



ZİRAAT, ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ ALANINDA AKADEMİK ÇALIŞMALAR

V

EDİTÖRLER
Prof. Dr. Ali AYBEK
Dr. Zekeriya KARA



İKSAD
Publishing House

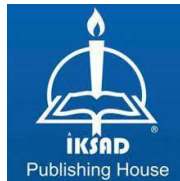
Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Akademik Çalışmalar V

Editörler

Prof. Dr. Ali AYBEK
Dr. Zekeriya KARA

Yazarlar

Prof. Dr. Ali Volkan BİLGİLİ
Prof. Dr. Emine ÖZPOLAT
Prof. Dr. Muhammed ATAMANALP
Prof. Dr. Salih AYDEMİR
Doç. Dr. Mine KÖKTÜRK
Doç. Dr. Turgay KABAY
Doç. Dr. Yasin ALTAY
Dr. Öğr. Üyesi M. Murat TURGUT
Dr. Öğr. Üyesi Rabia ALBAYRAK DELİALİOĞLU
Öğr. Gör. Dr. Zekeriya KARA
Çevre Müh. Ayşe SAKA
Doktora Öğrencisi Halime ÖZTÜRK
Doktora Öğrencisi Hasine KÜÇÜKYILDIRIM
Doktora Öğrencisi Süreyya Betül RUFAİOĞLU



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: 978-625-367-983-5

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2024

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

ATIKSULARIN ARITIMINDA ALGLERİN KULLANILMASI

Çevre Müh. Ayşe SAKA

Prof. Dr. Emine ÖZPOLAT.....3

BÖLÜM 2

BAZI YOSUN ÇEŞİTLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Doç. Dr. Turgay KABAY.....29

BÖLÜM 3

BİTKİSEL ARAŞTIRMALARDA UZAKTAN ALGILAMA ve SPEKTORADYOMETRE TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI

Doktora Öğrencisi Süreyya Betül RUFAİOĞLU

Öğr. Gör. Dr. Zekeriya KARA

Prof. Dr. Ali Volkan BİLGİLİ.....41

BÖLÜM 4

PETaz ENZİMİ MİKROPLASTİKLERDEN KURTULUŞ OLABİLİR Mİ?

Doç. Dr. Mine KÖKTÜRK

Prof. Dr. Muhammed ATAMANALP.....69

BÖLÜM 5

SERALARDA KULLANILAN BAZI ISITMA SİSTEMLERİ

Doç. Dr. Turgay KABAY.....89

BÖLÜM 6

TARIMDA PERMÜTASYONEL ÇOK DEĞİŞKENLİ VARYANS ANALİZİ (PERMANOVA) KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Rabia ALBAYRAK DELİALİOĞLU

Doç. Dr. Yasin ALTAY.....101

BÖLÜM 7

TARIMSAL UYGULAMALARDA MAKİNE/TOPRAK İLİŞKİLERİNİN BELİRLENMESİNDE TOPRAK KANALLARININ KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi M. Murat TURGUT.....135

BÖLÜM 8

YAVAŞ SALINIMLI AZOTLU GÜBRELERİN BİTKİ BESLEMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Doktora Öğrencisi Hasine KÜÇÜKYILDIRIM

Doktora Öğrencisi Halime ÖZTÜRK

Prof. Dr. Salih AYDEMİR.....147

ÖNSÖZ

Tarım sektörü (Ziraat, Orman ve Su ürünleri), insanlığın ihtiyaç duyduğu başta gıda ürünleri olmak üzere her türlü ürünün temel kaynağını üreten sektördür. Bu nedenle yenilikçi ve sürdürülebilir yöntemlerle üretim tekniklerinin geliştirilerek sektörün kıt kaynaklarını etkin kullanarak üretimi daha verimli, sağlıklı, güvenli ve fonksiyonel hale getirmek için yapılan araştırmalar önem kazanmaktadır.

Prof. Dr. Ali AYBEK¹

Dr. Zekeriya KARA²

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi/Ziraat Fakültesi/Biyosistem Mühendisliği Bölümü/ Tarımsal Makine Sistemleri Anabilim Dalı/ ORCID NO:0000-0003-3036-8204 aaybek@ksu.edu.tr

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi/Rektörlük (Ziraat Fakültesi/Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Bölümü/ Toprak Anabilim Dalı) ORCID NO: 0000-0001-7855-4968 zekeriyakara0261@gmail.com, zkara@ksu.edu.tr

BÖLÜM 1

ATIKSULARIN ARITIMINDA ALGLERİN KULLANILMASI

Çevre Müh. Ayşe SAKA¹
Prof. Dr. Emine ÖZPOLAT²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14384990>

¹ Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji, Elazığ, Türkiye.
ayseturgut090@gmail.com

² Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Elazığ, Türkiye. emineozpolat@firat.edu.tr.

GİRİŞ

Alglerin geçmişten bugüne kadar birçok alanda kullanımı mevcuttur. Bu kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Algler içeriğindeki proteinler, mineraller, pigmentler, vitaminler, karbonhidratlar sebebiyle birçok canlı organizmanın ihtiyacını karşılayabilmektedirler. Algler ilkel yapıları olmaları sebebiyle kök, gövde ve yapraklara sahip değildirler. Alglerde en çok bulunan türler, fitoplankton adı verilen tek hücreli yapılardır. Algler, prokaryotik bir özellik taşımaktadırlar. Aynı zamanda kırmızı algler (*Rhodophyta*), kahverengi algler (*Phaeophyta*), yeşil algler (*Chlorophyta*), ateş rengi algler (*Pyrrophyta*), altın sarısı algler (*Chrysophyta*), diatomlar (*Bacillariophyta*), sarı-yeşil algler (*Xanthophyta*) ve kamçılı algler (*Euglenophyta*) olarak 8 ökaryotik bölüme ayrılmaktadır. Algler, makroalg ve mikroalg olarak sınıflandırılmaktadırlar. Makroalgler, çıplak gözle görülecek kadar çok hücreye sahip olan büyük boyutlu alglerdir. Algler taşıdığı bu özellik sebebiyle deniz yosunu olarak da adlandırılmaktadırlar. Mikroalgler ise gözle görülemeyecek kadar küçük olan yalnızca mikroskop altında gözlemlenebilen tek hücreli alglerdir. Mikroalgler, ototrofik, fotosentetik ve ökaryotik olmaları sebebiyle besin zincirinin ilk halkasını oluşturmaktadırlar ve böylece ekosistemin en temel parçası olma özelliğini kazanmaktadırlar.

Atıksuların artırılmasında, mikroorganizmaların birçok yöntemle kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar, mikroalglerin tek başına ya da bakterilerle kullanımı temeline dayanmaktadır. Son dönemlerde mikroalgler; atıksuların artırılması, atıksulardan ağır metal giderilmesi, biyoizleme ve ekolojik testler gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Mikroalgler atıksudan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), azot (N), fosfor (P) ve ağır metallerin giderilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, mikroalgler atıksuları artırırken astaksantin, fikosiyenin, ksantofil, fikoeritrosin, klorofil a,b,c ve β -karoten gibi önemli pigmentler üretmektedirler. Etkili bir atıksu yönetim planı için endüstriyel tesisin metodolojik olarak eksiksiz değerlendirilebilmesi ve atıksu kaynaklarının karakterize edilmesi gerekmektedir.

Protein bakımından zengin mikroalglerin atıksu arıtma sistemlerinde kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan kapsamlı analizler bu alg proteinlerinin yüksek kalitede olduğunu ortaya koymaktadır. İnsanlarda günlük aktivitelerin artması, evsel atıksularda artışa sebep olmaktadır. Bu

atıksuların alıcı ortamlara kontrolsüz deşarj edilmesi durumunda kirlilik oranı yükselmekte ve kontrol altına alınmasını zorlaştırmaktadır. Mikroalgler, besin olarak algıladıkları kirliliklerin uzaklaştırılması için sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu nedenle mikroalg kullanımı yeni ortaya çıkan bir alternatif arıtım yöntemi olarak kabul edilmektedir (Ruiz – Marin ve ark. 2010).

Son yıllarda evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılmasında birçok mikroalgin kullanılması üçüncül bir arıtım sistemi haline gelmiştir. Yapılan çalışmalarda mikroalglerle arıtımın diğer arıtma teknolojilerine göre daha ekonomik, yenilikçi, düşük maliyetli, yeşil teknoloji ve çevre dostu olduğu tespit edilmiştir.

1. MİKROALGLER

Mikroalgler, fotosentez yoluyla kendi besinini üreten ototrofik organizmalardır. Bu özellikleri sayesinde besin zincirinde önemli rol oynamaktadırlar. Alglerin tek hücreli ve çok hücreli olmak üzere birçok çeşidi bulunmaktadır. Geniş tür çeşitliliğine sahip olmaları, alglerin çeşitli ekosistemlerde bulunmalarını sağlamaktadır. Algler, biyokütle üretimi açısından diğer bitkilere kıyasla daha fazla lipid üretmektedirler. Bazı alg türleri, suyun besin elementlerini gidererek çevresel açıdan faydalı olmaktadır (Behera ve ark., 2019).

Mikroalgler, basit gelişen yapıları sayesinde hızlı büyümektedirler. Ayrıca, değişen çevresel koşullarda büyüebilmeleri ve yetiştirilebilmeleri için önemli parametreler mevcuttur. Örneğın, mikroalgler 24 saat gibi kısa sürede sayılarını ikiye katlayabilmektedirler. Bu şekilde hızlı çoğalabilmeleri yağ, karbonhidrat ve protein bakımından zengin olmalarını sağlamaktadır. Geniş üreme potansiyeline sahip mikroalgler, yüksek konsantrasyonda protein, lipid, karbonhidrat, vitamin, pigment ve enzime sahip olduklarından çeşitli ürünlerin üretiminde kullanılabilirler (Behera ve ark., 2019).

Evsel atıksulardan azot (N) ve fosfor (P) gideriminde mikroalgler kullanılabilirler. *Chlorella* ve *Scenedesmus* algleri N ve P gideriminde %80 verim sağlamaktadır. Birincil arıtıma tabii tutulmuş kanalizasyon suyunda bulunan azotun %90'ı fosforun ise %80'i *C.vulgaris* algi tarafından giderilmektedir. *Chlorella* ve *Scenedesmus* oksidasyon havuzlarında ve alg havuzlarında kullanılan fitoplanktonik baskın türlerdendir (Burgos ve ark., 2018).

Evsel atıksularda yetiştirilen *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Micractinium sp.*, *Actinastrum sp.* gibi farklı alg türlerinin biyokütle üretim potansiyeli 25-2000 mg/ L*Gün, lipit verimliliği ise 8-505 mg/L*Gün olarak tespit edilmiştir (SY ve ark., 1982). Tarımsal kökenli, yüksek oranda gübre içeren atıksularda yetişen mikroalgler karbonhidrat ve protein bakımından zengindir. Bu özellikleriyle biyoyakıt üretimine de katkıda bulunmaktadır. Tarımsal atıksuların N ve P içeriği evsel atıksulara göre oldukça fazladır. Mikroalglerle yapılan çalışmalar, tarımsal atıksularda verimli bir giderimin olduğunu ve bu atıksulardan N ve P gideriminin olduğunu göstermektedir. An vd., tarafından yapılmış olan çalışmalarda, domuz ahır atıksularında; *Botryococcus braunii* adlı yeşil algin verimli bir şekilde geliştiği ve %80 oranında NO₃ giderimi oluşturduğu tespit edilmiştir (An ve ark., 2003). *B.braunii*, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Microspora willeana*, *Ulothrix zonata*, *Ulothrix aequalis*, *Rhizoclonium hieroglyphicum*, *Oedogonium sp.* gibi tarımsal atıksularda yetiştirilen alg türlerinin biyokütle üretim verimliliği 6-700 mg/L*Gün aralığında, lipit verimliliği ise 0,54-69 mg/L*Gün aralığında olduğu bildirilmiştir (Woertz ve ark., 2009).

Hindistan'da aktif çalışan atıksu arıtma tesisinin oksidasyon havuzunda yapılan bir çalışmada *Chlorella minutissima* adlı alg türü tespit edilmiştir (Bhatnagar, Chinnasamy, Hunt, Das, 2010). Bu alg türü yüksek konsantrasyona sahip kanalizasyon atıksularında ve oksidasyon havuzlarında verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tür tuz varlığında ve geniş bir pH aralığında aktivasyon göstermektedir (Bhatnagar ve ark., 2010).

Wang vd.'nin alglerin atıksu arıtımı üzerinde yaptığı çalışmada bir evsel atıksu kullanılmıştır. Bu çalışmada azot, fosfor, KOİ ve metal iyonlarının giderimi tesisin dört bölgesinden alınan atıksu ile değerlendirilmiştir (Wang ve ark., 2014). Bu dört bölgeden alınan atıksular;

1. Ön çökeltim havuzu öncesinde alınan atıksu,
2. Ön çökeltim havuzu sonrasında alınan atıksu,
3. Aktif çamur arıtımı sonrası oluşan atıksu,
4. Çamur santrifüjleme sonrasında oluşan atıksudur.

Alınan bu atıksu örneklerinde *Chlorella sp.* adlı yeşil alg yukarıda bahsedilen parametrelerin gideriminde kullanılmıştır. Ön çökeltim havuzu öncesi ve sonrasında alınan, çamur santrifüjleme sonrası oluşan atıksularda

NH₄-N'in giderim verimi sırasıyla %82,4, %74,7 ve %78,3 olarak tespit edilmiştir. Bu noktalardan alınan atıksularda fosfor giderimi sırasıyla %83,2, %90,6 ve %85,6, KOİ giderimi ise %50,9, %56,5 ve %83'tür (Wan ve ark., 2014).

Süt endüstrisi atıksularında farklı mikroalg türlerinin kullanılması hakkında birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. *Chlorella vulgaris* kullanılarak yapılan çalışmalarda BOİ, KOİ, SS, TN ve TP giderimleri sırasıyla %86, %81, %29, %86 ve %66 olarak tespit edilmiştir (Choi, 2016).

2. MİKROALGLERİN YETİŞTİRİLMESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Mikroalg kültürlerinin verimli olabilmesi için uygun çevresel şartların sağlanması önem taşımaktadır. Bu şartlar, sıcaklık, ışık yoğunluğu, karıştırma, besin kompozisyonu ve gaz değişimidir. Her bir alg türü, büyümek ve çoğalmak için farklı çevresel şartlara ihtiyaç duymaktadır (Whitton ve ark., 2016).

2.1. Sıcaklık

Alg türlerinin büyüme hızında optimum sıcaklık aralığı belirleyici bir faktördür. Sıcaklığın artması mikroalglerin çoğalma hızını artırırken optimum sıcaklık aralığının üzerine çıkması bu hızın azalmasına neden olabilmektedir. Her mikroalg türünün yaşayabileceği sıcaklık aralıkları farklı olabilmektedir. Genellikle mikroalglerin üretiminde 16-27 °C arasındaki sıcaklığa uyum sağladıkları gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda 16 °C' nin altındaki sıcaklıkların üremeyi yavaşlattığını, 35 °C'den fazla sıcaklıkların ise algler üzerinde öldürücü etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra ani hava değişimlerinin de üretim verimini etkilediği gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar buharlaşma yoluyla mikroalg kültür kaybına neden olmaktadır (Gezici, 2012).

Güneş radyasyonunun ve sıcaklık kontrolünün sınırlı olduğu ortamlarda, doğru alg türünün seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu durumda, ortamın doğal koşulları ve iklim özellikleri dikkate alınarak belirli bir bölge veya iklim için uygun olan alg türlerinin seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca yetiştirilme tesislerinde sıcaklık kontrolünün sağlanması ve güneş radyasyonunun optimum seviyede tutulmasında büyüme koşullarının iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (Gross, 2013).

Sonuç olarak, mikroalglerin optimum büyüme koşullarına uyum sağlaması için doğru sıcaklık aralığının belirlenmesi ve ortam koşullarına uygun alg türlerinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu, mikroalg kültürlerinin verimliliğini arttırırken, sıcaklık gibi çevresel faktörlerin olumsuz etkilerini en aza indirmektedir (Gross, 2013).

2.2. Işık Yoğunluğu

Mikroalgler, fotosentez yaptıkları için ışık yoğunluğu kontrol edilmesi gereken en önemli parametrelerden biridir. Işık yoğunluğundaki azalma klorofil a, klorofil b, klorofil c, fikobiliproteinler gibi ışık tutan pigmentlerin artışına yol açmaktadır. Işık yoğunluğunun artmasıyla bu pigmentler azalarak fotosentez hızının düşmesine neden olmaktadır. Işık yoğunluğunun artması, lipit oranının ve doymamış yağ asitlerinin azalmasına sebep olabilmektedir (Yaşar, 2016).

2.3. Karıştırma

Karıştırma, mikroalglerin üretiminde etkili olan sıcaklık, ışık yoğunluğu gibi parametrelerin üretim ortamında eşit olarak dağılması için uygulanmaktadır. Karıştırma, ortamdaki besin maddelerinin homojen olarak dağılmasını sağlamak ve mikroalglerin ortamda çökmemesini sağlamaktadır (Genç, 2016).

2.4. Besin

Mikroalg kültürlerinin üretilmesinde kullanılan ana besin maddesi azot ve fosfor'dur. Azot ve fosfor; alg üretiminde yapısal ve fonksiyonel görevlere sahiptirler. Mikroalg kültürlerinin üretilmesinde eser miktarda kükürt, potasyum, magnezyum, demir, çinko, selenyum ve nikel gerekmektedir (Genç, 2016).

2.5. Gaz Değişimi

Mikroalgler, fotosentez sırasında CO₂'yi tüketerek O₂ üretmektedirler. O₂ konsantrasyonunun artması mikroalgleri olumsuz etkilemektedir. Özellikle kapalı sistemlerde karşılaşılan bu durumu stabil hale getirene kadar ortama CO₂ gazı ilave edilmelidir (Genç, 2016).

