E., & Helmiyati S. (2022). The profile of tropical alfalfa in Indonesia: A review. *Saudi J Biol Sci.* 2023 Jan;30(1):103504. doi: 10.1016/j.sjbs.2022.103504. Epub 2022 Nov 15. PMID: 36452943; PMCID: PMC9703797.
- Tava, A., Biazzi, E., Ronga, D., Pecetti, L., & Avato, P. (2022). Biologically active compounds from forage plants. *Phytochemistry Reviews*, 1-31.

- Tucak, M.; Horvat, D.; Čupić, T.; Krizmanić, G.; Ravlić, M. (2023). Assessment of Alfalfa Populations for Forage Productivity and Seed Yield Potential under a Multi-Year Field Trial. *Agronomy* 2023, 13, 349. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020349>
- Undersander, D. (2013). Effect of drought on alfalfa and managing for next growing season. Team Forage. Division of Extension (in University of Wisconsin-Madison). <https://fyi.extension.wisc.edu/forage/effect-of-drought-on-alfalfa-and-managing-for-next-growing-season/> (Accessed: August 22, 2024).
- Uslu, Ö.S., & Kaya., M. (2021). Yonca (*Medicago sativa* L.) Yem bitkilerinin kraliçesi. Iksad Yayınevi. Ankara / Türkiye. ISBN: 978-625-7636-60-5
- Wang, T., & Zhang, W. H. (2023). Priorities for the development of alfalfa pasture in northern China. *Fundamental Research*, 3(2), 225-228.
- Zhang, K.; Zhai, C.; Li, Y.; Li, Y.; Qu, H.; & Shen, Y (2023). Effect of nitrogen application and cutting frequency on the yield and forage quality of alfalfa in seasonal cultivation. *Agriculture*, 13, 1063. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051063>

BÖLÜM 11

GAZAL BOYNUZU (*Lotus corniculatus*) & AK ÜÇGÜL (*Trifolium repens*) & ÇAYIR ÜÇGÜLÜ (*Trifolium pratense*)

Doç. Dr. Nizamettin TURAN¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759808>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Siirt, Türkiye.
nturan49@siirt.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-4026-6781

1. Gazal boynuzu (*Lotus corniculatus*)

Akdeniz Havzası ve Kuzey Afrika kökenli olan *Lotus corniculatus*, Güney Avrupa, Kuzey ve Güney Amerika ve Yeni Zelanda'da yaygın olarak yetiştirilen çok yıllık bir baklagil yem bitkisidir. Saman için mono ürün olarak veya otlatma için kullanıldığında buğdaygillerle birlikte yetiştirilebilir. Ayrıca toprak ıslahı ve erozyon kontrolü için de kullanılması mümkündür. Özellikle marjinal topraklarda ve geniş otlak yönetim sistemlerinde, en popüler ılıman iklim yem baklagilleri olan yonca (*Medicago sativa*) ve ak üçgülünden (*Trifolium repens*) daha iyi performans göstermektedir. Çok yıllık bir baklagil yem bitkisi türü olan Gazal boynuzu (*Lotus corniculatus*) aynı zamanda kuraklık koşulları altında büyümeye oldukça adapte olmuştur (Inostroza ve ark., 2015). Ancak su eksikliği yine de verimini azaltabilmektedir (Wang ve ark., 2022).



Şekil 1. Gazal boynuzu (*Lotus corniculatus*). (Foto: François Lebas)

Kaynak: Feedipedia, France, Toulouse, 2014

Azotu sabitleyerek toprak verimliliğini artıran bir baklagil bitkisi olan *Lotus corniculatus* 'un geniş kök sistemi toprağın daha derinlerinde suya erişmesine olanak sağlar (Morris ve ark., 2021). Gazal boynuzu her ne kadar ılıman-nemli ortamların bir bitkisi olsa da, sahip olduğu büyük genetik çeşitlilik onun kurak bölgeler gibi aşırı ortam koşullarında da yeterince büyüyüp gelişmesini sağlar (Gonzalez-Espindola ve ark., 2024a). Böylece bu bitkinin kuraklığa dayanıklı olduğu düşünülse de dayanıklılığına neden olan mekanizmalar henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Kostopoulou ve ark., 2016). *Lotus corniculatus* su kıtlığı, besin eksiklikleri, düşük sıcaklıklar gibi farklı ortamlara uyum sağlama kapasitesi yüksek olup, asidik toprakların yanı sıra yüksek seviyelerde alüminyum ve manganeze toleransı iyi olan bir yem bitkisidir (Sujkowska-Rybkowska ve ark., 2020). *Lotus corniculatus* türleri, Yonca (*Medicago sativa*) veya ak üçgül (*Trifolium repens*) ile karşılaştırılabilir bir verim performansına sahiptir (Marley ve ark., 2006). Gazal boynuzunun büyümesi, Yeni Zelanda ve Uruguay gibi kurak yazlara ve belirgin mevsimselliğe sahip ülkelerde başarılı olup, buralarda yem bitkisi olarak ve kuraklıktan kaynaklanan su açığına tolerans açısından iyi bir yem bitkisi özelliği taşımaktadır (Xolocotzi-Acoltzi ve ark., 2024).

Lotus corniculatus'un kuraklık koşulları altındaki genel olarak yem kalitesi, daha yüksek yaprak/gövde oranı ve geciken olgunlaşma nedeniyle *Medicago sativa*'ya göre daha iyidir. Ayrıca, yapraklarda bulunan yoğunlaştırılmış tanenler; bitki proteinlerini işkembede bozulmadan korur, geviş getiren hayvanlarda şişkinliği önler ve antihelmintik ilaçlar kullanmadan iç parazit enfeksiyonlarının

kontrolüne olanak tanır (Parissi ve ark., 2016). Doğrudan çiftlik hayvanları tarafından otlatıldığında şişkinlik yapmaması nedeniyle tarımsal açıdan önemli bir tür olarak kabul edilir. Ayrıca yapraklarının protein açısından zengin olması ve besi hayvanları için çok lezzetli olması nedeniyle besin değeri oldukça yüksektir.



Şekil 2. Tipik otlak-orman habitat ortamında *Lotus corniculatus*'un çiçek açması. (Foto: Carmen Burkett)

Kaynak: Chisausky ve ark., 2020

Çalışmalar; *Lotus corniculatus* türünün büyüme hızını, yaprak alanını ve biyokütle tahsisini değiştirerek kuraklığa tepki verme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Neal ve ark. (2011),

Avustralya'nın New South Wales bölgesindeki tarla koşullarında 15 farklı çok yıllık yem türünün su kullanım verimliliği (water-use efficiency, WUE)'ni tanımlamış ve *Lotus corniculatus*'un, kısıtlayıcı toprak nemi koşulları altında ak üçgül ve yoncadan daha yüksek bir WUE'ye ulaştığını göstermiştir. Borsani ve ark. (2001) tarafından, kuraklığın *Lotus corniculatus* üzerindeki etkilerini moleküler düzeyde incelenmiş ve kuraklığın *Lotus corniculatus* yapraklarında oksidatif strese neden olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak 4 saatlik kuraklık uygulamasından sonra bitkilerde antioksidan koruyucu olarak toplam süperoksit dismutaz aktivitesi artmıştır. Bu çalışma her ne kadar ilginç olsa da kapsamı sınırlıdır, çünkü aşırı su stresinin kısa süreli bir uygulamasını temsil etmektedir. Bu durum sahada meydana gelmediği gibi ileri bir gelişim aşamasında stresin sonuçlarına maruz kalan çok yıllık yem bitkisi türlerinin dinamiklerini de temsil etmez ve aynı zamanda yeniden büyüme kapasitesinin bitkilerin kuraklığa alışmasında temel bir rol oynadığı biçim ve otlatma işlemlerine de maruz kalırlar.

Lotus corniculatus'un çoğu ekotipi ve çeşidi, nemli ılıman iklime sahip bölgelerde yetiştirilmektedir (Gonzalez-Espíndola ve ark., 2024b). Akdeniz tipi iklimlerde kurak mevsimlerde yem üretimi, hayvansal üretim sistemlerindeki yem açığının azaltılması açısından çok değerli bir yem bitkisi olup (Real ve ark. 2011), asit ve kuraklığa dayanıklı çok yıllık bir baklagil yem bitkisi olduğundan bu boşluğu doldurma potansiyeline sahip bir bitkidir (Ayres ve ark. 2006b). *Lotus corniculatus*, yaz gün dönümünde fotoperiyodun >14.5 saat olduğu yerlerde en iyi çiçek açan, uzun gün bitkisidir. Bu fotoperiyot 37°'den büyük enlemlerde bulunur ve *Lotus corniculatus*'un ABD, Kanada,

Avrupa ve Yeni Zelanda'daki ana üretim alanlarına karşılık gelir. Güney Amerika'nın Campos bölgesi (Güney Brezilya, Uruguay ve Doğu Arjantin), *Lotus corniculatus*'un 28-36°S enlemlerinde yem türü olarak kullanıldığı birkaç istisnadan biridir (Real ve ark. 2012).

Avustralya'da *Lotus corniculatus*'un ticari uygulamaları mera denemeleriyle sınırlıdır ve 'Grasslands Goldie' ticari olarak mevcut olan ana çeşittir. Grasslands Goldie, 1973 ile 1976 yılları arasında Yeni Zelanda'da Kuzey ve Güney Adalarındaki (36-45°G enlemleri) aralıklı bitki seçimlerinden geliştirilmiştir. Grasslands Goldie'yi geliştirmek için en verimli ve dayanıklı bitkilerden oluşan bir polikros yapılmıştır. Ayres ve ark. (2006b), Grassland Goldie'nin, yıllık ortalama yağışın 650-1000 mm olduğu Avustralya'nın kuzeyindeki Yeni Güney Galler kalıcı mera bölgesinin yaylaları ve yamaçlarındaki düşük verimli, asidik topraklara tarımsal uyumunu göstermiştir. Ancak bu enlemlerdeki zayıf çiçeklenme nedeniyle Grasslands Goldie'nin başarılı üretimi sağlanamamıştır ve gelişmiş çiçeklenme kapasitesine sahip bir çeşit ihtiyacı doğmuştur. Yeni bir ıslah çalışması ile Phoenix, Venture ve Matador çeşitleri geliştirilmiştir (Ayres ve ark. 2008). Bu çeşitler, Doğu Avustralya'nın yüksek yağışlı, ılıman ve çok yıllık mera bölgesiyle eşleşen yaz ve kış yağışlarının olduğu bölgelere uyum sağlamıştır (Ayres ve ark. 2006a).

Akdeniz tipi iklimlere uyum sağlamak amacıyla yapılan ıslah çalışmalarıyla aşağıdaki niteliklere sahip yeni çeşitler geliştirilmiştir:

- Kurak mevsimlerde verimli ve erken çiçeklenmeyi sağlamak;
- Kurak mevsimlerde üretime devam etmek ve hayatta kalmak için kuraklığa dayanıklılığı sağlamak (yılda minimum yağış 600

mm);

- Yoncaya uygun olmayan asit topraklarda büyümeye toleransı sağlamak.

Akdeniz tipi iklimlerde yaz kuraklığının başlamasından önce erken ilkbaharda çiçek açma yeteneğinin kazandırılması önemli bir karakterdir. Erken çiçeklenme, bitkilerin çiçeklenme sırasında kuraklıktan kaçmalarını ve tohum vermelerini sağlar, bu da otlakların devamlılığı için gerekli bir tohum bankasının kurulması demektir (Ayres ve ark. 2007).

Kısa süreli kuraklık 6 aydan kısa süre, uzun süreli kuraklık ise 6 aydan uzun süre olarak tanımlanmaktadır (Dziegielewski, 2003). Sanchez ve ark. (2012) tarafından *Lotus* cinsinin altı türünün (*Lotus japonicus*, *Lotus filicaulis*, *Lotus burtii*, *Lotus corniculatus*, *Lotus tenuis* ve *Lotus uliginosus*) temsili genotiplerinde uzun süreli su yoksunluğundan kaynaklanan metabolik değişikliklere ilişkin kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu türler, düşük verimli topraklarda ve farklı olumsuz ortamlarda büyüme yetenekleri bakımından birbirinden farklılık göstermiştir. Araştırmacılar ilk olarak, model tür *Lotus japonicus* ekotipi Gifu'yu kademeli su stresine tabi tutmuşlar ve stres dozuyla ilişkili metabolik değişiklikleri belirlemişlerdir. Ardından, altı *Lotus* türünü de uzun süreli öldürücü olmayan kuraklığa tabi tutarak, uyum sırasında metabolik fenotipleri karşılaştırmışlardır. Denemeler, sürekli sulama ile kontrol ve 1, 2 veya 3 haftalık öldürücü olmayan kuraklık stresi olmak üzere dört farklı uygulama setine bölünmüş bitkilerden oluşmuştur. *Lotus corniculatus* ve *Lotus tenuis*, *Lotus uliginosus* ile karşılaştırıldığında orta derecede kuraklığa dayanıklı olduğu

saptanmıştır. Kuraklık, *Lotus uliginosus*'un büyümesini diğer beş türün herhangi birinden daha fazla etkilemiştir. Ancak, aşırı kuraklık stresi altında, *Lotus corniculatus* ve *Lotus tenuis*, *Lotus uliginosus*'tan daha yüksek toprak su içeriğinde solduğu tespit edilmiştir. Bu belirgin tutarsızlık *Lotus corniculatus* ve *Lotus tenuis* yapraklarından daha fazla su kaybıyla açıklanmıştır. *Lotus corniculatus* ve *Lotus tenuis*'in gösterdiği agronomik tolerans, normal tarla koşullarında su kıtlığı altında biyokütle üretimini garanti altına alan, ancak aşırı su stresi koşullarında zararlı hale gelebilen daha az muhafazakar bir su tasarrufu stratejisine yönelik doğal veya üreme eğiliminin bir sonucu olarak görülmüştür.

Georganta ve ark., (2014), Gazal Boynuzunun üç fenolojik aşamasındaki besin değeri üzerinde orta düzeyde su stresinin etkisini görmek için Yunanistan'ın Drama kentinde doğal bir popülasyonun bitkilerine tarla kapasitesine kadar ve tarla kapasitesinin %40'ı olmak üzere iki sulama seviyesi uygulamışlardır. Bitkileri erken vejetatif, çiçeklenme ve meyve oluşumunun başlangıcı olmak üzere üç fenolojik aşamada hasat etmişlerdir. Orta düzeydeki su stresi, lif konsantrasyonunun azalmasına ve sindirilebilirliğin artmasına neden olmuştur. Kuru madde içeriği yalnızca erken vejetatif aşamadaki hasatta azalmıştır. Orta düzeydeki su stresinin *Lotus corniculatus*'un besin değerini hafifçe ve olumlu yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

2. Ak üçgül (*Trifolium repens*)

Sürdürülebilir mahsul-hayvancılık sistemleri, çok yıllık yemlik baklagillerinin daha geniş çapta yetiştirilmesiyle sağlanabilir. Yonca (*Medicago sativa*), çoğu ılıman bölgede çiftlik sistemlerinin ana yem

bitkisidir. Ak üçgül (*Trifolium repens*) ve çayır üçgülü (*Trifolium pratense*) ise belirli bölge çiftlik sistemlerinde baskındır. Hastalık ve zararlı direnci için ıslah ilerlemesi elde edilmiş olmasına rağmen üçgüller, düşük ıslah yatırımı, daha uzun seleksiyon döngüleri, hasat endeksinden yararlanamama ve şiddetli akraba çiftleşme depresyonundan muzdariptir (Annicchiarico ve ark., 2015).

Çok yıllık mükemmel bir baklagil yem bitkisi olan ak üçgül (*Trifolium repens* L.), Güneydoğu Avrupa ve Güney Asya'ya özgü allotetraploid bir bitkidir. Yüksek besinsel, ekolojik, genetik üreme ve tıbbi değerlere sahiptir. Soğuğa, kurağa, çiğnenmeye ve yabancı ot istilasına karşı mükemmel direnç gösterebilir. Bu nedenle ak üçgül Avrupa, Amerika ve Çin'de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Aynı zamanda yüksek karbonhidrat ve protein içeriği ile otçul hayvanlar için de iyi bir lezzete sahiptir ve dünyanın birçok yerinde geviş getiren hayvanlar için yem olarak kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2023). Ayrıca ak üçgül, toprağı nemlendirme etkisi nedeniyle toprak ve su tasarrufu amacıyla çim zemin örtüsü olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ak üçgül, *Gramineae* familyasının yem bitkileriyle karıştırıldığında mükemmel bir büyüme sergiler. Hayvan performansı ve ot üretimi açısından yoğun otlatma sistemlerinde ve otlak ekosistemlerinin istikrarlı gelişmesinde tamamlayıcı önemli bir rol oynamaktadır (Egan ve ark., 2018).



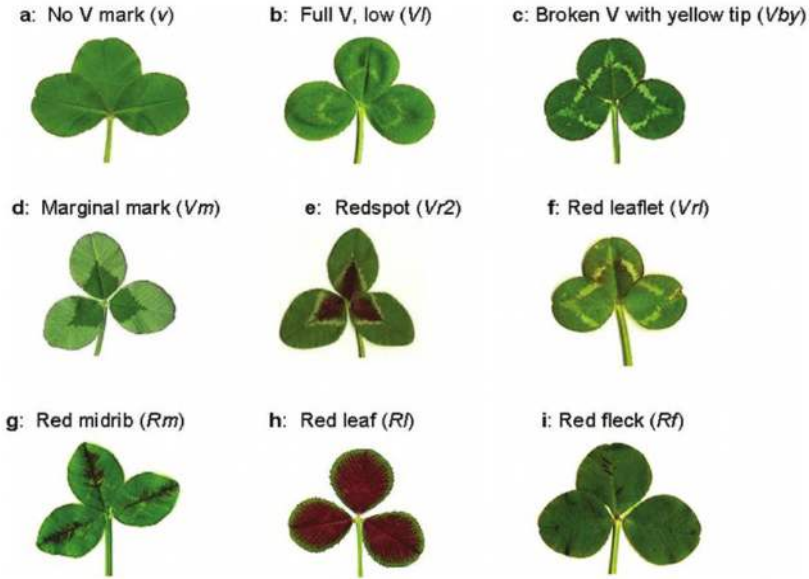
Şekil 3. Ak üçgül (*Trifolium repens* L.). (Foto: Algirdas, 2006)

Kaynak: Wikispecies

Ak üçgül, dünyanın ılıman bölgelerindeki en önemli pastoral baklagildir ve genellikle ryegrass ile birlikte yetiştirilir. Koyun, sığır, geyik gibi hayvanlar için ryegrass ve ak üçgülden oluşan mera karışım alanları oluşturulmuştur. Azot sabitleme yeteneği ve bunun sonucunda sürdürülebilir tarım sistemlerindeki rolü nedeniyle, küresel olarak kırsal sistemlerde bulunması tercih edilen bir bitkidir. Yeni Zelanda, yılda yaklaşık 4.500 ton ak üçgül tohumu ihraç ederek dünya çapında en yüksek ak üçgül ihracat payına (%57.5) sahiptir (Egan ve ark., 2021). Hampton ve ark. (2012), Yeni Zelanda'da 2010 ve 2011 yıllarında sırasıyla 3108 ve 3745 ton ak üçgül tohumu üretildiği belirtilmiştir. Ak üçgül, Yeni Zelanda için ekonomik açıdan önemlidir ve yılda yaklaşık 1.57 milyon ton azot sabitler. Küresel olarak kuraklık stresi, kırsal

sistemlerde ak üçgül performansını sınırlayan başlıca faktörlerden biridir. Kuraklığa dayanıklı ak üçgül çeşitlerinin ıslahında çok az başarı elde edilmiş olsa da, farklı otlatma yönetimi şemaları bitkilerin kuraklık koşulları altında korunmasına yardımcı olabilir (Egan ve ark., 2021).

Ak üçgül (*Trifolium repens*) ve çayır üçgülünün (*Trifolium pratense*) yem kalitesi mükemmel olan baklagil yem bitkileri arasında yer alır. Uzun boylu ve kısa ömürlü çok yıllık bir bitki olan çayır üçgülü, saman, mera, silaj, yeşil ot, kuru ot ve toprak iyileştirme ve yaban hayatı habitatları için kullanılır. Öte yandan, yavaş büyüyen çok yıllık bir bitki olan ak üçgül, otlatma için en uygun baklagil yem bitkisidir. Ak üçgülün yetiştirilmesi kolay ve verimi daha düşük olmasına rağmen çayır üçgülüne göre kuraklığa daha dayanıklıdır. Ak üçgülün küçük yapraklı, orta yapraklı (orta) ve ladino gibi büyük yapraklı farklı türleri vardır. Küçük yapraklı türlerin verimi daha düşüktür, fakat orta ve ladino türlerine göre daha kalıcıdır. Bu yem baklagilleri ekim rotasyonlarında örtü bitkisi olarak iyi çalışır ve organik rotasyonlarda popüler bir seçimdir. Çünkü üçgüller azot sabitleyerek yem kalitesini ve verimini artırır, otlatma mevsimini uzatır ve hayvansal performansı artırır. Yenileme yapılırken, üçgül, biçilmiş ya da çok kısa süre otlatılmış, hali hazırda kurulmuş mera otlarına ilkbaharda ekilir. Üçgüller yaz sonunda da ekilebilir; ancak su eksikliği büyümesini ve gelişmesini etkilediği için kuraklık sorunları ortaya çıkabilmektedir (Vaseva ve ark., 2011).



Şekil 4. Ak üçgülde farklı yaprak izleri. Fotoğrafların üzerinde gen sembolleri mevcuttur ve onları tanımlayan yazarlar tarafından orijinal olarak önerildiği gibidir
Kaynak: Tashiro ve ark., 2010

Ayrıca ak üçgül, süs değeri nedeniyle çimlerde ve şehir parklarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamada ak üçgül çeşitli abiyotik ve biyotik kısıtlamalar nedeniyle potansiyel verimlerine nadiren ulaşmaktadır. Kuraklık stresi, büyümeleri ve gelişmeleri için en zararlı abiyotik streslerden biridir (Li & Peng, 2012).

Ak üçgül, öncelikle stolonlar yoluyla çoğalır ve varlığını sürdürür. Bitki büyüdükçe stolonlar kırılarak çok sayıda küçük bitki oluşturur. Bu aşamada bitkiler biyotik ve abiyotik streslere karşı daha savunmasız hale gelir (Sanderson ve ark., 2003) ve bir çimenlikteki ak üçgül bileşeni dramatik bir düşüşe uğrayabilir. Bu olgu, mahsul performansını güvenilir hale getirir ve dolayısıyla üretici için bitkinin cazibesi azalır;

çünkü mahsul verimliliği, stress koşullarına karşı iyi bir toleransla birleştirilmedikçe sorun oluşturabilir. Su eksikliği, mahsul verimliliğini en çok etkileyen çevresel faktörlerden biridir ve bunun ak üçgül üzerindeki olumsuz etkileri iyice belgelenmiştir. Avustralya'da 30 yıllık bir süreçte, ak üçgülün kalıcılığında ana sınırlayıcı faktörün su mevcudiyeti olduğu ve göreceli su içeriğindeki %30'luk bir azalmanın stolon (sülük) sayısında %80'lik bir azalma oluşturduğu beş farklı ak üçgül genotipinde tespit edilmiştir (Bisaga ve ark., 2017). Sığ kök sistemi ve terlemeyi etkili bir şekilde kontrol edememesi nedeniyle ak üçgül, yonca (*Medicago sativa* L.) gibi diğer çok yıllık baklagil yem bitkilerine göre kuraklığa daha az toleranslıdır (Annicchiarico ve Piano, 2004).

Norton ve ark., (2021) tarafından yürütülen çalışmada yoncanın derin köklenmesinin kısıtlandığı saksılarda serada yürütülen bir denemede ak üçgül ve yonca (*Medicago sativa*) karşılaştırılmıştır. Ak üçgül daha fazla toprak suyu kullanmış ve daha muhafazakar su kullanımı yoncanın kuru aşamada ak üçgüle göre daha uzun süre hayatta kalmasını sağlamıştır. Yonca toplam kuru maddesinin daha fazlasını kök büyümesine sevk etmiştir ve ak üçgüle göre çok daha yüksek kök/sürgün oranlarına sahip olmuştur. Yaprak/stolon uzaması, su açığı arttıkça sona eren ilk bitki süreçlerinden biri olmuştur, ancak kuru aşamanın başlangıcında uzama ak üçgülde yoncadan daha fazla olmuş ve bu eğilim daha düşük toprak su içeriklerine ulaşılan kadar devam etmiştir. Yaprak solması genellikle oldukça yüksek su stresi seviyelerinde başlamış ve ak üçgülde yoncadan daha hızlı bir şekilde tam solmaya ilerlemiştir. Yoncanın dokularında ak üçgüle göre daha yüksek seviyede su içeriğinin

korunduğu tespit edilmiştir. Yoncada, daha fazla değişkenlikler de olsa, ak üçgülde %6'ya kıyasla, %9'luk ölüm oranı gözlemlenmiştir. Ancak ak üçgül, yüzey toprak katmanlarından su çekmede daha yetenekli bulunmuştur.

Ak üçgül, hem popülasyon içinde hem de popülasyonlar arasında yüksek düzeyde genetik heterojenliğe sahip, çapraz geçişli bir allotetraploid tür ($2n=4x=32$) olduğundan, abiyotik stres direnci ve verim gibi karmaşık özellikler için yavaş ve maliyetlidir (Jahufer ve ark. 2002). Avustralya'daki kurak alan meralarında, yaz-sonbahar dönemindeki periyodik nem stresi sırasında stolonların hayatta kalmasının arttırılması amacıyla başlatılan ıslah çalışmalarında, yeni ak üçgül çeşitlerinin birincil ıslah hedefi olmuştur. Kuraklık stresine toleranslı olarak geliştirilen "Grasslands Tribute" isimli ak üçgül çeşidi, 1991 yılında başlatılan ortak bir programın ürünü olarak 2003 yılında piyasaya sürülmüştür. Bu çeşit, orijinal olarak birkaç Avustralya ekotipini, bir dizi Yeni Zelanda çeşidini ve ıslah hattını ve Güney Avrupa ve Suriye'den toplanan üç ekotipi içeren 20 ak üçgül soyundan oluşan bir koleksiyondan geliştirilmiştir. Seçilen hatlar kuraklığa tolerans, pas direnci ve yüksek kuru madde (dry matter) verimi sergilemiştir. Bu materyalden, Sustain, Crau, Güney Avrupa II ve Suriye olmak üzere dört hattın yüksek dayanıklılık ve ot verimi sergileyen 45 genotip seçilmiştir. Çoklu çaprazlamanın ardından Victoria'da 45 üvey kardeş dört kontrol çeşidiyle taranmıştır. 2 yıl sonra, sonbahar-kış büyümesi ve kuraklığa toleransın artması nedeniyle 25 üvey kardeş seçilmiştir. Bu üvey kardeş aileler daha da incelenmiş ve Sustain, Crau, Güney Avrupa II ve Suriye menşeli 11 üvey kardeş aileden gelen seçkin bitkiler, orta ile büyük

yapraklı ak üçgül olan Grasslands Tribute'u üretmek üzere yeniden birleştirilmiştir. Grasslands Tribute, Yeni Zelanda'da yedi lokasyonda yapılan denemede, kuru alan otlatma koşullarında tutarlı performans ve dayanıklılık sergilemiştir. Hem koyun hem de süt hayvancılığında en iyi sonuca orta ila büyük yapraklı çeşitlerle ulaşılmıştır. Grasslands Tribute tüm mevsimlerde güçlü bir büyüme göstermiş, ancak serin sezonda çok iyi bir büyüme ve iyi bir kuraklık toleransına sahip olmuştur (Woodfield ve ark. 2003). Grasslands Tribute, Avustralya'da ticari olarak hâlâ mevcuttur (Hayes ve ark., 2019).



Şekil 3. *Trifolium repens*'in çiçeklenme döneminde çiçekçiklerin sıralı açılma süreci (ardışık fotoğraflar soldan sağa birinci günden dokuzuncu güne doğrudur)

Kaynak: Hou ve ark., 2022

Yeni Güney Galler (New South Wales, NSW)'de yapılan yaklaşık 30 yıllık bir çalışmada (1964-1993), yoğun otlatma baskısı, erken kuraklığın ardından ak üçgülün toparlanmasının zayıf olmasına neden olurken, hafif ve orta otlatma yönetiminde ak üçgül, 1980-82 arasındaki şiddetli kuraklığa kadar varlığını sürdürmüştür (Hayes ve ark., 2019). Kuraklık nedeniyle azalan toparlanmanın, tohum bazlı yenilenmenin başarısızlığı olduğu düşünülüyordu ancak, 1981 yılına gelindiğinde, yoğun otlatma uygulamasında tohum rezervlerinin, hafif ve orta düzeyde otlatma uygulamalarına kıyasla üç kat daha düşük olduğu görülmüştür. Yüksek otlatma baskısıyla birlikte bitki kompozisyonunda tek yıllık

türlerin istilası da artış göstermiş, bu durum otlatmaya ilave olarak zaten az olan tohum rezervinin yanı sıra çimlenen fidelerin istilacı bitkilerle rekabetini de oluşturmuştur. Fakat ak üçgülün yatay büyümesi, birçok büyüme noktasının otlatma yüksekliğinin altında olması otlatma baskısı ve rekabetten sağ çıkmasını sağlamış, bitkilerin boşluklara yayılmasına olanak tanımıştır (Lane ve ark. 2000). Yüksek otlatma baskısı altında pek çok ak üçgül çeşidi, kısa yaprak sapı, yüksek yaprak yoğunluğu ve kök boğumu yoğunluğu (birim stolon başına) ve yaprak dökülmesini önleyebilen çok sayıda küçük yaprak geliştirebilir (Hayes ve ark., 2019).

3. Çayır üçgülü (*Trifolium pratense*)

Dünya tarımındaki büyük ürünler arasında üçgül geç gelen türlerdendir. Yaklaşık 1000 yılında evcilleştirildiği Güney İspanya'dan çıkan üçgül Avrupa'yı fethetmiştir. 17. ve 18. yüzyıllarda, Avrupa tarımı, giderek artan sayıda nüfusa sahip şehirlere yapılan tahıl ihracatının artması nedeniyle kritik bir azot açığıyla karşılaştığında, etkili bir azot sabitleyici olan üçgül, nüfusu beslemek için elzem hale gelmiştir. 19. yüzyılda üçgül, kömürün tarımsal eşdeğeri idi. Tıpkı kömür, tüten bacaları hoş kokusu ile manzarayı değiştirmesi gibi, ak üçgül ve çayır üçgülü de tarlaları değiştirmişti. 19. yüzyılın romantik manzarasını üçgül tarlaları oluşturuyordu. Daha sonra tıpkı kömürün 20. yüzyılda diğer enerji taşıyıcıları tarafından aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması gibi, üçgül de Haber-Bosch amonyak sentez yönteminin (1909) icadıyla gereksiz görülmeye başlanmış ve bu sentetik yöntem, bitkisel-bakteriyel araçlar olmadan tarım için 'havadan' azot üretimini mümkün kılmıştır. Üçgül ekiminin durdurulması, İkinci Dünya Savaşı sonrası donuk, tek kültürlü manzaranın oluşmasına neden olmuştur (Kjaergaard, 2003).



Şekil 4. Çayır üçgülü (*Trifolium pratense*) ve öküz gözü papatya (*Chrysanthemum leucanthemum*) türlerinin birlikte "çiçek yatağı" görünümü.

Kaynak: Schneider-Binder, 2017

Çayır üçgülü dünya tarımı için önemli bir baklagil yem bitkisidir. Çayır üçgülü samanının yıllık verimi tipik olarak hektar başına dört tonun (4 ton/ha) üzerindedir. Çayır üçgülünün kökeni Güneydoğu Avrupa ve Küçük Asya'dır. Ekimi ilk kez 1650 civarında Kuzey Avrupa'da başlamıştır ve daha sonra Avrupalı sömürgeciler tarafından Amerika'ya götürülmüştür. Çayır üçgülü kısa ömürlü çok yıllık bir baklagil olması nedeniyle yalnızca 2-3 yıl boyunca verimi yüksektir. Boyu 20-60 cm arasında olur ve serin, nemli koşulları tercih eder (Boucher, 2016).

Çayır üçgülü, *Rhizobium trifolii* ile simbiyotik ilişki kurar (Queen ve ark., 2009). Soğuk ılıman ve kuzey iklimlerinde çayır üçgülü ve ak üçgül (*Trifolium repens*), yem veya azot temini amacıyla en sık yetiştirilen baklagil türleridir (Riesinger ve Herzon, 2010). Üreticiler,

Rhizobium trifolii aşılamaıcıları ve baklagil tohumlarının düşük maliyetli ve kolay temin edilebilir olması nedeniyle, çim bitkileri ile baklagilleri ekonomik ve kolay bir şekilde yetiştirebilirler (Gil ve Fick, 2001). Çayır üçgülü genellikle, yeterli kök gelişimini destekleyen ve baklagiller ile tahıl mahsullerinin sağlıklı bir şekilde kurulması ve büyümesi için gerekli olan geçirgen alt toprağa sahip gevşek yüzey toprağında en iyi şekilde büyür (Riesinger ve Herzon, 2010).

Çayır üçgülü (*Trifolium pratense* L.), dünya çapında ılıman bölgelerde önemli bir baklagil yem bitkisi olup (Annicchiarico ve Pagnotta, 2012), hem buğdaygillerle karışım halinde hem de monokültür olarak yetiştirilmesi mümkündür. Çiftçiler, çayır üçgülünü toprak bakterileri ile simbiyoz halinde atmosferik azotu sabitleme kapasitesi, yem verimi, ham protein içeriği yüksek olması nedeniyle tercih etmektedir (Kjaergaard, 2003). Çayır üçgülü kısa ömürlüdür, yaklaşık üç yıl boyunca üretken kalır, daha sonra vejetasyonu bozulmaya başlar. Bitkiler ekimden sonraki ilk yıl içinde derin, iyi dallanmış bir ana kök geliştirir ve bu daha sonra adventif köklerle tamamlanır. Ticari çeşitler genellikle iki olgunluk tipinde sınıflandırılır. 'Çift kesimli' çeşitler ilkbaharın başlarında gelişir, yeniden güçlü büyüme kapasitesine ve yüksek sürgün/kök oranına sahiptir. Çevre koşulları uygun olursa geç sonbahara kadar büyümeye devam eder. 'Tek kesimli' çeşitler ise ilkbaharda daha geç büyümeye başlar, biçme sonrasındaki yeniden büyümesi daha yavaş olur ve sonbaharda daha erken uyku haline geçer. Bu özellikler üçgülleri daha kalıcı ve kışa dayanıklı kılar (Hejduk ve Knot, 2010).

Tek kesimli çeşitler, çiçeklenmeyi başlatmak için çift kesimli çeşitlere göre daha uzun fotoperiyotlara (gün uzunluğu 14 saat veya daha fazla) ihtiyaç duyar ve nadiren biçme olayları arasında çiçek açar (Boucher, 2016). Tek kesimli türler genellikle Kuzey iklimlerinde yetiştirilirken, çift kesimli türler ılıman ve sıcak iklimlere daha iyi uyum sağlamaktadır (Vleugels ve ark. 2024).

“Mamut” olarak da adlandırılan tek kesimli türler, çift kesimli türlere kıyasla çiçeklenmeyi tetiklemek için daha uzun fotoperiyotlara ihtiyaç duyar. Türün vernalizasyona ihtiyacı yoktur, ancak kuzey enlemlerine adapte olmuş bazı türler soğuk uygulamadan sonra daha hızlı çiçek açabilir. Çift kesimli türler, tek kesimli türlerle karşılaştırıldığında ana gövdedeki ilk çiçeğe daha az boğum arası üretir. Tek kesimli türler, ilk çiçeğin konumundan önce 10 veya daha fazla gövde boğumunu oluştururken, çift kesimli türlerde, ilk çiçeğin oluşumuna kadar yalnızca beş ila yedi kök boğum arası bulunur. Tek kesimli türler, çift kesimli türlere göre daha büyük bir kök biyokütlesine sahiptir. Yem kullanımı için, Kuzey Amerika'nın çoğunda, daha fazla yem verimi ve bol tohum mevcudiyeti nedeniyle, tek kesimli çeşitlere göre çift kesimli çeşitler tercih edilir. Hatta çift kesimli çeşitlerin mevsimlik ot verimi, tek kesimli çeşitlere göre %15 ila %40 daha yüksektir (Wheaton, 2015). Bununla birlikte, tek kesimli çeşitler Alberta ve Saskatchewan'da muhtemelen çift kesimli çeşitlere göre kışa daha dayanıklı olmaları nedeniyle daha fazla alana sahiptir. Çift kesimli türlerde tek kesimlilere göre daha fazla ot verimi, çift kesimli türde sezon içerisinde gövde ve çiçek oluşumuyla birlikte ilave yeniden büyümelerden kaynaklanmaktadır.

Çayır üçgülü, kaba yem ve toprak iyileştirme amacıyla münavebe bitkisi olarak yetiştirilebilir (Boucher, 2016). Ontario, Kanada'da iyi çeşitlendirilmiş bir rotasyon olarak mısır (*Zea mays*) - soya fasulyesi (*Glycine max*) - kışlık buğday (*Triticum aestivum*) içerisine ekilen çayır üçgülü (*Trifolium pratense*) yaygın bir şekilde tercih edilir. Burada çayır üçgülü tohumları kışlık buğday ekilmiş tarlaya ilkbaharda serpilerek, toprağın donma-çözülme döngüleri kullanılarak ekilir. Çayır üçgülünün, buğdayla bu şekilde geçişle ekilebilmesi ve yetiştirilebilmesi, tesis ve yönetiminin kolay olması ve çok çeşitli toprak türlerine ve koşullarına uyum sağlaması nedeniyle Ontario çiftçileri arasında yaygın bir seçimdir. Çayır üçgülü, diğer örtü bitkileriyle karşılaştırıldığında gölge toleransının iyi olması nedeniyle buğday örtüsü altında yetiştirilmeye uygundur, sonbaharda veya ilkbaharda hasat edildiğinde 0.5 t/da'a kadar topraküstü kuru biyokütle üretebilir ve sonraki mısır mahsulü için gereken en ekonomik azot oranı 4.4–6.4 kg N/da bırakır (Gaudin ve ark. 2013). Çayır üçgülünün kışlık buğday ile karışım halinde ekilmesi ve bir örtü bitkisi olarak kullanılması, yetiştirme sistemine dahil olan tüm mahsullerde önemli verim artışları sağlar (Meyer-Aurich ve ark., 2006). Bunun yanı sıra çevre ve toprak sağlığına ve yabancı ot kontrolüne (Blaser ve ark. 2011), su infiltrasyonu ve muhafazasına (Hartwig ve Ammon 2002), toprak stabilitesine, sistemden azot kayıplarının azaltılmasına (Meyer-Aurich ve ark. 2006) ve artan toprak karbon içeriğine katkılar ve iyileştirmeler sağlar (Ladoni ve ark. 2016). Tahıl hasadını takiben çayır üçgülü biyokütle biriktirir ve ardından sonbaharda veya bir sonraki ilkbaharda kimyasal veya mekanik olarak kontrol edilir (Queen ve ark. 2009). Çiftçiler, önemli faydalarına rağmen, kışlık buğday ile çayır üçgülünün karışık ekim uygulaması son 20 yılda önemli ölçüde

azalmıştır (Wagner-Riddle ve ark., 2007).

Çeşitli çalışmalar, çayır üçgülünün düşük biyokütlesini kurak yıllardaki düşük yağış dönemleriyle ilişkilendirmiştir (Singer ve ark. 2006; Queen ve ark. 2009). Boucher, (2016) tarafından dört çayır üçgülü (*Trifolium pratense*) ve iki *Medicago truncatula* çeşidi, kontrollü bir ortamda üç, beş ve yedi haftalıkken iki haftalık kuraklık stresine verdikleri tepki açısından karşılaştırılmıştır. Üçgüller %80, %30 ve %15 tarla kapasitesinde *Medicago* çeşitleriyle karşılaştırıldığında daha büyük birleşik taç, kök ve sürgün biyokütlesine sahip olmuşlardır. *Medicago* çeşitlerinin birleşik taç ve kök ağırlıkları nem stresi arttıkça değişmezken, üçgülün taç ve kök ağırlıkları azalmıştır. Her iki tür için de nem stresi arttıkça sürgün ağırlığı azalmıştır.

Loucks ve ark. (2018), çift kesimli (Belle) ve tek kesimli (Altaswede) çayır üçgülünü dört farklı kuraklık süresince (4, 8, 12 ve 16 gün), %15 bağıl toprak nem içeriğinin (relative soil water content, RSWC) altında yetiştirmişlerdir. Çift kesimli çeşit, tek kesimliye kıyasla toprak nem eksikliği süresince önemli ölçüde daha fazla su kullanmış ve daha büyük yaprak alanına, sürgün kuru ağırlığına ve RSWC'ye sahip olmuştur. Buna karşılık, tek kesimli çeşit, çift kesimliden önemli ölçüde daha yüksek hayatta kalma oranlarına sahip olmuştur.

Vleugels ve ark. (2024) tarafından iki büyüme mevsimi boyunca 395 çayır üçgülü genotipinin bitki büyümesi mobil yağmur barınakları kullanarak iki ardışık yaz boyunca 6 ila 8 haftalık kuraklık dönemlerinde, termal sensörlerle donatılmış bir drone ile yapılan çoklu uçuşlar kullanılarak her iki büyüme mevsimi boyunca izlenmişlerdir. Bitki su

stresi indeksi (crop water stress index CWSI), kuraklık olayı sırasında veya hemen sonrasında iki anda belirlenmiştir. Manuel ve İHA ile elde edilen ölçümler iyi bir şekilde ilişkilendirilmiş ve bu da İHA ile elde edilen ölçümlerin çayır üçgülünde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. İncelemeler çayır üçgülünde kuraklık toleransı ve kuraklıktan kurtulma olarak iki bağımsız stratejinin mevcudiyetini işaret etmiştir

İyi sulanan koşullar altında iyi performans gösterebilen genotiplerin büyük bir kısmının kuraklıktan daha az etkilenenler olduğu görülmüştür.

Staniak ve ark. (2019), saf (yalın) ve karışım halinde yetiştirilen *Festulolium* hibriti ve çayır üçgülünde su eksikliğinin gaz değişim parametreleri üzerine etkisini araştırmışlardır. İki faktörlü saksı denemesinde iki toprak nem seviyesinde (iyi sulanan koşullar ve kuraklık stresi) değerlendirmeler yapmışlardır. Yalın halde yetiştirilen çayır üçgülü strese en fazla tepki verirken, *Festulolium* hibriti en az tepki vermiştir. Ayrıca çayır üçgülüne göre daha ekonomik bir su yönetimi sağlayan *Festulolium*'da en yüksek su kullanım verimliliği indeksi (water use efficiency, WUE) gözlemlenmiştir.

Hofer ve ark. (2014), dört model türü (*Lolium perenne*, *Cichorium intybus*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense*) kullanarak yoğun olarak yönetilen otlaklardaki kuraklığa direnci değerlendirmişlerdir. Türler farklı fonksiyonel tipleri temsil ediyordu; bunlar simbiyotik azot (N₂) fiksasyonu ve köklenme derinliği ile ilgili özelliklerin bir kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır. Üç bölgede (Tänikon, Reckenholz, Wexford)

ortak bir tarla denemesinde, yağışların tamamen hariç tutulduğu on haftalık bir yaz kuraklık dönemi simüle edilmiştir. Her üç bölgede de kuraklık uygulamasında toprak üstü biyokütle üretimi olumsuz etkilenmiştir. Ortalama azalma (kontrol ile karşılaştırıldığında) Tánikon'da %30, Reckenholz'da %48 ve Wexford'da %85 olmuştur. Farklı bitki fonksiyonel türlerinin kuraklığa dayanıklılıkları farklılık göstermiştir: N₂ sabitleyen türler, Tánikon ve Reckenholz'da sırasıyla yalnızca %8 ve %28 biyokütle azalması gösterirken, sabitleyici olmayan türlerde bu oran %51 ve %68 olmuştur. Ancak Wexford'da yalnızca köklü *Cichorium intybus* türü kuraklığa bir dereceye kadar (diğer üç türdeki %94'lük azalmaya karşılık biyokütlede %57'lik azalma) karşı koyabilmiştir. Bu üç bölgenin bitkiler üzerinde çok farklı derecelerde kuraklık stresi oluşturduğunu, ancak N₂ sabitleyicinin ve derin köklü türlerin ekiminin gelecekteki iklim koşulları altında önemli bir yönetim seçeneği olabileceğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Algirdas, 2006. General Wikispecies, Taxonavigation section. Linnaeus, C. 1753. Species Plantarum. Tomus II: 767. https://species.wikimedia.org/wiki/Trifolium_repens
- Annicchiarico, P., Barrett, B., Brummer, E.C., Julier, B., Marshall, A.H. 2015. Achievements and challenges in improving temperate perennial forage legumes. Critical Reviews in Plant Sciences, 34(1-3), 327-380.
- Annicchiarico, P., Pagnotta, M.A. 2012. Agronomic value and adaptation across climatically contrasting environments of Italian red clover landraces and natural populations. Grass and Forage Science, 67(4), 597-605.
- Annicchiarico, P., Piano, E. 2004. Indirect selection for root development of white clover and implications for drought tolerance. Journal of Agronomy and Crop Science, 190(1), 28-34.
- Ayres, J.F., Blumenthal, M.J., Lane, L.A., O'Connor, J.W. 2006a. Birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) and greater lotus (*Lotus uliginosus*) in perennial pastures in eastern Australia 2. Adaptation and applications of lotus-based pasture. Australian Journal of Experimental Agriculture, 46(4), 521-534.
- Ayres, J.F., Blumenthal, M.J., Lane, L.A., O'Connor, J.W. 2006b. Birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) and greater lotus (*Lotus uliginosus*) in perennial pastures in eastern Australia 2. Adaptation and applications of lotus-based pasture. Australian Journal of Experimental Agriculture, 46(4), 521-534.
- Ayres, J.F., Kelman, W.M., Lane, L.A., McCorkell, B.E. 2007. Regeneration characteristics of birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) in low latitude environments in eastern Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture, 47(7), 833-843.
- Ayres, J.F., Kelman, W.M., Wiedemann, S.G., Lane, L.A., McCorkell, B.E. 2008. Developing birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) varieties for permanent pasture applications in low latitude regions of eastern Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture, 48(4), 488-498.
- Bisaga, M., Lowe, M., Hegarty, M., Abberton, M., Ravagnani, A. 2017. Deep sequencing of suppression subtractive hybridisation drought and recovery libraries of the non-model crop *Trifolium repens* L. Frontiers in Plant Science, 8, 213.
- Blaser, B.C., Singer, J.W., Gibson, L.R. 2011. Winter cereal canopy effect on cereal and interseeded legume productivity. Agronomy Journal, 103(4), 1180-1185.
- Borsani, O., Díaz, P., Agius, M.F., Valpuesta, V., Monza, J. 2001. Water stress generates an oxidative stress through the induction of a specific Cu/Zn

- superoxide dismutase in *Lotus corniculatus* leaves. Plant Science, 161(4), 757-763.
- Boucher, K. 2016. Breeding for improved drought tolerance in red clover (*Trifolium pratense* L.) (Doctoral dissertation, University of Guelph).
- Chisausky, J.L., Soley, N.M., Kassim, L., Bryan, C.J., Miranda, G.F.G., Gage, K.L., Sipes, S. D. 2020. Syrphidae of Southern Illinois: Diversity, floral associations, and preliminary assessment of their efficacy as pollinators. Biodiversity Data Journal, 8.
- Dziegielewski, B. 2003. Long-term and short-term measures for coping with drought. Tools for drought mitigation in mediterranean regions, 319-339.
- Egan, L., Hofmann, R., Nichols, S., Hadipurnomo, J., Hoyos-Villegas, V. 2021. Transpiration rate of white clover (*Trifolium repens* L.) cultivars in drying soil. Frontiers in Plant Science, 12, 595030.
- Egan, M., Galvin, N., Hennessy, D. 2018. Incorporating white clover (*Trifolium repens* L.) into perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) swards receiving varying levels of nitrogen fertilizer: Effects on milk and herbage production. Journal of Dairy Science, 101(4), 3412-3427.
- Feedipedia-Animal Feed Resources Information System - INRAE CIRAD AFZ and FAO. François Lebas, France, Toulouse, 2014. <https://www.feedipedia.org/node/280>
- Gaudin, A.C., Westra, S., Loucks, C.E., Janovicek, K., Martin, R. C., Deen, W. 2013. Improving resilience of northern field crop systems using inter-seeded red clover: a review. Agronomy, 3(1), 148-180.
- Georganta, A., Parissi, Z.M., Kyriazopoulos, A.P., Abraham, E.M., Lazaridou, M. 2014. Effect of water stress on *Lotus corniculatus* L. nutritive value at different stages of maturity. EGF at 50: The future of European grasslands. Proceedings of the 25th General Meeting of the European Grassland Federation, Aberystwyth, Wales, 7-11 September 2014.
- Gil, J.L., Fick, W.H. 2001. Soil nitrogen mineralization in mixtures of eastern gamagrass with alfalfa and red clover. Agronomy Journal, 93(4), 902-910.
- Gonzalez-Espíndola, L.A., Pedroza-Sandoval, A., de los Santos, G. G., Trejo-Calzada, R., Álvarez-Vázquez, P., del Rosario Jacobo-Salcedo, M. 2024. Secondary Metabolites and Their Antioxidant Activity Enhance the Tolerance to Water Deficit on Clover *Lotus corniculatus* L. through Different Seasonal Times. International Journal of Plant Biology, 15(1), 175-186.
- Gonzalez-Espíndola, L.Á., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Jacobo-Salcedo, M.D.R., García de los Santos, G., Quezada-Rivera, J.J. 2024a. Relative Water

- Content, Chlorophyll Index, and Photosynthetic Pigments on *Lotus corniculatus* L. in Response to Water Deficit. *Plants*, 13(7), 961.
- Hampton, J.G., Rolston, M.P., Pyke, N.B., Green, W. 2012. Ensuring the long term viability of the New Zealand seed industry. *Agronomy Society of New Zealand*.
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U. 2002. Cover crops and living mulches. *Weed science*, 50(6), 688-699.
- Hayes, R.C., Ara, I., Badgery, W.B., Culvenor, R.A., Haling, R.E., Harris, C.A., Smith, R. W. 2019. Prospects for improving perennial legume persistence in mixed grazed pastures of south-eastern Australia, with particular reference to white clover. *Crop and Pasture Science*, 70(12), 1141-1162.
- Hejduk, S., Knot, P. 2010. Effect of provenance and ploidity of red clover varieties on productivity, persistence and growth pattern in mixture with grasses. *Plant, Soil and Environment*, 56(3), 111-119.
- Hofer, D., Suter, M., Hoekstra, N. J., Haughey, E., Eickhoff, B., Finn, J. A., Lüscher, A. 2014. Important differences in yield responses to simulated drought among four species and across three sites. *The Future of European Grasslands*, 166.
- Hou, Q., Shao, W., Ehmet, N., Wang, T., Xu, Y., Sun, K. 2022. Changes in Florets' Vertical Direction within Inflorescence Affects Pollinator Behavior, and Fitness in *Trifolium repens*. *Phyton* (0031-9457), 91(8).
- Inostroza, L., Acuña, H., Tapia, G. 2015. Relationships between phenotypic variation in osmotic adjustment, water-use efficiency, and drought tolerance of seven cultivars of *Lotus corniculatus* L. *Chilean journal of agricultural research*, 75(1), 3-12.
- Jahufer, M.Z.Z., Care, D.A., Nichols, S.N., Crush, J.R., Dunn, L.O., Ford, J.L., Jones, C.S. 2006. Phenotyping and pattern analysis of key root morphological traits in a white clover mapping population. *NZGA: Research and Practice Series*, 12, 127-130.
- Kjaergaard, T. 2003. A plant that changed the world: the rise and fall of clover 1000-2000. *Landscape research*, 28(1), 41-49.
- Kostopoulou, P., Karatassiou, M., Lazaridou, A., Lazaridou, M. 2016. Water deficit effect on physiological responses of *Lotus corniculatus* plants of different origin. In *Options Méditerranéennes. Series A: Mediterranean Seminars*. CIHEAM-IAMZ, Zaragoza (Spain), Democritus University of Thrace (Greece), Aristotle University of Thessaloniki (Greece), Hellenic Range and Pasture Society, Thessaloniki (Greece).

- Ladoni, M., Basir, A., Robertson, P. G., Kravchenko, A.N. 2016. Scaling-up: Cover crops differentially influence soil carbon in agricultural fields with diverse topography. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 225, 93-103.
- Lane, L.A., Ayres, J.F., Lovett, J.V. 2000. The pastoral significance, adaptive characteristics, and grazing value of white clover (*Trifolium repens* L.) in dryland environments in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(7), 1033-1046.
- Li, Z., Peng, Y. 2012. Photosynthetic characteristics and variation of osmoregulatory solutes in two white clover (*Trifolium repens* L.) genotypes in response to drought and post-drought recovery. *Australian Journal of Crop Science*, 6(12), 1696-1702.
- Loucks, C.E., Deen, W., Gaudin, A.C., Earl, H.J., Bowley, S.R., Martin, R.C. 2018. Genotypic differences in red clover (*Trifolium pratense* L.) response under severe water deficit. *Plant and soil*, 425, 401-414.
- Marley, C.L., Fychan, R., Jones, R. 2006. Yield, persistency and chemical composition of *Lotus* species and varieties (birdsfoot trefoil and greater birdsfoot trefoil) when harvested for silage in the UK. *Grass and Forage Science*, 61(2), 134-145.
- Meyer-Aurich, A., Weersink, A., Janovicek, K., Deen, B. 2006. Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 117(2-3), 119-127.
- Morris, P., Carter, E.B., Hauck, B., Hughes, J.W., Allison, G., Theodorou, M.K. 2021. Responses of *Lotus corniculatus* to environmental change. 4: Root carbohydrate levels at defoliation and regrowth climatic conditions are major drivers of phenolic content and forage quality. *Planta*, 253, 1-11.
- Neal, J.S., Fulkerson, W.J., Sutton, B.G. 2011. Differences in water-use efficiency among perennial forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. *Irrigation Science*, 29, 213-232.
- Norton, M.R., Li, G.D., Xu, B., Price, A., Tyndall, P., Hayes, R.C. 2021. Differences in dehydration tolerance affect survival of white clover (*Trifolium repens*) and lucerne (*Medicago sativa*) during a drying cycle. *Crop and Pasture Science*, 72(9), 723-730.
- Parissi, Z.M., Kyriazopoulos, A.P., Abraham, E.M., Karatassiou, M., Lazaridou, M. 2016. Effect of water stress on the nutritive value of three *Lotus corniculatus* L. populations at the regrowth stage. In *Options Méditerranéennes. Series A: Mediterranean Seminars. CIHEAM-IAMZ, Zaragoza (Spain)/FAO/INRA/CIRAD/Montpellier*.

- Queen, A., Earl, H., Deen, W. 2009. Light and moisture competition effects on biomass of red clover under seeded to winter wheat. *Agronomy journal*, 101(6), 1511-1521.
- Real, D., Li, G., Clark, S., Albertson, T.O., Hayes, R., Denton, M.D., Dear, B. 2011. Evaluation of perennial forage legumes and herbs in six Mediterranean environments. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(3), 357-369.
- Real, D., Sandral, G.A., Rebuffo, M., Hughes, S.J., Kelman, W.M., Mieres, J.M., Crossa, J. 2012. Breeding of an early-flowering and drought-tolerant *Lotus corniculatus* L. variety for the high-rainfall zone of southern Australia. *Crop and Pasture Science*, 63(9), 848-857.
- Riesinger, P., Herzon, I. 2010. Symbiotic nitrogen fixation in organically managed red clover–grass leys under farming conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 60(6), 517-528.
- Sanchez, D.H., Schwabe, F., Erban, A., Udvardi, M.K., Kopka, J. 2012. Comparative metabolomics of drought acclimation in model and forage legumes. *Plant, Cell & Environment*, 35(1), 136-149.
- Sanderson, M.A., Byers, R.A., Skinner, R.H., Elwinger, G.F. 2003. Growth and complexity of white clover stolons in response to biotic and abiotic stress. *Crop Science*, 43(6), 2197-2205.
- Schneider-Binder, E. 2017. The role of diaspore banks for the restoration of floodplain meadows. Results of a long term monitoring on the Northern Upper Rhine (Germany). *Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research*, 19(2), 19-36.
- Singer, J.W., Casler, M.D., Kohler, K. A. 2006. Wheat effect on frost-seeded red clover cultivar establishment and yield. *Agronomy journal*, 98(2), 265-269.
- Staniak, M., Księżak, J., Bojarszczuk, J., Feledyn-Szewczyk, B. 2019. Gas exchange parameters in red cover (*Trifolium pratense* L.) and festulolium (*Festulolium braunii* (K. Richt) A. Camus) under drought stress. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(1).
- Sujkowska-Rybkowska, M., Kasowska, D., Gediga, K., Banasiewicz, J., Stępkowski, T. 2020. *Lotus corniculatus*-rhizobia symbiosis under Ni, Co and Cr stress on ultramafic soil. *Plant and Soil*, 451, 459-484.
- Tashiro, R.M., Han, Y., Monteros, M.J., Bouton, J.H., Parrott, W.A. 2010. Leaf trait coloration in white clover and molecular mapping of the red midrib and leaflet number traits. *Crop Science*, 50(4), 1260-1268.

- Vaseva, I., Akiscan, Y., Demirevska, K., Anders, I., Feller, U. 2011. Drought stress tolerance of red and white clover—comparative analysis of some chaperonins and dehydrins. *Scientia horticulturae*, 130(3), 653-659.
- Vleugels, T., Saleem, A., Dubey, R., Muylle, H., Borra-Serrano, I., Lootens, P., Roldán-Ruiz, I. 2024. Phenotypic characterization of drought responses in red clover (*Trifolium pratense* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1304411.
- Wagner-Riddle, C., Furon, A., McLaughlin, N.L., Lee, I., Barbeau, J., Jayasundara, S., Warland, J. 2007. Intensive measurement of nitrous oxide emissions from a corn? soybean? wheat rotation under two contrasting management systems over 5 years. *Global Change Biology*, 13(8), 1722-1736.
- Wang, H., Wu, Y., He, Y., Li, G., Ma, L., Li, S., Yang, G. 2023. High-quality chromosome-level de novo assembly of the *Trifolium repens*. *BMC genomics*, 24(1), 326.
- Wang, L., Jian, Z., Wang, P., Zhao, L., Chen, K. 2022. Combined physiological responses and differential expression of drought-responsive genes preliminarily explain the drought resistance mechanism of *Lotus corniculatus*. *Functional Plant Biology: FPB*.
- Wheaton, H.N. 2015. Red clover G4638. University of Missouri Curators: University of Missouri. [Online] Available from: <http://extension.missouri.edu/p/G4638> [July 15, 2024].
- Woodfield, D.R., Clifford, P.T.P., Baird, I.J., Miller, G.C.J., Widdup, K.H., Caradus, J.R. 2003. Grasslands Tribute: a multi-purpose white clover for Australasia. In *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* (pp. 157-162).
- Xolocotzi-Acoltzi, S., Pedroza-Sandoval, A., García-De los Santos, G., Álvarez-Vázquez, P., Gramillo-Ávila, I. 2024. Growth, Productivity, Yield Components and Seasonality of Different Genotypes of Forage Clover *Lotus corniculatus* L. under Varied Soil Moisture Contents. *Plants*, 13(10), 1407.

BÖLÜM 12

DİKENLİ AKASYA (*Acacia nilotica*) & ÇEMEN OTU (*Trigonella foenum-graecum*) & YEM BAKLASI (*Vicia faba*) & *Medicago truncatula*

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759834>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. feyzagundel@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-7435-4130

GİRİŞ

1. Dikenli akasya (*Acacia nilotica*)

Acacia nilotica türü (Familya: *Fabaceae*; Alt-familiya: *Mimosoideae*; Cins: *Acacia*), Afrika ve Asya'da doğal bitki varlığı içinde yaygın olarak bulunan ve Avustralya'da yetişen çok amaçlı kullanım alanına ve azot sabitleme yeteneğine sahip önemli bir ağaç baklagilidir. Altısı Afrika tropiklerine ve diğer üçü Hindistan alt kıtasına özgü olmak üzere dokuz alt türü olan karmaşık bir türdür. Deniz seviyesinden 2000 m'nin üzerine kadar olan alanlarda yetişebilir ve aşırı sıcaklıklara (>50°C) dayanabilir ancak genç dönemde dona karşı hassastır. Tanen, sakız, kereste, yakıt, yem ve ilaç kaynağı olarak kullanılan *nilotica* ilk çağlardan beri ekonomik öneme sahip değerli bir bitki olarak bilinmektedir. Bu cinsin en önemli avantajı, hızlı biyolojik azot fiksasyonu sayesinde azot eksikliği olan ve kuraklığa eğilimli topraklara adaptasyonu, tarımsal ormancılık sistemlerine uygunluğu ve dolayısıyla kurak alanların rehabilitasyonunda kullanılabilmesidir. Dünyanın kurak ve yarı kurak bölgelerinde yaygın olan dikenli akasya kuraklığa dayanıklı bir baklagildir. Topraktaki besin maddesi ve nemden çok iyi yararlanır. *Acacia nilotica* ağacının boyu 15-18 m yüksekliğe ve gövdesi 2-3 m çapa kadar büyüyebilmektedir (Bargali ve Bargali, 2009).