3. ATIKSU ARITIM MİKROBİYOLOJİSİ

Atıksu arıtımında kullanılan biyolojik prosesleri tasarlamak ve etkin bir şekilde işletebilmek için, sistemdeki mikroorganizmaların görevlerinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Bakterilerin organik atıkları hızlı bir şekilde parçalanmasının yanı sıra, çökeltim havuzlarında aktif çamur prosesinde flok oluşturmaktadır. Flok oluşumu; suda çözünebilen, çok yüksek molekül ağırlıklı organik polimerler kullanılarak taneciklerin bir araya getirilmesi işlemidir. Başarılı bir çökeltim prosesi sonrasında oluşan flok yapısı, yüksek arıtım verimliliğinin oluşmasında kilit rol oynamaktadır. Biyolojik arıtımda önemli rol oynayan prokaryotik gruplar genellikle bakterilerdir. Ökaryotik gruplar arasında ise protozoa, rotiferler ve algler bulunmaktadır (Erdirençlebi ve ark., 2020).

Aktif çamur prosesindeki bakteriler genellikle *Pseudomonas*, *Zooglea*, *Archromobacter*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Corynebacterium* ve *Comomonas* gibi bakteri türleridir. Yapısal ihtiyaçlarını inorganik karbondan yararlanarak sağlayan bakterilere ototrofik bakteri adı verilmektedir. Karbon kaynağını organik karbonlardan karşılayan bakterilere ise heterotrofik bakteri adı verilmektedir. Aktif çamur sistemlerinde 300'den fazla bakteri türü olduğu tahmin edilmektedir. Nitrifikasyon işlemlerinden sorumlu olan *Nitrosomonas* ve *Nitrobacter* gibi nitriye edici bakterilerde bulunmaktadır. Bunların yanı sıra *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Leucothrix* ve *Geotrichum* gibi çeşitli filamentöz bakterilerde bulunmaktadır. Bakteriler, sisteme giren atıksulardaki organik atıkları parçalayan gerçek mikroorganizmalar olmalarına rağmen, diğer mikroorganizmalarda aktif çamurda önemlidir (Erdirençlebi ve ark., 2020).

Protozoalar, genellikle tek hücreli ve hareketli olan protistalardır. Büyük çoğunluğu aerobik heterotroflardır, ancak bazıları anaerobiktir. Bakterilerden daha büyük olan protozoalar enerji kaynağı olarak bakterileri tüketmektedirler. Temel olarak rotiferler ve protozoonlar arıtılmış suda parlaticı olarak işlev görmektedirler (Uyanık ve Nas, 2020).

Rotiferler, çok hücreli bir yapıya sahiptirler ve aerobik heterotrofik özellik taşımaktadırlar. Rotiferler baş kısımlarında dönen sillerle adlandırılmaktadır. Floküle olmuş bakterilerle partikül halindeki organik maddeleri tüketmektedirler. Rotiferlerin bulunması aerobik biyolojik saflaştırma prosesinin gerçekleştiğini göstermektedir (Uyanık ve Nas, 2020).

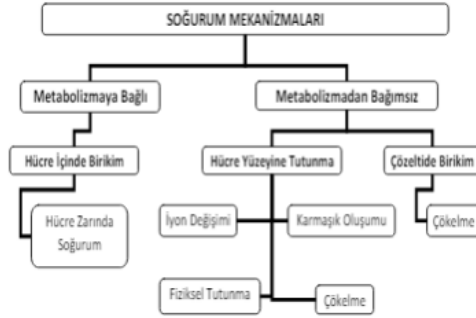
Algler, ışıklı ortamlarda, inorganik karbonu kullanarak ortama oksijen sağlarlar. Bu özelliklerinden dolayı, stabilizasyon havuzunda, organik maddenin aerobik parçalanmasında gerek duyulan oksijen algler tarafından kazandırılmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde, atıksuyun ışık gördüğü bölgelerde istenmeyen yeşil görünümlü yosun oluşumuna neden olmaktadır (Uyanık ve Nas, 2020).

Sonuç olarak, son yıllarda yapılan çalışmalarda biyolojik arıtmada mikroorganizmalardan faydalanılmaktadır. Kolloidal ve çözünmüş halde bulunan organik maddelerin parçalanarak flok oluşturması ve bu flokların tabana çökebilmesi temeline dayanmaktadır (Uyanık ve Nas, 2020).

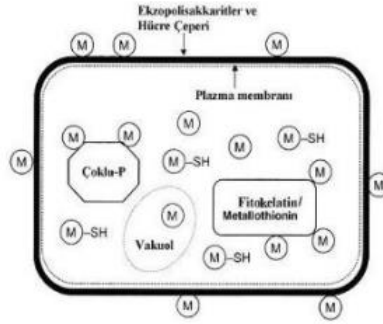
4. MİKROALGLERLE METAL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARINDAN METAL GİDERİMİ

Metal üretimi ülkemizde en fazla yapılan üretimlerin başında gelmektedir. Metallerinde içerisinde bulunduğu endüstriyel üretimlerde ciddi ölçülerde su kullanılmaktadır. Kullanılan bu su atıksularda endüstriyel kirliliğin artmasına sebep olmaktadır. Metal endüstrisinde oluşan atıksular ön arıtmaya tabii tutulmadan ya kanalizasyon kanallarına yada direkt doğal ortama deşarj edilmektedir. Metal endüstrisinde metal ve metal alaşımları yoğunlukla kullanılmaktadır. Kullandığı bu ham maddeleri işlenebilir duruma getiren bu endüstri dalı, demir-çelik üretiminde, otomotivde, petrol ve telekomünikasyon gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Emir, 2017).

Atıksu arıtımında birçok alg türü kullanılmasına rağmen metallerin gideriminde tatlı su yeşil algleri (*Chlorella sp.*, *Cladophora spp.*, *Scenedesmus spp.*, *Chlamydomonas reinhardtii*), kahverengi algler (*Sargassum natans*, *Fucus vesiculosus*, *Ascophyllum nodosum*, *Laminaria japonica*) ve mavi-yeşil algler (*Microcystis aeruginosa* ve *Oscillatoria*) kullanılmaktadır. Alglerin metal soğurumlarında; hücre büyüklüğü, kullanılan alg çeşidi, pH, sıcaklık, biyomasların yoğunluğu etkili olan parametrelerdendir. Metallerin soğurulmasında işleyiş metabolizmaya bağımlı ve metabolizmadan bağımsız olarak sınırlandırılmaktadır. Metabolizmaya bağılı soğurum mekanizmasında hücre içinde birikim yapılmaktadır. Metabolizmadan bağımsız soğurum mekanizmasında ise hücre yüzeyine tutunma ve çözeltide birikim yöntemleri uygulanmaktadır (Öztürk, 2016).



Şekil 4.1. : Mikroorganizmaların soğurum (Veglio,1997).



Şekil 4.2. : Tipik alg hücreesindeki metal bağlama yerleri (Mehta,2005).

Metal sektörünün atık sularının arıtılmasıyla ilgili literatürde yapılan araştırmalardan biri, emaye kaplama prosesi sonrası oluşan atık suların kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) parametresinin fenton oksidasyonu ile artırılabilirliğini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, KOİ parametresi için giderim veriminin %88'e ulaştığı belirlenmiştir (Dolay, 2009). Demir çelik endüstrisi atık sularının arıtılmasıyla ilgili başka bir çalışmada, atık suların içerdiği C^1 ve Ca^{2+} kirleticilerinin elektrosorpsiyon tekniği ile giderilerek suyun endüstriyel proseslerde tekrar kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ortalama giderim verimleri %75 ve %68 olarak belirlenmiştir (Zhang ve ark., 2011). Başka bir çalışmada ise, Çin'de endüstriyel atık sularındaki ağır metallerin giderimi için akışkan yataklı reaktörler kullanılmıştır. Bu çalışmanın hedefi, arıtım sonrası çamurda susuzlaştırma gereksinimini ortadan kaldırmak olmuştur. Uygun bir pH değeri olan 9 - 9,1'in

tespit edildiği bu çalışmada, arıtımın verimi %95 olarak bulunmuştur (Zhou ve ark., 1999).

Başka bir çalışmada, kimyasal çöktürme, yüzdürme, koagülasyon-flokülasyon, iyon değiştirme ve membran filtrasyon gibi arıtım yöntemlerinde *Chlorella ESP-6* kullanılarak kontamine olmuş atık sularındaki Zn, Cd, Mn, Cu ve Ni gibi ağır metallerinin giderilmesi üzerine araştırma yapılmıştır. Uygulanan arıtım yöntemlerinden kimyasal çöktürmenin, atık su arıtımında en etkili yöntemlerden biri olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen giderim verimleri sırasıyla %99,77, %99,67, %99,30, %80 ve %85 olarak tespit edilmiştir (Kurniawan ve ark., 2006).

Çin'de yapılan bir çalışmada, endüstriyel atık sularındaki Ni ve Zn metallerinin giderimi için çeşitli türdeki mikroalglerin performansı incelenmiştir. Çalışmanın ilk 300 dakikasında, *S. quadricauda* mikroalgisinin giderim verimleri Ni için %99, Zn için ise %99,3 olarak gözlemlenmiştir (Chong ve ark., 2000).

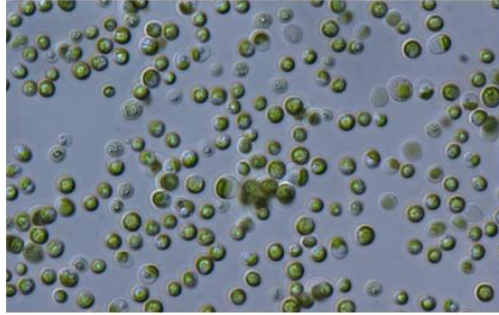
Suudi Arabistan'da yapılan bir çalışmada, bakırın sulu çözeltilerinde *Spirulina platensis* mikroalginin biyosorpsiyonu incelenmiştir. Çalışmada, optimum koşullar gözlemlenerek %90,6 oranında Cu metalinin biyosorpsiyon verimliliğine ulaşılmıştır (Al-Homaidan ve ark., 2014). İran'da, enerji santrali atık sularında sülfat giderimi ve biyokütle üretimi için beş farklı mikroalg türüyle yapılan bir çalışmada, en yüksek sülfat giderim oranı %32 ile *Oocystis sp.* mikroalgide ve maksimum biyokütle verimliliği *Chlorella sp.* mikroalgide gözlemlenmiştir (Mohammadia ve ark., 2018).

Minnesota Eyaleti'nde bulunan Saint Paul şehri'nin atık su arıtma tesisinden alınan dört farklı noktadan elde edilen atık su örnekleri üzerinde yetiştirilen *Chlorella sp.* mikroalginin metal iyonlarını giderme etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, Al, Ca, Fe, Mg ve Zn metallerinin giderim verimleri sırasıyla %87,3, %95,4, %100, %98,4 ve %81,2 olarak belirlenmiştir (Wang ve ark., 2010) Mısır'da BeniSuef kentindeki evsel ve endüstriyel atık su arıtma tesisinden alınan örnekler üzerinde *Chlorella sp.* mikroalgisinin ekilerek sudaki kirleticilerin giderilmesi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, Fe, Zn ve Al metalleri için giderim verimleri sırasıyla %92,2, %51,4 ve %98,8 olarak bulunmuştur (Hammouda, Abdel-Raouf, Shaaban, Kamal, 2015).

Metal endüstrisi atık sularında *Chlorella ESP-6* mikroalginin metal giderimine uygun olduğu ve yüksek giderim sağladığı gözlemlenmiştir. Metal endüstrisi atık sularının arıtımı bağlamında, endüstriyel arıtım birimlerine eklenen biyolojik arıtım prosesiyle üretilen *Chlorella ESP-6* mikroalgi, atık sulardaki metal kirliliğinin giderilmesine yardımcı olmaktadır (Kumar, 2014).

4.1.Chlorella ESP-6

Atıksu arıtmada kullanılan *Chlorella ESP-6*, genetiği değiştirilerek elde edilen bir türdür ve *Chlorella vulgaris* mikroalginin bir türevidir. Modern mikroalg kültür çalışmaları Beijerinck tarafından *Chlorella vulgaris* ile başlatılmıştır. *Chlorella* adı, Yunanca "chloros" kelimesinden gelir ve "yeşil" anlamına gelir. *Chlorella ESP-6*, *Chlorella vulgaris* mikroalginin karakteristik özelliklerini sergiler. Hücrelerin çapı genellikle 4-10 µ arasında değişir ve bezelye yeşili renge sahiptir. Şekil 5.1. 'de *Chlorella vulgaris*'in mikroskop altında görüntüsü verilmiştir (Safi, 2014).



Şekil 4.3. *Chlorella ESP-6* mikroalginin mikroskop görüntüsü (Duygu,2017).

Biyoteknolojik uygulanabilirliği en yüksek olan mikroalg türlerinden biri olan *Chlorella vulgaris*, *Chlophyceae* mikroalg familyasının bir üyesidir. Ayrıca, %42 ila 58 oranında yüksek protein içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. *Chlorella vulgaris* hücresi, mitokondri, küçük bir çekirdek, tek bir kloroplast ve golgi aygıtı organellerini barındırmaktadır (Safi, 2014).

4.2.Biyosorpsiyon Yöntemi

Metallerin endüstriyel atık sulardan giderilmesi için kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemlere ek olarak, biyolojik maddelerin kullanımı, çevre dostu ve alternatif bir uygulama prosesi sunmaktadır. Metal gideriminde biyolojik

maddelerin kullanıldığı yöntemler arasında, biyosorpsiyon en önde gelmektedir. Biyosorpsiyon, endüstriyel atık sularda bulunan metal iyonlarının biyolojik kökenli organizmaların yüzeyine tutunması sürecidir. Metallerin biriktiği organizmalar biyokütle olarak adlandırılır. Biyosorpsiyon süreci, sulu ortamdaki biyokütlenin yüzey alanının metal çözültüsüyle temas etmesi sonucu metal iyonlarının sudan uzaklaştırılmasıdır. Son yıllarda artan çevre bilinci ve çeşitli endüstri atıkları için yapılan yasal düzenleme ve yönetmelikler, düşük maliyetli arıtım sistemlerine olan talebi artırmıştır. Bu bağlamda, ucuz ve yenilenebilir biyokütle ile yapılan biyosorpsiyon çalışmaları giderek yaygınlaşmaktadır. Metal arıtımında biyolojik işlemler, özellikle mikroalglerle gerçekleştirilen metal biyosorpsiyonu, etkili ve alternatif bir teknoloji sunma kapasitesine sahiptir. Biyosorpsiyon teknolojisinin avantajları, atık sulardaki metal konsantrasyonlarını çok düşük seviyelere indirgedeki etkinliği ve ekonomik, kolayca üretilebilen mikroalg biyokütlelerinin kullanımınıdır. Yüksek seçiciliğe sahip mikroalgler, biyosorpsiyon yöntemiyle metal iyonlarını gidermede ve çok seyreltik sulardan bile kirleticileri etkili bir şekilde uzaklaştırmada kullanılmaktadır. Biyosorpsiyon yönteminin diğer avantajları, yerinde uygulanabilmesi, maliyetli özel tasarımlar ve endüstriyel işlemler gerektirmemesi ve birçok arıtım sistemiyle ekonomik bir şekilde birleştirilebilmesi sayesinde arıtım veriminin en üst düzeye çıkarılabilmesidir (Kale, 2018).

4.2.1. Biyosorpsiyonu Etkileyen Parametreler

Biyosorpsiyon yönteminde, süreci etkileyen önemli parametreler şunlardır: biyokütlenin miktarı, karıştırma hızı, pH değeri ve sucul ortamın sıcaklığı.

Biyokütlenin miktarı : Bu yöntemde en etkili olan parametrelerden biridir. Ortamda bulunan metal konsantrasyonunda biyokütle miktarının artmasıyla biyosorpsiyon verimi artmaktadır (Hamutoğlu, 2012).

Karıştırma hızı : Biyosorpsiyonun gerçekleşme hızı, sucul ortamdaki çözültünün karıştırma hızıyla doğru orantılı olarak artar. Karıştırma hızının artmasıyla metal çözültüsü ile biyokütle arasındaki etkileşim artar ve bu da biyosorpsiyon işleminin verimini artırır (Mustafaoğlu, 2011).

pH değeri : Biyosorpsiyon ortamının pH değeri, metallerin ve mikroalglerin yüzeyine tutunmasını etkileyen en önemli parametredir. Farklı

pH değerlerinde elde edilen değişken adsorpsiyon hızları, metaller ile biyokütle arasındaki kimyasal etkileşimin bir sonucudur. Sulu çözeltide kullanılan mikroalglerin gelişimi, biyosorpsiyon sürecinde uygun pH değeri olan 7-10 arasında etkili olmaktadır (İzgi, 2012).

Sıcaklık : Mikroalglerle metal biyosorpsiyonunda, sıcaklık önemli bir parametredir çünkü enerjiye bağlı mekanizmalar etkilidir. Birçok biyosorpsiyon işlemi ekzotermiktir. Sıcaklık arttıkça, düşük sıcaklıklardan başlayarak biyokütlenin yüzeyindeki gözenekler genişler ve tutunma daha yüksek düzeyde olur. Ayrıca, biyosorpsiyon hızı da artmaktadır. Ancak genellikle 25°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, biyosorpsiyonun ekzotermik özelliğinden dolayı verim azalır (Yazıcı, 2007).