Şekil 1. *Acacia nilotica*'nın yaprakları, açmış çiçekleri ve açmamış çiçekleri.

Kaynak: Rojas-Sandoval, 2023

Acacia nilotica kuraklığın yanı sıra otlatmaya, yangına ve tuzlu topraklara karşı dayanıklıdır. Bitkinin tohum verimi yüksektir. Tohumları hayvanlar, su ve rüzgar tarafından taşınabilir ve toprakta uzun süre çimlenmeden kalabilir. Bu özelliğinin kötü yönetildiği durumlarda yayılış gösterdiği ülkelerde bitkinin istilacı davranışlar sergilediği bilinmektedir. *Acacia nilotica*, halihazırda bulunduğu coğrafyaların çoğunda değerli bir ağaçtır; fakat henüz mevcut olmadığı diğer ülkelere girişi önerilmez. Bu bitki türünün yaygın bulunduğu ülkeler Pakistan, Hindistan, Endonezya, Irak, Kıbrıs, Sudan, Mısır, Tanzanya, Nijerya, Avustralya ve Karayipler'dir. Queensland-Avustralya'da fide dikim metodu (su drenaj kanalları boyunca yapılması) ve stok yönetimi (koyun yerine sığır beslemede kullanılması) *Acacia nilotica*'nın istilacı yayılımına neden olmuştur. Çünkü hem yüksek tohum üretimini teşvik

edecek bir su kaynağının hem tohumların dışkıları aracılığıyla bulaşmamış alanlara taşınmasına neden olacak evcil hayvanların özellikle büyükbaş hayvanların mevcudiyeti istila riskini yükseltmiştir. Bu riski azaltmak için hayvanlar yeni otlak alanlarına bırakılmadan önce yedikleri baklalardaki tohumları oldukları yere dışkılamaları için bir süre karantinada tutulması tavsiye edilir. Yarı kurak, sıcak ılıman ve subtropikal bölgeleri tercih eden ancak tropikal ortamlarda da yetişebilen dikenli akasya tarımsal ormancılık sistemlerinde yem olarak kullanılmak üzere yetiştirilebilir (Rojas-Sandoval, 2023).

Acacia nilotica, yağışın yüksek oranda düştüğü mevsimlerde yağışların ardından filizlenir. Tohumların %95'i iki yıl sonra fertilesini kaybeder ancak bazı tohumlar toprağa düştükten 15 yıl sonra bile çimlenebilmektedir. Tohumların yangına maruz kalması veya otlayan hayvanların sindirim sisteminden geçmesi uyarıcı etki yaparak çimlenmesine yardımcı olur. Ağaç iki ila üç yaşına geldiğinde çiçek açabilir ve meyve verebilir; yağışın yüksek olduğu yıllarda ise çiçeklenme ve meyve oluşumu daha hızlı gerçekleşebilir. Dikenli akasya Mart ile Haziran ayları arasında çiçek açar ve Temmuz ile Aralık ayları arasında baklalar oluşur. Yaprak dökülmesinin çoğu Haziran ve Kasım ayları arasındaki kurak döneme karşılık gelir. Olgunlaşmış tohumlar Ekim ayından Ocak ayına kadar dökülür (Bargali & Bargali, 2009).



Şekil 2. "*Acacia nilotica* " bakkaları.

Kaynak: Mbuvi ve ark. 2015

A. nilotica'ya en yaygın olarak çayır ve meralarda, açık ormanlık alanlarda, taşkın yatağında, çiftlik hayvanlarının barınaklarının yakınında ve yol kenarlarında rastlanır. Kurak bölgelerde nispeten hızlı büyüyen öncü bir türdür. Queensland, Avustralya'da, yüksek kil içeriğine sahip nemli toprak alanlarından tuzluluk oranı yüksek toprak alanlarına kadar yayılmıştır. *Acacia nilotica*, yıllık yağış miktarının 200-1500 mm olduğu kuru koşulları tercih eder, ancak sulama altında bazı çeşitler 100 mm'den az yağış alan bölgelerde de yetişebilmektedir. Hindistan'da sulama yapılmadan optimum yetiştirme alt yağış sınırı 600 mm civarındadır. Düzensiz yağış rejimlerinin yaşandığı bölgelere de iyi adaptasyon gösterir (Rojas-Sandoval, 2023).

Acacia nilotica yaprağı sindirilebilirliği yüksek ve iyi düzeyde

protein içerir. Yaprak ve baklalar %12.4 ham protein, 7.2 MJ/kg enerji içerir ve mineraller açısından zengin olup genellikle koyun ve keçilerin beslenmesinde kullanılır. Hindistan'da sığır beselemede de oldukça popülerdir. Kuru baklaları hayvan beslenmesinde takviye yem olarak kullanılmaktadır (Bargali ve Bargali, 2009).



Şekil 3. "*Acacia nilotica* subsp. *indica*" yem için budanıyor, Rajasthan, Hindistan (Photo:Colin Hughes/OFI, Oxford, UK).

Kaynak: Rojas-Sandoval, 2023

Acacia nilotica, tarım alanlarında 5 m aralıklarla sıralar halinde veya tarla bitki sınırlarına ekilen bir tarımsal ormancılık ağacı olarak popülerdir. Yem ağacı olarak birçok farklı silvopastoral sistemde kullanılmakta ve hoş kokulu kabukları özellikle hayvanlar tarafından sevilmektedir. Hindistan'da baklaları kümes hayvanı rasyonlarına eklenmektedir. Kuru mevsimin sonuna doğru olgunlaşarak kuruyan

baklalar, meralarda otlayan hayvanlar tarafından çok sevilerek tüketilir. Hindistan'da dalları genellikle yem amacıyla budanır. Sadece koyun besleyen hayvancılık işletmelerinde yayılma daha yavaştır ve fide aşamasında yoğun koyun otlatma, *A. nilotica*'nın istilacı etkisini ortadan kaldırabilir. Koyun ve sığırların olgun baklaların yakınında otlatılmasının önlenmesi, bitkinin hayvan dışkıyla yayılmasını kısıtlar ve predatör böcekler tarafından yenmesine izin verilerek biyolojik mücadeleye olanak sağlar. Bunu başarmak için olgun tohum baklalarının mevcut olduğu dönemlerde çitler yapılarak hayvanların bu alanlarda otlatılmasının önüne geçilebilir (Rojas-Sandoval, 2023).

Dikenli akasya tuzlu ve alkali topraklara ekilerek arazi rehabilitasyonunda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca atık su veya tuzlu suyla sulandığında gelişimini sürdürebilir ve kömür madenlerinde kömürün hazırlanması esnasında oluşan atıklardan etkilenen alanlarda da yetiştirme potansiyeline sahiptir. Ağacın koruma kuşağı olarak kullanımı popülerdir. Özellikle *Acacia nilotica* subsp. *Cupressiformis*, diğer taksonlara göre taç genişliğinin daha dar olması özelliğiyle daha az gölge oluşturduğundan çiftçiler tarafından tarlalar için ideal bir rüzgar kesici olarak yüksek oranda tercih edilmektedir. *A. nilotica* aynı zamanda popüler bir süs ağacıdır ve Hindistan'da sıklıkla cadde ağacı olarak dikilir. Firavunlar zamanından bu güne Sudan ve Mısır'daki Nil nehrinin kıyısındaki ormanlarda büyük ağaçlarından kereste olarak yararlanılmaktadır. Sudan'da özellikle demiryoluna uygun, termitlere dayanıklı kereste üretiminde; Hindistan ve Pakistan'da ise yakacak odun ve madencilikte destek olarak kullanılan kalasların üretiminde kullanılmaktadır. *Acacia nilotica*'dan elde edilen zambak boya ve ilaç

yapımında değerlendirilmektedir (Rojas-Sandoval, 2023).

Pek çok akasya türü, Na^+ ve K^+ iyonları açısından daha iyi iyonik dengeleri (yüksek Na^+/K^+ oranı) nedeniyle tuzlu koşullara iyi uyum sağlamaktadır (Abbas ve ark., 2013). Diğer kserofitler gibi akasya da kuraklığa karşı koyarak kurak ortamlarda hayatta kalma kapasitesine sahiptir. Doğal koşullar altında, bu türün fide, genç ağaç veya olgun ağaç olsun, özellikle yaz mevsiminde kurak dönemde yapraklarını döktüğü gözlemlenmiştir. Yaprak dökme, bitkilerin terleme yoluyla su kaybını önlemek için gösterdikleri karakteristik bir özelliktir (Ramoliya ve Pandey, 2002; Abbas ve ark., 2016) Ayrıca su kıtlığı koşullarında ince ve derinlere nüfuz eden köklerin oluşması, daha fazla su alımı için önemli bir mekanizma olarak kabul edilmektedir (Ramoliya ve Pandey, 2002).

Radwan ve ark., (2020), *Acacia nilotica* ve *Acacia raddiana* fidelerinin aşırı kurak koşullar altındaki fizyolojik tepkilerini incelemişlerdir. %12, %9, %6, %4 ve %2'lik farklı su rejimleri kullanılarak hiper kurak bir ortamda deneyler yapmışlardır. En yüksek fotosentetik aktif radyasyonda (photosynthetically active radiation, PAR) fotosentez ve terleme oranı ölçülmüş ve anlık su kullanım verimliliği hesaplanmıştır. *Acacia raddiana*'nın maksimum terleme oranı %4 toprak nem içeriğinde olmuştur. *Acacia nilotica*'nın maksimum terleme oranı ise %9 toprak nem içeriğinde olmuştur. Maksimum anlık su kullanım verimliliği %12 toprak nem içeriğinde *Acacia raddiana*'da görülmüş, *Acacia nilotica* ise %6 toprak nem içeriğinde maksimum anlık su kullanım verimliliği göstermiştir. *Acacia raddiana*, yüksek PAR'da ideal çöl bitkisi gibi davranmıştır. Diğer taraftan *Acacia nilotica*, yüksek

PAR ve düşük toprak nem içeriği seviyelerinde maksimum anlık su kullanım verimliliği sağlayarak fotosentez oranını maksimuma çıkarmış ve terleme oranını minimuma indirmiştir.

2. Çemen otu (*Trigonella foenum-graecum*)

Çemen otu (*Trigonella foenum-graecum* L.), Doğu Akdeniz'e özgü tek yıllık bir baklagil bitkisidir. Dünyanın birçok yerinde çoğunlukla baharat olarak yetiştirilir; yaprakları ve tohumları tıbbi amaçlar için yaygın olarak kullanılır (Bitarafan ve ark., 2019). *Trigonella*, küçük sarımsı beyaz çiçeklerin üçgen şekline atıfta bulunarak Latince 'küçük üçgen' anlamına gelen kelimedenden gelir; foenum-graecum ise 'Yunan samanı' anlamına gelir ve bitkiyi antik çağda çok yaygın bir yemlik ürün olarak kullanılan Yunanistan'dan alan Romalılar ona bu adı vermiştir (Mehrafarin ve ark., 2011). Çemen otu (fenugreek) tek biçimli, tek yıllık bir yem bitkisidir. Yem bitkisi olarak çemen otuna ilgi, olgunlaşmaya rağmen yüksek protein içeriğini koruyabilmesi nedeniyle yüksek olmuştur. Kök sistemi, nodülasyon yeteneğine ve dallanan yan köklere sahip bir kazık kökten oluşur. Yem üretiminde kullanılmasının yanı sıra çemen otunun tek yıllık doğası, üreticilere onu ekim nöbetlerinde ara ürün olarak kullanma fırsatı da sağlar. Çemen otu, geniş getiren hayvanlar için uygun, yüksek kaliteli yem üretme potansiyeline sahiptir (Acharya ve ark. 2006).

Çemen otu, genellikle Akdeniz iklimine özgü bir bitki türüdür ve tarih boyunca mutfakta (baharat olarak) ve geleneksel tıpta önemli bir rol oynamıştır. Bitkinin yaprak ve tohumları çeşitli amaçları için kullanılmaktadır (Sürmen ve Kara, 2023). Çemen otu esas olarak baharat

olarak kullanılan tohumları için yetiştirilmektedir. Dünya tohum pazarı kabaca 30.000 ila 50.000 ton arasındadır Yaprak gelişimi sıcaklığa bağlıdır. Çemen otunun hasat kabiliyeti bezelye veya mercimekten daha iyidir; bakla veya nohut ile benzerdir. Bitki boyu mekanik hasat için yeterli yüksekliktedir (McCormick ve ark. 2006).



Şekil 4. Çiçeklenmeye başlamış bir çemen tarlası (*Trigonella foenum-graecum* L.)

Kaynak: Basu ve ark., 2017

Bazı araştırmacılar, çemen otunun Akdeniz bölgesine, Pencap ve Keşmir gibi Asya bölgelerine, Mezopotamya ve İran çöllerine, Küçük Asya'ya ve Yunanistan, İtalya, Türkiye ve İspanya gibi Güney Avrupa'ya

özgü olduğunu öne sürmüşlerdir (Dangi ve ark., 2004). Bununla birlikte, çemen otunun kökeninin Güney Avrupa'dan ziyade Asya olduğu tahmin edilmektedir (Mehrafarin ve ark., 2011). Önemli çemen üretim alanları İran'dan Kuzey Hindistan'a kadar uzanmaktadır (Sindhu ve ark., 2017). Çemen otu farklı iklimlere yüksek uyum kabiliyeti nedeniyle Hindistan, Mısır, Etiyopya ve Birleşik Krallık dahil olmak üzere dünya çapında yetiştirilmektedir (Maleki ve ark., 2021). Çemen otu, Umman'da önemli bitki türlerinden biridir. Umman'da yaygın olarak beş ana bölgede yetiştirilmektedir: Dakiliya, Dhahira, Buraimi, Batinah ve Sharqiya (Al-Maamari ve ark., 2014). *Trigonella foenum graecum*'un tohumları şekil, boyut ve renklerine göre sınıflandırılmış ve üç gruba (Indicae, Anatolicae ve Aethiopicae) ayrılmıştır. Ayrıca farklı bir yaklaşımda altı türe (Yemen, Transkafkas, Afrika, Afgan, Çin-Fars ve Hint) ayrılmışlardır. Tunus'ta çemen özellikle üst yarı kurak, yarı nemli ve alt kurak bölgelerde yetişmektedir (Marzougui ve ark., 2009).

Çemen otu, Kuzey Amerika için yeni olan bir bitkidir. Araştırmalar, Batı Kanada bozkırları gibi ılıman iklime sahip bölgeler için alternatif bir yem bitkisi olarak çemen otunun önemli bir potansiyelini ortaya çıkarmıştır (Moyer ve ark., 2003). Aslında çemen otu geleneksel olarak Akdeniz bölgesinde yem bitkisi olarak kullanılagelmiştir (Acharya ve ark., 2006). 15 yıllık Batı Kanada ortalaması (Acharya ve ark., 2008), çemen otunun oldukça yüksek kuru madde (dry matter, DM) verimi ürettiğini göstermektedir. Kurak alanlarda ve sulama koşullarında kuru madde verimi sırasıyla 580 ve 600 kg/da iken, aynı bölgede kurak alanda yetiştirilen yonca verimi 780 kg/da'dır. Montgomery (2009), Edmonton, Alberta'da kuru alan

koşullarında yetiştirilen Quatro ve F70 çemen otu çeşitlerinin kuru madde verimini sırasıyla 290 ve 250 kg/da olarak bildirmiştir. Alberta'daki bu düşük çemen otu kuru madde verimi muhtemelen yetiştirme sezonundaki çok düşük yağıştan (34 mm) kaynaklanmıştır. Batı Kanada'da bulunan ılıman iklimlerde çemen otu yetiştirmeye olan ilgi, kurak araziye adaptasyonu nedeniyle artmıştır. Çemen otu kısa bir süre içinde yüksek biyokütle üretebildiğinden, topraklardaki organik madde içeriğini artırmak için "yeşil gübre" bitkisi olarak kullanılabilir. Marjinal arazilerde yetişebilir ve endüstriyel faaliyetlerden etkilenen arazilerin ıslahı için kullanılabilir. (Acharya ve ark. 2008). Kanada'da çemen otunun hayvan besleme programlarına dahil edilme potansiyeli 1990'lı yıllarda fark edilmiş ve süt inekleri için yoncaya alternatif bir yem bitkisi olarak ilgi çekmiştir (Alemu ve Doepel, 2011).

Avustralya'da çemen otunun sabitlediği azot miktarı mercimek ve şifalı otunkine benzer olup 7.6 ila 8.5 kg/da arasında değişmektedir. Çemen otunun Avustralya'da bezelye, mercimek ve bakla arasında en yüksek donma toleransına sahip olduğunu bulmuşlardır. Çemen otu %5 ile en düşük donma hasarını alırken, baklada bu oran %10, bezelyede %20 ve mercimekte %50 olmuştur (McCormick ve ark. 2006).

Çemen otu büyümenin tüm aşamalarında yüksek kaliteli yem sağlama ve kuraklığa adaptasyon kabiliyeti nedeniyle kısıtlı su şartlarında kaba yem üretiminde büyük öneme sahiptir (Acharya ve ark. 2008). Generatif aşama başladıktan sonra kalitede belirgin bir düşüş görülmez. Bu, üreticilerin hasat zamanı konusunda daha fazla esneklik sağlamasına, özellikle de çemen otu hasadını daha sınırlı bir hasat aralığına sahip diğer mahsullerin hasadına uygun hale getirebilmesine

olanak tanır. Çemen otunda yaygın olarak kullanılan bakteri *Rhizobium meliloti*'dir. Ancak yonca veya tatlı yonca için kullanılan aşılayıcılar da çemen otunda kullanılabilir. Çemen otu bitkileri çıkış sonrası diğer baklagillere göre daha yavaş büyüdüğünden yabancı otlarla rekabeti düşüktür. Ekimden önce tarlanın yabancı ottan arı olması şarttır (Montgomery, 2009).

Çemen otu yoncadan daha yüksek ham protein seviyelerine sahiptir. Diğer yandan, in vitro gaz üretimi ve uçucu yağ asidi içeriği neredeyse yonca ile aynıdır. Olgun çemen otu, birinci sınıf kesilmiş yoncaya benzer yem kalitesine (protein ve lif içeriği) sahiptir ve bu da çemen otunu büyümenin herhangi bir aşamasında kullanılmasını kolaylaştırır. Yarı kurak yerlerde ot veriminin yüksek olduğu ve yoncanın aksine, ürünün şişkinlik yapmadığı bilinmektedir (Sürmen ve Kara, 2023).

Çemen otu, kuraklığa ve sıcaklığa dayanıklılığı, kısa süreli ürün rotasyonlarına dahil edilebilmesi, hayvan yemi için kuru ot ve silaj olarak kullanılması, toprak verimliliğini artırıcı özellikleriyle çok yararlı bir baklagil yem bitkisi olarak görülmektedir (Ahari ve ark., 2009). Çemen otunun verim potansiyeli, üretilen toplam biyokütle veya ürünün tarımsal açıdan önemli kısmı olarak tanımlanabilir. Toplam biyokütle, bitkideki metabolik reaksiyonların entegrasyonunun bir sonucudur. Sonuç olarak, bitkinin büyümesinin herhangi bir döneminde metabolik aktivitesini etkileyen herhangi bir faktör verimi etkileyebilir (Ahmed ve ark., 2010). Çemen otu bitkilerinin metabolik süreçleri büyük ölçüde bitkinin hem genetik yapısı hem de iklimsel ve edafik çevresel faktörler olmak üzere iki ana faktörü içeren koşullar tarafından yönetilir. Ilıman

Akdeniz iklimi tarımı için ideal bir bitkidir. Burada bitkiler yaklaşık dört ayda olgunlaşır. Çemen otunun çiçeklenme mevsimi genellikle yaz ortasıdır. Soğuk ve nemli koşullar altında büyüme daha yavaştır ve bu koşulların uzun süre devam etmesi, bitkilerin tohum hasadı için olgunlaşmamasına neden olabilir. Kurak toprakların bitkisi olduğundan su ihtiyacı düşüktür (Branch, 2013).

Çemen otu taşıdığı tıbbi değer sayesinde diğer baklagil yem bitkilerinde bulunmayan hayvan büyümesini teşvik eden bazı maddeler içerir ve bu nedenle su kaynaklarının ciddi kirleticileri olarak kabul edilen sentetik büyüme teşvik edici ilaçlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir (Acharya ve ark., 2006). Tıbbi değere sahip bitkilerin hayvan beslenmesinde yem katkı maddesi olarak kullanımının yemden yararlanmayı arttırarak büyümeyi teşvik ettiği ve hayvan sağlığını koruduğu bilinmektedir (Bilgin ve Yavaş, 2024). Genellikle büyükbaş hayvan yetiştiricileri sığırların hızlı kilo alımını teşvik etmek için sıklıkla sentetik hormonlar kullanmaktadır. Hormonların içerdiği kimyasallar hayvan dışkılarıyla tatlı su kaynaklarına sızarak kirliliğe neden olabilmektedir. Bu bağlamda çemen otu su kalitesi yönetimi açısından da önemli bir rol oynayabilir. Kuzey Amerika'nın büyük bir kısmı su kıtlığı çektiği ve tatlı suya talep yüksek olduğu için kuraklığa toleranslı olan çemen otu ilgi çekmektedir. Bu ürün, asgari ancak zamanında sulama ile yüksek biyokütle üretebilir. Bu anlamda çemen otu, Batı Kanada'da ve ABD'nin kurak bölgelerinde azalan tatlı su kaynakları üzerinde olumlu etki yaratma potansiyeline sahip etkili bir su koruyucusu olarak düşünülebilir. Geleneksel bir "Eski Dünya" ürünü olan çemen otu, sahip olduğu potansiyel sayesinde "Yeni Dünya'da bir

geleceğe sahip gibi görünmektedir (Acharya ve ark., 2006).

3. Yem baklası (*Vicia faba*)

Bakla (*Vicia faba* L.), genotipe bağlı olarak %24-30 protein (Sahile ve ark., 2009) ve %51-68 karbonhidrat içeren önemli bir gıda ve yemlik baklagildir (Hendawey ve Younes, 2013). Yem baklası yüksek protein içeriği ve dengeli bir amino asit profili sayesinde insan ve hayvan beslenmesinde avantajlar sağlamaktadır (L'Hocine ve ark., 2020). Bakla, simbiyotik N₂ fiksasyonu yoluyla toprağı azotca zenginleştirerek gübre gereksinimini azalttığı (Jensen ve ark., 2010) için ekim nöbetinde ara ürün olarak tercih edilir (Nebiyu ve ark., 2016). *Vicia* cinsinin ekonomik açıdan en önemli türüdür (Alharbi & Adhikari, 2020). Dane baklagiller arasında bakla, son zamanlardaki ekonomik ve çevresel faydalar nedeniyle Avrupa tarımında giderek daha popüler hale gelmektedir. Bakla son derece verimli bir ürün olabilir ancak kuraklık stresine karşı hassastır ve verim üzerine kuraklığın etkisi mevsimden mevsime önemli ölçüde değişiklik gösterebilir (Khan ve ark., 2007).

Akdeniz iklim tipi koşullarında verimi en üst düzeye çıkarmak için tek yıllık ürünler mümkün olduğunca erken ekilmelidir. Erken ekim yem baklasında da geç ekime göre daha yüksek toplam biyokütle üretimi sağlamaktadır (Manning ve ark., 2020). Büyüme mevsiminin başlangıcındaki yağış değişkenliği, geç ekimlerde ürünleri su açığına maruz bırakabilir ve bu da ürün ölümüne neden olabilecek veya potansiyel verimi azaltabilecek kadar ciddi olabilir. *Vicia faba*'da ekimin geciktirilmesi, ekimden kısa bir süre sonra ciddi bir su eksikliği olasılığı olmasa dahi bakla tanesi verimini azaltma olasılığı yüksektir (French,

2010).

ABD'de yem baklası genellikle Kaliforniya'nın Central Valley bölgesinde örtü bitkisi karışımlarında bulunur. Bu bölgede yem amaçlı kullanımı azdır fakat yem olarak baklanın en çekici yanı, yem türü çeşidi doğru seçildiğinde 500 kg/da'nın üzerinde yeşil ot verimine çıkabilmesidir. Bakla aynı zamanda fiğ ve bezelyeden daha fazla toprağa azot bağlama potansiyeline sahiptir (Braunwart ve ark., 2001).



Şekil 5. Kışa dayanıklı yeni geliştirilen bir bakla bitkisi.

Kaynak: ARS, 2016

Vicin, convicin ve tanenler gibi kaliteyi sınırlayan faktörler birçok hayvan diyetinde yem baklasının değerini tehlikeye atmaktadır. Primidin glikozitlerinden olan vicin ve convicin kotiledonlarda depolanır ve genetik kusur (Glukoz6-fosfat dehidrojenaz eksikliği, G6PD) taşıyan insanlar için ve ayrıca yumurta tavuğu ve piliç üretimi için zararlıdır

(Khazaei, 2014). Tohum kabuğundaki tanenler ise tek mideli hayvanlarda protein ve enerji sindirilebilirliğini azaltır (Crépon ve ark. 2010). Bakla ıslah programlarında düşük tanen içeriği (zt1 ve zt2) ve düşük vicin-convicine içeriği (zvc) veren aleller tanımlanmış ve ıslah programlarında kullanılmaktadır. Bu sayede insan ve hayvan beslenmesinde kalite değeri iyileştirilmiş yeni bakla çeşitlerinin geliştirilmesi hız kazanacaktır (Torres ve ark. 2010).

Gelişmekte olan ülkelerin iklim değişikliğinden en fazla etkilenmesi muhtemel kuru bölgelerinde önemli bir protein kaynağı olan baklanın (*Vicia faba*), baklagil türleri arasında su eksikliğine nispeten daha duyarlı olduğu bilinmektedir (Khan ve ark., 2010). Sulamaya oldukça iyi tepki verir (Oweis ve ark. 2005), ancak çoğu üretim bölgesinde nadiren sulanır ve büyümesi ve gelişmesi çoğunlukla depolanan toprak nemine ve yağışa bağlıdır.

Baklada verim artışı ve stabiliteyi sağlamak için yetiştiriciliğe ilişkin bazı uygulamaların iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ancak etkili çalışmaların az olmasından dolayı diğer türlerle karşılaştırıldığında ilerleme nispeten yavaş olmuştur (Stoddard ve ark. 2006). Kuraklığa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, bakla verim istikrarını iyileştirmek için esastır. Bu türde kuraklık stresine tepkide geniş genotipik varyasyon rapor edilmiştir. (Ricciardi ve ark., 2001; Khan ve ark. 2007). Kuraklığa toleranslı genotiplerin belirlenmesinde kullanılan alan fenotiplemesi maliyetli (yağmuru engelleyen barınakların kurulması ve bakımının yapılması gerektiğinde) ve zaman alıcıdır. Ayrıca mevsimsel değişiklikler sonucu kuraklık dönemlerinin süre, zaman ve yoğunluk bakımından farklılık göstermesi nedeniyle

genellikle güvenilir çıkıtlar üretebilmektedir (Khan ve ark., 2007). Bunun aksine, kontrollü koşullar altında tarama, hızlı yanıt ve güvenilir sonuçlar açısından bu tür araştırmalar için daha idealdir (Richards ve ark. 2010; Monneveux ve ark. 2014). Genotiplerin kuraklık stresine tepkilerinin kontrollü koşullarda belirlendiği çalışmalardan elde edilen bulguların daha sonrasında tarla şartlarına aktarılması gerekmektedir. Çünkü ıslah programının başarılı olabilmesi için geliştirilen yeni bir genotipin tarla koşullarında da iyi performans göstermesi gerekir. Yeni sensör teknolojilerindeki gelişmeler, otomatikleştirilmiş, yüksek verimli ve hassas fenotipleme platformlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Kurulumu maliyetli olmasına rağmen, bu platformlar çok sayıda örnekte veri toplamayı kolaylaştırıp otomatikleştirir ve böylece manuel ve görsel ölçümlerden oluşan hataları pratik olarak azaltır (Khazaei,2014). LemnaTec (Almanya; <http://www.lemnatec.com/plant-FENOTYPING.php>), PHENOPSIS (Granier ve ark. 2006), GROWSCREEN (Walter ve ark. 2007) ve TraitMill (Reuzeau ve ark., 2006) bu platformlardan bazılarıdır.

Stomaların kapanması kuraklığı önlemenin en önemli mekanizmasıdır ve köklerden taşınan absisik asitten (ABA) etkilenir. Daha yüksek stoma yoğunluğuna sahip bakla genotiplerinin daha düşük verime ve su stresine karşı daha az dirence sahip olduğu, daha düşük stoma yoğunluğunun ise kuraklıktan daha iyi kaçınma ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Uygun stoma aktivitesi baklada su kaybını azaltarak ve terleme verimliliğini artırarak kuraklığa adaptasyonun iyileştirilmesinde anahtar rol oynayabilir (Khazaei, 2014). Su kullanım verimliliği (water-use efficiency, WUE), genellikle suyun sınırlı olduğu koşullar altında

mahsul verimliliğinin en önemli belirleyicilerinden biri ve bitkilerin kuraklığa adaptasyonu için bir hedef olarak öne sürülmüştür. Ancak Blum (2009), kuraklık koşullarında yüksek WUE seçiminin verim ve kuraklığa uyumda genellikle negatif etkiye yol açtığını ileri sürmüştür. Kutikular mum, yaprakları terlemeden kaynaklanan su kaybına karşı korur. Baklada kutikular mum içeriğindeki ve kuraklık stresine yanıt olarak sentezindeki değişiklikler henüz belgelenmemiştir. Ancak kök özelliklerinin birçok ürün türünde olduğu gibi baklada da kuraklığın önlenmesinde önemli bir katkı sağladığı gözlenmiştir (Monneveux ve ark., 2014). Uygun kök özellikleri sayesinde su alımı maksimuma çıkarılabilir ve dehidrasyon ertelenebilir. Bunlardan ilki köklenme derinliğidir; sığ kökler kendilerine sunulan suyu tükettiğinde daha derindeki kökler toprak profilinin derinliklerinden su çekmeye devam edebilir. Baklanın bazen toprak tipine bağlı olarak maksimum kök derinliği 50 – 90 cm olan nispeten sığ köklü olduğu kabul edilir (Khazaei, 2014). Bakla germplazmında köklenme derinliğinde geniş çeşitlilik mevcuttur; örneğin bir çalışmada ekimden 35 gün sonra sekiz genotipin köklenme derinliği 32 ila 45 cm arasında ölçülmüştür. Stoma aktivitesi ile ilgili özelliklere ve kuraklığa adaptasyonun diğer yönlerine odaklanan bakla üzerine yapılan önceki çalışmalar, bu türün köklerine ilişkin araştırmalara duyulan ihtiyacı ortaya koymuştur (Khan ve ark., 2007; 2010).

Ozmotik ayarlama, hücrelerin çevrelerine uygulayabileceği ozmotik kuvveti artırarak ve dolayısıyla su alımını artırarak hücre su içeriğini korur. Ozmotik ayarlama, baklada derinlemesine araştırılmamıştır ancak diğer birçok baklagil türünde gözlemlenmiştir.

Kuraklıktan kaçış, bir mahsulün yaşam döngüsünü kuraklığın veya olumsuz koşulların başlamasından önce tamamlama yeteneğidir. Mahsul büyümesinin yağış düzeniyle eşleştirilmesi, kuraklığa eğilimli ortamlar, özellikle de nihai kuraklığa eğilimli olanlar için en önemli yetiştirme hedeflerinden biridir (Khazaei, 2014). Erken çiçeklenme, terminal kuraklığın muhtemel olduğu durumlarda en önemli fenolojik özelliktir. Sonuç olarak, erken ekim ile birlikte erken fide gücü ve kuru ortamlarda daha iyi kök oluşumu, toprağın hızla kaplanmasına olanak tanır ve sonuç olarak topraktan buharlaşmayı azaltır. Erken üretim yoluyla nihai kuraklıktan kaçış, Akdeniz ortamlarında başarılı bir yetiştirme stratejisidir. Erkencilik, mahsullerin nihai kuraklıktan kaçınmasına izin verse de, iyi sulanan koşullar altında verimin düşmesine yol açabilir. Bakla çeşitlerinde çiçeklenme başlangıcına kadar geçen günlerde (Khazaei ve ark. 2012) ve sıcaklık ve gün uzunluğuna verilen gelişimsel tepkilerde önemli farklılıklar vardır (Patrick ve Stoddard, 2010). Erkencilik aynı zamanda kuzey bölgesi gibi genellikle kısa mevsim iklimleri için de arzu edilen bir özelliktir (Stoddard ve Hamalainen, 2011).

Akdeniz bölgesinde su stresi bakla verimini sınırlayan ana faktördür. Ricciardi ve ark., (2001), yürüttükleri çalışmada, ıslah programında geliştirilmiş sekiz bakla popülasyonun ve iki çeşidin su stresine verdiği yanıtı incelemişlerdir. Tüm genotipler, şeffaf plastik bir örtü ile yağmurdan korunan büyük kaplarda yetiştirilmiş ve simüle edilmiş su stresine tabi tutulmuştur. Stressiz ve stresli koşullarda, su durumu yaprak su potansiyeli (leaf water potential, LWP) ve stoma direnci (Rs) ölçümleri yoluyla kaydedilmiştir. Ayrıca, genotipler ana

biyo-agronomik özellikler, absisik asit içeriği açısından değerlendirilmiş ve genotiplerin su stresine duyarlılığının bir indeksi hesaplanmıştır. Sonuçlar LWP ve Rs ölçümlerinin simüle edilmiş su stresini tanımlamada yararlı olduğunu, ancak su stresine toleransı olan genotipleri ayırt etmek için çok uygun olmadığını göstermiştir. Genotip duyarlılık indeksinin kullanımı, su stresine karşı genotiplerin farklı yanıtlarını tahmin etmede etkili olmuş, ancak absisik asit (ABA) tayini, ıslah programlarında su stresine karşı toleransın belirlenmesi hakkında herhangi bir yararlı bilgi sağlamamıştır.

Baklada kuraklık toleransının fizyolojik temellerini anlamak, dayanıklılığı belirlemede kullanılacak özelliklerin seçimi için önemlidir. Bunun için öncelikle kuraklık toleransı ile ilişkili fizyolojik özelliklerdeki genetik çeşitliliğin büyüklüğünü belirlemek ve ikinci olarak ıslah programlarında dayanıklılığı belirlemede kullanılabilecek potansiyele sahip özellikler arasındaki ilişkiyi keşfetmek gerekir. Yapılan çalışmalar bakla genotipleri arasında düşük genetik benzerlik ile birlikte yüksek polimorfik oranının, kuraklık stresine karşı farklı tolerans özelliklerini bir genotipte bir araya getirmek için ıslah programlarında kullanılabilecek yüksek düzeyde bir heterojenlik olduğunu göstermektedir. Özetle, baklanın mevcut genetik çeşitlilik varlığı bu türde kuraklığa dayanıklı çeşitlerin elde edilmesinde genetik havuz kullanılarak başarılı ıslah programlarının yapılabileceğini yüksek olasılıkla kanıtlamaktadır (Alghamdi ve ark., 2014)

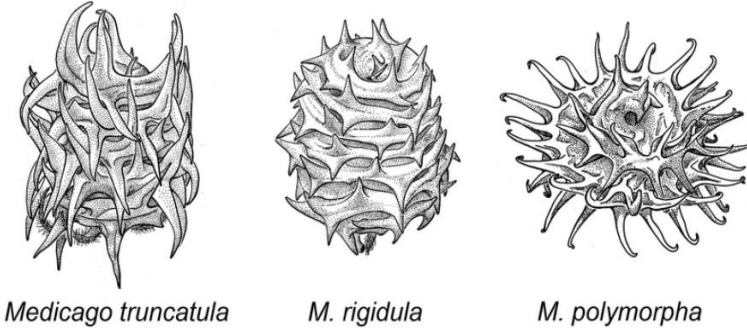
4. *Medicago truncatula*

Yem üretmek, karma çiftliklerde ve besi hayvanı çiftliklerinde geviş getiren hayvanları beslemek için birincil öneme sahiptir. Yemin değeri, hayvanlar tarafından tüketilen biyokütlenin miktarına ve kalitesine bağlıdır (Ball ve ark. 2001). İklim (özellikle güneş ışınımı, yağış ve sıcaklık) (Huyghe ve ark., 2014), botanik kompozisyon, toprak özellikleri, gübre uygulaması, mera yönetimi (biçme veya otlatma) (Lemaire ve ark., 2000) yem kapasitesini etkileyen önemli etmenlerdir. Avrupa ülkelerinde saf buğdaygil meralarında ortalama kuru madde (dry matter, DM) verimi 8-15 ton (DM)/ha/yıl ile kuzeybatı Avrupa'nın ılıman bölgelerinde (52–57° K enlemleri) en yüksek verime sahiptir (Graux ve ark. 2020). Güney Avrupa'da (Akdeniz ülkeleri ve güney Portekiz), su stresi genellikle verimi etkileyerek 1-5 ton DM/ha/yıl veya daha altına düşürebilir (Poirier ve ark. 2012). Avrupa'nın tüm bölgelerinde, genellikle saf baklagil otlaklarının verimi yüksek azot (N) gübrelemesi altındaki saf buğdaygil otlaklarından daha düşüktür, ancak düşük N gübrelemesi altındaki saf baklagiller ise saf buğdaygillere göre daha yüksek verime sahiptir (Nyfeler ve ark., 2011). Hem buğdaygil hem de baklagil yem bitkileri için potansiyel verimlilik zamanla değişir: tesis yılında en düşük seviyededir, takip eden 2-3 yılda zirveye ulaşır ve daha sonra türe bağlı olarak azalır. Karışık ekimler genellikle düşük girdili yönetim altında kültür bitkileriyle dönüşümlü ekilen geçici meralarının ömrünü uzatır ve yüksek verim eldesi sağlar (Nyfeler ve ark. 2009). Tüm iklimlerde buğdaygil+baklagil karışım meralarından genellikle ortalama 0.5-4.0 ton DM/ha/yıl arasında verim elde edilir (Martin ve ark., 2020). Bu bağlamda çeşitli iklim tiplerinde yalın ekim yerine uygun türlerin

karışım şeklinde ekimlerinin daha avantajlı olduğunu söyleyebiliriz.

Güneybatı Avustralya'nın tarım alanı Akdeniz tipi bir iklime sahiptir. Aynı zamanda doğası gereği toprak verimliliği düşüktür ve buralarda koyun ve sığırların otlatmasına uygun yerli baklagiller bir döneme kadar yoktur. Bu durum, Akdeniz havzasına özgü, kendi kendini yenileyebilen tek yıllık mera baklagilleri içeren tarım sistemlerinin geliştirilmesiyle değişmiştir (Howieson ve ark., 2000). Süperfosfat kullanımıyla birlikte mera baklagilleri toprak verimliliğini ve mahsul verimini pozitif yönde etkilemiş böylece daha fazla hayvansal üretime yol açmıştır. Mera baklagillerinin tarım sistemlerine dahil edilmesiyle kendinden sonar gelen ürünün hastalık ve zararlı yaşam döngüleri kırılmış olur. 1990'ların başından önce, Batı Avustralya'daki tek yıllık mera baklagil seçenekleri büyük ölçüde asitli topraklardaki yeraltı yoncası (*Trifolium subterraneum*) ve nötr-alkali topraklardaki tek yıllık yonca (*Medicago* spp.) ile sınırlıydı. Yeraltı yoncasının yaygın kullanımının iki anahtarı, yoğun otlatmaya karşı toleransı ve çiçeklenme zamanları farklı olan bir kaç çeşidin varlığıdır; bu özellikler çok çeşitli büyüme mevsimi uzunluklarına sahip ortamlarda yetiştirilmesine olanak tanır. Tek yıllık *Medicago*'lar düşük yağış alan bölgelerden orta yağışlı bölgelere kadar geniş bir ekiliş alanine sahiptir. Yüksek düzeydeki sert tohum özelliği, onların ürün rotasyonu sistemlerine adaptasyonunu artırır. Tek yıllık olarak ekilen başlıca *Medicago* türleri *Medicago truncatula*, *Medicago littoralis* ve *Medicago polymorpha* var *brevispina* olmuştur. *Medicago scutellata*, *Medicago rugosa* ve *Medicago tornata* ekimi ise sınırlıdır. 1980'lerin ortasında aside dayanıklı *Medicago murex* çeşidi ticarileştirilmiştir. O dönemde kayıtlı çeşitlere sahip ticari olarak

temin edilebilen diğer türler, *Ornithopus pressus*, *Trifolium michelianum*, *Trifolium resupinatum*, *Trifolium hirtum*, *Trifolium cherleri* ve *Ornithopus pinnatus*'dur (Nichols ve ark., 2010). 1990'ların başlarından bu yana, mevcut tarım sistemlerinde bir dizi sürdürülebilirlik ve ekonomik zorluklar ortaya çıkmış ve bu da geleneksel türlerdeki eksiklikleri ve baklagillerin biyolojik çeşitliliğinin eksikliğini ortaya çıkarmıştır. Değişimin bazı etkenleri şunlardır: 1) yeraltı yoncasının ve tek yıllık *Medicago*'ların zorlu topraklara, özellikle de derin, asitli kumlara ve tuzluluğa maruz kalan topraklara zayıf adaptasyonu; 2) artan ekim sıklıkları nedeniyle yumuşak tohumlu mera baklagillerinin tohum bankasının tükenmesi; 3) yeraltı üçgülü ve tek yıllık tohumların vakumla toplanmasından kaynaklanan toprak erozyonundan kaynaklanan çevresel kaygılar; 4) meraların yeniden ekimi için daha ucuz tohum ihtiyacı; 5) özelleşmiş yemlik baklagillere duyulan ihtiyaç; 6) yeraltı suyu şarjı kaynaklı kurak alan tuzlanma potansiyelini azaltmak için daha derin köklü bitkilere duyulan ihtiyaç ve 7) verimleri istikrara kavuşturmak için padoklarda daha fazla tek yıllık baklagil çeşitliliğine duyulan ihtiyaç. Bu yeni zorluklar, mevcut ve gelecekteki tarım sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılayacak özelliklere sahip mera baklagil seçenekleri yelpazesinin genişletilmesini gerektirmiştir (Nichols ve ark. 2007).



Şekil 6. *Medicago* türlerinin tipik meyveleri. *Medicago truncatula* karakteristik olarak meyvelerde (çoğunlukla dikenlerde) birkaç basit tüye sahipken, *M. rigidula* kabukları tipik olarak bez uçlu tüylerden oluşan kadifemsi bir yüzeyle kaplıdır (Gösterilen tüm meyveler yaklaşık 1 cm genişliğindedir (Çizen: Lucy Yuzyk).

Kaynak: Riefner Jr ve Small, 2009

Güney Afrika'nın Akdeniz benzeri bölgesinde, Western Cape Eyaleti'nin Swartland, Rûens ve Overberg bölgeleri başlıca tarımsal bölgelerdir. Burada, mevcut tarım arazisinin yaklaşık %24'ünün esas olarak tek yıllık *Medicago*, *Trifolium* ve çok yıllık yemlik baklagil türleri *Medicago sativa* kaplamaktadır (Swanepoel ve Tshuma, 2017). Bu alanlarda yem bitkileri, buğday (*Triticum aestivum*), arpa (*Hordeum vulgare*), kanola (*Brassica napus*) ve yulaf (*Avena sativa*) gibi ticari ürünlerle dönüşümlü olarak kurak alan koşullarında ekilmektedir (Porqueddu ve González, 2006). Bu yem bitkisi-tahıl rotasyonlarının son derece etkili olduğu ve baklagil yem bitkilerinin rotasyona dahil edilmesinin genel çiftlik verimliliğinde iyileşmeye yol açtığı görülmüştür (Martin ve ark., 2020). Bununla birlikte, bölgedeki iklim değişikliği, tek yıllık bitkilerde tohum çimlenmesini, fide oluşumunu ve büyümesini etkileyerek bu rotasyon sistemlerinin yem bitkisi aşamasının verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu durum özellikle tohumun çimlenmesi ve ardından fide oluşumu ve büyümesi için ihtiyaç

duyulan suyun sınırlı olduğu kuru dönemlerde geçerlidir (Hu ve ark., 2015). Güney Afrika'nın kışın yağış alan bölgesi için öngörülen iklim değişikliği senaryoları kapsamında, artan yağış değişkenliği ve yağışlı mevsimin gecikmeli başlangıcı (sıcaklık artışlarıyla birlikte), fide oluşumunun ve tesisten sonra hayatta kalmanın zayıf olmasına neden olacağı beklentisi önemli bir endişedir (Nichols ve ark., 2007).

İklim değişikliği senaryolarının çoğu, Akdeniz havzası da dahil olmak üzere dünya genelinde kurak alanlarda bir artış öngörmektedir. Bu nedenle su eksikliği en önemli abiyotik streştir ve suyun sürdürülebilir kullanımına yönelik stratejilerin yanı sıra bitkilerde kuraklığa dayanıklı türler üzerinde yoğunlaşmayı gerektirmektedir. Yaygın olarak “fıçı yoncası” olarak bilinen *Medicago truncatula* , Akdeniz kökenli, yarı kurak koşullara, yani alkali killi topraklara iyi adapte olmuş bir baklagil yem bitkisidir. Bu tür, moleküler ve genetik çalışmalarda kullanılmasını sağlayan özelliklere sahip bir baklagil modeli olarak kabul edilir (Nunes ve ark., 2008).



Şekil 7. *Medicago truncatula*; a) genel görünüm (Foto: Thomas Friedrich), b) çiçek (Foto: Jean-Paul Boerekamps) ve c) bakla (Foto: Joey Bom).

Kaynak: Catalogue of Life

Badri ve ark. (2016), Tunus'da toprak bileşimi, tuzluluk ve su bulunabilirliği açısından çeşitlilik gösteren ortamlardan örneklenen 11 *Medicago truncatula* popülasyonunda kuraklığa tepkinin doğal varyasyonunu analiz etmişlerdir. Bitkiler iyi sulanan ve %50 tarla kapasitesi (su eksikliği) uygulamaları altında serada yetiştirilmiştir. Ölçülen özelliklerin çoğu için en büyük popülasyon farklılaşması kuraklık stresi altında gözlemlenmiştir. Kuraklığa dayanıklılıkta 45 hassas, 14 orta derecede hassas, 31 toleranslı ve 23 en toleranslı hat tespit edilmiştir. Toleranslı grup, plajiotropik eksenlerin uzunluğunda, gövde uzunluğunda, boğum sayısında ve yaprak sayısında en düşük azalmaları yaşamıştır.

Müller ve ark., (2022), üç farklı tek yıllık *Medicago* türünün ve beş farklı tek yıllık *Trifolium* türünün tohum çimlenmesi, fide oluşumu ve erken fide büyüme aşamalarında uygulanan kuraklık stresine verdiği tepkilerini karşılaştırmışlardır. İlk denemede tohum çimlendirme odalarında 5 ila 30°C arasında değişen sabit sıcaklıklarda, 5°C artışlarla, her sıcaklıkta beş ozmotik işlem uygulanarak çimlendirilmiş ve çimlenme günlük olarak kaydedilmiştir. İkinci denemede tohumlar toprağın nem tutma kapasitesinin %100, 70, 50 ve 30'unda, daha sonrasında sulama yapılmadan ekildi ve çıkışları günlük olarak kaydedildi. Üçüncü deneyde, bir aylık fideler iki su kısıtlama dönemine (15 veya 30 gün) tabi tutulmuş ve morfolojik tepkileri ölçülmüştür. Türlerin kuraklık stresine gösterdikleri tepkilerin önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür. Beş tür - *Medicago polymorpha*, *Medicago truncatula*, *Trifolium alexandrinum*, *Trifolium vesiculosum* ve *Trifolium subterraneum* ssp. *subterraneum* - kuraklık stresini diğer türlere göre

daha iyi tolere edebilmiştir.

Yousfi ve ark. (2010), *Medicago truncatula* ve *Medicago laciniata*'da su eksikliği stresine daha dayanıklı olan genotip ve çeşitlerde kök/sürgün oranının artmasını önemli bulmuştur. *Medicago laciniata* ve *Medicago truncatula* popülasyonları arasındaki su kıtlığına karşı kuraklık toleransının değişkenliğinin, bunların daha düşük içsel büyüme hızı ve gaz değişiminin stoma kontrolü ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Su eksikliğine maruz kalan *Medicago truncatula* ve *Medicago laciniata* bitkilerinde net CO₂ asimilasyonu ile büyüme arasında yakın bir ilişki bildirmişlerdir.

Medicago truncatula cv Jemalong'un su yoksunluğu nedeniyle artan su açığına tepkisi Nunes ve ark. (2008), tarafından incelenmiş, kuraklık koşulları altında yüksek düzeyde net CO₂ asimilasyonunu sürdürmenin, esas olarak stoma iletkenliğini azaltarak kuraklıktan kaçınma mekanizmalarından olduğunu bildirmişlerdir.

İki *Medicago truncatula* genotipinin (Jemalong A17 ve R108) su eksikliği stresine farklı adaptasyonu Luo ve ark., (2016) tarafından analiz edilmiştir. R108 ile karşılaştırıldığında Jemalong A17 fidelerinin kuraklık toleransının, stoma açıklıklarındaki azalmaya bağlı olarak daha az su kaybı ve daha yüksek bağıl su içeriği ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Rouached ve ark., (2013), *Medicago truncatula*'nın kuraklık koşullarında büyümesinin büyük ölçüde uygun doku hidrasyonunu ve kök gelişimini sürdürme kapasitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kök gelişimi (kök kılı, kök dalları ve kök yoğunluğu) bitkilerin toprakta depolanan suyu daha kolay emmesine ve

kullanmasına olanak tanımaktadır (Molor ve ark. 2017).

KAYNAKÇA

- Abbas, G., Saqib, M., & Akhtar, J. (2016). Differential Response of Two *Acacia* Species to Salinity and Water Stress. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 53(1).
- Abbas, G., Saqib, M., Akhtar, J., and Basra, S. M. A. (2013). Salinity tolerance potential of two *Acacia* species at early seedling stage. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 50(4).
- Acharya, S. N., Thomas, J. E., & Basu, S. K. (2006). Fenugreek: an “old world” crop for the “new world”. *Biodiversity*, 7(3-4), 27-30.
- Acharya, S. N., Thomas, J. E., & Basu, S. K. (2008). Fenugreek, an alternative crop for semiarid regions of North America. *Crop science*, 48(3), 841-853.
- Ahari, D. S., Kashi, A. K., Hassandokht, M. R., Amri, A., & Alizadeh, K. (2009). Assessment of drought tolerance in Iranian fenugreek landraces. *J. Food Agric. Environ*, 7(3-4), 414-419.
- Ahmed, M. A., Ibrahim, O. M., & Elham, A. B. (2010). Effect of bio and mineral phosphorus fertilizer on the growth, productivity and nutritional value of fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) in Newly Cultivated Land. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 6(3), 339-48.
- Al-Maamari, I. T., Al-Sadi, A. M., & Al-Saady, N. A. (2014). Assessment of genetic diversity in fenugreek (*Trigonella foenumgraecum*) in Oman.
- Alemu, A. W., and Doepel, L. (2011). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as an alternative forage for dairy cows. *Animal*, 5(9), 1370-1381.
- Alghamdi, S. S., Al-Shameri, A. M., Migdadi, H. M., Ammar, M. H., El-Harty, E. H., Khan, M. A. and Farooq, M. (2014). Physiological and Molecular Characterization of Faba bean (*Vicia faba* L.) Genotypes for Adaptation to Drought Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*. ISSN 0931-2250.
- Alharbi, N. H., & Adhikari, K. N. (2020). Factors of yield determination in faba bean (*Vicia faba*). *Crop and Pasture Science*, 71(4), 305-321.
- ARS. (2016). New faba beans offer multiple benefits. Agricultural Research Service. <https://phys.org/news/2016-07-faba-beans-multiple-benefits.html>
- Badri, M., Bouhaouel, I., Arraouadi, S., Taamalli, W., Huguet, T., and Aouani, M. E. (2016). Variation in tolerance to drought among Tunisian populations of *Medicago truncatula*. *Plant Genetic Resources*, 14(1), 41-49.

- Ball, D. M., Collins, M., Lacefield, G. D., Martin, N. P., Mertens, D. A., Olson, K. E., ... & Wolf, M. W. (2001). Understanding forage quality. American Farm Bureau Federation Publication, 1(01), 1-15.
- Bargali, K., and Bargali, S. S. (2009). *Acacia nilotica*: a multipurpose leguminous plant. Nature and Science, 7(4), 11-19.
- Basu, S. K., Zandi, P., & Cetzal-Ix, W. (2017). Opportunities for fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a chemurgic crop in the emergent global nutraceutical and functional food industries. International Journal on Agricultural Sciences, 8(1), 9-13.
- Bilgin, F.D. and Yavas, İ. 2024. Use of Some Medicinal and Aromatic Plants in Animal Nutrition: A Review. 15. International Conference on Agriculture, Animal Science & Rural Development. Conference Proceedings Book, pg. 87-88. July 12-14, 2024 / Aydın, Türkiye
- Bitarafan, Z., Asghari, H. R., Hasanloo, T., Gholami, A., Moradi, F., Khakimov, B., ... and Andreasen, C. (2019). The effect of charcoal on medicinal compounds of seeds of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) exposed to drought stress. Industrial Crops and Products, 131, 323-329.
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field crops research, 112(2-3), 119-123.
- Branch, S. (2013). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a valuable medicinal plant. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 1, 922-931.
- Braunwart, K., Putnam, D., & Fohner, G. (2001). Alternative annual forages—now and in the future. In Proc. 31st California Alfalfa and Forage Symposium.
- Catalogue of Life. *Medicago truncatula* Gaertn. Published in: Fruct. Sem. Pl.2: 150 (1790). <https://www.gbif.org/species/2965280>
- Crépon, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouee, B., Arese, P., Duc, G. 2010. Nutritional value of faba bean (*Vicia faba* L.) seeds for feed and food, Field Crops Research, 115(3):329–339.
- Dangi, R. S., Lagu, M. D., Choudhary, L. B., Ranjekar, P. K., & Gupta, V. S. (2004). Assessment of genetic diversity in *Trigonella foenum-graecum* and *Trigonella caerulea* using ISSR and RAPD markers. BMC Plant Biology, 4, 1-11.
- French, R. J. (2010). The risk of vegetative water deficit in early-sown faba bean (*Vicia faba* L.) and its implications for crop productivity in a Mediterranean-type environment. Crop and Pasture Science, 61(7), 566-577.

- Granier, C., Aguirrezabal, L., Chenu, K., Cookson, S. J., Dauzat, M., Hamard, P., ... and Tardieu, F. (2006). PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New phytologist*, 169(3), 623-635.
- Graux, A. I., Resmond, R., Casellas, E., Delaby, L., Faverdin, P., Le Bas, C., ... and Peyraud, J. L. (2020). High-resolution assessment of French grassland dry matter and nitrogen yields. *European Journal of Agronomy*, 112, 125952.
- Hendawey, M. H., & Younes, A. M. A. (2013). Biochemical evaluation of some faba bean cultivars under rainfed conditions at El-Sheikh Zuwayid. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(2), 183-193.
- Howieson, J. G., O'hara, G. W., & Carr, S. J. (2000). Changing roles for legumes in Mediterranean agriculture: developments from an Australian perspective. *Field Crops Research*, 65(2-3), 107-122.
- Hu, X. W., Fan, Y., Baskin, C. C., Baskin, J. M., and Wang, Y. R. (2015). Comparison of the effects of temperature and water potential on seed germination of *Fabaceae* species from desert and subalpine grassland. *American Journal of Botany*, 102(5), 649-660.
- Huyghe, C., De Vlieghe, A., Van Gils, B., & Peeters, A. (2014). Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policies. éditions Quae.
- Jensen, E. S., Peoples, M. B., & Hauggaard-Nielsen, H. (2010). Faba bean in cropping systems. *Field crops research*, 115(3), 203-216.
- Khan, H. R., Paull, J. G., Siddique, K. H. M., & Stoddard, F. L. (2010). Faba bean breeding for drought-affected environments: A physiological and agronomic perspective. *Field Crops Research*, 115(3), 279-286.
- Khan, H. U. R., Link, W., Hocking, T. J., & Stoddard, F. L. (2007). Evaluation of physiological traits for improving drought tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant and Soil*, 292, 205-217.
- Khazaei, H. (2014). Leaf traits associated with drought adaptation in faba bean (*Vicia faba* L.). University of Helsinki, Finland, 15.
- Khazaei, H., Stoddard, F., Lizarazo, C., & Street, K. (2012). New sources of earliness for Finnish faba bean breeding. *Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote*, (28), 1-4.
- Lemaire, G., Hodgson, J., Moraes, A. D., Nabinger, C. D., & Carvalho, P. D. F. (Eds.). (2000). *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. CABI publishing.
- L'Hocine, L., Martineau-Cote, D., Achouri, A., Wanasundara, J.P.D., Loku Hetti Arachchige, G.W. (2020). Broad Bean (Faba Bean). In: Manickavasagan, A.,

- Thirunathan, P. (eds) Pulses. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41376-7_3
- Luo, S. S., Sun, Y. N., Zhou, X., Zhu, T., Zhu, L. S., Arfan, M., ... & Lin, H. H. (2016). *Medicago truncatula* genotypes Jemalong A17 and R108 show contrasting variations under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 190-198.
- Maleki, M., Shojaeiyan, A., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2021). Genotypic variation in biochemical and physiological responses of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) landraces to prolonged drought stress and subsequent rewatering. *Scientia Horticulturae*, 287, 110224.
- Manning, B. K., Adhikari, K. N., & Trethowan, R. (2020). Impact of sowing time, genotype, environment and maturity on biomass and yield components in faba bean (*Vicia faba*). *Crop and Pasture Science*, 71(2), 147-154.
- Martin, G., Durand, J. L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., ... and Jeuffroy, M. H. (2020). Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-25.
- Marzougui, N., Boubaya, A., Elfalleh, W., Guasmi, F., Laaraiedh, L., Ferchichi, A., ... and Beji, M. (2009). Assessment of genetic diversity in *Trigonella foenum graecum* Tunisian cultivars using ISSR markers. *J. Food Agric. Environ*, 7(1), 101-105.
- Mbuvi, M. T., Musyoki, J. K., & Ongugo, P. O. (2015). Equity Mechanisms in traditional forest management Systems: a case study of Loita forest in Kenya. *Journal of Sustainable Forestry*, 34(4), 380-405.
- McCormick, K., Norton, R., & Eagles, H. A. (2006, September). Fenugreek has a role in south-eastern Australian farming systems. In *Proceedings of "Groundbreaking stuff", 13th. Annual Agronomy Conference, Perth, Australia* (Vol. 639).
- Mehrafarin, A., Rezazadeh, S. H., Naghdi Badi, H., Noormohammadi, G. H., Zand, E., & Qaderi, A. (2011). A review on biology, cultivation and biotechnology of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a valuable medicinal plant and multipurpose. 24-6), 37(10, فصلنامه علمی پژوهشی گیاهان دارویی.
- Molor, A., Khajidsuren, A., Myagmarjav, U., & Vanjildorj, E. (2016). Comparative analysis of drought tolerance of *Medicago* L. plants under stressed conditions. *Mongolian Journal of Agricultural Sciences*, 19(3), 32-40.
- Monneveux, P., Ribaut, J. M., & Okono, A. (Eds.). (2014). Drought phenotyping in crops: from theory to practice. *Frontiers E-books*.