5. MİKROALGLERLE MEZBAHA ATIKSULARININ ARITIMI

Birçok endüstriyel faaliyetin ve küreselleşmeyle gelişen modern sanayileşmenin artmasıyla endüstriyel atıksular çevresel tehdit oluşturmaktadır. Mezbahalar, çeşitli et ürünlerinin üretilmesi için küçükbaş ve büyükbaş hayvanların kesilerek yan ürünlerin elde edilmesi için faaliyet gösteren endüstriyel tesislerdir (Özcan, 2001). Mezbaha tesislerinde sadece hayvan kesimi gerçekleştirilmektedir. Hayvanların kesilmesinin dışında sakatatların ayrıldığı, karkasların elde edildiği ve hayvanların derilerinin yüzüldüğü tesislerde mezbahanelerdir (Özcan, 2001).

Mezbaha atıksularında arıtımın ilk aşamasını fiziksel arıtım oluşturmaktadır. Bu endüstrinin atıksularında kıl, kemik, et parçaları bulunmaktadır. Bu kirleticiler ızgara ve eleklerden geçirilerek ortamdaki uzaklaştırılırlar. Bu sayede bir sonraki uygulanacak sistemlerde oluşabilecek aksaklıklar ortadan kaldırılmaktadır (Özcan, 2001).

Gıda sektöründeki endüstriyel faaliyetlerin artmasının en büyük sebebi nüfusun artmasıdır. Nüfusun artışı, atıksularda kirliliğin artmasına, su hacimlerinde kirlilik konsantrasyonlarının artmasına yol açmaktadır. Bunların sonucunda alıcı ortamlarda kirliliğin artması ve ekolojik denge bozulmaktadır (Demirer, 2005).

Mezbahalardan çıkan atıksular yağ, kan, hayvan atıkları, kemik ve dışkı içermektedir. Bu sebeple mezbaha atıksuları yüksek oranda organik azot ve fosfor içermektedir. Ayrıca bu atıksularda KOİ, BOİ, AKM ve yağ oranlarında

oldukça yüksektir. Yüksek olan bu konsantrasyonlar sebebiyle biyolojik ayrışabilen atıksular oluşmaktadır (Demirer, 2005). Mezbaha atıksularında belirli miktarlarda deterjan, dezenfektan, patojen olan ve patojen olmayan mikroorganizmalar bulunmaktadır. Ayrıca mezbahane atıksularında ağır metal, renk ve bulanıklık oranları da yüksektir (Bustillo-Lecompte ve ark., 2015).

Mezbaha atıksularının doğrudan alıcı ortamlara (göl, nehir vb.) deşarj edilmesiyle, içeriğinde bulunan azot, fosfor ve makro moleküller sebebiyle ötrofikasyona sebep olmaktadır. Alıcı ortamlarda bu besin maddelerinin varlığı aşırı yosunlaşmaya sonrasında ise çürümeye sebep olmaktadır. Sonuç olarak, mezbaha atıksularının alıcı ortama verilmesiyle çözünmüş oksijen (ÇO) seviyelerinde azalma, sucul yaşamda bozulma, BOİ'nin azalmasıyla oksijen oranında azalma, balıkların sucul yaşamlarında bozulma meydana gelir. Ortamdaki oksijenin tamamen bitmesiyle, anaerobik ayrışım meydana gelerek metan ve hidrojen sülfid oluşturmaktadır (Bustillo-Lecompte ve ark., 2015).

Alıcı ortama deşarj edilmiş atıksuların askıda katı madde oranı yüksek olduğundan dolayı sulara derin tortular oluşturarak bulanıklığa sebep olmaktadır ve balıkların solunum yollarında tahribata yol açmaktadır. Mezbaha atıksularında yoğun bulunan yağ ve greslerin alıcı 15 ortamdaki su yüzeyinde bir film oluşmasına neden olmaktadır. Bu film tabakası ışık ve oksijen geçirgenliğini azaltarak sudaki canlıların ölümüne sebep olmaktadır. Ayrıca, sucul yaşam için oldukça tehlikeli olan amonyak ve kromun ortama salgılanmasına sebep olmaktadır (Bustillo-Lecompte ve ark., 2015).

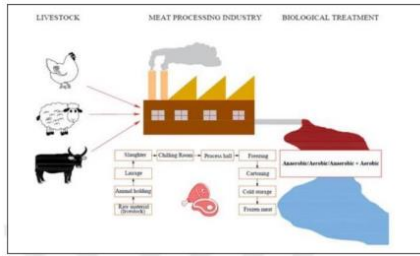
Yüksek oranda karbon (C), azot (N) ve fosfor (P) içeriğine sahip olan mezbaha atıksularının deşarj edilmeden önce arıtılması gerekmektedir (Bustillo-Lecompte, Mehrvar, 2015). Mezbaha ve et endüstrilerinde oluşan atıksular birincil, ikincil arıtıma tabii tutulmaktadır. Gerekli görülen durumlarda üçüncül arıtıma başvurulmaktadır. Birincil arıtımla askıda katı maddeler %60 oranında BOİ ise %30 oranında giderilmektedir. Fizikokimyasal yöntemlerde hava flotasyonu, membran uygulamaları, koagülasyon ve flokülasyon bulunmaktadır (Mittal, 2006).

Kimyasal arıtım, mezbaha ve et endüstrisi atıksularında yaygın olarak kullanılmaktadır (Mittal, 2006). Yaygın olarak alüminyum ve demir elektrotlarının kullanıldığı elektrokoagülasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde alüminyum elektrotlarıyla %79 oranında KOİ giderilmektedir (Mittal, 2006).

Biyolojik arıtmada ki proseslerden biri olan damlatmalı filtreler özellikle aktif çamur sistemlerinde yüksek oranda BOİ giderimi sağlamaktadır. İki kademeli olarak gerçekleşmektedir. Tek basamaklı filtrasyonda %81-90 aralığında, iki basamaklı filtrasyonda ise %90-95 aralığında BOİ giderimi gerçekleşmektedir. Biyolojik arıtmalarda yaygın olarak aktif çamur prosesi yada oksidasyon hendekleri kullanılmaktadır. Damlatmalı filtrelerde BOİ oranı yüksek olduğundan dolayı 5:1 oranında geri devir yapılmaktadır. Et endüstrisi atıksularında ön çökeltim ve birincil arıtım yerine flotasyon kullanılarak katı partiküller yağ sıyrıcı kullanılmadan yağ ile uzaklaştırılmaktadır (Mittal, 2006).

Mikroalgler, hücre içerisinde birçok protein, karbonhidrat, vitamin, mineral ve pigment bulundurmaktadırlar. Bu sebeple atıksuların arıtılmasında özellikle ağır metal içeren atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadırlar (Bustillo-Lecompte ve ark., 2015).

Mezbaha atıksularının arıtımında sıklıkla kullanılan alg türü *Chlorellaceae* familyasına ait olan *Chlorella ESP-6*'dır (Mittal, 2006). Mezbaha tesisi çıkışından alınan atıksuya %0, %20 ve %30 oranlarında seyreltme işlemi yapılmıştır. *Chlorella ESP-6* mikroalginin seyreltilen atıksuyla çalışması sonucunda giderim oranlarının sırasıyla %97, %99 ve %98 olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda yüksek giderim veriminin olduğu ve daha ekonomik maliyetli olduğu gözlenmiştir (Metin, 2019).



Şekil 5.1. Mezbaha endüstrisi atıksularının biyolojik arıtım proses şeması (Tevkur, 2019).

6. LİPİT İÇEREN MİKROALGLERİN ATIKSULARIN İLERİ ARITIMINDA KULLANILMASI

Mikroalgler yapısında yağ asidi ve lipit bulundurmaktadırlar. Bunlar mikroalglerin enerji kaynağı olarak kullanılabilmesine olanak

sağlayabilmektedir. Alglerden maksimum düzeyde verim alınabilmesi için yüksek miktarda CO₂ kazandırılması gerekmektedir. Bu kazanım havuzlardan veya biyoreaktörlerden sağlanmaktadır (Lardon, Helias, Helias, Steyer, Bernard, 2009).

Chlorella emersonii ve *Botryococcus braunii* gibi lipit içeren mikroalglerin atıksuların ileri arıtımında kullanımı, çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu mikroalg türleri, organik kirleticilerin parçalanmasında etkili olabilir ve atıksulardaki nitrat, fosfat ve diğer besin maddelerini emerek biyolojik arıtım sağlayabilirler. Ayrıca, bu mikroalgler lipit birikimi yaparak biyoyakıt üretimi potansiyeline sahiptirler (Lardon ve ark., 2009).

Chlorella emersonii ve *Botryococcus braunii*'nin atıksu arıtımında kullanılması, atıksu arıtımı için ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunabilir. Bu mikroalglerin yetiştirilmesi ve kullanımı, atıksu arıtım tesislerinde enerji ve kimyasal maddelerin kullanımını azaltabilir ve arıtılmış suyun geri kazanılmasına yardımcı olmaktadır. Ancak bu teknolojinin pratik uygulanabilirliği ve ticari potansiyeli üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (Lardon, Helias, Helias, Steyer, Bernard, 2009).

Loseva vd.'nin 1998 yılında algler üzerinde yaptıkları çalışmada, *Chlorella* algleri üzerinde sıcaklık ve tuzun etkilerini araştırmışlardır. Belirli aralıklarla 45 °C sıcaklık ve 450 µM NaCl uygulaması yapılarak *Chlorella* alginin dayanıklılığı gözlenmiştir (Lardon ve ark., 2009).

Azot ve fosfor oranını belirlemek için yapılmış olan çalışmalarda *Chlorella*, *Scenedesmus* ve *Monoraphidium* alglerinin en yüksek verime sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle *Chlorella* türlerinin azot-fosfor biyosorpsiyonunda oldukça verimli olduğu gözlenmiştir (Corelli, 1999).

Satoh vd., *Pseudochoricystisellipsoidea* mikroalgini kullanarak normal besi yerinde ve N sınırlaması olan ortamlarda inceleme yapmışlardır. Bu mikroalg ile normal besi yerinde 5-10 gün aralığında yapılan incelemede %32 hücre yoğunluğu olduğunu tespit etmişlerdir. N sınırlaması olan ortamda ise bu oranın %26 ya düştüğü gözlemlenmiştir (Satoh vd., 2010).

Patil , atıksuların arıtımında *Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus quadricauda* alglerinin verimini araştırmıştır. Bu araştırma da 8 günlük bir süre uygulaması yapılmıştır. *Scenedesmus quadricauda* alginde 8 gün boyunca %85-95 aralığında fosfatta %70-80 aralığında NH₃-N, %70 oranında ise BOİ'de giderim sağlandığı gözlemlenmiştir. *A.falcatus* alginde ise 8 günlük

süre boyunca %80 fosfat, %60 NH₃-N, %70 BOİ giderimi sağlanmıştır (Patil, 1990).

Bir başka çalışmada, 29-50 gün BG11 besi yerinde çevre kirliliğini azaltmak için *Chlorella sp.* ve *Scenedesmus sp.* algleriyle araştırma yapılmıştır. Burada besi yerine çeşitli inorganik 18 azotlar, CO₂ ve tuz ilaveleri yapılmıştır (Corelli, 1999). Bu çalışma sonucunda NaNO₃ miktarındaki azalma ve alg miktarındaki artış dikkat çekmiştir. Yalnızca NaNO₃ oranındaki azalma ortamdaki lipit oranının azalmasına sebep olmuştur (Corelli, 1999).

Sonuç olarak, yukarıda detaylandırılan alg türlerinin verimlilikleri incelendiğinde amonyum azotunda, TOC, azot ve fosfor oranlarında yüksek oranlarda giderim sağlanmıştır. Bu alg türlerinin kullanımıyla atıksuların ileri arıtılması yöntemlerinde gelişim görülmüştür.

7. MİKROALGLERLE TEKSTİL ATIKSULARININ ARITIMI

Türkiye'nin en hızlı ve sürekli gelişim gösteren sektörü tekstil sektörüdür. Bu hızlı gelişim çevresel kirliliğinde hızla artmasına sebebiyet vermektedir. Tekstil üretiminde kullanılan asitler, bazlar, deterjanlar, boyalar, kimyasallar atıksuların arıtımını zorlaştıran başlıca parametrelerdendir. Tekstil atıksularının alıcı ortama verilmeleri için gereken sınır değerler SKKY'de yer almaktadır (Gönüllü, 2004).

Tekstil endüstrisi, kumaş üretimini pamuk, keten, kenevir, polyester gibi elyafları kullanarak yapan tesislerdir. Tekstil endüstrilerinde ve tekstil boya üretim tesislerinde boyama, apreleme proseslerinden kaynaklanan atıksular ciddi çevresel problemlere sebep olmaktadır (Gönüllü, 2004). Bu işletme koşullarına göre tekstil atıksuları bünyelerinde birçok organik bileşik, KOİ, BOİ, pH ve renk bileşenleri ihtiva etmektedir. Bu atıksular alıcı ortamda ekolojik dengeyi bozmaktadır. Tekstil atıksularının içeriğinde bulunabilecek en minimum boya konsantrasyonunda bile alıcı ortamda ışık geçirgenliği azalmakta ve sucul canlıların ölümüne sebep olabilmektedir (Gönüllü, 2004).

Tekstil atıksularının arıtımında fiziksel ve kimyasal yöntemlere karşın biyolojik yöntemler daha fazla tercih edilmektedir. Biyolojik yöntemlerin tercih edilmesinin sebebi daha az çamur üretimi ve daha düşük maliyettir (Gönüllü, 2004). Lim vd.(2010), *Chlorella vulgaris* ile tekstil atıksuyundan renk giderimi yapılabilmektedir. Bu mikroalgin absorban özelliği sayesinde tekstil

sektöründen kaynaklanan renk kirliliği azaltılmaktadır. Lim vd.'nin yaptığı bu çalışmada KOİ, NH₄-N, PO₄-P giderimi sağlanmış ayrıca %42-50 aralığında renk giderimi sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın maliyet açısından oldukça ekonomik olduğu gözlenmiştir. Bu ekonomik maliyetin temel sebebi çalışmada kullanılan alg türünün doğru seçilmesi ve bu alg sayesinde gerekli enerji kaynaklarının sağlanmasıdır (Acuner, 2004).

Chlorella vulgaris kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada renk giderimi dışında N ve P giderimi üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada sıcaklık ve pH parametrelerinin sağlanması durumunda %77-91 oranında azot giderimi, %84-99 oranında toplam fosfat giderimi ve %81 oranında ise KOİ giderimi sağlanmıştır. Bu çalışma sonucunda *C.vulgaris* alginin absorban özelliğinin çeşitli parametrelerde etkili olduğu gözlenmiştir (Kocaer, 2002).

SONUÇLAR

Mikroalgler ile atıksu arıtımı, son yıllarda en çok tercih edilen arıtım yöntemlerindedir. Mikroalgler, CO₂ tutma, atıksudan besin eldesi, N/P giderimi, renk giderimi, KOİ,BOİ ve ağır metallerin uzaklaştırılması gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Günümüzde mikroalglerle atıksu arıtımı üzerinde ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle mezbaha endüstrisi atıksularında, metak üretim endüstrisi atıksularında, tekstil endüstrisi atıksularında ve daha birçok ağır metal içeren endüstrilerin atıksularında mikroalglerle spesifik kirleticilerin giderimi sağlanmıştır. Mikroalgler, atıksularda daha çok KOİ, BOİ, N, P, metal, ağır metal, renk gibi parametlerin gideriminde verim alınmıştır.

Atıksu arıtımında kullanılacak mikroalgin seçimi atıksu karakteristiğine göre yapılmalıdır. Örneğin metal endüstrisi ve mezbaha et işleme endüstrisi atıksularından metal gideriminde *Chlorella ESP-6* ile en yüksek verim elde edilmiştir. Atıksuların ileri arıtılmasında ise en çok *Chlorella emersonii* ve *Botryococcus braunii* alglerinden verim elde edilmiştir. Mikroalglerde atıksu arıtımının diğer arıtım yöntemlerine göre daha ekonomik, yenilikçi, kompleks olmayan çevre dostu bir yöntem olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, atıksulardaki spesifik kirleticilerin gideriminde algal biyomasın kullanılmasının birçok avantajı vardır. Algal biyomaslar kirleticilerin gideriminin yanı sıra atıksudan CO₂' yi de gidermektedir. Algler buldukları ortam içeriğindeki kirleticileri besin kaynağı olarak kullanarak

enerji ihtiyaçlarını gidermektedirler. Bu da mikroalg ile atıksu arıtım yöntemini daha ekonomik ve çevreci kılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Acuner, E. (2004). *Treatment of Textilon Yellow 2G by Chlorella vulgaris*, Process Biochemistry, 39, 623-631.
- Al-Homaidan, A.A., Al-Houri, H.J., Al-Hazzani, A.A., Elgaaly, G., Moubayed, N.M.S. (2014). *Biosorption of Copper Ions From Aqueous Solutions by Spirulina platensis Biomass*, Arabian Journal of Chemistry, 7, 57-62.
- An, JY., Sim, SJ., Lee, JS., Kim, BW. (2003). *Hydrocarbon Production From Secondly Treated Piggery Wastewater By The Green Algae Botryococcus Braunii*, Journal Of Applied Phycology, 15(2-3), 185-191.
- Behera, B., Acharya, A., Gargey, I.A., Aly, N., Balasubramanian, P. (2019). *Bioprocess Engineering Principles Of Microalgal Cultivation For Sustainable Biofuel Production*, Bioresource Technology Reports, 297-316.
- Bhatnagar, A., Chinnasamy, S., Hunt, RW., Das, KC. (2010). *Microalgae Cultivation In A Wastewater Dominated By Carpet Mill Effluents For Biofuel Applications*, Bioresource Technology, 101(9), 3097-105.
- Bustillo-Lecompte, C.F., Mehrvar, M. (2015). *Slaughterhouse Wastewater Characteristics, Treatment and Management in the Meat Processing Industry : A Review on Trends and Advances*, Journal of Environmental Management, 161, 287-302.
- Burgos, C., Cevallos, M., Cisneros, M., Van, D.I., De Zutter, L. (2018). *Quantification Of The Campylobacter Contamination On Broiler Carcasses During The Slaughter Of Campylobacter Positive Flocks In Semi – Industrialized Slaughterhouses*, International Journal Of Food Microbiology, 269, 75-79.
- Choi, H. (2016). *Dairy Wastewater Treatment Using Microalgae for Potential Biodiesel Application*, Environmental Engineering Research, 21(4), 393-400.
- Chong, A.M.Y., Wong, Y.S., Tam, N.F.Y. (2000). *Performance of Different Microalgal Species in Removing Nickel and Zinc From Industrial Wastewater*, Chemosphere, 41, 251-257.
- Corelli, D.L.(1999). *Phosphorus: A Rate Limiting Nutrient in Surface Waters*, Poultry Science, 78, 674-682.