- Montgomery, J. (2009). The potential of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) as a forage for dairy herds in central Alberta.
- Moyer, J. R., Acharya, S. N., Mir, Z., & Doram, R. C. (2003). Weed management in irrigated fenugreek grown for forage in rotation with other annual crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 83(1), 181-188.
- Müller, F., Masemola, L., Britz, E., Ngcobo, N., Modiba, S., Cyster, L., ... & Raitt, L. (2022). Seed germination and early seedling growth responses to drought stress in annual *Medicago* L. and *Trifolium* L. forages. *Agronomy*, 12(12), 2960.
- Nebiyu, A., Diels, J., & Boeckx, P. (2016). Phosphorus use efficiency of improved faba bean (*Vicia faba*) varieties in low-input agro-ecosystems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(3), 347-354.
- Nichols, P., Loi, A., Nutt, B., Snowball, R., and Revell, C. (2010). Domestication of new Mediterranean annual pasture legumes. In *Sustainable use of genetic diversity in forage and turf breeding* (pp. 137-141). Springer Netherlands.
- Nichols, P. G. H., Loi, A., Nutt, B. J., Evans, P. M., Craig, A. D., Pengelly, B. C., ... and You, M. P. (2007). New annual and short-lived perennial pasture legumes for Australian agriculture—15 years of revolution. *Field crops research*, 104(1-3), 10-23.
- Nunes, C., de Sousa Araújo, S., da Silva, J. M., Fevereiro, M. P. S., and da Silva, A. B. (2008). Physiological responses of the legume model *Medicago truncatula* cv. Jemalong to water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1-3), 289-296.
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E., Connolly, J., & Lüscher, A. (2009). Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology*, 46(3), 683-691.
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E., & Lüscher, A. (2011). Grass–legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agriculture, ecosystems & environment*, 140(1-2), 155-163.
- Oweis, T., Hachum, A., & Pala, M. (2005). Faba bean productivity under rainfed and supplemental irrigation in northern Syria. *Agricultural Water Management*, 73(1), 57-72.
- Patrick, J. W., and Stoddard, F. L. (2010). Physiology of flowering and grain filling in faba bean. *Field crops research*, 115(3), 234-242.
- Poirier, M., Durand, J. L., & Volaire, F. (2012). Persistence and production of perennial grasses under water deficits and extreme temperatures: importance of

- intraspecific vs. interspecific variability. *Global Change Biology*, 18(12), 3632-3646.
- Porqueddu, C., and González, F. (2006). Role and potential of annual pasture legumes in Mediterranean farming systems. *Pastos*, 36(2), 125-142.
- Radwan, U., Radwan, T., and Abouelkasim, E. (2020). Comparision of ecophysiological responses of *Acacia raddiana* and *Acacia nilotica* during seedling establishment in extreme arid conditions. *Egyptian Journal of Botany*, 60(2), 593-603.
- Ramoliya, P. J., and Pandey, A. N. (2002). Effect of salinization of soil on emergence, growth and survival of seedlings of *Acacia nilotica*. *Botánica complutensis*, 26(2002), 105-119.
- Reuzeau, C., Frankard, V., Hatzfeld, Y., Sanz, A., Van Camp, W., Lejeune, P., ... and Broekaert, W. (2006). Traitmill™: a functional genomics platform for the phenotypic analysis of cereals. *Plant Genetic Resources*, 4(1), 20-24.
- Ricciardi, L., Polignano, G. B., and De Giovanni, C. (2001). Genotypic response of faba bean to water stress. *Euphytica*, 118, 39-46.
- Riefner Jr, R. E., and Small, E. (2009). *Medicago rigidula* and *M. truncatula* (Fabaceae): new to the California flora. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 323-329.
- Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Watt, M., Condon, A. T., Spielmeyer, W., & Dolferus, R. (2010). Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology*, 37(2), 85-97.
- Rojas-Sandoval, J. (2023). *Acacia nilotica* (gum arabic tree). *CABI Compendium*, 342, 1-17.
- Rouached, A., Slama, I., Zorrig, W., Jdey, A., Cukier, C., Rabhi, M., ... & Abdelly, C. (2013). Differential performance of two forage species, *Medicago truncatula* and *Sulla carnosu*, under water-deficit stress and recovery. *Crop and Pasture Science*, 64(3), 254-264.
- Sahile, S., Fininsa, C., Sakhula, P. K., & Ahmed, S. (2009). Evaluation of pathogenic isolates in Ethiopia for the control of chocolate spot in faba bean. *African Crop Science Journal*, 17(4).
- Sindhu, A., Tehlan, S. K., & Chaudhury, A. (2017). Analysis of genetic diversity among medicinal therapist *Trigonella foenum-graecum* L. genotypes through RAPD and SSR markers. *Acta physiologiae plantarum*, 39, 1-15.
- Stoddard, F., and Hämäläinen, K. (2011). Towards the world's earliest maturing faba bean. *Grain legumes: the magazine of the European Association for Grain Legume Research.*, (56), 9-10.

- Stoddard, F. L., Balko, C., Erskine, W., Khan, H. R., Link, W., & Sarker, A. (2006). Screening techniques and sources of resistance to abiotic stresses in cool-season food legumes. *Euphytica*, 147, 167-186.
- Sürmen, M. and Kara E. (2023). Alternative Forage Crops- II. Chapter name: Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). Iksad Publications. Editor: Assoc. Prof. Dr. Gülcan Demiroğlu Topçu.
- Swanepoel, P. A., and Tshuma, F. (2017). Soil quality effects on regeneration of annual *Medicago* pastures in the Swartland of South Africa. *African Journal of Range & Forage Science*, 34(4), 201-208.
- Torres, A. M., Avila, C. M., Gutierrez, N., Palomino, C., Moreno, M. T., & Cubero, J. I. (2010). Marker-assisted selection in faba bean (*Vicia faba* L.). *Field crops research*, 115(3), 243-252.
- Yousfi, N., Slama, I., Ghnaya, T., Savouré, A., and Abdelly, C. (2010). Effects of water deficit stress on growth, water relations and osmolyte accumulation in *Medicago truncatula* and *M. laciniata* populations. *Comptes Rendus. Biologies*, 333(3), 205-213.
- Walter, A., Scharr, H., Gilmer, F., Zierer, R., Nagel, K. A., Ernst, M., ... & Schurr, U. (2007). Dynamics of seedling growth acclimation towards altered light conditions can be quantified via GROWSCREEN: a setup and procedure designed for rapid optical phenotyping of different plant species. *New Phytologist*, 174(2), 447-455.

BÖLÜM 13

KIRKYONCA (*Medicago polymorpha*) &
AFRİKA AKASYASI (*Acacia tortilis ssp. raddiana*) &
ADİ FİĞ (*Vicia sativa*) &
BAMBARA FASULYESİ (*Vigna subterranea*)
MÜRDÜMÜK (*Lathyrus sativus*)

Öğr. Gör. Dr. Feyza Döndü BİLGİN¹
Dr. Öğr. Üyesi Emre KARA²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759849>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Koçarlı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. feyzagundel@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-7435-4130

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Çayır Mera ve Yem Bitkileri Bölümü Aydın, Türkiye. emre.kara@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-5535-8398

1. Kırkyonca (*Medicago polymorpha*)

Medicago polymorpha L., *Fabaceae* familyasından tek yıllık bir yem bitkisidir ve ilkbaharda hızla büyür. Akdeniz iklim bölgelerinde hafif nötr ve alkali topraklarda yetişen, besleyici, oldukça lezzetli ve N₂ sabitleyici bir yem bitkisidir (Del Pozo ve ark., 2002). Anavatanı Akdeniz havzası olmakla birlikte neredeyse dünyanın her yerinde bulunur. Esas olarak kaliteli yem olarak kullanılır ve atlar dışındaki tüm hayvan sınıfları onu kolayca yer (Muir ve ark., 2005). Özellikle Akdeniz iklim tipine özgü ılık, nemli kışlar ve sıcak, kuru yazların hakim olduğu alanlarda yaygındır. Yıllık kuru madde üretimi, çeşit ve iklim koşullarına bağlı olarak 1 ila 9 ton kuru madde/ha arasında değişebilmektedir (Bijanzadeh ve ark. 2019). Tunus'ta *Medicago* cinsine ait türler oldukça zengin ve çeşitli bir gen havuzuna sahiptir ve *Medicago polymorpha* bunlardan biridir (Badri ve ark., 2016).

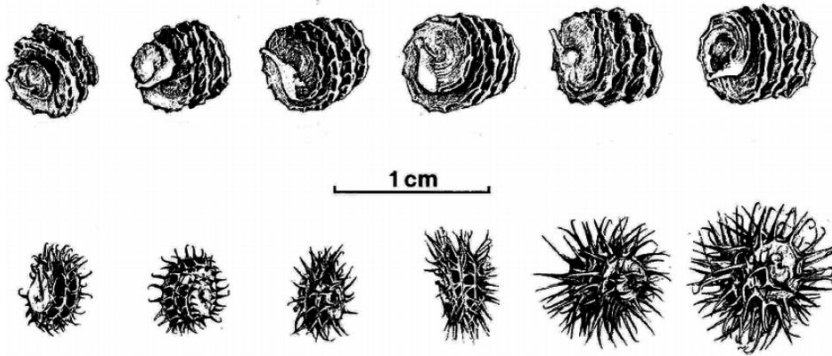


Şekil 1. *Medicago polymorpha*, Kocaeli Kent Ormanı.

Kaynak: Doğan H., 2019

Medicago polymorpha, tek yıllık otogam (kendine döllen) bir türdür. Geniş dağılımı ve uyumu, fotoperiyoda ve vernalizasyona karşı duyarlılığının düşük olmasıyla açıklanabilir. Bu türün üç botanik çeşidi

tanımlamıştır: 1) *brevispina*, dikensiz veya yumrulu baklalı 2) *polymorpha*, dikenli ve 3) *vulgaris*, dikenli ancak baklaları *polymorpha*'dan daha küçük (Badri ve ark., 2016).



Şekil 2. Şili'deki *Medicago polymorpha* meyve koleksiyonlarının, boyut, şekil ve "dikenlerinin" (glochides) mevcudiyetini gösteren çizimleri.

Kaynak: Del Pozo ve ark., 2002

Sadeghi ve Fakhari, (2016), kuraklık stresi ve sonrasındaki iyileşme sırasında üç farklı tek yıllık *Medicago* türünde (*Medicago polymorpha*, *Medicago rigidula* ve *Medicago scutellata*) bakla dökmeninin büyüme ve N₂ fiksasyon yeteneği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Uygulamalar, tek yıllık *Medicago* türlerinde, baklanın mevcudiyeti veya uzaklaştırılması ve stres döneminde dört seviyede su stresini içermiştir (%100 “kontrol olara”, %80, %60 ve %40 tarla kapasitesi). Sonuçlar, tek yıllık *Medicago* türlerinin yarı kuraklığa dayanıklı türler olarak kabul edilebileceğini ve hafif ve orta kuraklık stresinden kurtulma yeteneklerinin nispeten iyi olduğunu göstermiştir. *Medicago polymorpha*, test edilen diğer türlerle karşılaştırıldığında daha iyi performans ve daha yüksek kurtulma yeteneği göstermiştir.

Medicago polymorpha, Akdeniz Bölgeleri'nde mera ıslah ve amenajman çalışmaları için potansiyel bir tür olarak kabul edilir. Tür ayrıca Avustralya, Şili, Güney Afrika ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Akdeniz iklimi benzeri koşullara sahip bölgelerde de yaygındır (Del Pozo ve ark., 2000). *M. polymorpha*'nın doğal alanlardaki gözlemleri, nötr ve hafif asidik topraklara iyi adapte olduğunu göstermektedir. Coğrafi dağılımı, yarı kurak biyoklimatik aşamaya yönelik bir tercih olduğunu gösterir. *Medicago polymorpha* geniş bir ekotipik farklılaşma yelpazesi gösterir ve ekologların ve yetiştiricilerin dikkatini çekmiştir. *Medicago polymorpha*'nın doğal popülasyonları gerçekten de önemli tür içi farklılaşmaya uğramıştır ve bu alanlar Akdeniz ortamlarına adapte olmuş çeşitleri seçmeyi amaçlayan ıslah programları için çok yararlı kaynaklar olabilirler. Yağış, yıllık *Medicago* türlerinin ekolojik dağılımını belirleyen en belirleyici faktördür. *Medicago polymorpha* nemli ve yarı kurak iklim ortamlarında daha yaygındır (Yousfi ve ark., 2015).

Diğer tek yıllık *Medicago*'lar gibi, *Medicago polymorpha* da popülasyonlar içindeki değişken seviyelerde tohum dormansisi ile karakterize edilir. Tohum dormansisi mevsim dışı yağışların bir sonucu olabilecek çimlenme ve fide ölümlerini önlemeye yardımcı olur. Ayrıca *Medicago polymorpha*'nın hububat-yem bitkisi rotasyon sistemi (Norfolk Sistemi)'nde uygulanmasına olanak sağlayarak bitkiyi hayvancılık için hatırı sayılır değere sahip bir mera bitkisi haline getirir. Oldukça değişken çiçeklenme fenolojisi ile birleşen bu özellik, bu türün yayılışını genişletme ve çok çeşitli biyoiklimsel bölgelerde olumsuz dönemlerde hayatta kalma becerisinde etkili olmaktadır. Kuraklık, don,

edafik koşullar ve diğer keskin çevresel değişimler tek yıllık bitki türleri arasındaki seçilimi ve ekotipik farklılaşmayı açıkça etkileyen koşullardır. Çiçeklenme fenolojisi veya tohum dinlenme (dormansi) düzeyi gibi özellikler çevresel değişimlere dayanıklılık açısından türler arasında farklılıklar oluşturmaktadır. Türler arası veya tür içi bu farklılıklar ekonomik açıdan önemli ekotipleri belirleme noktasında teori ve saha sonuçları açısından tutarsızlıklar oluşturabilmektedir. Örneğin, dikensiz baklalara sahip popülasyonlar Şili'de çok yaygındır. Ancak Sardunya'da *Medicago polymorpha*'nın yaygın olduğu alanlarda dikensiz bir ekotipin hiç bulunmamış olması bir zıtlıktır. Dikenli baklalara sahip türlerin koyun kıllarına takılması sonucu yünün ticari değerini büyük ölçüde azalttığından dolayı, Avustralya ve Şili'deki yetiştiriciler ve çiftçilerce dikensiz baklalı türler büyük ilgi çekmektedir. Şili'nin Akdeniz iklim bölgesinin kurak ila yarı kurak alanlarında *polymorpha* yaygın olarak yetiştirilmektedir (Del Pozo ve ark., 2002).

Yousfi ve ark., (2015), Tunus'un kurak (Mp-173), orta (Mp-345) ve nemli (Mp-664) iklim bölgelerindeki üç *Medicago polymorpha* popülasyonunda uzun süreli su eksikliği stresi ve toparlanmanın fenoloji, net fotosentez, yaprak özellikleri, büyüme ve tohum verimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 30 gün boyunca bol sulama yapıldıktan sonra, her popülasyondaki bitkiler iki gruba ayrılmıştır: ilk grup %100 tarla kapasitesinde sulanmış, ikincisi ise sadece %45 tarla kapasitesinde sulanmıştır. 30 günlük uygulamadan sonra, susuz bitkilerin bir grubu %100 tarla kapasitesinde yeniden sulanırken, diğeri %45 tarla kapasitesinde tutulmuştur. Su açığı altında, Mp-664 ile karşılaştırıldığında, Mp-345 toplam biyokütle üretimi ve yaprak gazı

değişim özelliklerinde daha düşük azalmaya, ancak yaprak kuru ağırlığında, yaprak alanında ve özgül yaprak alanında daha fazla azalmaya sahip olmuştur. Mp-345'te su kıtlığına yaprak morfolojik özelliklerinin tepkisi kuraklığın üstesinden gelmek için önemli bir özellik olarak görülmüştür. Tüm popülasyonlardaki bitkiler için stoma sınırlamasının net fotosentezin azalmasının ana nedeni olduğu kanıtlanmıştır. Bakla başına tohum sayısı, kurak bir iklimdeki *Medicago polymorpha* popülasyonlarında tohum verimini sürdürmede önemli bir özellik olmuştur. Veriler, Mp-173'ün daha yüksek derecede kuraklık toleransı gösterdiğini açıkça göstermiştir. Mp-173'ün su kıtlığına toleransının daha düşük büyüme hızı, daha yüksek yaprak su içeriğinin korunması ve fotosentezin daha düşük metabolik bozulması ile ilişkili olduğu bulunmuştur.

2. Afrika Akasyası (*Acacia tortilis* ssp. *raddiana*)

Afrika'da kurak ve yarı kurak bölgelerdeki otlakların yanı sıra yağmurun az olduğu ormanlık alanlarda hayvanlara yem temin eden savanların miktarı da azalmaya devam etmektedir. Ayrıca ot formasyonu olan savanlar kuraklığın etkisinin yanısıra insan faaliyetlerinin ve yoğun hayvan varlığının yüksek baskısından da büyük ölçüde etkilenmektedir. Bitki örtüsünü etkileyen diğer etmenler ise ağaç yüksekliği ve yoğunluğudur (Mohammed ve ark., 2021). Kurak mevsim besleme stratejisi olarak, Orta Afrika'nın kurak ve yarı kurak bölgelerindeki pastoralistler, hayvanların ek yemlemesinde yerel yem kaynaklarını kullanırlar. En yaygın kullanılan tamamlayıcı yemler ise yerel otlar, baklagillerin yaprakları ve akasya baklalarıdır. Bu yemler geleneksel olarak açık gölgeliklerde, ağaç dallarında ve canlı barınaklarda depolanır

ve bu durum onların kalitesini ve raf ömrünü etkiler. Canlı barınaklardaki ısı ve nem nedeniyle, yaprakların ve otların kalitesi büyük ölçüde düşer. Depolanan bütün Akasya baklaları böcek zararlıları ve küf istilasına nedeniyle kısa bir ömre sahip olduğu bilinmektedir. *Acacia tortilis* gibi baklagil bitkilerinin baklaları, orta ila yüksek kuru madde parçalanabilirliğine sahip ve makro ve mikro mineraller açısından zengin, değerli bir protein kaynağıdır. Bununla birlikte, *Acacia* türlerinin yutulan tohumları tam sindirilemediği için besinlerin önemli bir miktarı, geviş getirme işlemi sırasında dışkı yoluyla kaybedilmektedir. Akasya baklalarının öğütülerek işlenmesi besin kaybını azaltır, tüm bakla tohumlarını hedef alan zararlıların görülme sıklığını azaltır ve protein sindirilebilirliğini artırır (Lengarite ve ark., 2014).



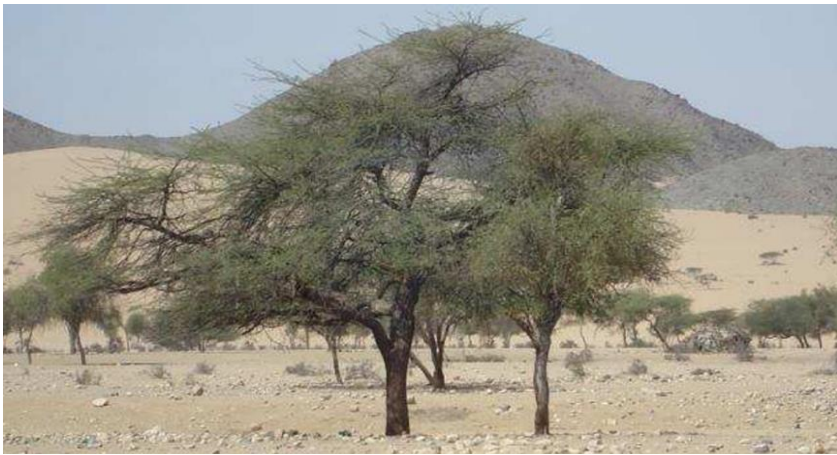
Şekil 3. *Acacia tortilis* ssp. *raddiana*, çiçek ve baklaları.

Kaynak: Lemmel C. ve Attiou Z., 2018

Dünyanın pek çok ekosisteminde akasya cinsi geniş bir dağılım gösterir ve ekonomik açıdan önemlidir. Kurak ve Sahra iklimlerinde *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* ekosistemin işleyişinde ve istikrarında önemli bir rol oynar. *A. tortilis*, diğer türler için istikrarlı koşullar oluşturarak ve ekosistem süreçlerini modüle edip dengeleyerek bir topluluğu yapılandıran temel bir tür olarak düşünülebilir. Örneğin Afrika

Sahra bölgesinde *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* birçok çöl hayvanına yem ve barınak sağlarken, tür aynı zamanda yerel Bedevi halkı için de önemli bir yakıt ve ilaç kaynağıdır (Noumi ve ark., 2011).

Yarı kurak ve kurak iklim koşullarında *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* gibi ağaçlar otsu bitki örtüsünün bileşimini ve örtüsünü değiştirerek yapısı üzerinde etki gösterir (Abdallah ve ark., 2008). Tür zenginliği ağaç örtüsü altında daha fazladır. Ayrıca, büyüme mevsimi daha uzundur ve biyokütle üretimi iki ila üç kat daha fazladır. Odunsu bitki örtüsü toprağın verimliliğini artırabilir. Örtülü alanların altındaki toprak genellikle daha yüksek miktarda organik madde ve bitkiler için kullanılabilir azot içerir; daha iyi katyonik değişim kapasitesi, iyi bir fiziksel yapı ve daha iyi su filtrasyonu özellikleri gösterir. Bitkilerin döküntüleri ve akasya ağaçlarının ölü kısımları ve gölge arayan vahşi hayvanların dışkıları dahil olmak üzere, gölgelik altındaki toprağın verimlilik sürecinin iyileştirilmesiyle ilişkili çeşitli faktörler vardır (Abdallah ve ark., 2012).



Şekil 4. *Acacia tortilis* ssp. *Raddiana*.

Kaynak: El-Azazi ve ark., 2013

Mohammed ve ark., (2021) tarafından yürütülen Sudan'daki bir ekolojik biyolojik çeşitlilik taramasında, kurak bölgelerdeki en baskın ağaçların mevcudiyeti, yoğunluk, sıklık, yem biyokütle örtüsü ve biyolojik çeşitlilik açısından toprak üstü bitki örtüsünün ve sosyoekonomik yönlerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Araştırma için rastgele üç bölge seçilmiştir. Yem ağacı olarak Akasya ağaçları tercih edilmiştir çünkü hem hayvanlara yem sağlarlar hem de toprak verimliliğini artırıp toprağı korurlar. Araştırmanın sonucunda incelenen özellikler yönünden *Acacia tortilis* diğer akasya türlerine göre en uygun yem ağacı olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yaz aylarında kaynakların kullanımını belirleyen temel faktörün su olduğu, aşırı otlatma ve şiddetli iklim değişikliklerinin ağaç yoğunluğunu negatif etkilediği belirlenmiştir.

Mısır florası, sadece 120 familyadan 725 cinse ait 2076 türden oluşmaktadır. Bununla birlikte Mısır bitki örtüsü, yerli Afrika ve Asya türlerinin eşsiz karışımına sahiptir. Sina Yarımadası Mısır'da tür çeşitliliği ve bitki örtüsünün en yüksek olduğu yerdir. Özellikle kuzey Sina'da tür zenginliği yüksektir. Sina'da 984 tür kaydedilmiştir. Bu türlerin 171'i Akdeniz sektöründe, 203'ü Süveyş Körfezi'nde, 394'ü Güney Sina'dadır (Hegazy ve Amer, 2002). 285 tür içeren Elba dağ grubunun Mısır kesimi, tür çeşitliliği açısından Sina'dan sonra ikinci sırada yer almaktadır. *Acacia* türleri, olumsuz koşullar altında gelişme yeteneğine sahiptir. Akasya, Mısır'da on türle temsil edilmektedir; bunlardan ikisi (*A. tortilis* ve *A. nilotica*) iki alt türle temsil edilmektedir. Mısır'ın çeşitli fitocoğrafik bölgelerinde yaygın olarak dağılmışlardır. *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* çöl vadilerinde ve kumlu ovalarda,

genellikle Sina, Kızıldeniz kıyısı, Doğu Çölü ve Gebel Elba'daki su havzalarında yetişir. *Acacia mangium* ise, tropik nemli ve yarı nemli bölgelerde önemli bir plantasyon ağacı türü haline gelmiştir (El-Azazi ve ark., 2013).



Şekil 5. *Acacia tortilis* ssp. *raddiana*, Sidi-Ali-Taфраout kumulları.

Kaynak: Lemmel C. ve Attiou Z., 2018

Lengarite ve ark., (2014) tarafından, işlenmiş (öğütülmüş *Acacia tortilis* baklaları ve kıyılmış buğdaygil otu) ve işlenmemiş (bütün halde *Acacia tortilis* baklaları ve buğdaygil otu) kuru mevsim ilave yemlerinin keçilerin süt verimi ve emzirmenin büyüme tepkisi üzerindeki etkisini belirlemek için bir hayvan besleme denemesi yapılmıştır. Canlı ağırlıkları 25-30 kg olan bir pastoral sürüden yirmi doğurgan Küçük Doğu Afrika keçisi gruplanmış ve beslenmiştir. Diyetler, kıyılmış karışık ot, bütün karışık ot, öğütülmüş *Acacia tortilis*, bütün *Acacia tortilis* ve kontrol (takviye yok) olmuştur. Kıyılmış otun (309,5 g) ve bütün *Acacia tortilis*'in (413,1 g) günlük alımı bütün ottan (165,4 g) ve öğütülmüş *Acacia tortilis*'den (186,4 g) daha yüksek olmuştur. Takviye edici

diyetler arasında en çok tüketilen bütün *Acacia tortilis* (%87,7) olurken, onu öğütülmüş *Acacia tortilis* (%67,3), kıyılmış ot (%51) ve bütün ot (%40,4) takip etmiştir. Katkı maddesi keçilerin süt üretimini %6-45 arasında artırmıştır. Ancak emziren oğlakların ortalama günlük kazancı (average daily gain, ADG) uygulama grupları arasında benzer olmuştur. Bu çalışmada, *Acacia tortilis* baklalarının öğütülerek işlenmesinin sindirilebilirliği, otların doğranmasının ise alımı artırdığı tespit edilmiştir.

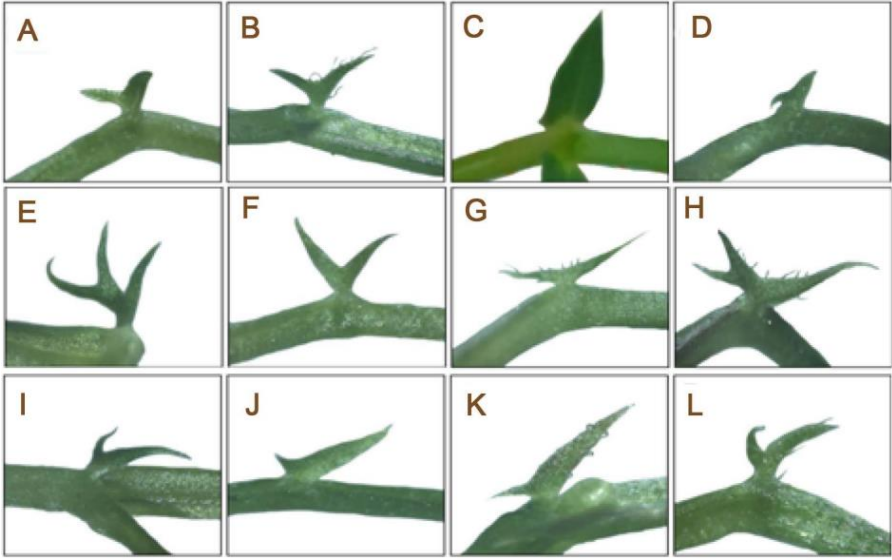
Yapılan çalışmalar *Acacia tortilis* ssp. *raddiana*'nın hayvan diyetlerine dahil edilmesinin kurak mevsimdeki sınırlı beslenme sorununu azaltarak, süt verimini artırılabilceğini ve kurak meralardaki silvo-pastoral sistemlerde yetiştirilen hayvanların vücut kondisyonlarının korunabileceğini göstermektedir.

3. Adi fiğ (*Vicia sativa*)

Adi fiğ, yüksek verim ve ham protein içeriğine sahip, lezzetli tek yıllık bir baklagil yem bitkisidir ve esas olarak yeşil/kuru ot, silaj ve yeşil gübre için kullanılır. Toprak azotunu artırma ve organik madde içeriğinin oluşumunu teşvik etme kapasitesi nedeniyle karışık ekimde yeri doldurulamaz bir bileşendir. Sahip olduğu bu özellikler gübre uygulamasını azaltarak toprak verimliliğini artırırken çevre kirliliğini ve üretim maliyetlerini de azaltır (Huang ve ark., 2017). Diğer yem bitkileri ile karşılaştırıldığında fiğ, geviş getiren hayvan yemi olarak tek başına kullanıldığında en iyi kullanım potansiyeli indeksine sahiptir ve karışık ekimlerde yemin kalitesini artırır (Huang ve ark., 2019). Tarla koşulları altında adi fiğ, kış ve kuraklık gibi aşırı hava koşullarına diğer

baklagillerden daha toleranslıdır. Örneğin adi fiğ 24 güne kadar kuraklığa dayanabilir ve kuraklık stresi sonrası yapılan sulamayla birlikte biyolojik fonksiyonları tamamen yenilenir (Tenopala ve ark., 2012).

Yem olarak kullanıldığında, adi fiğ (*Vicia sativa*) çoğunlukla bezelyeye benzer şekilde tahıl taneleri ile harmanlanarak kullanılır. Fiğ, bezelyeye göre daha yavaş tesis olur ancak yüksek üretim kapasitesine sahiptir. Bezelyeye göre olgunlaşması da daha yavaş olduğundan, fiğ ekimi için en uygun tahıl çeşidi, bezelye ekiminde kullanılacak tahıl çeşidinden farklı olabilir. Bezelye ve fiğ tahıllarla birlikte ekildiğinde baklagillerin fikse ettiği azotu ekimde kendisine eşlik eden tahıllar da kullanmaktadır. Çoğu baklagilin azot fiksasyonu, tam çiçeklenmeden önceki son birkaç haftada en yüksektir. Bezelyeye göre *Vicia sativa*'nın olgunlaşması yavaş olduğundan daha geç hasat edilmektedir ve hasat zamanına bağlı olarak bezelyeye göre daha fazla azot bağlama yeteneğine sahiptir. Yem hasatı tahılların süt olum döneminde yapılacaksa, mahsulün fiğ tarafından sabitlenen azotu kullanması için fazla zaman olmaz. Hasat hamur olum aşamasına kadar götürülecekse, mahsul fiğin fikse ettiği azotu daha uzun süre kullanır. Bu nedenle fiğ ekiminde eşlik edecek tahıl seçiminde bu kriterlere dikkat edilmelidir. Fiğ tek başına ekildiğinde de yem amaçlı kullanılabilir. Tüm yem bitkilerinde olduğu gibi, hasat zamanını kalite ve tonaj dengesine göre belirlemek gerekir (Braunwart ve ark., 2001).



Şekil 6. Bazı *Vicia* türlerinde stipule (yaprak sapı dibindeki yaprakçık) yapısı: A) *Vicia amoena*; B) *Vicia angustifolia*; C) *Vicia bungei*; D) *Vicia costata*; E) *Vicia hirsuta*; F) *Vicia japonica*; G) *Vicia sativa* subsp. *nigra*; H) *Vicia sativa* subsp. *sativa*; I) *Vicia tenuifolia*; J) *Vicia tetrasperma*; K) *Vicia villosa* subsp. *dasycarpa*; L) *Vicia villosa* subsp. *Varia*.

Kaynak: Abozeid ve ark., 2017

Atmosforik azot fiksasyonu sayesinde baklagil bitkileri kuraklığa toleranslıdır. Dünya baklagil üretiminin %60'tan fazlası mevcut kuraklık koşulları altında yapılmaktadır (Çiftçi ve Açıkbaş, 2023). *Vicia sativa* da bir baklagil yem bitkisi olması nedeniyle sürdürülebilir yem kaynağı olarak marjinal bölgelerde yetiştirilebilir (Nguyen ve ark., 2020). Kalan toprak nemini ve geç yağmurları kullanarak kurak aylarda yağmurla beslenen tarımda kullanılır (Tenopala ve ark., 2012).

Zeiditoolabi ve ark., (2020) tarafından İran'da Lorestan Üniversitesi'nde üç yemlik fiğ türünde (*Vicia sativa*, *Vicia narbonensis*, *Vicia dasycarpa*) stoma morfolojik yapısı ve yem verimi; üç bitki

yoğunluğunda (m^2 başına 100, 150 ve 200 tohum) kuru tarım koşulları altında değerlendirilmiştir. Birim alana bitki yoğunluğu ve bitki türlerinin etkileşimi, üst stoma sayısını ve yem verimini önemli ölçüde etkilemiştir. İran yarı kurak iklimine, yem verimi açısından *Vicia narbonensis* ve *Vicia sativa* uygun türler olarak bulunmuştur.

Berger ve ark., (2002) tarafından yürütülmüş çalışmada, Akdeniz kıyısındaki baklagillerin dane ve yem üretkenliğini etkileyen temel adaptif özelliklerini ve aynı zamanda geniş bir *Vicia* türü yelpazesinin tarımsal potansiyelini belirlemek için, Doğu Akdeniz boyunca yabani doğadan toplanan germplazmı, Tel Hadya ve Suriye'de yarı kurak koşullar altında (313 mm büyüme mevsimi yağışı) yetiştirilmiştir. Bunlar arasında şu anda Akdeniz tarımında kullanılan *Vicia sativa*'nın yanı sıra geçmişte daha yaygın olarak kullanılan *Vicia ervilia*, *Vicia narbonensis*, *Vicia johannis*, *Vicia hyaeniscyamus*, *Vicia serratifolia* ve *Vicia kalakhensis* gibi türler yer almıştır. Koleksiyon, rakım (20–1510 m), yağış (180–1700 mm/yıl) ve toprak derinliği (5–50 cm) açısından çok çeşitli habitatlardan seçilmiştir. Çalışmada tarımsal potansiyel, tohum, kuru ot ve biyolojik verimin yanı sıra hasat indeksi, bitki yüksekliği ve tohum büyüklüğü gibi tarımsal özellikler belirlenmiştir. Fenoloji, bitki habitusu ve tohum büyüklüğü gibi temel tarımsal özelliklerin verim üzerindeki karşılaştırmalı etkisi, üreme stratejilerine bağlı olarak türler arasında büyük farklılıklar göstermiştir. Tohum oluşturmak ve yeterli biyokütle biriktirmek için uzun vejetatif aşamalara ve büyüme mevsimlerine dayanan ve nispeten az tarımsal varyasyonun olduğu daha küçük tohum türleri olan *V. sativa* ve *V. ervilia*'da fenolojinin verim üzerinde büyük bir etkisi tespit edilmiştir. *V. ervilia* ve

V. sativa gibi fideleri erken çıkan taksonlarda uzun vejetatif evreye ve büyüme mevsimine sahip türlerde tohum verimi çiçeklenme ile negatif korelasyon göstermiştir. Kuru ot verimi 0,1-3,4 t/ha arasında, tohum verimi 0-2,0 t/ha arasında ve olgunluktaki kuru madde verimi 1,6-6,5 t/ha arasında değişmiştir.

Beyaz, (2022) tarafından kuraklık stresi sonrası fiğ (*Vicia sativa*) bitkisinin sürgün ve kök organlarının morfolojik ve biyokimyasal tepkileri araştırılmıştır. Fiğ fideleri in vitro koşullarda kuraklık stresine (100 g/l PEG“6000”) maruz bırakılmış, fizyolojik parametreler 14 günlük fidelerde ölçülmüştür. Kuraklık stresi altında sürgün ve kök uzunluğu, taze ağırlık ve su içeriği azalmıştır. Kuru madde oranı hem kökte hem de sürgünde artmış, kök kuru ağırlığında artış tespit edilmiştir. Enzim analizi, katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD) ile askorbat peroksidaz (APX) ve glutatyon redüktaz (GR) aktiviteleri arasında ters bir ilişki olduğunu ortaya konmuştur. Prolin ve malondialdehit içeriğinde artış tespit edilmiştir. Genel olarak, morfolojik ve biyokimyasal parametrelerdeki artış, kök organının kuraklık stresi altında sürgün organından daha güçlü bir tepkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Alvarez-Arag ve ark. (2023), yaptıkları çalışmada şiddetli su yoksunluğu altında simbiyotik etkileşimlerin stres toleransını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bunun için rhizobium bakteri suşu V31 ile aşılansak nodül oluşumu teşvik edilen fiğ ve bezelye bitkileri azot (N) eksikliği olan bir ortamda yetiştirilmiştir. Aşılansak bitkilere ise N takviyesi (N-besleme) yapılmıştır. Araştırmada her iki bitki türünde de aşılama yapılarak etkili nodül oluşumu sağlanan uygulamada, N-besleme yapılan uygulamaya göre kurak şartlarda önemli ölçüde daha

yüksek hayatta kalma oranı ve tane verimi görülmüştür. Rhizobium simbiyozunun fiğ ve bezelyede kuraklığa dayanıklılıkta katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar kurak koşullarda dayanıklılık ve verimi artırma stratejisi olarak aşılama uygulamasının potansiyelini desteklemektedir.

4. Bambara Fasulyesi (*Vigna subterranea*)

Bambara fasulyesi (*Vigna subterranea* L.), Afrika'da yerfıstığı (*Arachis hypogea*) ve börülceden (*Vigna unguiculata*) sonra üçüncü en önemli gıda baklagil ürünü olarak kabul edilir. 15-25% protein, 49-64% karbonhidrat, 5,2-6,4% lif, 4,5-7,4% yağ, 3,2-4,4% kül ve 2% mineral içerir (Murevanhema ve Jideani, 2013). Fakir topraklara, kuraklığa ve tuz stresine karşı toleransı ve yerfıstığı üretiminin tamamen başarısız olduğu koşullarda bile mahsul verebilme kabiliyeti ile tanınır. Bunlar muhtemelen yerel halk tarafından hala yetiştirilmesinin başlıca nedenleridir (Adzawla ve ark., 2016). Bambara fasulyesi, öncelikle yenilebilir tohumları için yetiştirilen tek yıllık, sürünücü bir bitkidir. Afrika'da tohumu için yetiştiriciliği, yem olarak kullanılabilen ürün artıkları (saplar) ile de sonuçlanır. Ayrıca bitki biçilerek veya otlatılarak da kullanılabilir (Heuze ve ark., 2020).



Şekil 7. Bambara fasulyesi (*Vigna subterranea* L.).

Kaynak: Norihiko ve ark. 2010

Afrika genelinde *Vigna subterranea*'nın küçük ölçekli çiftçilerin genetik çeşitliliğini koruduğu çok sayıda yerel ırkı mevcuttur. Mahsul, Afrika'daki geleneksel düşük girdili tarım sistemleri altında geçimlik çiftçiler tarafından yetiştirilir. Azam-Ali ve ark. (2001) bambara fasulyesini, para kazanmak yerine geçim için yetiştirilen 'yoksul adamın mahsulü' olarak nitelemiştir. Esas olarak yüksek lizin içeriğine sahip yenilebilir proteini için yetiştirilir ve tahıllarla birlikte tüketildiğinde faydalı bir tamamlayıcı etkiye sahiptir (Massawe ve ark., 2005). Yerfıstığı ve soyadan farklı olarak bambara fasulyesi, çok düşük yağ içeriğine sahip olduğundan ticari bir ürün değildir. Neredeyse tam bir gıda olan, kuraklığa dayanıklı, yetiştirilmesi kolay ve topraktan fazla talebi olmayan bu yerli Afrika mahsulünün araştırmalarına çok az ilgi gösterilmesi bir paradokstur (Berchie ve ark., 2012). *Vigna subterranea* kuraklık ve düşük toprak verimliliği koşullarında bile makul verimler üreten son derece dayanıklı bir baklagil olan iklim dostu mahsullerden biridir. Daha önce yeterince kullanılmayan mahsul, dengeli beslenme profili nedeniyle araştırmacılar ve tüketiciler arasında giderek artan bir ilgi görmektedir. Bambara fasulyesinin yerli tüketicileri etno-tıbbi

faedahalarını da bildirmektedirler (Jideani ve Jideani, 2021)



Şekil 8. Bambara fasulyesi (*Vigna subterranea* L.) meyveleri. (Fotoğraf: Wibowo Djatmiko).

Kaynak: CC BY-SA 4.0 TAPU.

Tohumlarındaki yüksek ham protein ve enerji, düşük ham selüloz ve yüksek sindirilebilirlik özelliği sadece insan beslenmesinde değil aynı zamanda hayvan beslenmesinde de avantaj sağlar (Mahala ve Mohammed, 2010). Bambara fasulyesinin tohumunda esansiyel amino asit olan metiyonin içeriği diğer baklagillere göre daha yüksektir (Mubaiwa ve ark., 2018). Metiyonin, rasyonda sınırlayıcı olduğu düşünülen temel amino asitlerden biridir (Gülgün, 2020). Ayrıca bambara fasulyesinin vejetatif kısımları da (genellikle yapraklar ve saplar) azot ve fosfor açısından zengindir ve bu nedenle kaba yem olarak kullanılır (Mubaiwa ve ark, 2018).

Mwale ve ark., (2007), kuraklığın bambara fasulyesinin (*Vigna subterranea*) büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkisini, İngiltere'deki kontrollü ortamlı seralarda incelemişlerdir. Üç yerel çeşide (sırasıyla Namibya, Botsvana ve Svaziland'dan S19-3, DipC ve UN) iki sulama rejimi uygulamışlardır: 1) %90 tarla kapasitesine kadar haftalık olarak sulanan bir kontrol ve 2) ekimden (DAS) 49 gün sonradan son hasada (147 DAS) kadar sulama yapılmayan bir kuraklık uygulaması. Bambara fasulyesi, kuraklık stresine karşı vejetatif büyüme sırasında yaprak alanı genişleme oranını, son kanopi boyutunu ve toplam kuru maddeyi azaltarak yanıt vermiştir. Kuraklık ayrıca bakla kuru maddesinde, bakla sayısında, tohum ağırlığında ve hasat indeksinde önemli azalmalara neden olmuştur. Bakla verimindeki azalma oranı çeşitler arasında farklılıklar göstermiştir. Kurak şartlarda ortalama bakla verimi %45 düşmüştür. Tüm yerel çeşitlerdeki azalmaya rağmen, yaklaşık 100 gün boyunca su almayan kuraklık uygulamalarındaki ortalama bakla verimi, türün kuraklığa karşı dayanıklılığını göstermiştir.

Jorgensen ve ark., (2010), Afrika'daki zıt ortamlardan toplanan iki bambara fasulyesi yerel çeşidinin (Uniswa Red ve S19-3) kuraklığa uyum stratejilerini karşılaştırmıştır. Yapraktaki absisik asit (ABA) konsantrasyonu, göreceli yaprak su içeriğinin azalmasıyla doğrusal olarak artmıştır. Kuraklık stresi altındaki bitkilerde son hasatta Uniswa Red çeşidinde, S19-3 çeşidine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek ABA tespit edilmiştir. S19-3, terlemedeki azalmayı Uniswa Red'den önemli ölçüde daha düşük bir toprak su eşiğinde başlatmıştır. Bu da Uniswa Red'in toprak kurummasına yanıt olarak bitki su kullanımını azaltmada daha hassas olduğunu göstermiştir.

Bambara fasulyesi, tane baklagiller içinde kuraklığa en dayanıklı tür olarak kabul edilir ve yer fıstığı ile soya fasulyesine alternatif olabilecek büyük bir potansiyele sahiptir. Bambara fasulyesinin kuraklık toleransı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış olsa da kuraklık direnç mekanizmaları tam olarak açıklanmamıştır. Ancak yapılan çalışmalar Bambara fasulyesinin kurak şartlara adaptasyonu sayesinde kuraklığa eğilimli alanlarda yetiştirilmesinin bu bölgelerde hem insan hem hayvan beslenmesinde gıda güvenliği potansiyelini artırabileceğini ön görmektedir (Kundy ve ark., 2023).

5. Mürdümük (*Lathyrus sativus*)

Bir gıda ve yemlik baklagil ürünü olan mürdümük (*Lathyrus sativus* L.), kuraklığa oldukça dayanıklıdır ve yıllık ortalama yağışın 380 mm ila 650 mm olduğu bölgelerde başarıyla yetiştirilmiştir. Bu seviyedeki aşırı kuraklık altında, mürdümük tek verimli üründür ve bazı kırsal veya marjinal bölgelerdeki yoksullar için tek gıda haline gelir (Vaz Patto ve ark., 2006). Mürdümük, Asya ve Afrika'nın kuraklık problemi olan bölgelerindeki geniş ve giderek artan popülasyonlar için en umut verici nişasta ve protein kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Jiao ve ark., 2011). Mürdümük yalnızca hayvan yemi ve insan gıdası olarak tarımsal açıdan önemli bir ürün olma potansiyeline sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda bitkilerin kuraklığa direncine ilişkin araştırmalar için de yararlıdır. Diğer baklagillerle karşılaştırıldığında, dar yapraklar, kanatlı kenarlı gövdeler ve derin ve geniş bir kök sistemi dahil olmak üzere bazı morfolojik kuraklığa tolerans özellikleri geliştirmiştir (Jiang ve ark., 2013). Sulama yapılmadan ot ve dane üretimi için yıllık yağış miktarı 250 mm olan çorak alanlarda yetiştirilebilmektedir. (Karadağ ve

ark., 2023). Mürdümük samanı hayvan yemi olarak (Grela ve ark., 2010) ve tohumu biyoetanol üretiminde kullanılır. Mükemmel bir yeşil gübredir (Jafarinasab ve ark., 2022). Cezayir'de *Lathyrus* cinsi esas olarak tahıl üretimi (gıda) için yetiştirilmekte ve aynı zamanda marjinal çiftçiler tarafından yem (hayvan yemi) olarak da kullanılmaktadır (Dalila ve ark., 2018). Çiçeklenme sonrası dönemdeki su kıtlığı, mürdümük büyümesini ve tohum verimini önemli ölçüde azaltabilir (Gusmao vd., 2012).



Şekil 6. *Lathyrus sativus* L. genel görünümü.

Kaynak: Karadağ ve ark., 2023

Mürdümük tohumlarının besin bileşimi nohut, bezelye, bakla veya acı baklanınınkinin üzerindedir. Tohumlarındaki ortalama protein içeriği kuru maddenin %25 ila %30'u arasında değişir. Çok güçlü ve derinlere ulaşan kök sistemi nedeniyle, farklı toprak pH'larına toleranslı olması ve farklı toprak türlerinde büyüüp gelişebilmesi, onu baklagiller arasında benzersiz kılmaktadır. Üstelik mürdümük, periyodik su baskını, düşük

sıcaklık, toprak tuzluluğu ve hepsinden önemlisi uzun süreli kuraklık gibi olumsuz çevresel faktörlere karşı son derece toleranslıdır. Temel olarak kuraklık dönemlerinde hayatta kalan ve meyve veren önemli bir baklagil bitkisidir. Yüksek derecede atmosferik azot sabitlemesi, toprak verimliliğine yardımcı olması ve mürdümük üretim maliyetlerinin düşük olması, onu sürdürülebilir tarımın önemli bir bileşeni haline getirmektedir (Tokarz ve ark., 2020). Hayvancılıkta yem olarak ot, saman ve dane şeklinde, ayrıca otlatarak kullanılmaktadır (Tenikecier, 2020).



Şekil 5. Mürdümükte çiçek renginin çeşitliliği (foto: Yanpei Wu/ILRI)

Kaynak: Hanson ve Street, 2008

Mahsul olarak, Hindistan alt kıtasında 1 milyon hektarın üzerinde bir alanda yetiştirilmektedir ve Hindistan, Bangladeş, Nepal, Afganistan, Etiyopya ve Suriye'ye kadar marjinal arazileri işleyen yoksul çiftçiler tarafından yaygın olarak insan tüketimi ve hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Kuraklığa dayanıklı, yüksek proteinli bir hayvan yemi

olarak mürdümüğün çeşitli avantajları, Avustralya'da geliştirilmesine yönelik araştırmaları ve Çin'de yeniden tanıtılması yönündeki çalışmaları teşvik etmiştir. Asya, Afrika, Akdeniz ve Avustralya'daki birçok ülkede hayvan yemi olarak öncelikle kışlık baklagil mahsulü olarak yetiştirilmektedir (Hillocks ve Maruthi, 2012). Mürdümük, İran'ın geniş coğrafi bölgelerinde de yetiştirilen en eski yerel ürünlerden biridir (Jafarinasab ve ark., 2022). Hayvansal ürünlere ve dolayısıyla hayvan yemine olan talebin artmasıyla birlikte mürdümük yüksek proteinli ve ucuz bir yem kaynağıdır ancak mevcut durumda yeterince tüketilmemektedir. Mürdümük yetiştiriciliği Şili'de de yapılmakta olup hayvan yemi olarak yetiştirilmekte ve bir kısmı Avrupa'ya ihraç edilmektedir. 'Chalus' ve 'Ceora' çeşitleri Avustralya'da hayvan yemi olarak piyasaya sürülmüştür. Chalus tohumu %26'ya kadar protein içerebilmektedir. Hayvan yemi kaynağı olarak *Lathyrus* germplazmasının ön taraması güney İtalya'nın kuru dağlık alanları için de gerçekleştirilmiştir. Polonya'daki yerel arazi ırklarının taranması, Polonya'da yaygın olarak görülen asitli topraklarda, yaz kuraklığına yatkın bölgelerde örtü bitkisi ve hayvan yemi olarak kullanılmaya uygun, yüksek verimli hatların geliştirilmesi potansiyelinin bulunduğunu göstermiştir (Hillocks ve Maruthi, 2012).

Diğer baklagillerle karşılaştırıldığında mürdümük, bir takım zararlı böceklerin yanı sıra *ascochyta* yanıklığı ve *Fusarium oxysporum* gibi hastalıklara karşı da direnç göstermektedir. *Lathyrus* ssp. külleme ve soğuğa karşı gösterdiği tolerans açısından önemli bir gen kaynağıdır. Su ihtiyacının düşük olması nedeniyle, mürdümük sıklıkla dünyanın kurak bölgelerinde (özellikle bazı Afrika ve Asya ülkelerinde) yetiştirilir

ve tohumları insanlar için temel bir diyet enerjisi ve protein kaynağıdır. Günümüz Avrupa'sında bile tohumlarından hazırlanan yiyecekler İspanya, Fransa, Almanya ve Bulgaristan'ın yanı sıra Polonya'nın bazı bölgelerinde hala tüketilmektedir (Grela ve ark., 2010). Günümüzde mürdümük sürdürülebilir tarım için bir model ürün olarak değerlendirilmektedir (Vaz Patto ve ark. 2006). Bitkinin yatay yayılma alışkanlığı, geç olgunlaşması ve baklalarının çatlaması gibi bazı istenmeyen özellikler, mürdümük yetiştiriciliğinin yaygın olarak uygulanmasını sınırlandıran önemli faktörlerdir. Ayrıca antibesin faktörleri de daha yaygın olarak besin kullanımının önünde bir engel oluşturmaktadır. Bu bileşenler, ve nörotoksinler, özellikle de 3-(N-oksalil)-L2,3-diamino propiyonik asittir (ODAP), mürdümük tohumlarının uzun süreli aşırı tüketiminden sonra hem hayvanlarda hem de insanlarda nörolatirizme neden olur. Nörolatirizm, insanlarda bacaklarda veya hayvanlarda arka bacaklarda spastik felç, iskelet kaslarında genel zayıflık ve artan sertlikle karakterize bir hastalıktır. Bu zararlı maddelerden pek çok bileşik, bitkilerin melezlenmesi ve seleksiyonu veya tohumların teknolojik olarak hazırlanması yoluyla azaltılabilir (Grela ve ark., 2010).

Jafarinasab ve ark., (2022) tarafından terminal kuraklığın mürdümük, ekotiplerinin büyümesi, verimi ve bazı fizyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için tarla denemeleri yürütülmüştür. İran'ın doğu, güneydoğu ve güneyindeki farklı iklim bölgelerinden toplanan dokuz yerel bezelye ekotipi (Baft_1, Baft_2, Bardsir, Dehbakri, Kuhbanan, Rabor, Sirjan, Shiraz ve Torbat Heydarieh) normal sulamaya veya terminal kuraklığa (çiçeklenme dönemi su stresi) maruz

birakılmıştır. Her iki uygulamada da üstün ekotipler Baft_2 ve Rabor oldu. Bitki başına bakla sayısı her iki sulama rejiminde de tohum verimi ve biyolojik verimle çok yüksek korelasyona sahip olmuş ve yüksek verimli ekotiplerde en yüksek korelasyonu göstermiştir. Mürdümükte kuraklık toleransının, yüksek nişasta birikimi ve şekerlere dönüşüme yansıdığı, suyun daha iyi kullanımı ve bitki fotosentez kapasitesiyle yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Yüksek verimli ekotipler generatif dokularına daha fazla kuru madde tahsis etmiştir.

Boukecha ve ark., (2010) beş Cezayir popülasyonunu (4Lat 4-1, 4Lat 4-2, 2lat2-1, 3lot31 ve 1Lat1) ve ABD’den gelen 2 mürdümük çeşidini (21Lat, 11Lat) iki koşul altında (sulama ve kuraklık stresi) değerlendirmişlerdir. Kuraklığın bitki boyu, çiçeklenme süresi, bakla sayısı, bakla uzunluğu, olgunluk zamanı, tohum verimi ve bin tane ağırlığı gibi özellikler üzerinde etkisi incelenmiştir. Çalışmada, incelenen tüm özelliklerin kuraklıktan etkilendiği ve bu etkilerin genotiplere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak kuraklık stresinin kritik aşamada sulama eksikliğinden dolayı tüm genotiplerde düşük tohum verimine neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 21 Lat, 4Lat4-2 ve 1Lat-1 genotiplerinin kuraklık koşullarına daha dayanıklı olduğu ve bu çeşitlerin kuraklık toleransı üzerine çalışılan ıslah programlarında gen kaynağı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Lathyrus türü, yalnızca kuraklığa dayanıklılık sağlayan morfolojik özellikleriyle değil aynı zamanda tohumundaki besin içerikleri ve antibeslenme faktörlerindeki muazzam çeşitlilikle de karakterize edilir. Besin kalitesi yüksek ve lezzetli olan mürdümük bitkisinin, uygun kimyasal bileşiminin dikkate alınması kaydıyla

tohumlarının hem insan hem de hayvan beslenmesinde daha yaygın kullanım potansiyeli bulunmaktadır (Grela ve ark., 2010).

KAYNAKÇA

- Abdallah, F., Noumi, Z., Ouled-Belgacem, A., Michalet, R., Touzard, B., & Chaieb, M. (2012). The influence of *Acacia tortilis* (Forssk.) ssp. *raddiana* (Savi) Brenan presence, grazing, and water availability along the growing season, on the understory herbaceous vegetation in southern Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 76, 105-114.
- Abdallah, F., Noumi, Z., Touzard, B., Belgacem, A. O., Neffati, M., & Chaieb, M. (2008). The influence of *Acacia tortilis* (Forssk.) subsp. *raddiana* (Savi) and livestock grazing on grass species composition, yield and soil nutrients in arid environments of South Tunisia. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 203(2), 116-125.
- Abozeid, A., Liu, Y., Liu, J., & Tang, Z. (2017). Comparative foliar structure of *vicia* l. species from China. *Journal of Biosciences and Medicines*, 5(3), 170-175.
- Adzawla, W., Donkoh, S. A., Nyarko, G., O'Reilly, P. J., Olayide, O. E., Mayes, S., ... & Azman, H. R. (2016). *African Journal of Agricultural Research* 11:583-594. DOI: 10.5897/AJAR2015.10568.
- Alvarez-Aragon, R., Palacios, J.M. and Ramírez-Parra, E. (2023). Rhizobial symbiosis promotes drought tolerance in *Vicia sativa* and *Pisum sativum*. *Environmental and Experimental Botany*. Volume 208, 105268.
- Azam-Ali, S. N., Sesay, A., Karikari, S. K., Massawe, F. J., Aguilar-Manjarrez, J., Bannayan, M., & Hampson, K. J. (2001). Assessing the potential of an underutilized crop—a case study using bambara groundnut. *Experimental agriculture*, 37(4), 433-472.
- Badri, M., Cheikh, N. B., Mahjoub, A., & Abdelly, C. (2016). Morpho-phenological diversity among natural populations of *Medicago polymorpha* of different Tunisian ecological areas. *African Journal of Biotechnology*, 15(25), 1330-1338.
- Berchie, J. N., Opoku, M., Adu-Dapaah, H., Agyemang, A., & Sarkodie-Addo, J. (2012). Evaluation of five bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) landraces to heat and drought stress at Tono-Navrongo, Upper East Region of Ghana. *African Journal of Agricultural Research*, 7(2), 250-256.
- Berger, J. D., Robertson, L. D., & Cocks, P. S. (2002). Agricultural potential of Mediterranean grain and forage legumes: Key differences between and within *Vicia* species in terms of phenology, yield, and agronomy give insight into plant adaptation to semi-arid environments. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 49, 313-325.

- Beyaz, R. (2022). Morphological and biochemical changes in shoot and root organs of common vetch (*Vicia sativa* L.) after exposure to drought stress. *ScienceAsia*, 48(1): 51-56
- Bijanzadeh, E., Barati, V., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2019). Assessment of the crop water stress index and color quality of bur clover (*Medicago polymorpha* L.) under different irrigation regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2825-2835.
- Boukecha, D., Laouar, M., Mekliche-Hanifi, L. and Harek, D. (2018). Drought tolerance in some populations of grass pea (*Lathyrus sativus* L.). *Legume Research*, 41(1) 2018 : 12-19.
- Braunwart, K., Putnam, D., & Fohner, G. (2001). Alternative annual forages—now and in the future. In *Proc. 31st California Alfalfa and Forage Symposium*.
- Çifçi, H. ve Açıkbaş, S. (2023). Kuraklık Stresinin Yaygın Fiğ (*Vicia sativa* L.) Çeşitlerinin Çimlenme ve Fide Gelişimine Etkisi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*. 10(3): 288-299.
- Dalila, B., Laouar, M., Leila, M. H., & Harek, D. (2018). Drought tolerance in some populations of grass pea (*Lathyrus sativus* L.). *Legume Research-An International Journal*, 41(1), 12-19.
- Del Pozo, A., Ovalle, C., Aronson, J., & Avendaño, J. (2000). Developmental responses to temperature and photoperiod in ecotypes of *Medicago polymorpha* L. collected along an environmental gradient in central Chile. *Annals of Botany*, 85(6), 809-814.
- Del Pozo, A., Ovalle, C., Aronson, J., & Avendano, J. (2002). Ecotypic differentiation in *Medicago polymorpha* L. along an environmental gradient in central Chile. I. Phenology, biomass production and reproductive patterns. *Plant Ecology*, 159, 119-130.
- Doğan H. (2019). *Medicago polymorpha* (Kırkyonca). <https://kocaelibitkileri.com/medicago-polymorpha/>
- El-Azazi, E. S., Khalifa, E. A., Belal, M. S. A., & Eltanger, N. A. (2013). Ecological Studies of some *Acacia* species grown in Egyptian Derserts. *Earth*, 7, 3-8542.
- Grela, E. R., Rybiński, W., Klebaniuk, R., & Matras, J. (2010). Morphological characteristics of some accessions of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) grown in Europe and nutritional traits of their seeds. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 57, 693-701.

- Gusmao, M., Siddique, K. H. M., Flower, K., Nesbitt, H., & Veneklaas, E. J. (2012). Water deficit during the reproductive period of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) reduced grain yield but maintained seed size. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(6), 430-441.
- Gülgün, E. (2020). Süt İneklerinde Rasyona İlave Edilen Korunmuş Metiyonin ve Lizinin Süt Verimi ve Süt Kompozisyonu Üzerine Etkiler. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi. Zootekni Anabilim Dalı.
- Hanson J. and Street K. (2008). Regeneration guidelines for grasspea. Introduction for Regeneration Guidelines. CGIAR. <https://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/index.php/regeneration-guidelines-of-crops/grasspea-mainmenu-404>
- Hegazy, A. K., & Amer, W. M. (2002). Altitudinal and latitudinal diversity of the flora on eastern and western sides of the Red Sea. In *Biodiversity: Biomolecular aspects of biodiversity and innovative utilization* (pp. 197-216). Boston, MA: Springer US.
- Heuze V., Tran G., Lebas F. (2020). Bambara groundnut (*Vigna subterranea*) haulms. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO
- Hillocks, R. J., & Maruthi, M. N. (2012). Grass pea (*Lathyrus sativus*): Is there a case for further crop improvement?. *Euphytica*, 186(3), 647-654.
- Huang, Y., Matthew, C., Zhang, Z., & Nan, Z. (2019). Morphological fractions, chemical composition and in vitro digestibility of stover of four common vetch varieties grown on the Tibetan plateau. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 103(6), 1646-1656.
- Huang, Y. F., Gao, X. L., Nan, Z. B., & Zhang, Z. X. (2017). Potential value of the common vetch (*Vicia sativa* L.) as an animal feedstuff: a review. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 101(5), 807-823.
- Jafarinasab, A., Azari, A., Siddique, K. H., & Madahhosseini, S. (2022). Variation of yield and physiological characteristics of *Lathyrus sativus* L. populations under terminal drought. *Agricultural Water Management*, 273, 107886.
- Jiang, J., Su, M., Chen, Y., Gao, N., Jiao, C., Sun, Z., ... & Wang, C. (2013). Correlation of drought resistance in grass pea (*Lathyrus sativus*) with reactive oxygen species scavenging and osmotic adjustment. *Biologia*, 68, 231-240.
- Jiao, C. J., Jiang, J. L., Ke, L. M., Cheng, W., Li, F. M., Li, Z. X., & Wang, C. Y. (2011). Factors affecting β -ODAP content in *Lathyrus sativus* and their possible physiological mechanisms. *Food and chemical toxicology*, 49(3), 543-549.