- Demirer, P.G.N. (2005). *Endüstriyel Tesislerden Kaynaklanan Atıksuların Karakterizasyonu, Kirlilik Yüklerinin Tahmini ve İzlenmesi Endüstriyel Atıksuların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Koşulları: ASKİ Örneği Endüstriyel Tesislerden Kaynaklanan Atıksuların Karakterizasyonu, Endüstriyel Atıksu İzleme ve Kontrolü Eğitim Semineri, Ankara.*
- Dolay, E. (2009). *Emaye Kaplama Endüstrisi Atıksularının Fenton Prosesi ile Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.*
- Duygu, D. (2017). *Chlorella vulgaris Beyerinck (Chlorophyta) Suşlarının Kesikli Kültür Sisteminde Yığın Kültürlerinin Üretimi Üzerine Bir Çalışma, Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research, 3(2).*
- Emir, B. (2017). *Tel ve Halat Üretim Fabrikası, Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ders Sunumu.*
- Erdirençelebi, D., Perendeci, N.A., Aygün, A., Ereşme, İ. (2020). *Endüstriyel Atıksu Arıtımı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Modül 14.*
- Gezici, M. (2012). *Biyodizel Üretimine Uygun Mikroalglerin Gelişimine Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 312009.*
- Genç, T. (2016). *Tam Ölçekli Çöp Sızıntı Suyu Arıtma Tesis Çıkış Suyunda Mikroalg Kültürlerinin Geliştirilmesi ve Enerji Üretim Potansiyellerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.*
- Gönüllü, M.T. (2004). *Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, Cilt 1. Birsen Yayınevi, Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul.*
- Gross, M. (2013). *Development and Optimization of Algal Cultivation Systems, MSc Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, US.*
- Hammouda, O., Abdel-Raouf, N., Shaaban, M., Kamal, M. (2015). *Treatment of Mixed Domestic Industrial Wastewater Using Microalgae Chlorella sp., Journal of American Science, 11(12), 303- 315.*
- Hamutoğlu, R. (2012). *Biyosorpsiyon, Adsorpsiyon ve Fitoremediasyon Yöntemleri ve Uygulamaları, Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi, 69(4), 235-253.*

- İzgi, N. (2012). *Bakır İyonlarının Biyosorpsiyon Yöntemiyle Giderilmesinde Rhizobium phaseoli Bakterisinin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ, 302333.
- Kurniawan, T.A., Chana, G.Y.S., Lo, W., Babel, S. (2006). *Physico-chemical Treatment Techniques for Wastewater Laden with Heavy metals*, Chemical Engineering Journal, 118, 83-98.
- Kocaer, F.O. (2002). *Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri*, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Sayı 1: 47-55.
- Kale, M. (2018). *Biyokütle Kullanılarak Metal İyon Biyosorpsiyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 514269.
- Kumar, R. (2014). *Heavy metal Biosorption Using Algae*, B.Tech thesis, National Institute of Technology, Department of Chemical Engineering Rourkel
- Lardon, L., Helias, B., Helias, B., Steyer, J., Bernard, O. (2009). *Life-cycle Assesment of Biodiesel Production From Microalgae*, Environmental Science and Technology, 43(17): 6475- 6481.
- Mehta, SK. (2005). *Use of Algae for Removing Heavy Metal Ions From Wastewater* : Mittal, G.S. (2006). *Treatment of Wastewater From Abattoirs Before Land Application a Review*, Bioresource Technology, 97(9), 1119-1135.
- Mohammadia, M., Mowlaa, D., Esmailzadeha, F., Ghasemi, Y. (2018). *Cultivation of Microalgae in a Power Plant Wastewater for Sulfate Removal and Biomass Production : A Batch Study*, Journal of Environmental Chemical Engineering, 6, 2812-2820.
- Mustafaoğlu, D. (2011). *Adsorpsiyon ve Biyosorpsiyon Yöntemiyle Fenol Giderimi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 284345.
- Metin, M. (2019). *Mezbaha Atıksularının Mikroalg ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Patil, H.S. (1990). *The Role of Ankistrodesmus falcatus and Scenedesmus quadricauda in Sewage Purification*, Bioreource Technology, 37, 121-126.
- *Progress and Prospects. Critical Reviews in Biotechnology.*
- Ruiz – Marin, A., Mendoza – Espinosa, LG., Stephenson, T. (2010). *Growth And Nutrient Removal In Free and Immobilized Green Algae In Batch and Semi – Continuous Cultures Treating Real Wastewater*, Bioresource Technology, 101(1), 58-64.
- Safi, C. (2014). *Morphology, Composition, Production, Processing and Applications of Chlorella vulgaris : A Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 265-278.
- Satoh, A., Kato, M., Yamato, K., Ismibashi, M., Sekiguchi, H., Kurano, N., Miyachi, S. (2010). *Characterization of the Lipid Accumulation in a new Microalgal Species*, Journal of the Japan Institute of Energy, 89: 909-913.
- SY, IP., Bridger, JS., Chi, C., Martin, WRB., Rape, WGC. (1982). *Algal Growth In Primary Settled Sewage The Effects Of Five Key Variables*, Water Research, 16, 621-632.
- Tevkur, S. (2019). *Mezbaha Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi Kullanılarak Arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, 534705.
- Özcan, P. (2001). *Mezbaha Endüstrisi Atıksularında Magnezyum Amonyum Fosfat Çöktürmesi ile Azot Giderimi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, İ. (2016). *Atıksu Mühendisliği*, Stilnet Basım, İstanbul.
- Uyanık, S., Nas, B. (2020). *Küçük Yerleşim Yerlerinde Atıksu Yönetimi*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Modül 13.
- Veglio, F. (1997). *Removal of Metals by Biosorption: A Review*, Hydrametallurgy, 44: 301-316.
- Yaşar, F. (2016). *Yosun Yağından Biyodizel Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması*, Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Yazıcı, H. (2007). *Marrubium Globosum Ssp. Globosum Bitkisi ile Sulu Çözeltilerde Cr ve Cu İyonlarının Biyosorpsiyonunun İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 200497.
- Zhang, Y.H., Gan, F.X., Li, M., Wang, D.H., Huang, Z.M., Gao, Y.P. (2011). *Treatment of Reused Comprehensive Wastewater in Iron and Steel Industry With Electrosorption Technology*, Journal [of Iron and Steel Research, 18(6), 37-42.
- Zhou, P., Huang, J.C., Alfred, W.F.L., Wer S. (1999). *Heavy metal Removal From Wastewater in Fluidized bed reactor*, Water Research, 33(8), 1918-1924.
- Wan, M., Hou, D., Li, Y., Fan, J., Huang, J., Liang, S., Wang, W., Pan, R., Wang, J., Li, S. (2014). *The Effective Photo-Induction of Haematococcus pluvialis for Accumulating Astaxanthin with attached cultivation*, Bioresource Technology, 26-32.
- Wang, H., Ji, C., Bi, S., Zhou, P., Chen, L., Liu, T. (2014). *Joint Production Of Biodiesel and Bioethanol From Filamentous Oleaginous Microalgae Tribonema Sp.*, Bioresource Technology, 172, 169-173.
- Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y., Ruan, R. (2010). *Cultivation of Green Algae Chlorella sp.'in Different Wastewaters From Municipal Wastewater Treatment Plant*, Appl Biochem Biotechnology, 162, 1174-1186.
- Whitton, R., Le Mevel, A., Pidou, M., Ometto, F., Villa, R., Jefferson, B. (2016). *Influence of Microalgal N and P Composition on Wastewater Nutrient Remediation*, Water Research, 91, 371- 378.
- Woertz, I., Feffer, A., Lundquist, T., Nelson, Y. (2009). *Algae Grown On Dairy And Municipal Wastewater For Simultaneous Nutrient Removal and Lipid Production For Biofuel Feedstock*, Journal Of Environmental Engineering, 135(11), 1115-1122.

BÖLÜM 2

BAZI YOSUN ÇEŞİTLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Doç. Dr. Turgay KABAY^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14386080>

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Erciş Meslek Yüksekokulu, Van, Türkiye

*Sorumlu Yazar: turgaykabay@gmail.com Orcid no: <https://orcid.org/0000-0002-3239-0037>

GİRİŞ

Yosunlar yaklaşık olarak, insanlık tarihi kadar çok eskiye dayanmaktadır. Tarih boyunca medeniyetler tarafından ilaç ve gıda yapımında kullanılmışlardır (Sukatar, 2002). Yosunları, M.Ö. 2700’lerde ilk kullanan kişi Kral Shen Nung’tur. M.S. ise Uzak Doğu ülkeleri deniz alglerini tıpta ve beslenmede kullanmışlardır. Öncelikle kozmetik sektöründe pigment olarak, Roma İmparatorluğu Heros ve Virjil zamanında kullanılmıştır (Cirik, 1981).

Yosunlar (algler) okyanus, deniz ve nehir gibi su ortamlarında, toprakta, kayalar ve taşlarda bulunan canlılardır. Yosunlar fotosentez yapabilme kabiliyetine sahip tüm prokaryotik ve ökaryotik mikroorganizmaları içermektedir. Yosunlar yeryüzünün birçok alanında rastlanabilen buzul alanlardan 70°C’ye kadar olan sıcaklıklarda yetişir. Ayrıca çok tuzlu ortamda, düşük ışık yoğunluğu ve yüksek basınç altındaki sularda kısaca fotosentez yapmak için ışık alabildikleri ortamlarda, sulak habitatlardır. Gövde ya da benzer işlevlere sahip kök benzeri yapılar sayesinde sulak alanlarda, toprak, ağaç ve kayalarda tutunarak yaşayabilirler ve güneş ışığını kullanarak fotosentez yoluyla karbondioksiti yem, yiyecek, biyokimyasal ve potansiyel biyo yakıtlara dönüştürebilirler. Azot fiksasyonu yapabilmeleri sayesinde biyogübre olarak da kullanılabilirler (Kaykaç, 2003; Gümüş, 2006; Chisti, 2007; İrkin 2020).

Algler yapısal olarak prokaryotik (mikroalg) ve ökaryotik (makroalg) olmak üzere ikiye ayrılır. Mikroalgler “Mavi ve yeşil algler (Cyanophyta)” olarak bilinirler. Makroalgler ise kamçı yapısına ve içerdikleri pigment maddelerine göre kahverengi algler (phaeophyta), kırmızı algler (rhodophyta), yeşil algler (chlorophyta), diyatomeler ve kamçılı algler (flagellata) olarak gruplara ayrılmaktadır (Kaykaç, 2003; Gümüş, 2006; Chisti, 2007; İrkin 2020).

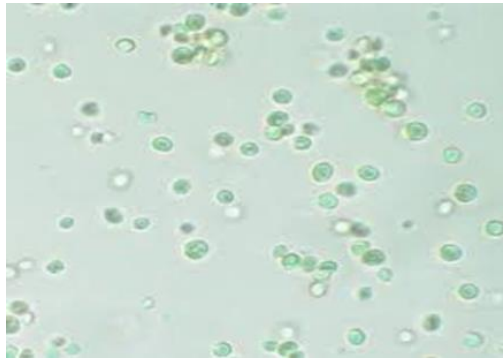
MİKROALGLER

Mikroalgler heterotrofik canlı olup, karbondioksit ve besin maddelerinin yeterli düzeyde olduğu kültürlerde yaşayabilmektedir (İrkin 2020). Sulak alanlarda fotosentez yapabilen tek hücreli organizmalardır. Atmosferdeki oksijenin büyük kısmını mikroalgler sağlar. Doğada çok fazla görülen türü diatomlar olan (Bacillariophyceae), mavi- yeşil algler (Cyanophyta) ve altın rengi alglerdir (Chrysophyceae), ayrıca bakteriler gibi prokaryotik hücre yapısı olan tek gruptur. Mitokondri, kloroplast ve iç membran olmayan klorofil içeren,

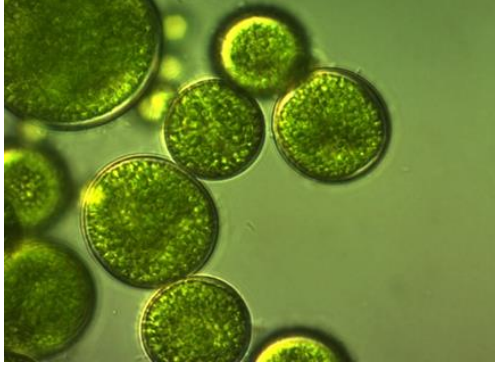
tatlı sularda ve denizlerde yaşayan canlılardan bir gruptur (Brownlee ve ark 2005; Becker 207, Begum ve ark 2016; Bai ve ark. 2011) .

Mavi-yeşil alglerin bazı türleri nemli topraklar ve su sızdıran kayaların üzerini siyahımsı bir örtü halinde kaplarlar. Deniz kenarlarındaki kayaların üzerinde de bulunurlar. Işık şiddetine göre kromatik adaptasyon gösterdiklerinden, karanlık mağara duvarlarında yaşayan türleri de vardır. Bazı türler sıcak su kaynaklarında 75-85 °C sıcaklıkta yaşarlar. Bazı türler mantarlarla birlikte simbiyoz yaşayarak likenleri oluştururlar. Mikroalglerin ürettiği klorofil, karotenoid gibi maddeler gıda endüstrisinde renklendirici olarak, kozmetik endüstrisinde ise gösterdikleri antioksidan özellikleri ile kullanılmaktadır (Brownlee ve ark., 2005; İrkin 2020).

Mikroalgler (Şekil 1, Şekil 2) yeni ilaçların keşfedilmesi amacıyla kullanılıyor. İlaçlardaki etken maddeler doğal kaynaklı olup bitkilerden, mikroorganizmalardan ve diğer canlı türlerinden sağlanır. Yapılan birçok araştırma, bazı mikroalg türlerinin yapısındaki yağ asitleri, proteinler, polisakkaritler, lipidler, vitaminler, enzimler ve aktif bileşiklerin bakterilere, virüslere, mantarlara, kansere karşı etkili olduğunu göstermiştir (Begum ve ark., 2016). Mikroalglerin çoğu gıda sektöründe değerlendirilmektedir. İçeriğindeki pigmentler, vitaminler sebebiyle tıpta, eczacılıkta ve kozmetik ürünlerinde kullanılırlar. Son yıllarda, yakıt üretimi için biyokütle üretiminde değerlendirilmeye başlanmıştır (Eliçin ve ark., 2009). Mikroalglerin ticari kullanımı besin katkı maddelerinin, antioksidanların, kozmetik ürünlerin, doğal boyaların ve çoklu doymamış yağ asitlerinin üretiminde kullanılması ile yaygınlaşmıştır (Spolaore ve ark., 2006)



Şekil 1 Mavi renkli mikroalg (Evrenosoğlu 2013)



Şekil 2 Yeşil renkli mikroalg (anonin1 2024)

MAKROALG

Çok hücreli ökaryotik organizmalardan olan makro algler denizlerin önemli canlı kaynaklarından biridir. Deniz yosunu olarak da adlandırılan bu canlılar zengin içerikleri nedeniyle, gıda, ziraat, eczacılık, tıp ve enerji gibi birçok endüstriyel alanda değerlendirilmektedir. Dünya genelinde bilinen ve bilinmeyen çok sayıda makroalg bulunmaktadır. Ekosistemin en önemli canlılarından olan bu algler, heterotrofik organizmalar için besin kaynağıdır. Ayrıca fotosentez yaparak oksijen ihtiyacını da karşılamaktadırlar. Gerçek kök, gövde ve yaprak farklılaşması yoktur.

Makroalgler, uzunlukları 1-2 cm ile 40-50 cm arasında değişen, canlılar için beslenme, barınma ve üreme sağlayan organizmalardır. İçerdikleri pigmentlere göre kahverengi (phaeophyceae), kırmızı (rhodophyceae) ve yeşil (chlorophyceae) algler olarak sınıflandırılmaktadır (Brownlee ve ark 2005; Becker 2007; Bai ve ark., 2011; Begum ve ark., 2016).

Yeşil algler (chlorophyta) (Şekil 3, Şekil 4), en az 20.000 türün bulunduğu geniş bir gruptur. Hareket edebilen veya edemeyen tek hücreli, kolonial, dallanmış veya dallanmamış iplikli, yassı ve yaprak şeklinde olabilirler. Bir kısmı mikroskobik, bir kısmı da makroskobiktir. Türlerin %10'u denizlerde, geri kalanı ise tatlı sularda ve nemli kara parçalarında yaşarlar. Denizde yaşayanların çoğu genellikle kıyı bölgelerinde, nispeten sığ seviyelerde bulunurlar. Tatlı sularda yaşayanların büyük bir çoğunluğu, özellikle tek hücreli veya koloni halinde olanlar, planktoniktirler. Bazıları bir ortama bağlı olarak, bazıları serbest olarak yaşarlar. Bazı yeşil algler çok nadir

olarak nemli topraklar, kayalar ve ağaçlar üzerinde de bulunabilirler. Bazıları ise mantarlarla simbiyoz olarak yaşayarak likenlerin yapısına girerler (Brownlee ve ark 2005; Becker 2007; Bai ve ark., 2011; Begum ve ark., 2016).



Şekil 3 Denizdeki yeşil makro alg (anonim 2 2024)



Şekil 4 Kıyıda oluşan yeşil makro alg (anonim 3 2024)

Kahverengi algler (Phaeophyta) (Şekil 5), Genellikle makroskobik büyüklükte farklı şekillere sahip alglerdir. Hücre çeperi vardır. Dış tabaka jelatinli maddelerden, iç tabaka ise selülozdan oluşmuştur. Çok nadir olarak tatlı sularda yaşarlar. Genellikle soğuk denizlerin algleridir. Bununla birlikte, bazı türleri ılık denizlerde de yaşayabilirler. Bazı türler deniz kıyısındaki taşlara tutunmuş olarak bulunur.



Şekil 5 Kahverengi alg (anonim 4 2024)

Kırmızı algler (Rhodophyta) (Şekil 6), diğer alglerden, eşeyli üremelerindeki özellikleri ve kamçılı üreme hücrelerinin olmayışı ile ayrılırlar. Hücrelerinin çeperleri selüloz ve çeşitli pektin bileşiklerden oluşmuştur. Renkleri fikoeitrin pigmentinin varlığı nedeniyle ağırlıklı olarak kırmızıdır, ancak mor veya mavimsi olabilir (Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8). Bazı morlar tatlı suda, özellikle derelerde ve berrak hızlı nehirlerde bulunur. *Batrachospermum*, kahverengimsi veya kırmızımsı boncuk benzeri hücrelerden oluşan, dokunulduğunda jelatinimsi, güçlü bir şekilde dallanmış bir algdir. *Lemanea*, genellikle hızlı akan akarsularda ve şelalelerde büyüyen fırça benzeri bir formdur. *Audouinella*, küçük nehirlerde bulunan ipliksi bir algdir. İrlanda yosunu (*Chondrus crispus*) yaygın bir deniz makrofitidir. Morlar hareketli hücreler oluşturmazlar (Brownlee ve ark 2005; Becker 2007; Bai ve ark., 2011; Begum ve ark., 2016).

Mavi algler, Kaliforniya ve Meksika'daki bazı göllerde bulunan sarmal alglerdir. Yüksek protein, B12 vitamini ve P-karoten içeriği nedeniyle cilt elastikiyetini artırır ve harika bir sıkılaştırıcı etkiye sahiptir.



Şekil 6 Kırmızı alg (anonim 4 2024)



Şekil 7 mor alg (anonim 4 2024)



Şekil 8 Mavi alg (anonim4 2024)

Kara yosunları (Şekil 9), dünyanın birçok bölgesinde bitki örtüsünün önemli bir bileşenidir ve nemli orman, sulak alan, dağ ve tundra ekosistemlerindeki biyolojik çeşitliliğin önemli bir bölümünü oluşturur (Brownlee ve ark 2005; Becker 2007; Bai ve ark., 2011; Begum ve ark., 2016).

Yosun toplulukları, çeşitli organizmaların hayatta kalması için kritik olan mikro habitatlar sunar. Böceklerin yaşaması, yumurtalarını bırakması ve yiyecek avlaması için değerli barınak sağlarlar (Şahin 2021).



Şekil 9. Nemli topraklardaki yeşil alg (anonim 5 2024)

Kaya veya fener yosunları (Şekil 10) olarak da bilinir ve kayaların üzerinde yetişir. Çok sayıda tür kümeler halinde büyür ve siyah renklidir. Bitkinin bir kısmının fenere benzeyebileceği ve kayaların üzerinde büyüdüğü düşünülürse “kaya” ve “fener” isimlendirilmeleri uygundur. Yüksek enlemlerde ve soğuk ortamlarda büyüüp gelişebilir (Ünver 2018).



Şekil 10 Kaya yosunu (anonim5 2024)

Algler yem ve gübre sanayii, gıda boyası ve gıda katkı maddesi olarak, kozmetik gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Uzak Doğu'da uzun yıllardır geleneksel gıda olarak tüketilmektedir. Gıda olarak tüketilen türler özellikle Phaeophyceae ve Phodophyceae sınıfına aittir. Alglerden karragen (Chondrus, Eucheuma ve Kappaphycus türleri), agar-agar (Gelidium ve Gracilaria türleri) ve alginat (Laminaria, Ascophyllum ve Macrocystis türleri) gibi endüstriyel polisakkaritler elde edilir (Alçay ve ark., 2017).

Alginat, Laminaria digitata gibi kahverengi alglerden elde edilen bipolimerik yapıda bir biyomoleküldür. Üretilen alginatın %20'si gıda katkı maddesi, %80 sanayii alanında kullanılmaktadır. Film oluşturabilme ve su tutma özelliği sebebiyle pasta kaplamalarında kullanılan alginatlar dondurma imalatında düzgün yapı ve hacim artışı sağlamanın yanında buz kristallerinin oluşumunu da önlemektedir. Aynı zamanda jel formu alabilmeleri sebebiyle krem peynir, krem şanti, peynir ve kremalarda stabilizatörler olarak kullanılırlar. Alginatlar et ve su ürünlerinin acılaşımlarını engellemek ve buharlaşmayla olan kayıpları aza indirmek amacıyla kullanılmaktadır.

SONUÇ

Yeryüzünde birçok mikro ve makro alg'ler bulunmaktadır. Bu algler günlük yaşantımızın birçok alanında kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda insan sağlığında, beslenmede, tıp, kozmetik, temizlik alanlarında, tarım ve hayvancılıkta, toprak ıslah etmekte, ilaç yapımında yakıt üretmek amacıyla kullanıldığı gibi diğer birçok alanlarda kullanımları son zamanlarda artmıştır. ,

İlk yıllarda doğal olarak temin edilen alglerin, son yıllarda ticari olarak kullanım alanlarının artmasıyla özel olarak üretimleri de artış göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Alçay A, Bostan K, Dinçel E, Varlık C (2017). Alglerin İnsan Gıdası Olarak Kullanımı. Aydın Gastronomy, 1(1):47-59.
- Anonin1 2024 <https://evrimagaci.org/mikroalgler-besin-olarak-kullanilabilir-mi-8973>
- Anonim 2 2024 <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/deniz-yosunu-izmir-korfezinde-yeniden-yayiliyor/2409647>
- Anonim 3 2024 <https://educalingo.com/tr/dic-tr/su-yosunu>
- Anonim 4 2024 <https://themeformen.ru/tr/moles/gde-rastet-vodorosl-gde-obitayut-burye-vodorosli-vodorosli/>
- Anonim5 2024 <https://wallhere.com/tr/wallpaper/101819>
- Bai MD, Cheng CH, Wan HM, Lin YH (2011). Microalgal pigments potential as by products in lipid production. J. Taiwan Inst. Chem. Eng., 42(5): 783-786. 23.
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. Biotechnology Advances, 25 (2), 207-210.
- Begum H, Yusof, FM, Banerjee S, Khatoon H, Shariff M (2016). Availability and utilization of pigments from microalgae. Crit Rev Food Sci Nutr. 56(13):2209-2222.
- Brownlee IA, Allen A, Pearson JP, Dettmar PW, Havler ME, Atherton MR, Onsøyen E. (2005). Alginate as a source of dietary fiber. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 45:497–510.
- Chisti, Y., (2007). Biodiesel from microalgae, Biotechnology Advances, 25, 294–306.
- Cirik, Ş. (1981). Algae in Turkish sea and their means of evaluation. Çevre haberleri, Boğaziçi Üniversitesi yayımları, İstanbul,(9), 65, 68.
- Eliçin AK, Kılıçkan A, Avcıoğlu AO (2009). Mikroalglerden Biyodizel Üretimi. 25. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi bildiri kitabı, pp: 273 – 278. Isparta
- Evrenosoğlu, M., Eliçin, K., Borowski, P., Koç, C., Gezici, M., & Gürhan, R. (2013). Biyoyakıt Amaçlı Nannochloropsis salina Mikroalg Türünün Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Belirlenmesi. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 9(2), 99-107.

- Gümüş G (2006). Deniz Marulunun Kimyasal Kompozisyonunun Araştırılması, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.İrkin, L. C. 2020 Akuakültürde alglerin önemi ve kullanım alanları. İksad Yayın Evi.
- Kaykaç, O. G., Cirik, Ş., Tekinay, A. A. (2008). Yeşil deniz alglerinden *Ulva rigida* C. Agardh)' nın besin kompozisyonu ve aminoasit içeriklerinin mevsimsel Değişimi, *Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 25, 9-12.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101: 87–96.
- Sukatar, A. (2002). Alg kültürü yöntemleri. Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları.
- Şahin, B. (2021). Türkiye'nin tatlısu suyosunları florası için yeni bir kayıt. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 8(2), 27-31.
- Ünver, Z. M. (2018). Tatlı su ve topraktan izole edilmiş mikroalglerin biyoyakıt üretimi için karakterizasyonu (Doctoral dissertation, Anadolu University (Turkey)).

BÖLÜM 3

BİTKİSEL ARAŞTIRMALARDA UZAKTAN ALGILAMA ve SPEKTORADYOMETRE TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI

Süreyya Betül RUFAİOĞLU¹, Öğr. Gör. Dr. Zekeriya KARA²,
Prof. Dr. Ali Volkan BİLGİLİ³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14386812>

¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, ORCID: 0000-0001-5285-8568

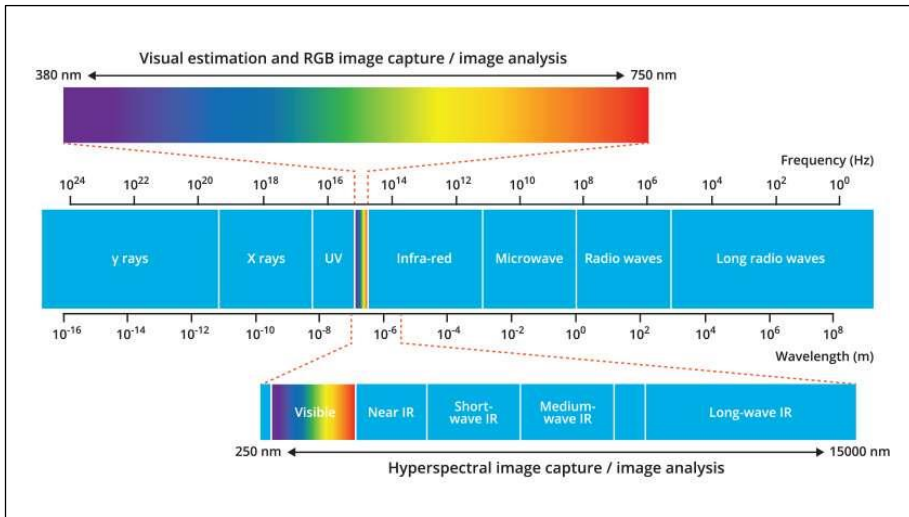
² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, zekeriyakara0261@gmail.com ORCID: 0000-0001-7855-4968

³ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, ORCID: 0000-0002- 4727-8283

GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojileri, tarımsal ve ekolojik araştırmalarda devrim yaratmıştır. Bunun en büyük nedeni, uzaktan algılama tekniklerinin geleneksel yöntemlere kıyasla bitki sağlığını ve gelişimini daha geniş alanlarda yüksek doğrulukla analiz etmesidir.

Uzaktan algılama teknolojileri (UAT), tarımsal ve çevresel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan gelişmiş bilimsel araçlardır. UAT' ler genellikle elektromanyetik spektrumun UV-VIS-NIR bölgelerine düşen yansıyan, iletilen ve/veya emilen ışığın spektral dağılımını hassas bir şekilde ölçer (Şekil 1). Bu çok yönlülük ve hassasiyet, onların bitki sağlığı, bitkilerin fizyolojik durumu ve strese karşı verdikleri tepkilerdeki küçük değişiklikleri tespit etme de uygun hale getirmiştir. Ayrıca UAT' lerin bitkilerin agronomik çalışmalarında önemli ve tahribatsız araçlar olduğu gösterilmiştir (Blackburn, 2007; Jones ve Vaughan, 2010).



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum ve görüntüleme teknolojilerinin dalga boyu aralığı (URL.1)

Bitkiler geniş bir dalga boyu spektrumunda ışıkla etkileşime girer ve bu etkileşimlerin her biri bitkilerin yapısı, kimyasal bileşimi ve fizyolojik durumu hakkında yararlı bilgiler sunar. Spektral yansıma veya bitki spektrumu ile pigment konsantrasyonları (klorofil, karotenoidler, antosiyaninler), yaprak morfolojisi ve su içeriği güçlü bir etkileşim içindedir. Örneğin, klorofil esas

olarak mavi (400-500 nm) ve kırmızı (600-700 nm) bölgelerdeki ışığı emerek yeşil ışığı yansıtır ve bitkilere genel yeşil rengi verir. Işığın bu seçici emilimi ve yansımaları, bitki sağlığının ve fotosentetik yeteneğin değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir (Gitelson ve Merzlyak, 1997; Carter ve Knapp, 2001). Bitki özelliklerinin ve tepkilerinin deşifre edilmesinde farklı dalga boylarının rolünü anlamak önemlidir. Görünür spektrum (400-700 nm), klorofilin ana emici pigment olduğu fotosentez için özellikle önemlidir. Bitkilerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için özellikle önemli olan bir diğer bölge de görünür spektrumun hemen ötesinde yer alan yakın kızılötesi bölgedir (700-1100 nm). Sağlıklı bitki dokusu NIR bölgesinde daha fazla yansıma yaparken, stresli veya sağlıklı doku, yaprağın iç yapısındaki değişiklik nedeniyle daha az yansıma yapar. Bu farklılıklar sayesinde spektral yansımalar bitki sağlığı, besin içeriği ve stres koşullarının başlangıcı hakkında bilgi sağlayabilir (Peñuelas ve Filella, 1998).

Ayrıca, kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgesindeki dalga boyları (1100-2500 nm) bitki su içeriği, lignin, selüloz ve diğer biyokimyasal bileşenler hakkında ek bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle, spektrometrelerin kullanımı, mahsul besin eksikliklerinin değerlendirilmesinden hastalık salgınlarının ve çevresel stres faktörlerinin izlenmesine kadar çeşitli tarımsal uygulamalarda bu dalga boylarından veri yakalamada etkili olmuştur. Dolayısıyla bu tür spektral analizler, kaynak kullanımını optimize eden ve verimi artıran müdahalelerin zamanında yapılmasını sağlayarak hassas tarım ve sürdürülebilir ürün yönetiminde kilit bir rol oynamaktadır (Richardson ve Berlyn, 2002; Mutanga ve Skidmore, 2004). Kısacası, bitkiler ve çevre arasındaki etkileşimler hakkında çok daha kapsamlı bilgi sahibi olunmasını sağlar. Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ve Fotokimyasal Yansıtma İndeksi (PRI) gibi bitki verimliliği ve bitki stresinin izlenmesinde geniş uygulama alanı bulan indekslerin oluşturulmasına yardımcı olur. Bu indekslerle ilişkilendirilen spektral veriler, uzaktan algılama teknolojilerinin geliştirilmesinde ve tarımsal uygulamalarda karar verme sürecinin iyileştirilmesinde değerli olmuştur (Tucker, 1979; Gamon ve ark., 1992).