- Jideani, V. A., & Jideani, A. I. (2021). Bambara groundnut: Utilization and future prospects. Springer.
- Jorgensen, S. T., Liu, F., Ouédraogo, M., Ntundu, W. H., Sarrazin, J., & Christiansen, J. L. (2010). Drought responses of two bambara groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc.) landraces collected from a dry and a humid area of Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(6), 412-422.
- Karadağ, Y., Özkurt M. ve Tufa, Y. (2023). Yaygın Mürdümük (*Lathyrus sativus* L.). Tarımsal Üretime Makro Bakış. Bölüm 4, syf.119-138. İksad Yayınevi. ISBN: 978-625-6404-59-5.
- Kundy, A.C., Mayes, S., Msanya, B., Ndakidemi, P. and Massawe, F. (2023). Building Resilient Crop Production Systems for Drought-Prone Areas—A Case for Bambara Groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc) and Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Agronomy* 2023, 13, 383. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020383>.
- Lemmel C. ve Attioui Z., (2018). Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acacia_tortilis_var._raddiana_
- Lengarite, M. I., Getachew, G., Akudabweni, L., & Hoag, D. (2014). Supplementary feeding of lactating goats with processed and unprocessed *Acacia tortilis* pods and local grass in the dry season in northern Kenya. *Agricultural Science Research Journal*, 4(3), 63-71.
- CC BY-SA 4.0 TAPU, (Mahama, A.A.). Bambara groundnut (*Vigna subterranea*). <https://colostate.pressbooks.pub/understudiedindigenouiscrops/chapter/bambara-groundnut/>
- Mahala, A.G and Mohammed, A.A.A. (2010). Nutritive Evaluation of Bambara Groundnut (*Vigna subterranea*) Pods, Seeds and Hull as Animal Feeds. *Journal of Applied Sciences Research*, 6(5): 383-386.
- Massawe, F. J., Mwale, S. S., Azam-Ali, S. N., & Roberts, J. A. (2005). Breeding in bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.): strategic considerations. *African Journal of Biotechnology*, 4(6), 463-471.
- Mohammed, G. E. K., Mohamed, D. E. E., & Areibi, M. B. M. (2021). Grazing patterns affecting browse availability and sustainable management. *International Journal of Multidisciplinary Trends*; 3(2): 30-33.
- Mubaiwa J, Fogliano V, Chidewe, C, Bakker EJ, Linnemann AR. 2018. Utilization of Bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) for sustainable food and nutrition security in semi-arid regions of Zimbabwe. *PLoS ONE* 13:e0204817 DOI: 10.1371/journal.pone.0204817

- Muir, J. P., Ocumpaugh, W. R., & Butler, T. J. (2005). Trade-offs in forage and seed parameters of annual *Medicago* and *Trifolium* species in north-central Texas as affected by harvest intensity. *Agronomy Journal*, 97(1), 118-124.
- Murevanhema, Y. Y., & Jideani, V. A. (2013). Potential of bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc) milk as a probiotic beverage—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 53(9), 954-967.
- Mwale, S. S., Azam-Ali, S. N., & Massawe, F. J. (2007). Growth and development of bambara groundnut (*Vigna subterranea*) in response to soil moisture: 1. Dry matter and yield. *European journal of agronomy*, 26(4), 345-353.
- Nguyen, V., Riley, S., Nagel, S., Fisk, I., & Searle, I. R. (2020). Common vetch: a drought tolerant, high protein neglected leguminous crop with potential as a sustainable food source. *Frontiers in plant science*, 11, 818.
- Norihiko, T., Kaga, A., Isemura, T., Vaughan, D., Srinives, P., Somta, P., ... & Yokoyama, T. (2010). Vigna genetic resources. In *Proceeding of the 14th NIAS International Workshop on Genetic Resources, Genetic and Comparative Genomics of Legumes (Glycine and Vigna)* (pp. 11-21).
- Noumi, Z., Abdallah, F., Torre, F., Michalet, R., Touzard, B., & Chaieb, M. (2011). Impact of *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* tree on wheat and barley yield in the south of Tunisia. *Acta oecologica*, 37(2), 117-123.
- Sadeghi, H., & Fakhari, F. (2016). Response of growth and nitrogen fixation to pod elimination of three annual *Medicago* species submitted to drought and subsequent recovery. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(5), 757-764.
- Tenikecier, H. S. (2020). Forage and seed yield, relationships among its characters in some grass pea (*Lathyrus sativus* L.) genotypes. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 37(3), 152-158.
- Tenopala, J., González, F. J., & De la Barrera, E. (2012). Physiological responses of the green manure, *Vicia sativa*, to drought. *Botanical Sciences*, 90(3), 305-311.
- Tokarz, B., Wójtowicz, T., Makowski, W., Jędrzejczyk, R. J., & Tokarz, K. M. (2020). What is the difference between the response of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) to salinity and drought stress?—A physiological study. *Agronomy*, 10(6), 833.
- Vaz Patto, M.C., Skiba, B., Pang, E.C.K., Ochatt S.J., Lambein, F., Rubiales, D. (2006). *Lathyrus* improvement for resistance against biotic and abiotic stresses: From classical breeding to marker assisted selection. *Euphytica* (2006) 147: 133-147.
- Yousfi, N., Saïdi, I., Slama, I., & Abdelly, C. (2015). Phenology, leaf gas exchange, growth and seed yield in *Medicago polymorpha* L. populations affected by water

deficit and subsequent recovery. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 214, 50-60.

Zeiditoolabi, N., Daraie-Mofrad, A., Direkvandy, S., Mosavi Rad, H., & Romiani-Karami, A. (2020). Effect of plant density on the stomata morphological structure and forage yield in three species of forage yield vetch (*Vicia* sp.) under dry farming conditions of khorramabad. Agricultural Knowledge, 3(5), 17-32.

BÖLÜM 14

SOYA (*Glycine max*)

ACI BAKLA (*Lupinus angustifolius*)

İSKENDERİYE ÜÇGÜLÜ (*Trifolium alexandrinum*)
***Stylosanthes* spp.**

Öğr. Gör. Dr.Feyza Döndü BİLGİN¹
Prof. Dr. Mustafa SÜRMEN²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.13759879>

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Koçarlı MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aydın, Türkiye. feyzagundel@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-7435-4130

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Aydın, Türkiye. mustafa.surmen@adu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-9748-618x

1. Soya (*Glycine max*)

İşlenmiş soya (*Glycine max*) en büyük yemlik protein ve bitkisel yağ kaynağıdır (Manavalan ve ark., 2009). Soya ekim alanlarındaki 20. yüzyılın sonu ve 21. yüzyılın başındaki keskin artış, yem proteinine ve yenilebilir yağa olan talepten kaynaklanmaktadır. Soya, yem, tüketim ve endüstriyel amaçlar için yaygın kullanımı nedeniyle tüm modern dünya için son derece önemli bir üründür. Soya fasulyesi tohumları, uygun bir amino asit bileşimi ile karakterize edilen %33 ila %45 protein içerir (Sun ve ark., 2018). Soya fasulyesi kuru ot, otlatma ve silaj olarak kullanılabilir. Ekimden 3-4 ay sonra yonca kuru otuna eşdeğer kalitede kuru ot üretir (Kökten ve ark., 2014). 2020 yılında dünya çapında 127 milyon hektarda soya yetiştirilmiş ve 353 milyon ton üretimi yapılmıştır. Dünyanın başlıca soya üreticileri, küresel soya tohumu üretiminin %82'sini sağlayan Brezilya, ABD ve Arjantin'dir. Dünyada 2018'de soya esas olarak hayvan yemi (%76), doğrudan insan gıdası (%20) ve endüstriyel işlemler (%4) için kullanılmıştır (Staniak ve ark., 2023).

Soya çeşitlerinin çoğu kısa gün bitkileridir ve genellikle en iyi verimi veren genotiplerdir. *Bradyrhizobium japonicum* ile simbiyoz halindeki soya fasulyesi, yılda 4-30 kg N da⁻¹ arasında azot sabitleyebilir. Güçlü, iyi gelişmiş kök sistemi sayesinde besin hareketliliğini ve mineralizasyonu aktive eden kök salgıları yoluyla toprak yapısını ve verimliliğini olumlu yönde etkiler (Staniak ve ark., 2023).

Soya, yüksek verim elde etmek için büyüme sürecinde yeterli suya ihtiyaç duyan önemli bir üründür. Kuraklık stresi soya fasulyesinde bitki boyu ve yaprak alanındaki artışları engeller. Bu inhibisyon, kuraklık

stresinin seviyesi, süresi ve sıklığı arttıkça daha önemli hale gelir. Kuraklık stresi altında soya yapraklarındaki klorofil ve bağıl su içeriği azalır, ozmolit içeriği, antioksidan potansiyeli ve membran lipidlerinin peroksidasyonu artar. Stres ortadan kalktıktan sonra tekrar sulama işleminin telafi edici etkisi koşulludur. Şiddetli stres, özellikle uzun vadeli şiddetli stres, telafi edici etkiyi azaltacaktır (Dong ve ark., 2019). Kuraklık stresi klorofil a, b ve toplam klorofil içeriğini önemli ölçüde azaltabilir (Wu ve Zhang, 2019).

Soya, birincil kök (ana kök) ve yanal köklerden oluşan allorhizik bir kök sistemine sahiptir. Örneğin, soya çeşidi Jackson, allorhizik kök sistemine sahip mükemmel bir örnektir ve toprağın derinlerine doğru büyüyen uzun kökleri kurak şartlarda daha iyi su alımına olanak tanır (Fenta ve ark., 2014). Kuraklık koşulları altında birçok soya (*Glycine max*) çeşidinde kök uzunluklarının ve kuru biyokütle birikiminin azaldığı bildirilmiştir (Thu ve ark., 2014).

Simbiyotik azot (N_2) fiksasyonunun orta düzeydeki toprak suyu eksikliğine bile duyarlı olduğu soyada, kuraklık ürün veriminin kaybına neden olan en önemli çevresel faktördür. Toprak kurumasıyla N_2 fiksasyonunun azalması, protein üretimi için yetersiz N nedeniyle verim düşüşlerine neden olur. Soya fasulyesinin toprak kurumasına duyarlılığının temelini, nodüllerden sürgünlere üreidler halinde N taşınmasıyla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Azotu amidler halinde taşıyan türlerin N_2 fiksasyonu, üreid şeklinde taşıyan türlere göre toprak kurumasına daha az duyarlıdır. Soya fasulyesi, toprak kuruması sırasında üreidler biriktirir ve bu da N_2 fiksasyon aktivitesini etkiler (Sinclair ve ark., 2007).

Kanopi solması, soyada toprak su eksikliğinin ilk görünür belirtisidir. Kuraklık stresine bir yanıt olan kanopi solmasının başlangıç zamanı ve şiddeti genotipleri göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, toprak profilinden su çekme yeteneğini etkileyen köklenme derinliği, yan köklenme veya köklenme yoğunluğu gibi kök sistemi özellikleri ile ilişkilidir. Yavaş solan genotip PI 416937'nin, diğer genotiplere kıyasla oldukça verimli bir kök sistemine ve artan yan kök büyümesine sahip olduğu bildirilmiştir (King ve ark., 2009).



Şekil 1. Su kısıtı koşullarında yavaş solan (slow wilting) ve hızlı solan (fast wilting) soya çeşitlerinin tarladaki performansının karşılaştırılması.

Kaynak: NCSU, 2024

Modern soya ıslahının ilk birkaç on yılında (1940'lardan 1970'lere kadar), ıslahçılar adapte edilmiş ıslah materyali havuzunda kuraklığa dayanıklılık için belirgin bir kaynak belirleyememişlerdir. Kuraklığa dayanıklılık ıslahında fizyolojik ölçümler zaman alıcı olduğundan küresel soya germ plazması koleksiyonunda toleranslı genotipleri

belirlemek için yeterli stratejiye sahip olunamamış; yerel ırkların veya egzotik soya germ plazmasında da çok az çaba sarf edilmiştir. 1980'lerde ve 1990'larda, birkaç yavaş solan bitki keşfedilmiştir. Yavaş solma özelliğinin stres altındaki verimle bir ilişkisi olduğu kısa sürede ortaya çıkmış ve yakın zamanda yapılan bir kantitatif özellik lokusu (quantitative trait loci, QTL) analizi, yavaş solma ile stres altındaki verim artışı arasında paralel bir ilişki olduğunu doğrulamıştır. Yavaş solma özelliğine sahip birkaç soya genetik kaynağı artık ABD'de kuraklığa dayanıklılık ıslahında kullanılmaktadır. Bu özelliğin genetik ve fizyolojik temelleri şu anda yeterince anlaşılmamıştır ve yavaş solmanın kuraklığa dayanıklılık için tek bir mekanizma mı yoksa birkaçının entegrasyonu mu olduğu bilinmemektedir (Hufstetler ve ark., 2007).

Bitkiler kuraklık stresiyle başa çıkmak için çeşitli mekanizmalar kullanırlar. Bunlar üç gruba ayrılabilir: kuraklıktan kaçış, kuraklıktan kaçınma ve kuraklığa tolerans. Kuraklıktan kaçış, bitkinin kuraklığın başlamasından önce yeterli su temini döneminde yaşam döngüsünü tamamlamasını sağlar. Kuraklıktan kaçışın bir örneği, şu anda Güney ABD'de yaygın olarak kullanılan "Erken Soya Ekim Sistemi"dir. Bu sistemde, daha önce geç olgunlaşan çeşitlerin yetiştirildiği bölgelerde kısa sezonlu çeşitler Mart-Nisan aylarında ekilir. Erken olgunlaşan çeşitler Nisan sonu Mayıs başında çiçeklenmeye başlar ve Mayıs sonunda bakla oluşturur, böylece Temmuz-Ağustos'taki olası kuraklık döneminden önce generatif aşamasını tamamlar (Heatherly ve Elmore, 2004). İkinci mekanizma olan kuraklıktan kaçınma, bitkinin stres dönemlerinde yüksek su durumunu korumasına yardımcı olan stratejileri içerir; bu stratejiler ya köklerden verimli su emilimi yoluyla ya da havai

kısımlarından buharlaşmayı azaltarak gerçekleşir. Kuraklık toleransı olan üçüncü mekanizmada ise, bitkiler düşük su potansiyelinde bile turgor basıncını korumak için ozmoprotektan madde ve ozmolit gibi moleküllerin sentezi yoluyla protoplazmik tolerans uygularlar (Manavalan ve ark., 2009). Soya fasulyesinde, su sınırlı koşullar altında tane verimi (Y) için yaygın olarak kabul gören bir denklem, terlenen su miktarı (T), su kullanım verimliliği (WUE) ve hasat indeksi (HI) olmak üzere üç bileşenin bir fonksiyonudur; $Y = T \times WUE \times HI$. Su kullanım verimliliğinde artışa yol açan optimum terlemenin korunması, soya verimi iyileştirme stratejilerinden biridir. Kuraklık sırasında T'yi artırma veya koruma olasılığı ile ilişkili olduğu bildirilen dokuz ikincil özellik vardır. Bu özellikler fenoloji, fotoperiyot duyarlılığı, gelişimsel plastisite, yaprak alanı, ısı toleransı, ozmotik ayarlama, erken canlılık, köklenme derinliği ve köklenme yoğunluğudur. Ayrıca, terleme etkinliği ve yaprak yansıması WUE ile ilgili diğer iki özelliiktir (Purcell ve Specht, 2004).

Soyada kuraklığa dayanıklılık için hedeflenen özellikler arasında daha derin kök sistemi, sürekli azot fiksasyonu (Sinclair ve ark., 2007), yavaş kanopi solması (Hufstetler ve ark., 2007) ve su kullanım verimliliği yer almaktadır. Soyadaki yavaş solma özelliği, bazı genotipler tarafından muhafazakar bir su kullanım stratejisi önermekte olup kuraklığa dayanıklılık için ıslahta kullanılmıştır. Kuraklık stresi soyada fotosentez oranını azaltır. Kuraklık stresi altında, fotosentez oranındaki azalma esas olarak yapraklardaki absisik asit (ABA) konsantrasyonunun artmasıyla oluşan stoma iletkenliğindeki azalmadan kaynaklanır. Yapraklardaki nişasta birikimi bu azalmada önemli bir rol

oynar (Mutava ve ark., 2015).

Soyada su ilişkisi özellikleri ve su kullanımının yüksek verimi ve güvenilir gravimetrik ölçümlerini sağlamak için, ıslah programına yağmur barınağı gibi modern tesisleri dahil etmek de önemlidir. Ek olarak, kontrollü koşullar altında toprak su eksikliğine karşı bitki tepkilerini incelemek için otomatik bitki fenotipleme platformları (Granier ve ark., 2006), buharlaşma-terleme ve bitki büyüme ölçümleri için otomatik döner lizimetre sistemi (Lazarovitch ve ark., 2006), taşınabilir tek taraflı nükleer manyetik rezonans kullanarak zaman içinde bitki su durumunun tahribatsız ölçümü ve bitki su kullanımını ölçmek için diğer hassas ekipmanlar gibi güncel gelişmelerden yararlanılmalıdır (Manavalan ve ark., 2009).

24 soya genotipi kullanılarak yapılan bir çalışmada, Su kullanım etkinliği (WUE) 2.7 g kuru madde kg^{-1} su ile 3.4 g kuru madde kg^{-1} su arasında değişmiştir (Hufstetler ve ark., 2007). Yağmurdan korunma amaçlı yapılan bir barınak çalışmasında, tohum verimine dayalı kuraklık toleransı Brezilya soya çeşitleri arasında değişiklik göstermiştir. Yüksek kuraklık toleransına sahip çeşitler, yüksek tohum verimiyle ilişkili olan erken generatif aşamada yüksek bir ürün büyüme oranını korumuştur (Oya ve ark., 2004).

Soya çeşitlerinde kazık kök uzama oranındaki genotiple çeşitlilik sera çalışmalarıyla iyi bir şekilde belgelenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, daha hızlı uzama oranlarına sahip çeşit grubunun yüzeyin 120 cm altındaki toprak suyunu daha fazla tüketebildiğini göstermiştir. Soya fasulyesinde kuraklığa dayanıklılık ile kuru ağırlık, toplam uzunluk,

hacim ve yanal kök sayısı gibi çeşitli kök özellikleri arasında önemli korelasyonlar vardır (Liu ve ark. 2005). Toprak kuruması aynı zamanda soya yapraklarında üreidlerin birikmesine yol açar ve nodülasyonun bir inhibitörü olduğu düşünülmektedir. Yaprak tüylenme yoğunluğu, su stresi altındaki koşullar altında soya için önemli bir adaptif özelliktir. Yoğun tüylü hatlar, artmış vejetatif canlılığa, daha fazla kök yoğunluğuna ve daha derin kök uzantısına sahiptir. Dahası, ekstra yoğun tüylenme, soya fasulyesi mozaik virüsü enfeksiyonunun insidansını önemli ölçüde azaltabilir. Ancak, Pd1 ve Pd2 alelleri tarafından kontrol edilen artan tüylenme yoğunluğu hem pozitif hem de negatif tarımsal etkiler üretebilir (Pfeiffer ve ark., 2003).

Soya bitkileri, suyun yalnızca toprağın biraz daha derinlerinde kolayca bulunabildiği koşullara rağmen, sıklıkla önemli su eksiklikleri yaşarlar. Kuraklık stresi soya üretimi ve verim istikrarı için önemli bir kısıtlamadır. Kuraklık koşulları altında yüksek verimli çeşitler geliştirmek için en yaygın kullanılan kriter geleneksel olarak birden fazla lokasyonda verim istikrarı için doğrudan seçim olmuştur. Ancak bu yaklaşım zaman alıcı ve emek yoğunudur, çünkü verim düşük kalıtım derecesine sahip oldukça niceliksel bir özelliktir ve toprak heterojenliğinden ve çevresel faktörlerden kaynaklanan farklılıklardan etkilenir. Tüm genom dizisinin, fiziksel haritaların, genetiğin ve işlevsel genomik araçların kullanılabilirliğiyle birlikte, moleküler ıslah ve genetik mühendisliğini kullanan entegre yaklaşımlar soyada kuraklığa dayanıklılığı iyileştirmek için yeni fırsatlar sunmaktadır (Manavalan ve ark., 2009).

Soyada abiyotik stres tepki mekanizmasını çözmek için birkaç

proteomik çalışma yürütülmüştür ve kuraklık nedeniyle miktarı değişen kök proteinlerinin ozmotik stres tepkilerinde rol oynadığı görülmüştür (Toorchi ve ark., 2009). Bu proteomik çalışmalar ayrıca ozmotik korumada yer alan ve kuraklık tepkisinde kinazlar ve transkripsiyon faktörlerini kodlayan kök genlerinin önemli rolünü bir kez daha göstermiştir. İlginç bir şekilde, kuraklığa tepki olarak metiyonin sentaz miktarlarında azalma tespit edilmiştir (Mohammadi ve ark., 2012). Bu enzim, kükürt metabolizmasında sisteyinin metiyonine dönüşümünü katalize eder. Kükürt metabolizmasında merkezi öneme sahip olan bu protein, bu nedenle kuraklık tepkisinde tetiklenen olası epigenetik kontrollerin temelini oluşturan kuraklığa duyarlı bir protein olabilir (Tripathi ve ark., 2016).

Soya fideleri kuraklık stresine karşı hassastır. Fide aşamasındaki kuraklık stresi, hem bitki büyümesi hem de verim üzerinde geri döndürülemez olumsuz bir etki uygular. Kuraklık stresi soya sürgün ve kök dokularının büyümesini ve metabolizmasını olumsuz etkiler. Kuraklık stresi soya fasulyesi fidelerinde R/S oranında (root/shoot ratio, kök/sürgün oranı) artışa neden olur. Bu durum, köklere kıyasla sürgünlerin biyokütle birikiminin artan inhibisyonundan kaynaklanır. Kuraklık stresi altındaki soya büyümesi esas olarak şeker metabolizması, şeker tahsisi ve şeker taşınması tarafından düzenlenir (Du ve ark., 2020).

Benjamin ve Nielsen, (2006) tarafından baklagil kök sisteminin su eksikliği stresine verdiği yanıtı incelemek için bir deneme yürütülmüştür. Nohut (*Cicer arietinum*), tarla bezelyesi (*Pisum sativum*) ve soya (*Glycine max*) iki farklı su rejiminde yetiştirilmiştir. Birincisi doğal yağış koşulları altında, ikincisi su eksikliği stresini en aza indirmek

için sulanarak. Her tür için kök dağılımları, geç çiçeklenme ve orta bakla dolum büyüme aşamalarında, 0.23 m derinlik aralıklarında, bitkilerin hemen altında 1.12 m derinliğe kadar ölçülmüştür. Su açığı, göreceli soya kök dağılımını etkilememiştir. Toplam soya köklerinin yaklaşık %97'si her iki örnekleme zamanında ve her iki su rejiminde de yüzeydeki 0.23 m'de tespit edilmiştir. Buna karşılık, su açığı stresi nohut ve tarla bezelyesi köklerinin daha büyük bir kısmının daha derine büyümesine neden olmuştur. Sulama koşulları altında nohut ve tarla bezelyesi köklerinin yaklaşık %80'i yüzeydeki 0.23 m'de gözlemlenmiştir. Kuru koşullar altında toplam nohut ve tarla bezelyesi köklerinin yaklaşık %66'sı yüzeydeki 0.23 m'de ve köklerin geri kalanı toprak profilinde daha derinde ölçülmüştür. Kök yüzey alanı/ağırlık oranı tarla bezelyesi ve nohutta soyaya kıyasla daha yüksek olmuş, bu da her iki türde (soyanın aksine) ince bir kök sistemine, yarı kurak iklimlerde kurak arazi mahsulü üretimi için uygunluğa işaret etmiştir.

Wang ve ark., (2020) tarafından, aylık iklim ve tarım verileri kullanılarak, kuraklığın 1961'den 2017'ye kadar kuzeydoğu Çin'deki bölgenin iki ana ürünü olan mısır ve soya verimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kuraklığın artan sıklığı ve yoğunluğu her iki ürün üzerinde olumsuz etkiler göstermiştir. 1961-2017 dönemindeki orta kuraklık yıllarında, bölgede mısır veriminin %3.2'si ve soya veriminin %10.4'ü kaybedilmiştir. Ancak, daha şiddetli kuraklık yıllarında, soya için kayıplar iki katına çıkmışken (%21.8), mısır için dört kattan fazla artmıştır (%14.0). Kuraklığın mısır ve soya üretimi üzerindeki etkisi, büyüme aşamalarına göre farklı olmuş ve kuraklık ile soyanın dane dolum aşamasındaki verim kaybı arasında güçlü bir ilişki tespit

edilmiştir.

2. Acı bakla (*Lupinus angustifolius*)

Acı bakla (Lüpen), %40'a kadar protein içeren büyük tohumlar üreten ilginç bir baklagil bitkisi türüdür. *Lupinus* cinsi, *Genisteae* tribusunun bir parçasıdır. Yeni Dünya'dan 170'in üzerinde tür ve Avrupa, Kuzey ve Doğu Afrika'dan sadece 12 tür tanımlanmıştır. 'Lupin' kelimesi Latince *lupus* (kurt) kelimesinden türemiştir ve “çok zor ortamlarda yetişebilir” veya “topraktan büyük miktarda besin alabilir” gibi farklı yorumlara sahiptir. Yabani lüpenler, kimyasal savunma aracı olarak kinolizidin alkaloidleri ürettikleri için acı ve zehirlidir. Evcilleştirme sırasında, düşük alkaloid içeriğine sahip lüpenler seçilmiş ve bu da protein açısından zengin tohumlarda alkaloid içeriği %0,02'nin altında olan ve hem insan hem de hayvan tüketimi için kullanılabilen 'tatlı' lüpenlerin elde edilmesine yol açmıştır. Evcilleştirilmiş lüpenler arasında *Lupinus angustifolius*, *Lupinus albus*, *Lupinus luteus* ve *Lupinus mutabilis* bulunur. Mavi veya dar yapraklı lüpen (*L. angustifolius*), dünya çapında 1,3 milyon tondan fazla üretimiyle bunların en yaygın olarak yetiştirilenidir (Gresta ve ark. 2017).

Küresel protein tedarikine katkıda bulunan ve aynı anda iklim değişikliğinin etkilerini azaltan mahsullerin belirlenmesi acil bir konudur. Lüpenler besin açısından fakir veya kirli topraklara (kadmiyum, kurşun ve civa) iyi adapte olmuştur, çeşitli abiyotik streslere dayanıklıdır. Lüpenlerin simbiyotik olarak azot (N₂)'u sabitleme yeteneği ve özellikle fosfor (P) ve mikro besinleri kendisi veya kendinden sonra ekilen ürünler için harekete geçirme potansiyelleri

vardır. Her ne kadar en çok tohumları için yetiştirilse de acı baklalar yeşil gübre veya hayvan yemi olarak kullanılmak için vejetatif aksamı içinde de yetiştirilirler; ya doğrudan otlatılırlar ya da hasat edilerek saman veya silaj olarak saklanırlar (Cabrita ve ark., 2024). Ancak, acı baklaların düşük kuru madde ve çözünür şeker içeriği silolama sürecini zorlaştırdığından, çift ürün yaklaşımı dikkate alınmalıdır (Kennedy ve ark., 2018). Lüpenin, otçullara ve patojenik mikroorganizmalara karşı bir savunma stratejisinin parçası olarak sentezlenen, allelopatik işlevlere sahip ve muhtemelen N rezervleri oluşturan, özellikle indol ve kinolizidin alkaloidleri olmak üzere toksik alkaloidler içerdiği bilinmektedir. Lüpenin hayvan beslenmesinde kullanımı, alkaloid içerikleri nedeniyle sınırlı olabilir, çünkü akut ve kronik semptomlar dahil olmak üzere hayvan sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkileri bildirilmiştir. İlginçtir ki, alkaloidlerin türü ve seviyesinin bitki genotipine, patojenlerin varlığına, çevresel etkilere ve toprak özelliklerine bağlı olduğu bilinse de, tüm ürünlerde veya silolanmış acı baklalarda kinolizidin alkaloidlerine ilişkin veri bulunmamaktadır (Annicchiarico ve ark., 2014).



Şekil 2. Meksika'da yetiştirilen *Lupinus angustifolius* çeşitlerinden görüntüler.

Kaynak: Natera ve ark., 2023

Acı bakla (*Lupinus angustifolius* L.), düşük girdili üretim sistemlerine iyi adapte olmuştur, yüksek verim üretir ve hayvanlar için oldukça lezzetlidir. Vitabor ve Sanabor çeşitleri Etiyopya'da çok amaçlı baklagil bitkileri olarak kullanılmak üzere ulusal kayıtlı çeşitlerdir. Bu çeşitler hem hayvanlar için yem hem de insanlar için gıda potansiyeline sahiptir ve mısırla birlikte ekim için uygundur (Assefa ve ark. 2014). Alemu ve ark., (2019) Kuzeybatı Etiyopya'da yedi farklı çeşitle yürüttükleri çalışmada %50 çiçeklenme döneminde en yüksek kuru madde verimini 267 kg/da olarak bulmuşlardır.

Dar yapraklı acı baklanın (*Lupinus angustifolius*) tatlı çeşitlerinin tohumları iyi besin özelliklerine sahiptir; ancak bu bitkiler su eksikliğine karşı hassastır (Winnicki ve ark., 2019). Verimleri, vejetasyon sırasında elverişsiz hava koşullarında (örneğin kuraklık) istikrarsızdır. Su eksikliği

çiçeklerin dökülmesine, daha az sayıda baklaya ve düşük verime yol açar. Ek olarak, su eksikliği koşulları tohumun kimyasal bileşimini etkileyebilir, örneğin bazı tatlı acı bakla çeşitlerinde alkaloid içeriği artmıştır (Gresta ve ark. 2017).

Lüpenin 10.000 hektardan fazla alanda yetiştirildiği ülkeler Polonya, Rusya Federasyonu, Almanya, Belarus ve Ukrayna'dır. Almanya'da yetiştirilen ana tür *L. angustifolius* iken, Polonya'da hem *L. angustifolius* hem de *L. luteus* yetiştirilmektedir. Lüpenin bir ürün olarak yayılmasının önündeki en büyük engel alkali toprağa, kuraklığa ve antraknoza karşı düşük tolerans, yatma direnci, geç olgunlaşma, acı ve toksik alkaloidlerdir. Dar yapraklı lüpen (*L. angustifolius*) için toprak pH'sı maksimum 6,5-6,8 arasında olmalıdır. *L. angustifolius* ve *L. luteus*'un çoğu ticari çeşidi kireçli topraklarda zayıf büyüme, zayıf nodülasyon oluşumu ve yüksek seviyelerde kloroz gösterir. Evcilleştirilmiş acı bakla türleri genellikle hem dallanan hem de dallanmayan türlere sahiptir. Dallanmayan türler yalnızca ana gövdede çiçek açtığından, dallanan türlere göre daha erken ve daha düzgün olgunlaşırlar. Dar yapraklı acı baklanın dallanmayan türlerinde dallanan türlere göre daha kısa büyüme süreleri vardır (150-180 güne karşı 90–150 gün), bu nedenle ekvatorun kuzeyinde yer alan Finlandiya'da bile yetiştirilebilirler (Gresta ve ark. 2017).