Uzaktan algılama, bitkilerin ve tarımsal sistemlerin incelenmesinde çok etkili bir yaklaşım haline gelmiştir. Sensörler, uydu platformları ve veri analitiğindeki teknolojik gelişmeler, uzaktan algılamanın artık bitki sağlığı, fizyolojik süreçler ve çevresel etkileşimler hakkında hassas, büyük ölçekli ve

zamansal bilgiler sunmuştur. Bu nedenle, kitabın bu bölümü, bitki araştırmalarında uygulanan uzaktan algılamaya yönelik temel yaklaşımları (multispektral, hiperspektral, termal ve ışık algılama ve mesafe belirleme teknolojileri) ayrıntılı bir şekilde incelemiş ve en yaygın kullanılan tekniklere odaklanmıştır. Tüm bu yöntemler, bitki büyümesini, besin eksikliklerini, stres tespitini ve biyokütle üretiminin izlenmesinde önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

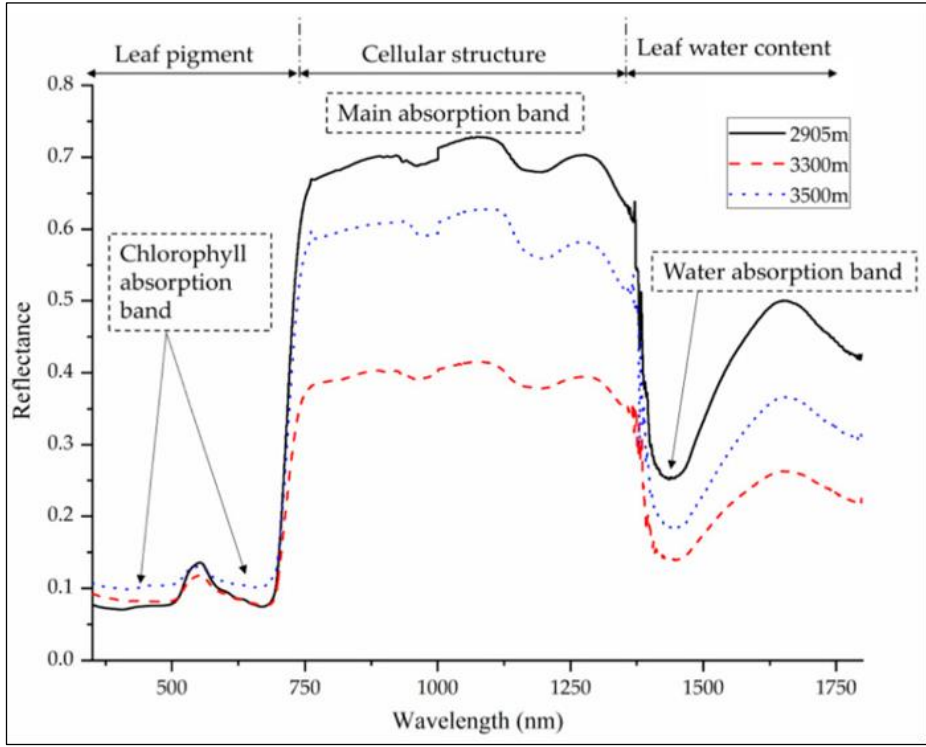
Bitki Yapraklarının Yansıma Spektrumu

Bitki yapraklarının yansıma spektrumu, bitkilerdeki çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerin değerlendirilmesi için zorunlu araçlardan biridir. Özellikle görünür (400-700 nm), yakın kızılötesi (700-1300 nm) ve kısa dalga kızılötesi (1300-2500 nm) bölgelerdeki spektral yansıma ölçümleri, bitki pigmentleri, yaprak su içeriği ve yapısal özellikler hakkında önemli bilgiler sağlamaktır. Uzaktan algılama, hassas tarım ve ekolojik izleme gibi birçok uygulamada gelen ışığın bitki yapraklarıyla etkileşimini anlamak çok önemlidir (Peñuelas ve Filella, 1998; Jones ve Vaughan, 2010). Spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm) bitki pigmentleri, özellikle de sırasıyla yaklaşık 430-450 nm ve 660-680 nm'deki emilim zirvelerini oluşturan klorofil a ve b hakimdir. Bu pigmentler fotosentez için son derece önemlidir çünkü bitkilerin büyümek için ihtiyaç duyduğu ışık enerjisi emiliminden sorumludurlar. Yansıma spektrumunda, bu klorofil absorpsiyon bantları, klorofil içeriğinin ve dolayısıyla bitki sağlığı ve canlılığının bir göstergesini sağlayan belirgin dalgalar oluşturmaktadır. Besin bulunabilirliği, su stresi ve hastalık gibi çevresel faktörler klorofil emilimini güçlü bir şekilde etkiler ve bu da görünür aralığı bitkilerin fizyolojik durumunun iyi bir göstergesi haline getirir (Gitelson ve Merzlyak, 1997; Carter ve Knapp, 2001). Görünür spektrumun ötesinde, yaklaşık 700-1300 nm arasında değişen yakın kızılötesi (NIR) bölge, yaprağın iç hücresel yapısıyla bağlantılıdır ve mezofil hücrelerini temsil eder. Görünür dalga boylarının aksine, NIR pigmentler tarafından emilmez, daha ziyade yansıtılır veya iletilir, daha yüksek yansıma genellikle sağlıklı yaprak dokusunu gösterir (Şekil 2). Bu bölge, bitki stresi veya hasarı ile ilişkili olabilecek hücre duvarı bütünlüğü, yaprak yoğunluğu ve genel yaprak yapısındaki değişikliklere karşı çok hassastır.

Ayrıca NIR bölgesi, bitkiler için son derece önemli olan iki parametrenin (yaprak biyokütle tahmini ve verimlilik) tahminin de kullanılır (Mutanga ve Skidmore, 2004; Blackburn, 2007).

SWIR bölgesi (1300-2500 nm), spektrumun yaprak su içeriğinden güçlü bir şekilde etkilendiği bir bölümdür. SWIR bölgesinde su absorpsiyon bantları (1450 nm ve 1940 nm) olarak da adlandırılan güçlü absorpsiyon bantları görülür (Şekil 2). Bu bölge (SWIR), bitki örtüsünün kuraklığa, strese ve terleme dinamiklerine karşı gösterdiği tepkileri ayırt etmede önemli rol oynar.

Bu soğurma bantları, fotosentez ve besin taşınması gibi fizyolojik süreçlerin sürdürülmesiyle bağlantılı yaprak nem içeriği gibi bilgileri sağlar (Sims ve Gamon, 2003; Ustin ve ark., 2004). Bu bölgelerden, spektral indeksler-NDVI ve WBI-bitki örtüsünün belirli fizyolojik özelliklerini tanımlamak için geliştirilmiştir. NDVI, klorofil tarafından kırmızı emilim ve NIR'deki yansıma arasındaki kontrastı kullanarak, bitki örtüsü, yoğunluğu ve sağlığını tahmin etmede en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Öte yandan, WBI, SWIR bölgesindeki suyun güçlü emiliminden yararlanarak bitki su içeriğinin tahmininde kullanılır. Bu indeksler uzaktan algılama uygulamalarında çok önemli araçlardır, çünkü bitki örtüsünün yüksek bir zamansal çözünürlükle geniş ölçekli izlenmesine izin verirler (Gamon ve ark., 1992; Tucker, 1979).



Şekil.2 Quercus aquifolioides yapraklarının farklı rakımlardaki yansımaya spektrumları (Zhu ve ark., 2020).

Rakım, yaprakların yansımaya özelliklerini belirleyecek bir diğer önemli faktördür. İrtifa değiştiğinde, çevresel koşullar- atmosferik basınç, sıcaklık ve ışınım her şey birlikte değişerek yaprakların fizyolojisini ve spektral özelliklerini etkilemektedir. Örneğin, yüksek rakımlardaki bitkiler daha güçlü UV ışınlarına ve düşük sıcaklıklara maruz kalabilir, bu da pigment konsantrasyonunda ve yaprak yapısında değişikliklere yol açarak spektral imzalarında kendini göstermektedir (Richardson ve Berlyn, 2002; Körner, 2007).

Görünür, NIR ve SWIR bölgelerinin her biri, bitki işlevi hakkında farklı bilgiler sunarak araştırmacıların bitki durumunu tahribatsız ve verimli bir şekilde değerlendirmesini sağlamaktadır. Spektral verilerin bitkiler ve tarım için araştırma ve yönetim uygulamalarına bu şekilde entegre edilmesi, bitki-çevre etkileşimleri ve kaynak yönetimi konusundaki anlayışımızı geliştirmiş ve

bilinçli karar verme ile sonuçlanmıştır (Peñuelas ve ark., 1993; Ustin ve Gamon, 2010).

Bitkilerdeki birçok stres türü, belirli dalga boyu bölgelerinde ki spektral yansımada değişikliklere neden olma eğilimindedir. Carter'ın (1993) stres faktörleri, özellikle yeşil (500-570 nm) ve kırmızı (600-700 nm) bölgelerde, görünür spektrumda yansımada bir artışa neden olduğunu ve bu genellikle bitkilerdeki diğer yaygın stres belirtisi olan klorofil içeriğindeki bir düşüşle olduğunu bildirmiştir. Ayrıca su endeksleri, araştırmacıların bitkilerdeki su içeriğini WI ve NDWI gibi endeksleri, değerlendirmelerine yardımcı olmak için belirli dalga boylarındaki (genellikle 970 nm) yansımaya dayanmaktadır. Bunlar, sulama yönetiminde ve kuraklık stresinin erken aşamada tespitinde temel olan bitki-su ilişkilerinin anlaşılması için çok yararlı parametrelerdir. Patojenik saldırı nedeniyle klorofil bozulması, pigment kaybı veya diğer biyokimyasal değişiklikler spektral ışınımların kullanılması ile hastalıkların varlığı tespit edilmektedir (Mahlein ve ark., 2013).

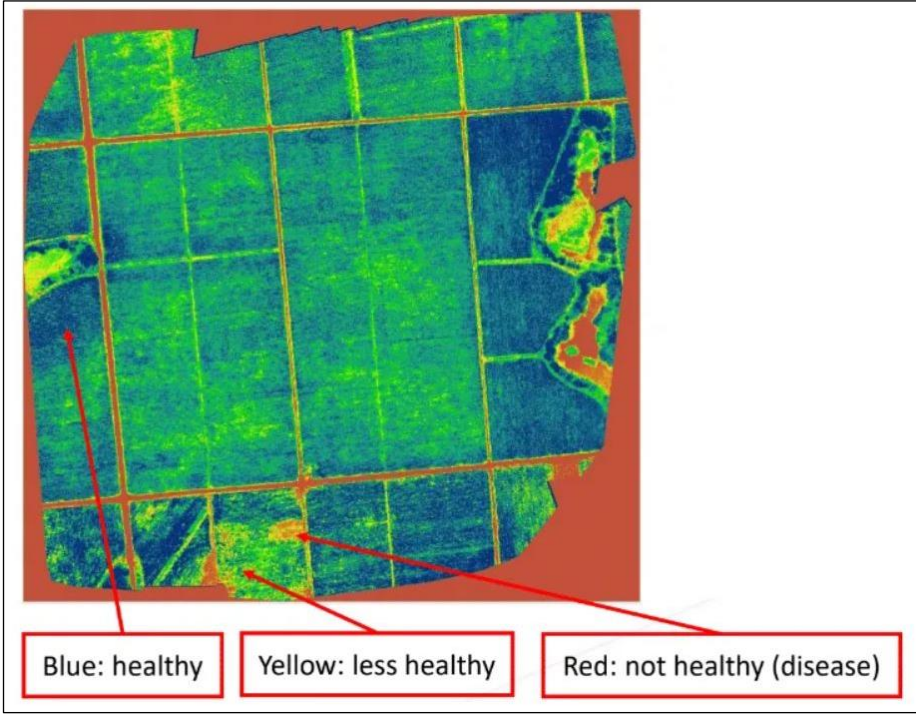
Bitkilerde Uzaktan Algılama Teknikleri

Multispektral Uzaktan Algılama

Multispektral uzaktan algılama çeşitli karasal, atmosferik ve sucul ortamların incelenmesini sağlamaktadır. Multispektral uzaktan algılamanın en önemli avantajı, çeşitli arazi örtüsü türleri arasında ayırım yapma, bitki örtüsü sağlığını değerlendirme, su kalitesini izleme ve tarım, ormancılık, şehir planlama ve çevresel izleme alanlarında çok sayıda uygulamaya yardımcı olma yeteneğinde olmasındadır (Jensen, 2007). Multispektral uzaktan algılamanın temel prensibi, dünya yüzeyinden yansıyan veya yayılan ışınımı birden fazla spektral bantta kaydetme yeteneğidir (Şekil 3). Dünya üzerindeki her nesne elektromanyetik radyasyonla benzersiz bir şekilde etkileşime girerek farklı bir spektral yansıma oluşturmaktadır. Bu spektral yansıma, uzaktan algılama uygulayıcılarının nesnelere sınıflandırmasını, çevresel parametreleri değerlendirmesini ve zaman içindeki değişiklikleri tespit etmesini sağlamaktadır. Örneğin, sağlıklı bitki örtüsü tipik olarak yakın kızılötesi bölgede daha yüksek enerji yansıtırken spektrumun kırmızı kısmında enerji emmektedir.

Uydu teknolojisinin gelişimi, multispektral uzaktan algılama yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Landsat gibi 1972'de başlayan ilk uydu görevleri,

spektrumun görünür ve kızılötesi kısımlarında orta düzeyde uzamsal çözünürlüğe sahip verilerle arazi örtüsü dinamikleri hakkında kritik bilgiler sağlamıştır. Günümüzde, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından fırlatılan Sentinel-2 gibi daha yeni uydular, daha geniş bir spektral bant dizisi ile birlikte daha yüksek mekansal ve zamansal çözünürlük sunarak dünya yüzeyinin daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Drusch ve ark., 2012). Multispektral veriler, tarımsal izlemeden afet yönetimine kadar çok sayıda bilimsel çalışmaya olanak sağlamıştır. Multispektral uzaktan algılamanın önde gelen uygulamalarından bir tanesi de hassas tarımdır. Çiftçiler, birden fazla dalga boyunda mahsul yansımalarına ilişkin verileri yakalayıp sulama, gübre uygulaması ve haşere kontrol uygulamalarını optimize edebilmektedir. Bu amaca yönelik yaklaşım sadece mahsul verimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tarımsal girdilerin (kimyasalların) aşırı kullanımını da sınırlandırmıştır. Ayrıca, multispektral görüntüler bitki stresinin erken tespit edilmesine yardımcı olarak çiftçilerin önemli verim kaybı yaşanmadan önce önlemler almasını sağlamaktadır (Mulla, 2013). Bunlar dışında, şehir planlama yetkilileri, şehir sınırları içindeki kentsel yayılmayı, arazi kullanımını ve bitki örtüsünü değerlendirmek için multispektral uzaktan algılamayı kullanmaktadır (Herold ve ark., 2003). Multispektral sensörler çevresel izleme ve afet müdahalesinde de kritik bir rol oynamıştır. Bitki örtüsü, toprak ve su koşullarındaki değişiklikleri izleme yeteneği, ormansızlaşma, toprak erozyonu ve kuraklık gibi çevresel bozulmaların erken tespit edilmesini sağlar. Ayrıca, seller ve orman yangınları gibi doğal afetler sırasında, multispektral görüntüler etkilenen alanların hızlı ve ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak acil müdahale ve kurtarma çabalarına yardımcı olmaktadır (Pinty ve ark., 2004).



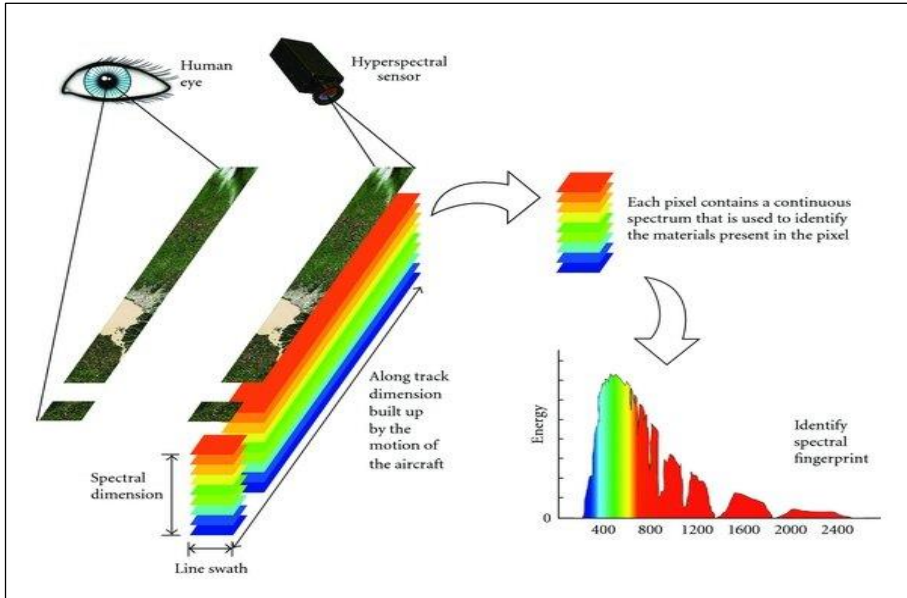
Şekil.3 Multispektral görüntü kullanarak haşere kontrolü ve tespiti örneği (URL2).

Multispektral uzaktan algılamanın avantajlarına rağmen, bazı sınırlamaların da kabul edilmesi gerekir. Bazı multispektral sensörlerin orta düzeydeki spektral ve uzamsal çözünürlüğü, küçük veya spektral olarak benzer özelliklerin tanımlanmasını engelleyebilir. Ayrıca, bulutlar ve aerosoller gibi atmosferik parazitler toplanan verilerin kalitesini etkileyebilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için araştırmacılar genellikle multispektral verileri hiperspektral veya sentetik açıklıklı radar (SAR) gibi diğer uzaktan algılama teknikleriyle entegre ederek daha doğru sonuçlar elde etmişlerdir (Campbell ve Wynne, 2011).

Sonuçta, multispektral uzaktan algılama, gözlem ve çevre yönetiminde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Elektromanyetik spektrum boyunca çeşitli spektral bilgileri yakalama yeteneği, hassas tarımdan çevresel izleme ve afet yönetimine kadar çok sayıda uygulamayı kolaylaştırmaktadır. Teknoloji ilerlemeye devam ettikçe, multispektral uzaktan algılamanın yetenekleri de artacak, gezegenimizin dinamikleri hakkında daha fazla bilgi sağlayacak ve sürdürülebilir kalkınma için bilinçli karar vermeyi destekleyecektir.

Hiperspektral Uzaktan Algılama

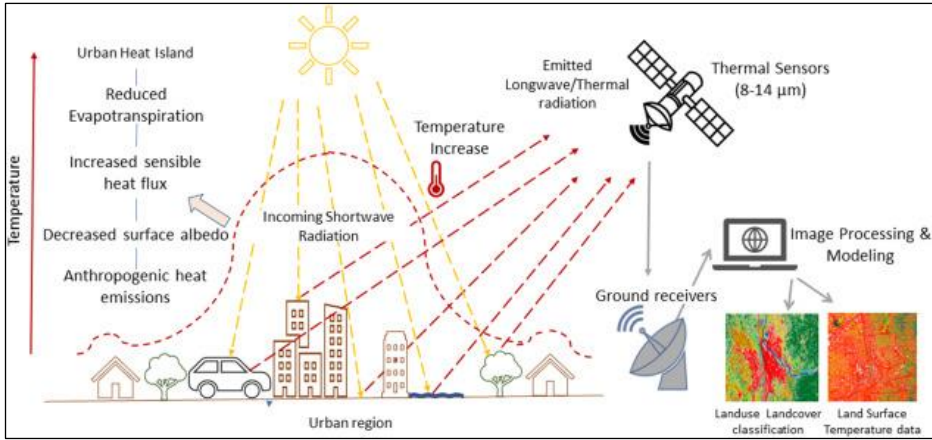
Hiperspektral uzaktan algılama, genellikle tüm görünür ve kısa dalga kızılötesi spektrumunu kapsayan yüzlerce dar, bitişik spektral bant üzerinde yansımayı toplayarak multispektral tekniklerin yerini alır (Şekil 4). Yüksek spektral çözünürlük, bitki fizyolojik durumunun daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Hiperspektral sensörler, klorofil, karotenoidler, su içeriği ve diğer pigmentler dışında bitkilerin biyokimyasal bileşenlerdeki küçük değişiklikleri algılama yeteneğine sahiptir (Sims ve Gamon, 2002). Hiperspektral veriler ayrıca bitki türlerini tanımlamada, stres tepkilerini değerlendirmede ve hastalıkların erken evrelerini tespit etmede etkili olduğunu kanıtlamıştır (Mahlein ve ark., 2013). Thenkabail ve arkadaşları (2011) gibi yazarların diğer çalışmaları, hiperspektral görüntülemenin bitkilerin biyofiziksel ve biyokimyasal özelliklerinin tahmininde potansiyelini göstermiş ve dolayısıyla besin seviyeleri ve su stresi hakkında bilgi sağlamıştır. Hiperspektral uzaktan algılamanın faydalarına rağmen, temel sınırlamalar genellikle söz konusu verinin büyük hacimlerinden kaynaklanmaktadır; bu da işleme için gelişmiş hesaplama teknikleri gerektirmekte ve daha gelişmiş ve pahalı sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil.4 Dünyanın hiperspektral uzaktan algılanması (Aiazzi ve ark., 2012).

Termal Uzaktan Algılama

Termal uzaktan algılama, termal kızılötesi bölgede bitkilerden yayılan radyasyonu ölçerek bitki yüzeyinin sıcaklığı hakkında bilgi sağlar (Şekil 5). Bu, bitki su durumunu değerlendirmek, sulama planlamak ve ısı stresini belirlemek için kullanılan çok önemli bir yöntemdir (Jones ve ark., 2009). Yaprak sıcaklığındaki değişiklikler stoma iletkenliği ve terleme oranlarıyla yakından bağlantılıdır, bu nedenle termal sensörler bitki-su ilişkilerinin analizi ve kuraklık stresinin tespiti için güçlü bir araç haline gelir (Costa ve ark., 2013). Son yıllarda, dronlara monte edilmiş hava termal kameraları kullanılarak bitki sıcaklığının yüksek çözünürlüklü haritaları elde edilmiştir. Bu sıcaklık verileri, sulama işleminin bitki su durumuna göre optimize edildiği, böylece su tüketiminin azaltıldığı ancak verimin korunduğu hassas tarım uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Bellvert ve ark., 2014).

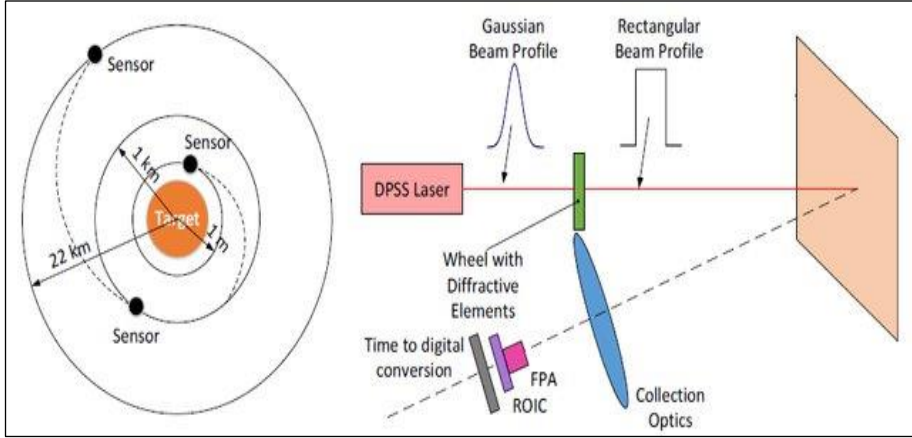


Şekil.5 Termal Kızılötesi Uzaktan Algılama (URL 3)

Işık Algılama ve Uzaklık Ölçümü (LiDAR)

LiDAR, lazer darbeleri kullanarak bitki kanopilerinin yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu modellerini veren bir uzaktan algılama teknolojisidir (Şekil 6). LiDAR'ın bitki boyu, kanopi eksikliği ve yer üstü biyokütlesini etkilemede etkili olduğu rapor edilmiştir (Lefsky ve ark., 2002). LiDAR'ın avantajları arasında kanopiye delebilmeye ve alttaki bitki örtüsünü kullanabilme yeteneği yer alır; bu nedenle, ekosistem üretkenliği değerlendirmeleri için doğru biyokütle tahminleri sağlar. Ayrıca, orman sınıflandırması, ağaç türü kullanımı ve karbon stokları gibi iklim değişikliğiyle mücadelede çok önemli

olan analizlerde de kullanılır (Popescu ve ark., 2011). Kara tabanlı karasal LiDAR ile birlikte, eşit derecede popüler olan havadan LiDAR, orman ekosistemlerindeki mekansal depolama hakkında önemli bilgiler veren kanopi mimarisinin haritalanmasında kullanılır (Zellweger ve ark., 2019).



Şekil.6. Işık Algılama ve Menzil Belirleme (LIDAR) cihazı işlevselliğinin şeması (Guilhot ve ark., 2019)

İnsansız Hava Araçları (İHA)

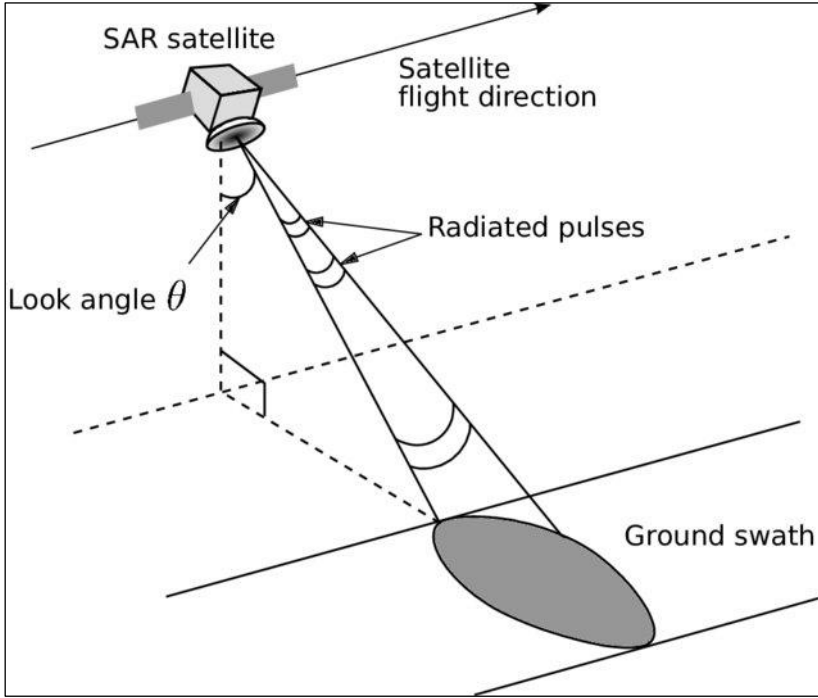
İnsansız Hava Araçları (İHA) veya farklı sensörler taşıyan dronlar (çoklu spektral, hiper spektral, termal ve LiDAR) yüksek çözünürlüklü, bölgeye özgü veriler sunarak uzaktan algılamada yeni bir temel taşı oluşturmuştur. İHA'lar, mahsul büyümesinin, hastalık salgınlarının ve zararlı istilasının benzeri görülmemiş bir mekansal ve zamansal ayrıntıda izlenmesini kolaylaştırmıştır (Zarco-Tejada ve ark., 2012). İHA platformunun esnekliği, bilim insanlarının doğru zamanda ve doğru çevre koşulları altında veri edinmesini sağlayarak uydu tabanlı uzaktan algılamının bazı sınırlamalarının üstesinden gelmesini sağlamıştır (Aasen ve ark., 2018).



Şekil.7 İnsansız hava araçları (URL 4).

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan bir aktif uzaktan algılama biçimidir, bu nedenle bulutları delebilir ve hava koşullarından veya günün saatinden bağımsız olarak veri toplayabilir (Şekil 8). SAR'ın bitki biyokütlesini ve toprak nemini izlemeye yararlı olduğu kanıtlanmıştır (Ulaby ve ark., 1986). Son araştırmalar, SAR verilerinin hassas tarım ve gıda güvenliği için önemli çıkarımlarla ürün biyofizik parametrelerini tahmin etmede etkili olduğunu rapor etmişlerdir (Torres ve ark., 2012).

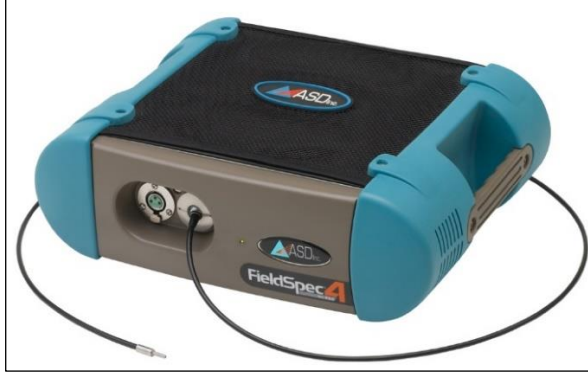


Şekil.8. Bir sentetik açıklıklı radar (SAR) sisteminin basitleştirilmiş geometrisi (Lauknes, 2011).

Spektroradyometreler

Spektroradyometreler, bitki yüzeylerinden yansıyan veya yayılan radyasyonun spektral güç dağılımını ölçmek için kullanılan cihazlardır ve normalde ultraviyole ile kızılötesi arasında geniş bir dalga boyu aralığındadır. Spektroradyometreler, multispektral ve hiperspektral sensörlerin aksine bitkilerin ayrıntılı biyokimyasal ve biyofiziksel değerlendirmelerini gerçekleştirmede son derece yararlı nokta tabanlı yüksek çözünürlüklü spektral ölçümler sunar (Penuelas ve Filella, 1998). Spektroradyometreler, bitki yapraklarının yansımısını, geçirgenliğini ve emilimini ölçmede en yaygın kullanılan cihazlardır ve bu nedenle pigment konsantrasyonu, su içeriği ve stres faktörleri gibi bitki fizyolojik durumu hakkında bilgi sağlar (Şekil 9, 10). Dalga boyunu, ışığın bir dedektör dizisine çarptığı yere göre ayırarak, bu ayırma ile tek bir edinimle tam spektrumu elde etmek mümkündür. Sistem kalibrasyonu, yazılım ve güç kaynağı, optik ve ölçüm motoru, spektroradyometrelerde

doğruluğu ve performansı belirleyen faktörlerden bazılarıdır. Bu cihazların ana bileşenleri arasında giriş optiği, giriş yarığı, ayırma filtreleri, kolimatör, kafes veya prizma, odaklama optiği, dedektör ve kontrol ve kayıt sistemi bulunmaktadır (Rufaioglu ve ark., 2023).



Şekil. 9 Spektroradmetre Cihazı (ASD FieldSpec 4)

Spektroradyometre cihazları yer tabanlı veya hava platformlarına kurulur ve bitkilerin yüzeyinden yansıyan ışığı geri ölçer. Bu ölçümler, bitki sağlığı ve gelişimini anlamak için kritik öneme sahip olan bitkilerin çeşitli dalga boylarındaki spektral tepkilerini içermektedir (Campbell ve Wynne, 2011). Örneğin, fotosentetik aktivitenin anlaşılmasında temel bir parametre olan klorofil içeriğinin tahmini, spektroradyometreler kullanılarak etkili bir şekilde elde edilmiştir (Gitelson ve ark., 2003). Dahası spektroradyometreler, biyokimyasal bileşenlerle ilişkili özgül emilim özelliklerindeki değişiklikleri analiz ederek, örneğin besin eksiklikleri, kuraklık stresi ve hastalıklar gibi bitki stresini tespit etmek için de kullanılmıştır (Carter, 1993).



Şekil.10. Spektrometre Bitki Probu (URL.5).

Daha yakın zamanda, saha spektrometreleri büyük ölçekli izleme doğruluğunu artırmak için İHA'lar ve uydulardan gelen uzaktan algılama verilerini kalibre etmek ve doğrulamak için kullanılmıştır (Zarco-Tejada ve ark., 2019). Spektrometrelerin yüksek spektral doğrulukları onları uzaktan algılama modellerini doğrulamak ve iyileştirmek için önemli bir araç haline getirmiştir.

Spektrometrik Verilerin Analizi

Spektrometrik veri analizi, bitki örtüsünün fizyolojik durumu, stres seviyeleri ve biyokimyasal bileşimi hakkında daha kapsamlı ayrıntılara sahip olarak bitkiler üzerindeki araştırmalarda bir ölçüt haline gelmiştir. Spektrometreler, ultraviyole (UV) ile kızılötesi (IR) arasında geniş bir dalga boyu aralığında yüksek çözünürlüklü spektral ölçümler sağlar. Bu nokta tabanlı ölçümler, bitki yansımaları, emilimini ve geçirgenliğini karakterize etmede çok önemlidir. Spektrometrik veriler, doğrudan fizyolojik süreçlerle bağlantılı bitkilerin spektral özelliklerini değerlendirmede kullanılır. Spektral yansımaları analiz ederek, bilim insanları klorofil, karotenoidler ve antosiyaninler gibi yaprak pigmentleri hakkında önemli bilgiler edinirler. Örneğin, klorofil mavi (430-450 nm) ve kırmızı (640-680 nm) bölgelerde farklı

emilim özelliklerine sahiptir ve bu özellikler klorofil konsantrasyonunu ve dolayısıyla bitkilerin fotosentetik aktivitesini tahmin etmek için kullanılabilir (Gitelson ve ark., 2003). Spektrometrik verilerden, Fotokimyasal Yansıma İndeksi (PRI) ve Kırmızı Kenar Pozisyonu (REP) gibi pigmente özgü endeksler, bitkilerdeki fotosentetik verimlilik ve stres seviyelerindeki dinamik değişiklikleri anlamak için sıklıkla türetilir (Gamon ve ark., 1997). Özellikle PRI, bitki örtüsünün genel sağlığı ve verimliliği ile ilişkili olan ışık kullanım verimliliğini tahmin etmek için kullanılmıştır (Sims ve Gamon, 2002). Spektrometrik ölçümlerden türetilen bu endeksler, ışık mevcudiyeti, besin durumu ve su stresi dahil olmak üzere bitkilerin çevresel değişikliklere verdiği tepkiler hakkında bilgi vermektedir.

Spektrometrik Çalışmaların Avantajları ve Kısıtlamaları

Spektrometrelerden elde edilen en iyi fayda, düzenli karşılaştırmaya kıyasla büyük miktarda veri elde edilmesidir. Özellikle yönetim çalışmalarında ve geniş ormanlık alanlar için, bu teknolojinin kısa bir süre içinde büyük miktarda veri elde etmesi mümkündür. Bu teknolojinin bir diğer ek avantajı, gözlemlenen herhangi bir bitki stresinin erken teşhisine izin vermesidir. Örneğin, su veya besin eksikliğiyle ilişkili stresin çok erken aşamaları, insan gözüyle görülemeyen spektrometri verileriyle tespit edilebilir. Verhoef (1984)'e göre spektrometrimin kullanımı, su stresini ve besin eksikliklerini erken bir aşamada tespit edebilir.

Çeşitli avantajlarına rağmen, spektrometre veri analizinin kullanımında çeşitli sorunlar görülmektedir. Spektrometreler nokta tabanlı ölçümler sağlamakta; bu sebeple, bulguların daha büyük mekansal ölçeklerde ekstrapolasyonu sınırlayıcı hale gelmektedir. Spektrometre ölçümün doğruluğunu değiştirebilecek diğer koşullar arasında ışık yoğunluğu ve atmosfer bileşimi bulunmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar bitkilerin sağlık durumu hakkında daha geniş bir bilgi kapsamı elde etmek için spektrometre verilerini giderek daha fazla multispektral ve hiperspektral İHA'lar gibi diğer uzaktan algılama platformlarıyla birleştirmektedir (Gao ve ark., 2020).

Uzaktan Algılama Verilerinin Kalibrasyonu ve Validasyonu

Spektroradyometrelerin başlıca uygulamaları, uydu veya İHA platformlarından gelen uzaktan algılama verilerinin kalibrasyonu ve doğrulanmasıdır. Spektroradyometrelerin yüksek spektral çözünürlüğü, onları yer doğrulaması için önemli bir araç haline getirmiştir; böylece uzaktan algılama ürünleri için doğruluk ve güvenilirlik sağlamıştır (Zarco-Tejada ve ark., 2019). Saha tabanlı spektroradyometre ölçümlerinin uydudan elde edilen yansıma ile bu şekilde karşılaştırılması, araştırmacıların atmosferik etkiler, sensör gürültüsü ve uzaktan algılama verilerinin doğruluğunu etkileyebilecek diğer faktörleri düzeltmelerini sağlar. Spektroradyometre verileri ayrıca, bitki örtüsü dinamiklerinin uydudan uzaktan algılanması için yaygın olarak kullanılan Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü Endeksi ve Geliştirilmiş Bitki Örtüsü Endeksi gibi bitki örtüsü endekslerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için bir temel oluşturur. Yüksek kaliteli spektroradyometre ölçümlerine göre kalibre edildiğinde, bu endeksler büyük mekansal ölçeklerde bitki sağlığı, üretkenlik ve fenolojik değişimin daha hassas değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Bitkisel Araştırmalarda Spektroradyometrelerin Uygulama Alanları

Spektroradyometre teknolojilerinin kullanımı tarım sektöründe çok önemli bir hale gelmiştir. Bu cihazın kullanımındaki uygulamalar, tarımsal verimin tahmin edilmesi, ürün gelişiminin, bitki su stresinin ve besin eksikliklerinin izlenmesini kapsamaktadır (Hatfield ve ark., 2008). Özellikle erken belirtilerin tespiti tarımsal üretim sürecine zamanında müdahale edilmesini sağlamaktadır. Bunun dışında, spektroradyometre bitki türlerinin belirlenmesi ve istilacı bitki türlerinin bulunması gibi araştırmalara uygulanabilmektedir. Teknoloji, geniş alanlarda hızlı ve etkili bir şekilde tarama yapılmasını sağlayarak araştırma yapma sürecini büyük ölçüde hızlandırır.