3. İskenderiye Üçgülü (*Trifolium alexandrinum*)

Trifolium alexandrinum, Akdeniz bölgesi ve Orta Doğu'daki en önemli baklagil yem bitkilerinden biridir. Toprak verimliliğine katkıda bulunur, toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirir ve yemi protein ve

mineral içeriği bakımından iyidir (Laghari ve ark., 2000). Berseem yoncası (*Trifolium alexandrinum*) Suriye'de ortaya çıkmış ve 6. yüzyılda Mısır'a, 19. yüzyılda Hindistan'a ve 20. yüzyılda Pakistan, Güney Afrika, ABD ve Avustralya'ya getirilmiştir. Dünyanın yarı kurak bölgelerinde saf bitki ve karışım halinde yetiştirilir (Hussain ve ark., 2015). Su stresi uygulamaları nedeniyle toplam kuru ağırlıkta, bitki boyunda ve prolin içeriğinde önemli bir azalma olur (Iannucci ve ark., 2000).

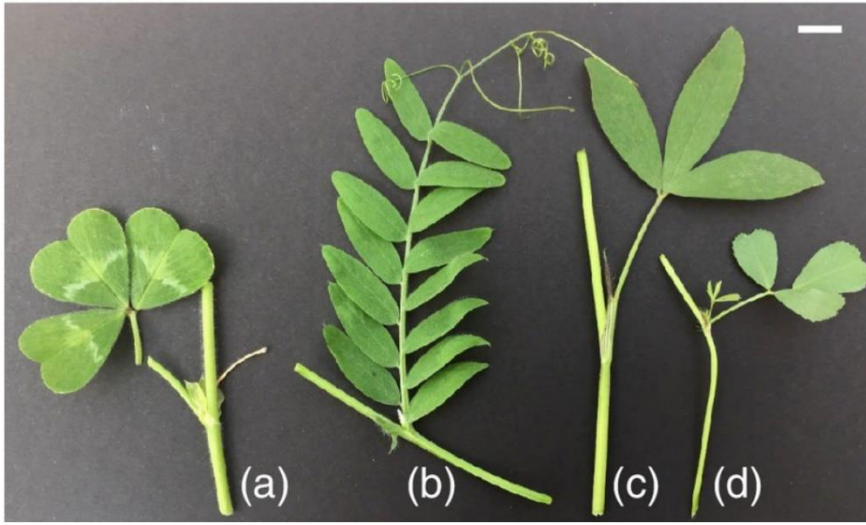


Şekil 3. *Trifolium alexandrinum* L.

Kaynak: Kaynak: Gagg, 2005

Tek yıllık üçgüller Akdeniz bölgelerinde çok popüler yem bitkileridir. Ancak, ot ve tohum verimleri genellikle ilkbahar ve yaz aylarında oluşan yüksek sıcaklıklar ve su stresi nedeniyle azalır. En yaygın yetiştirilen dört yem bitkisi olan *Trifolium alexandrinum*, *Trifolium incarnatum*, *Trifolium resupinatum* ve *Trifolium squarrosum*

erken ilkbahar büyüme alışkanlığına sahiptir ve kış yağışlarından yararlanabildiği için Akdeniz'in sıcak-ılıman bölgelerinde karışım halinde yetiştirilmektedir. Bu ortamlardaki yem bitkileri sulanmamakta ve sıklıkla ilkbahar-yaz döneminde oluşan yüksek sıcaklıkların ve su eksikliklerinin zararlı etkilerine maruz kalmakta, bu da ot ve tohum üretimini ciddi oranda azaltabilmektedir (Iannucci ve ark., 2002).



Şekil 4. a) *Trifolium subterraneum*, b) *Vicia benghalensis*, c) *Trifolium alexandrinum* ve d) *Medicago polymorpha*'nın yaprakları.

Kaynak: Enriquez-Hidalgo ve ark., 2020

İskenderiye üçgülü (*Trifolium alexandrinum*), hafif kışlara ve yaz aylarında aşırı kuraklık olmayan Akdeniz iklimine iyi adapte olmuştur. İyi bir verim potansiyeline sahiptir ve yeşil yem, saman, silo, mera ve yeşil gübre bitkisi amacıyla üretilebilir. Saf kültürde ve yıllık çavdar, yulaf, buğday veya arpa gibi buğdaygillerle veya yonca, *Trifolium incarnatum* veya *Trifolium repens* gibi baklagiller ile karışım halinde yetiştirilebilir (Marian ve ark., 2008).

Balazadeh ve ark., (2021) tarafından yürütülmüş çalışmada,

Trifolium resupinatum ve *Trifolium alexandrinum* türlerinin yem verimi ve kalitesi tam sulama (I 100), orta derecede sınırlı sulama (I 75) ve ciddi şekilde sınırlı sulama (I 50) koşullarında karşılaştırılmıştır. Beş *Trifolium resupinatum* (Pars, Aleshtar, Eghlid, Harat ve Zabol) ve beş *Trifolium alexandrinum* (Karaj, Elite, Ekinaton, Vienna ve Alex) çeşidinde sınırlı sulama uygulanması, yem bitkilerinin kuru madde (dry matter, DM) verimini, sindirilebilir kuru madde (digestible dry matter, DDM) verimini, ham protein (crude protein, CP) verimini, kuru madde alımını (DMI) ve bağıl yem değerini (relative feed value, RFV) azaltırken, ham protein oranını, suda çözünür karbonhidratlar (water-soluble carbohydrate, WSC), nötr deterjan lif (NDF) ve asit deterjan lif (ADF) içeriğini artırmıştır. Sınırlı sulama altında DM, DDM ve CP verimi için sulama suyu kullanım verimliliği (irrigation water use efficiency, IWUE) de artmıştır. Kuraklık stresi yoğunluğu arttıkça *Trifolium alexandrinum* çeşitlerinde DM verimi, DDM verimi ve içeriği ile RFV düşüşü daha yüksek olmuştur. Genel olarak, *Trifolium alexandrinum* tüm sulama rejimlerinde daha yüksek yem verimi ve su kullanım verimliliğine sahip olmuş fakat yem kalitesi kuraklığa karşı daha fazla hassasiyet göstermiştir.

Lazaridou & Koutroubas, (2004), Makedonya'da, *Trifolium alexandrinum*'un çeşitli fenolojik aşamalarında kuraklığın bitki su kullanım verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir deneme yürütmüşlerdir. Kuraklık uygulaması olarak tarla kapasitesinin yarısıyla sulama yapmışlar, erken vejetatif aşama, tomurcuklanma, erken çiçeklenme ve tam çiçeklenme aşamalarında toprak üstü kuru biyokütle, yaprak alanı ve terleme oranını ölçmüşlerdir. Kuraklık altındaki, sulanan

bitkilere kıyasla toprak üstü kuru biyokütlesi üçte birine düşmüştür (2.3 g/bitki'ye karşılık 6.8 g/bitki). Yaprak alanı ve terleme oranı da kuraklık altındaki bitkilerde sulama altındaki bitkilerden daha düşük olmuş, *Trifolium alexandrinum* terleme oranını ve yaprak alanını azaltarak bitki su kayıplarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak bu durum, verimde azalmaya neden olmuştur. Kuraklık koşullarında bitki su kullanım etkinliğinin en yüksek değeri çiçeklenme döneminin başlangıcında ölçülmüştür.

4. *Stylosanthes* spp.

Stylosanthes cinsi, Amerika, tropikal Afrika ve Güneydoğu Asya'nın tropikal, subtropikal ve ılıman bölgelerinde geniş bir dağılıma sahip çeşitli türler içeren bir gruptur. *Stylosanthes*'in dört ana türü olan *Stylosanthes scabra*, *Stylosanthes hamata*, *Stylosanthes humilis* ve *Stylosanthes guianensis*, tropikal bölgelerde yem bitkisi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Chandra, 2009). *Stylosanthes* cinsi, büyük ölçüde morfolojik özelliklere göre sınıflandırılan yaklaşık 40 tür içerir. Birçok türü önemli yem baklagilleridir ve hem yıllık hem de çok yıllık tarım sisteminde yetiştirilir. *Stylosanthes seabrana*'nın 1998-1999 yılında tanıtılmasından önce, *Stylosanthes scabra*, *Stylosanthes hamata*, *Stylosanthes guianensis* ve *Stylosanthes humilis*, Hint tropiklerinde ve subtropiklerinde yetiştirilen başlıca türlerdi (Chandra, 2013). *Stylosanthes humilis* 1914 yılında Avustralya'da ilk kez teşhis edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Planlı üretime 1933 yılında Brezilya'da *Stylosanthes guianensis* ile başlanmış ve *Stylosanthes hamata*'nın Verano çeşidi 1973 yılında tescil edilmiştir (Gündel, 2013). Bu türler çeşitli hükümet ve hükümet dışı kuruluşlar tarafından desteklenen

programların önemli bir bileşeni olarak tanımlanmıştır ve hayvan üretimi için pastoral, agropastoral ve ormancılık sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Toprak verimliliğini geri kazandırma, toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirme ve kalıcı bitki örtüsü sağlama yeteneği nedeniyle *Stylosanthes* türleri, birçok ülkede çorak alanların geliştirilmesinde de hayati bir rol oynayabilir (Chandra, 2013). *Stylosanthes*, tropikal bölgelerdeki en ekonomik ve önemli mera ve yem bitkisi olarak kabul edilir. Sonuç olarak, hayvan beslenmesini iyileştirme girişimi olarak, Avustralya'da birkaç yeni çeşidin geliştirilmesinden sonra 1960'larda Batı Afrika'ya tanıtılmıştır. *Stylosanthes*, özellikle kuraklığa dayanıklılık özelliği nedeniyle Afrika tarımının kurak topraklarına başarıyla uyum sağlamıştır (Faji ve ark., 2018).



Şekil 5. *Stylosanthes macrocephala* (sağda) ve *Stylosanthes capitata* (solda), Foto: Eliana Cezar.

Kaynak: Costa ve ark., 2007

Stylosanthes scabra genotipleri, yüksek yaprak kalınlığı, daha fazla prolin birikimi, malondialdehit, şekerler, nişasta ve klorofil içeriği ve düşük karbon izotop ayrımı değerleri ile kanıtlandığı gibi diğer türlerin hatlarına göre kuraklığa daha dayanıklıdır (Chandra ve Bhatt, 2008). Batı Bengal'deki değerlendirmeler ise, *Stylosanthes humilis*'in marjinal araziler için en iyi tür olduğunu göstermiştir (Chandra, 2009). *Stylosanthes scabra*, halk arasında “stylo” olarak bilinir; Brezilya'nın yarı kurak bölgesi Caatinga'ya özgüdür ve kuraklığa dayanıklı bir çalı yem bitkisi olarak öne çıkar. Sadece Brezilya'ya özgü bir fitocoğrafik alan olarak kabul edilen Caatinga, ülkenin yarı kurak bölgesinin çoğunu kaplayan en önemli doğal Brezilya ortamlarından biri olarak kabul edilir. Bu biyomun florası, bitkilerin yarı kurak ve zorlu ortama morfolojik ve moleküler adaptasyonları göz önüne alındığında geniş ve çeşitlidir. Bölgede su bulunabilirliği kıttır ve son derece değişkendir, birkaç organizmanın dağılımını ve hayatta kalmasını doğrudan etkiler (Castanho ve ark., 2020). Caatinga'nın bitkileri arasında baklagil olan *Stylosanthes* cinsinin türleri bulunur. Zengin genetik çeşitlilik ve aşırı koşullar altında hayatta kalma yeteneği gibi faktörler, bu klad türlerini mükemmel bir kaynak haline getirir. Ayrıca, *rizobiya* (azot sabitleyici bakteriler) ile olan ilişkilerinin daha önce bildirildiği ve kalıcı bitki örtüsü sağlama potansiyelleri nedeniyle, toprağın verimliliğini artırma ve fiziksel özelliklerini iyileştirme yetenekleri de belirtilmeye değerdir (Ferreira-Neto ve ark., 2022). Bu özellikler son derece önemlidir ve bu yem grubunu tropik ve subtropiklerde yüksek istihdam edilebilirlik seviyesine yükseltir. *Stylosanthes scabra* kuraklığa dayanıklılığı ve düşük verimliliğe sahip orta derecede asidik topraklarda büyüme kabiliyeti nedeniyle diğerlerinden ayrılır (Nagaich ve ark., 2013).

Dahası, bu tür genellikle yüksek toprak tuzluluğu ile karakterize edilen bölgelerle ilişkilendirilir. *Stylosanthes scabra*, düşük su potansiyeli altında dokularda turgorun korunmasına katkıda bulunan önemli bir ozmotik ayarlama kapasitesine sahiptir. Derin kökleri, topraktan oldukça düşük su potansiyellerinde (genellikle solma noktasıyla ilişkili olan 1,5 MPa'dan az) su toplayabilir. Bu özellikle tropik bölgelerde suyun kısıtlı olduğu mevsimlerde hayatta kalması gereken çok yıllık türler için önemli bir özelliktir (Chandra ve ark., 2006).



Şekil 6. *Stylosanthes scabra* genel görünüm ve kazık kök yapısı, Foto: Feyza Döndü Bilgin.

Kaynak: Gündel, 2013

Stylosanthes capitata, Brezilya'nın farklı bölgelerinde yetiştirilen bir mera bitkisi (Borjas-Ventura ve ark., 2020). *Stylosanthes capitata* savan bölgelerindeki asidik ve düşük verimli topraklarda yetiştirilebildiği için ekolojik ve ekonomik açıdan yem bitkisi olarak önemlidir. *Stylosanthes capitata*, Brezilya ve Venezuela'ya özgü bir baklagildir. Bu tür, C₄ otlarıyla birlikte yağmurla beslenen meralarda yetişir. Silindirik ve tüylü bir gövdeye, dağınık dallara ve üçlü bileşik yaprak (pinnatsı trifoliat) şekline sahip bir yarı çalı olarak kabul edilir.

Genellikle besin açısından fakir topraklarda mera kurmak veya köklerdeki atmosferik azot (N)'un doğal biyolojik fiksasyonu yoluyla topraktaki N kullanılabilirliğini artırmak için mısır veya diğer yem bitkileri türleriyle birlikte ekilir. Bu nedenle tür, gıda güvenliği açısından önemlidir (Alzate-Marin ve ark., 2019). *Stylosanthes capitata* üzerinde yürütülen önceki çalışmalar, yeterli su mevcudiyeti olan ortamlarda yüksek sıcaklıklara uyum sağlama konusunda biyolojik ve fizyolojik kapasitesini göstermiştir (Martinez ve ark., 2014). Su stresi ve ısınmadan kaynaklanan fenolojik değişimler çiçek kaynağı üretimini kısıtlayabilir ve *Stylosanthes capitata* poleninde morfolojik anormalliklere neden olabilir (Maluf ve ark., 2022). Ek olarak, türün doğal dağılımının gelecekteki küresel ısınma senaryolarından bağımsız olarak azalması beklenmektedir (Bonifacio-Anacleto ve ark., 2024).



Şekil 7. *Stylosanthes* spp. yaprak, çiçek ve bakla, Foto: Feyza Döndü Bilgin.

Kaynak: Gündel, 2013

Güney Afrika'da düşük yağışlar nedeniyle artan kuraklık, bitki örtüsü bileşimi ve doğal meralardan gelen biyokütle üretimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Mevcut yem yetersiz olduğundan geçimlik çiftçilik koşullarında hayvancılık üretimi genellikle düşüktür. Bu nedenle, kuraklığa dayanıklı, iyi biyokütle verimi ve kabul edilebilir besin değeri olan alternatif yem bitkilerine ihtiyaç vardır. *Stylosanthes scabra*, mevsimsel olarak kuraklık ve dona dayanıklı, biyokütle verimi yüksek, dik büyüyen, çalimsı, tropikal ve subtropikal ortamlar için önemli bir mera baklagilidir. Sonuç olarak, *Stylosanthes scabra* kurak mevsimde geniş getiren hayvanlar için alternatif bir yem kaynağı olarak mükemmel bir seçimdir (Mpanze, 2015).

Stylosanthes guianensis yarı yatık çok yıllık, kuvvetli bir kazık köke sahip, üstten tohumlamada başarılı, otlatmaya ve yangına karşı toleranslı, buğdaygillerle karışımında kullanılmaya uygun, Rodos otu ile uygun bir karışım oluşturabilen sıcak mevsim baklagil yem bitkisidir. Türünün Cook, Endeavour, Oxley, Schofield çeşitleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Gündel, 2013). Ayrıca *Stylosanthes guianensis* kuraklığa toleranslı ancak soğuğa duyarlı olan, subtropikal ve tropikal bölgeler için mükemmel bir yem kaynağıdır; ancak kuraklık toleransı mekanizması hakkında henüz çok şey bilinmemektedir (Han ve ark., 2022).



Şekil 8. *Stylosanthes guianensis* cv. Cook, Foto: Feyza Döndü Bilgin.

Kaynak: Gündel, 2013

KAYNAKÇA

- Alemu, F., Asmare, B., & Yeheyis, L. (2019). Growth, yield and yield component attributes of narrow-leaved lupin (*Lupinus angustifolius* L.) varieties in the highlands of Ethiopia. *Tropical Grasslands/Forrajes Tropicales*, 7(1).
- Alzate-Marin, A. L., Costa-Silva, C., Rivas, P. M. S., Bonifacio-Anacleto, F., Santos, L. G., Moraes Filho, R. M. D., & Martinez, C. A. (2019). Diagnostic fingerprints ISSR/SSR for tropical leguminous species *Stylosanthes capitata* and *Stylosanthes macrocephala*. *Scientia Agricola*, 77(3), e20180252.
- Annicchiarico, P., Manunza, P., Arnoldi, A., & Boschini, G. (2014). Quality of *Lupinus albus* L.(white lupin) seed: extent of genotypic and environmental effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(28), 6539-6545.
- Assefa, A. A., Wortmann, C. S., Yigzaw Dessalegn, Y. D., Kinde Tesfaye, K. T., Tamado Tana, T. T., & Nigussie Dechassa, N. D. (2019). Maize-lupine intercrop response to applied nitrogen and phosphorus in North-Western Ethiopia.
- Balazadeh, M., Zamanian, M., Golzardi, F., & Torkashvand, A. M. (2021). Effects of limited irrigation on forage yield, nutritive value and water use efficiency of Persian clover (*Trifolium resupinatum*) compared to berseem clover (*Trifolium alexandrinum*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(16), 1927-1942.
- Benjamin, J. G., & Nielsen, D. C. (2006). Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field crops research*, 97(2-3), 248-253.
- Bonifacio-Anacleto, F., San Martin, J. A. B., Reutemann, A. G., Habermann, E., Pozner, R. E., Nazareno, A. G., ... & Alzate-Marin, A. L. (2024). Warming and water deficit impact the reproductive features of the tropical forage species *Stylosanthes capitata*. *Environmental and Experimental Botany*, 105899.
- Borjas-Ventura, R., Ferraudo, A. S., Martínez, C. A., & Grato, P. L. (2020). Global warming: Antioxidant responses to deal with drought and elevated temperature in *Stylosanthes capitata*, a forage legume. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(1), 13-27.
- Cabrita, A. R., Valente, I. M., Monteiro, A., Sousa, C., Miranda, C., Almeida, A., ... & Fonseca, A. J. (2024). Environmental conditions affect the nutritive value and alkaloid profiles of *Lupinus* forage: Opportunities and threats for sustainable ruminant systems. *Heliyon*, 10(7).
- Castanho, A. D., Coe, M., Andrade, E. M., Walker, W., Baccini, A., Campos, D. A., & Farina, M. (2020). A close look at above ground biomass of a large and heterogeneous Seasonally Dry Tropical Forest-Caatinga in North East of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(01), e20190282.

- Chandra, A. (2009). Diversity among *Stylosanthes* species: habitat, edaphic and agro-climatic affinities leading to cultivar development. *Journal of Environmental Biology*, 30(4).
- Chandra, A. (2013). Biotechnology of *Stylosanthes*. In *Biotechnology of neglected and underutilized crops* (pp. 217-241). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Chandra, A., & Bhatt, R. K. (2008). Carbon isotope discrimination function analysis and drought tolerance of stylo species grown under rain-fed environment. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30, 63-69.
- Chandra, A., Pathak, P. S., & Bhatt, R. K. (2006). *Stylosanthes* research in India: Prospects and challenges ahead. *Current Science*, 915-921.
- Costa, J. A. A., Zimmer, A. H., Andrade, C. M. S. & Fernandes, C. D. (2007). Cultivo e uso do estilosantes Campo Grande. Comunicado Técnico. ISSN 1516-9308
https://www.researchgate.net/publication/320853254_Cultivo_e_uso_do_estilosantes-campo-grande
- Dong, S., Jiang, Y., Dong, Y., Wang, L., Wang, W., Ma, Z., ... & Liu, L. (2019). A study on soybean responses to drought stress and rehydration. *Saudi journal of biological sciences*, 26(8), 2006-2017.
- Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., Zhang, W., Zhang, B., & Xie, F. (2020). Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. *Plant physiology and biochemistry*, 146, 1-12.
- Enriquez-Hidalgo, D., Cruz, T., Teixeira, D. L., & Steinfert, U. (2020). Phenological stages of Mediterranean forage legumes, based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 176(3), 357-368.
- Faji, M., Abebe, A., & Ahmed, K. (2018). *Stylosanthes* Species for Herbage Yield and Yield Components under Rain-fed Condition of Benishangul Gumuz Region. *Livestock Research Results*, 555-561.
- Fenta, B. A., Beebe, S. E., Kunert, K. J., Burrridge, J. D., Barlow, K. M., Lynch, J. P., & Foyer, C. H. (2014). Field phenotyping of soybean roots for drought stress tolerance. *Agronomy*, 4(3), 418-435.
- Ferreira-Neto, J. R. C., de Araújo, F. C., de Oliveira Silva, R. L., de Melo, N. F., Pandolfi, V., Frosi, G., ... & Benko-Iseppon, A. M. (2022). Dehydration response in *Stylosanthes scabra*: Transcriptional, biochemical, and physiological modulations. *Physiologia Plantarum*, 174(6), e13821.
- Gagg, A. (2005). *Trifolium alexandrinum* L. <https://identify.plantnet.org/k-world-flora/observations/1011058891>

- Granier, C., Aguirrezabal, L., Chenu, K., Cookson, S. J., Dauzat, M., Hamard, P., ... & Tardieu, F. (2006). PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New phytologist*, 169(3), 623-635.
- Gresta, F., Wink, M., Prins, U., Abberton, M., Capraro, J. E. S. S. I. C. A., Scarafoni, A. L. E. S. S. I. O., & Hill, G. E. O. R. G. E. (2017). Lupins in European cropping systems. In *Legumes in cropping systems* (pp. 88-108). Wallingford UK: CABI.
- Gündel, F.D. (2013). Çukurova Koşullarında Bazı Sıcak Mevsim Baklagil Yem Bitkilerinin Verim, Kalite ve Adaptasyonu Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi.Tarla Bitkileri Anabilim Dalı.
- Han, Y., Xiang, L., Song, Z., & Lu, S. (2022). Overexpression of SgDREB2C from *Stylosanthes guianensis* leads to increased drought tolerance in transgenic *Arabidopsis*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3520.
- Heatherly, L. G., & Elmore, R. W. (2004). Managing inputs for peak production. *Soybeans: Improvement, production, and uses*, 16, 451-536.
- Hufstetler, E. V., Boerma, H. R., Carter, T. E., & Earl, H. J. (2007). Genotypic variation for three physiological traits affecting drought tolerance in soybean. *Crop Science*, 47(1), 25-35.
- Hussain, M. M., Rauf, S., Paderewski, J., UIHaq, I., Sienkiewicz-Paderewska, D., & Monneveux, P. (2015). Multitraits evaluation of Pakistani ecotypes of berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.) under full-irrigation and water restriction conditions. *Journal of Applied Botany and Food Quality*.
- Iannucci, A., Russo, M., Arena, L., Di Fonzo, N., & Martiniello, P. (2002). Water deficit effects on osmotic adjustment and solute accumulation in leaves of annual clovers. *European Journal of Agronomy*, 16(2), 111-122.
- Iannucci, A., Rascio, A., Russo, M., Di Fonzo, N., & Martiniello, P. (2000). Physiological responses to water stress following a conditioning period in berseem clover. *Plant and Soil*, 223(1), 219-229.
- Kökten, K., Seydosoglu, S., Kaplan, M. and Boydak, E. (2014). Forage Nutritive Value of Soybean Varieties. *Legume Res.*, 37 (2) : 201 – 206.
- Kennedy, P. C., Dawson, L. E. R., Lively, F. O., Steen, R. W. J., Fearon, A. M., Moss, B. W., & Kilpatrick, D. J. (2018). Effects of offering grass silage alone or in combination with lupin/triticale, lupin/wheat or pea/oat whole-crop silages on animal performance, meat quality and fatty acid composition of beef from cattle offered two levels of concentrate. *The Journal of Agricultural Science*, 156(8), 1017-1027.

- King, C. A., Purcell, L. C., & Brye, K. R. (2009). Differential wilting among soybean genotypes in response to water deficit. *Crop science*, 49(1), 290-298.
- Laghari, H. H., Channa, A. D., Solangi, A. A., & Soomro, S. A. (2000). Comparative digestibility of different cuts of berseem (*Trifolium alexandrinum*) in sheep. *Pakistan Journal of Biological Sciences (Pakistan)*, 3(11).
- Lazaridou, M., & Koutroubas, S. D. (2004). Drought effect on water use efficiency of berseem clover at various growth stages. In *New directions for a diverse planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia* (Vol. 26, pp. 467-475).
- Lazarovitch, N., Ben-Gal, A., & Shani, U. (2006). An automated rotating lysimeter system for greenhouse evapotranspiration studies. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 801-804.
- Liu, F., Andersen, M. N., Jacobsen, S. E., & Jensen, C. R. (2005). Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. *Environmental and Experimental Botany*, 54(1), 33-40.
- Maluf, R. P., Alzate-Marin, A. L., Silva, C. C., Pansarin, L. M., Bonifácio-Anacleto, F., Schuster, I., ... & Martinez, C. A. (2022). Warming and soil water availability affect plant–flower visitor interactions for *Stylosanthes capitata*, a tropical forage legume. *Science of the Total Environment*, 817, 152982.
- Manavalan, L. P., Guttikonda, S. K., Phan Tran, L. S., & Nguyen, H. T. (2009). Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and cell physiology*, 50(7), 1260-1276.
- Marian, F., Moisuc, A., Cojocariu, L., & Horablaga, M. (2008). Researches Regarding Some Morphological Haracters of Production in Different Phenophases at *Trifolium alexandrinum* L. *Research Journal of Agricultural Science*, 40(1), 289-292.
- Martinez, C. A., Bianconi, M., Silva, L., Approbato, A., Lemos, M., Santos, L., ... & Manchon, F. (2014). Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. *Environmental and Experimental Botany*, 102, 58-67.
- Mohammadi, P. P., Moieni, A., Hiraga, S., & Komatsu, S. (2012). Organ-specific proteomic analysis of drought-stressed soybean seedlings. *Journal of proteomics*, 75(6), 1906-1923.
- Mpanza, T. D. E. (2015). Biomass yield and nutritive value of *Stylosanthes scabra* accessions as forage source for Goats. University of Pretoria (South Africa).
- Mutava, R. N., Prince, S. J. K., Syed, N. H., Song, L., Valliyodan, B., Chen, W., & Nguyen, H. T. (2015). Understanding abiotic stress tolerance mechanisms in

- soybean: A comparative evaluation of soybean response to drought and flooding stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 86, 109-120.
- Nagaich, D., Tiwari, K. K., Srivastva, N., & Chandra, A. (2013). Assessment of genetic diversity and morpho-physiological traits related to drought tolerance in *Stylosanthes scabra*. *Acta physiologiae plantarum*, 35, 3127-3136.
- Natera, J. F. Z., Hernández, I. Z., Jiménez, C. E. A., Aguilar, F. B. M., & Galdámez, J. G. (2023). Assessing the biomass yield and nitrogen fixation of *Lupinus angustifolius* varieties as green manure in Jalisco, Mexico. *Eurasian Journal of Soil Science*, 12(4), 320-327.
- NCSU. (2024). NC State University. <https://cals.ncsu.edu/crop-and-soil-sciences/people/bdfallen/>
- Oya, T., Nepomuceno, A. L., Neumaier, N., Farias, J. R. B., Tobita, S., & Ito, O. (2004). Drought Tolerance Characteristics of Brazilian Soybean Cultivars—Evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field—. *Plant Production Science*, 7(2), 129-137.
- Pfeiffer, T. W., Peyyala, R., Ren, Q., & Ghabrial, S. A. (2003). Increased soybean pubescence density: yield and soybean mosaic virus resistance effects. *Crop science*, 43(6), 2071-2076.
- Purcell, L. C., & Specht, J. E. (2004). Physiological traits for ameliorating drought stress. *Soybeans: Improvement, production, and uses*, 16, 569-620.
- Sinclair, T. R., Purcell, L. C., King, C. A., Sneller, C. H., Chen, P., & Vadez, V. (2007). Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. *Field crops research*, 101(1), 68-71.
- Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Kocira, A. (2023). Responses of soybean to selected abiotic stresses—Photoperiod, temperature and water. *Agriculture*, 13(1), 146.
- Sun, J., Mooney, H., Wu, W., Tang, H., Tong, Y., Xu, Z., ... & Liu, J. (2018). Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(21), 5415-5419.
- Thu, N. B. A., Nguyen, Q. T., Hoang, X. L. T., Thao, N. P., & Tran, L. S. P. (2014). Evaluation of drought tolerance of the Vietnamese soybean cultivars provides potential resources for soybean production and genetic engineering. *BioMed Research International*, 2014(1), 809736.
- Toorchi, M., Yukawa, K., Nouri, M. Z., & Komatsu, S. (2009). Proteomics approach for identifying osmotic-stress-related proteins in soybean roots. *Peptides*, 30(12), 2108-2117.
- Tripathi, P., Rabara, R. C., Reese, R. N., Miller, M. A., Rohila, J. S., Subramanian, S., ... & Rushton, P. J. (2016). A toolbox of genes, proteins, metabolites and

promoters for improving drought tolerance in soybean includes the metabolite coumestrol and stomatal development genes. *Bmc Genomics*, 17, 1-22.

Wang, C., Linderholm, H. W., Song, Y., Wang, F., Liu, Y., Tian, J., ... & Ren, G. (2020). Impacts of drought on maize and soybean production in northeast China during the past five decades. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2459.

Winnicki, K., Ciereszko, I., Leśniewska, J., Dubis, A. T., Basa, A., Żabka, A., ... & Polit, J. T. (2019). Irrigation affects characteristics of narrow-leaved lupin (*Lupinus angustifolius* L.) seeds. *Planta*, 249, 1731-1746.

Wu, Z. L., & Zhang, Y. Z. (2019). Effects of exogenous auxin on physiological and biochemical characteristics of soybean under PEG simulated drought stress. *Hubei Agricultural Sciences*, 58(6), 16.



ISBN: 978-625-367-823-4