Taşınabilir spektroradyometre, bir çalışmada meyve ağaçlarının yapraklarındaki bazı makro ve mikro besin maddelerinin tahmini için kullanılmıştır. Bu çalışmada armut, kiraz, şeftali ve kayısı bahçelerinden alınan yaprak örneklerinden spektral yansıma değerleri ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak azot (N), fosfor (P), potasyum (K), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), demir (Fe), çinko (Zn), manganez (Mn) ve bakır (Cu) içerikleri çoklu regresyon analizi yöntemi ile tahmin edilmiştir. Sonuçlar spektral yansıma

değerleri ile besin içerikleri arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Spektrometre verileri kullanılarak N, P, K, Mg ve Mn içerikleri tahmin edilebilmesine rağmen, Ca, Fe, Zn ve Cu içerikleri tahmin edilememiştir. Yapılan analiz sonuçları taşınabilir spektrometre ile yapılan spektral ölçümlerin yapraklardaki besin içeriğinin tahmininde kimyasal analizlerin yerine kullanılabilirliğini göstermiştir (Basayigit ve Şenol, 2009).

Spektrometrik yöntemler, bitkilerin besin eksikliği, kuraklık, tuzluluk veya hastalık gibi, bitkide stresine sebep olacak durumların tespiti için çok etkilidir (Karadağ ve ark., 2020; Bilgili ve ark., 2023). Spektrometrik veriler, azot, fosfor ve potasyum gibi makro besin maddelerinin konsantrasyonlarının değerlendirilmesi yoluyla bitkilerin beslenme koşullarını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, azot içeriği klorofil sentezinde oldukça önemli bir rol oynarken, bu bölgede bulunan yansımada meydana gelen değişiklikler kırmızı ve yakın kızılötesi bölgelerdeki yansıma değişiklikleriyle tahmin edilebilmektedir (Gitelson ve ark., 2005). Dahası, spektrometrik analiz, bitkilerin yapısal ve savunma özelliklerini anlamak için önemli olan lignin, selüloz ve fenolikler gibi diğer biyokimyasal bileşiklerin tespitine olanak tanımaktadır.

Sonuçlar ve Gelecek Perspektifleri

Uzaktan algılama tekniklerini kullanan bitki araştırmaları, bitki sağlığı değerlendirmesinde doğruluğu ve güvenilirliği artırmak için birden fazla sensör türünü birleştirerek veri birleştirmenin umut verici gelişimiyle genişlemeye devam etmektedir (Gao ve ark., 2020). Makine öğrenimi algoritmaları, özellikle derin öğrenme, karmaşık bitki özelliklerinin otomatik olarak çıkarılmasına ve sınıflandırılmasına olanak sağlamak için uzaktan algılama iş akışlarına giderek daha fazla dahil edilmektedir (Kamilaris ve Prenafeta-Boldú, 2018). Bununla birlikte, standartlaştırılmış veri işleme hatlarına duyulan ihtiyaç, diğer tarımsal veri kaynaklarıyla entegrasyon ve bazı uzaktan algılama platformlarıyla ilişkili yüksek maliyetlerle başa çıkma gibi zorluklar devam etmektedir. Bununla birlikte, bitki izleme için uzaktan algılamanın geleceği, teknolojiyi daha da erişilebilir ve etkili hale getirmek için sensörlerin daha da minyatürleştirilmesini ve gelişmiş veri analitiğini, İHA'ların artan kullanılabilirliğiyle bir araya getireceği öngörülmektedir. Çoklu spektral, hiperspektral, termal, LiDAR, spektrometre, İHA tabanlı ve SAR

teknolojileri gibi uzaktan algılama tekniklerinin çoğu, bitki sağlığı, stres ve üretkenlikle ilgili araştırma yönlerini devrim niteliğinde değiştirmiştir. Her teknolojinin kendine özgü avantajları vardır ve çeşitli bitki araştırma yönlerine yaygın olarak uygulanabilmektedir. Artan teknolojik ilerlemeyle birlikte, bu uzaktan algılama tekniklerinin makine öğrenimiyle bütünleştirilmesinin yakın gelecekte sürdürülebilir tarım, hassas çiftçilik ve ekosistem izlemede çok önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir.

Son çalışmalar, spektrometre teknolojilerinin bitki araştırmaların da büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Bu teknoloji, bitki sağlığı ve tarımsal verimliliğin tahmininde kullanılan diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Önümüzdeki zamanlarda, spektrometre teknolojisinin tarımsal uygulamalarda daha fazla öneme sahip olacağı görülmektedir. Özellikle, sensör teknolojisindeki gelişmeler ve yapay zekâ destekli analiz tekniklerinin kullanımı, spektrometre verilerinin misyonlarını daha verimli bir şekilde destekleyecektir.

Gelecekteki araştırmaların taşınabilir spektrometreler geliştirmeye ve bunları gerçek zamanlı veri analizi için makine öğrenimi algoritmalarıyla entegre etmeye kanalize edilmesi beklenmektedir. Bunlar, yerinde bitki sağlığı izleme kapasitesini artıracak ve hassas tarım ve sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamaları üzerinde yürütülebilecek hızlı değerlendirmelere olanak tanıyacaktır. Sensör teknolojisindeki gelişmeler, spektrometrelerin minyatürleştirilmesini ve bu araçların rutin tarımsal izleme ve araştırma için erişilebilirliğini iyileştirmeyi içermektedir (Aasen ve ark., 2018). Spektrometrik verilerin analizi, bitki fizyolojisi, stres tespiti, besin durumu ve uzaktan algılama modeli doğrulaması hakkında etkili içgörüler sağlamaktadır. Bu nedenle, spektrometreler, hassas tarım, çevresel izleme ve sürdürülebilir arazi yönetiminde çok önemli bir rol oynayan bitkiler hakkında yüksek spektral çözünürlük sağlayan ve ayrıntılı biyokimyasal ve biyofiziksel bilgi sağlayan araçlardır. Spektrometrik verilerin diğer uzaktan algılama platformları ve gelişmiş analizlerle entegrasyonu, ölçeklenebilirlik ve çevresel değişkenlikle ilişkili zorluklara rağmen, bitki bilimi ve tarımındaki araştırmanın bir sonraki aşamasında muazzam bir potansiyel göstermektedir.

Kaynakça

- Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., & Bareth, G. (2018). Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 119-140.
- Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S., Lastris, C., & Selva, M. (2012). Spectral distortion in lossy compression of hyperspectral data. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012 (1), 850637.
- Basayigit, L., & Senol, H. (2009). Prediction of plant nutrient contents in deciduous orchards fruits using spectroradiometer. *Int. J. ChemTech Res*, 1(2), 212-224.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15(4), 361-376.
- Berger, K., Verrelst, J., Feret, J. B., Wang, Z., & Woche, M. (2020). A survey of active learning for the estimation of vegetation biophysical and biochemical variables with remote sensing. *Remote Sensing*, 12(10), 1629.
- Bilgili, A., Bilgili, A.V., Tenekeci, M.E., & Karadağ, K. (2023). Spectral characterization and classification of two different crown root rot and vascular wilt diseases (*fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* and *fusarium solani*) in tomato plants using different machine learning algorithms. *Eur J Plant Pathol* 165, 271-286
- Blackburn, G. A. (2007). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 855-867.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Carter, G. A. (1993). Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 80(3), 239-243.
- Carter, G. A., & Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*, 88(4), 677-684.

- Costa, J. M., Grant, O. M., & Chaves, M.M. (2013). Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3937-3949.
- Drusch, M., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.
- Gamon, J. A., Peñuelas, J., & Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41(1), 35-44.
- Gamon, J. A., Serrano, L., & Surfus, J.S. (1997). The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112(4), 492-501.
- Gao, B. C., Montes, M. J., Ahmad, Z., & Davis, C.O. (2020). Remote sensing of aquatic vegetation. *Advances in Remote Sensing for Natural Resource Monitoring*, 12, 123-134.
- Gitelson, A. A., et al. (1993). Remote Estimation of Chlorophyll Content in Higher Plant Leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14(17), 3369-3375.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M.N. (1997). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 19(7), 1283-1285.
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271-282.
- Gitelson, A. A., Vina, A., Verma, S.B., & Rundquist, D.C. (2005). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 72-83.
- Guilhot, D., & Ribes-Pleguezuelo, P. (2019). Laser technology in photonic applications for space. *Instruments*, 3(3), 50.
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., & Walthall, C. L. (2008). Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, 100(3), S117-S131.

- Herold, M., et al. (2003). Spectral Characteristics of Surface Materials in an Urban Environment. *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 532-540.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Education.
- Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978-989.
- Jones, H.G., & Vaughan, R.A. (2010). *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press.
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.
- Karadağ, K., Tenekeci, M.E., Taştaltın, R., Bilgili, A. 2020. Detection of pepper fusarium disease using machine learning algorithms based on spectral reflectance, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100299,
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569-574.
- Lauknes, T.R. (2011). Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52(1), 19-30.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Mahlein, A. K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H. W., Plümper, L., Steiner, U., & Oerke, E. C. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 128, 21-30.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five Years of Remote Sensing in Precision Agriculture: Key Advances and Remaining Knowledge Gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- Mutanga, O., & Skidmore, A.K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 3999-4014.

- Mutanga, O., & Skidmore, A.K. (2007). Red edge shift and biochemical content in grass canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3-4), 517-527.
- Peñuelas, J., & Filella, I. (1993). Dehydration-induced changes in reflectance indices and chlorophyll fluorescence in Mediterranean plants. *International Journal of Remote Sensing*, 14(10), 1887-1905.
- Penuelas, J., & Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3(4), 151-156.
- Pinty, B., et al. (2004). Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109 (D6).
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2011). Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(5), 639-654.
- Richardson, A. D., & Berlyn, G. P. (2002). Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mount Washington, New Hampshire, USA. *American Journal of Botany*, 89(1), 88-94.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309.
- Rufaioglu, S. B., Kaplan, F., & Bilgili, A. V. (2023). Nitrogen fertilization recommendations using optical sensors. In *Focus on Agricultural Sciences* (Chapter 5).
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures, and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337-354.
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2003). Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84(4), 526-537.

- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & Pauw, E. D. (2011). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71(2), 158-182.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rommen, B. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1986). Microwave remote sensing: Active and passive. *Volume II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*. Artech House.
- URL 4 Precision agriculture: the hype around drone technology - Bearing Tips
- URL 5 ASD Instrument Spectroscopy Probes And Accessories - Prolab Systems
- URL1 What is hyperspectral Imaging: A Comprehensive Guide- Specim Spectral Imaging
- What is Remote Sensing The Definitive Guide- GIS Geography
- URL2 The Role of Multispectral and Hyperspectral Imagery in Modern Agriculture - Terra Drone Agri
- URL3 Thermal Infrared Remote Sensing - an overview | ScienceDirect Topics
- Ustin, S. L., & Gamon, J. A. (2010). Remote sensing of plant functional types. *New Phytologist*, 186(4), 795-816.
- Ustin, S. L., Zarco-Tejada, P. J., & Jacquemoud, S. (2004). Remote sensing of the environment: State of the science and new directions. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 274-275.
- Verhoef, W. (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16(2), 125-141.
- Zarco-Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2012). Precision agriculture: An opportunity for EU farmers-Potential support with the CAP 2014-2020. *Joint Research Centre Scientific and Policy Reports*.
- Zarco-Tejada, P. J., Camino, C., Beck, P. S., Calderon, R., Hornero, A., & Hernandez-Clemente, R. (2019). Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations. *Nature Plants*, 5(8), 432-439.

- Zellweger, F., Braunisch, V., Müller, J., & Bollmann, K. (2019). The influence of forest management, abiotic and biotic factors on microhabitat structures at the stand scale. *Forest Ecology and Management*, 434, 221-230.
- Zhu, J., He, W., Yao, J., Yu, Q., Xu, C., Huang, H., & Mhae B. Jandug, C. (2020). Spectral reflectance characteristics and chlorophyll content estimation model of *Quercus aquifolioides* leaves at different altitudes in Sejila Mountain. *Applied Sciences*, 10(10), 3636.

BÖLÜM 4

PETaz ENZİMİ MİKROPLASTİKLERDEN KURTULUŞ OLABİLİR Mİ?

Doç. Dr. Mine KÖKTÜRK¹, Prof. Dr. Muhammed ATAMANALP²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14387488>

¹ Iğdır Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü, Iğdır, Türkiye. mine.kokturk@igdir.edu.tr. ORCID ID: 0000-0003-4722-256X

² Atatürk Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Yetiştiriciliği Bölümü, Erzurum, Türkiye. mataman@atauni.edu.tr. ORCID ID:0000-0002-2038-3921

1. GİRİŞ

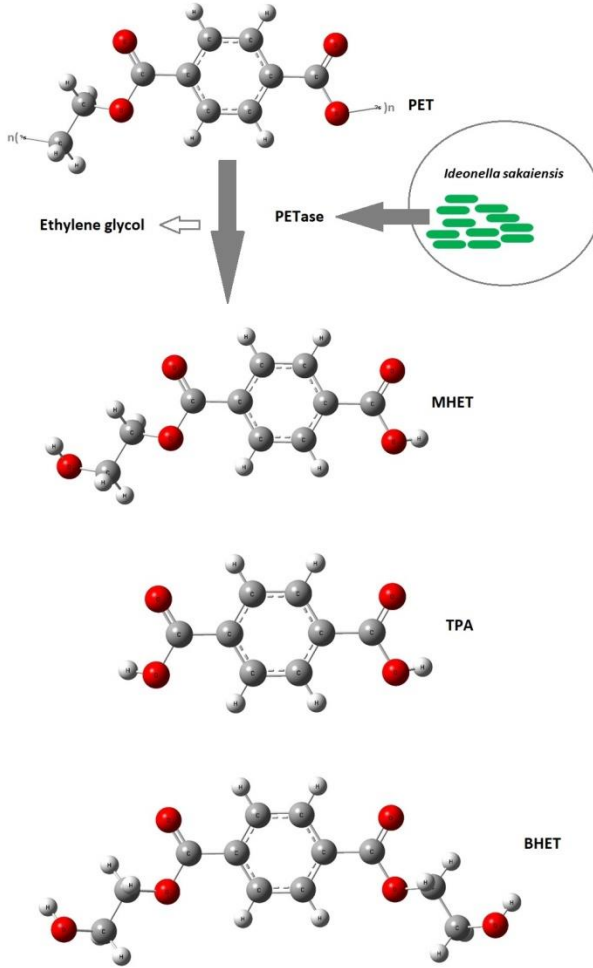
Son elli yılda plastik malzemeler çeşitli avantaj sayılabilecek özelliklerinden dolayı pek çok uygulama alanlarında cam, metal ve ahşap gibi daha çevre dostu malzemelerin yerini alarak insanoğlunun her alanında vazgeçilmezi hale gelmiştir (Feil ve Pretz, 2020). Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) 2021 yılında yayınlanan raporuna göre yılda yaklaşık 400 milyon metrik ton plastik atık üretiliyor ve uzmanların tahminleri 2060 yılında bu üretimin 3 kat artacağını göstermektedir. (UNEP, 2021; Organization for Economic Co-operation and Development, 2021).

Plastiklerin dayanıklılıkları bu malzemelerin yaygın kullanımına neden olmuş, ekosistemde farklı kimyasal ve fiziksel etkiler sonucunda daha küçük (< 5 mm) yapılara dönüşen mikroplastiklerin (MP) canlılar için alarm niteliğinde bir tehdit olduğu konusunda son yıllarda görüş birliği ortaya çıkmıştır (Biswas ve ark.,2024;Wilhelm ve ark.,2024). MP' lerin ekosistem için önemli bir tehlike olduğunu artık kabul eden bilim dünyası şimdilerde bu tehlike için ne gibi önlemler alınabileceğini yoğun bir şekilde araştırmaktadır. Ancak MP' lerin boyutları ve kimyasal yapıları göz önüne alındığında bu yapılardan kurtulmanın çokta kolay olmadığı bilinmektedir. Mikroplastikler nanopartiküller, mikroorganizma bazlı iyileştirme ve üçüncül arıtma gibi yenilikçi MP giderme stratejileri ve teknolojileri ile ekosistemden uzaklaştırılmaya çalışılmış, ancak bu yöntemler mikroplastiklerin tamamen yok edilmesi yada daha az zararlı bir yapıya dönüştürülmesine tam olarak yardımcı olamamıştır (Ahmed ve ark.,2024).

Mikroplastiklerin tamamen yok edilmesi özellikle insanlar ve diğ canlıların doku ve organları için önem taşımaktadır. Çünkü yapılan çalışmalar MP' lerin insan vücuduna sindirim, solunum ve dermal yolla girebileceğini bildirmiştir (Rahman ve ark.,2021; Zhao ve ark.,2023). İnsan dolaşımında MP' lere de rastlanmış olup her ml kan için ortalama 1,6 µg MP ve en yüksek konsantrasyonu >7 µg tespit olduğu bildirilmiştir (Leslie ve ark.,2022). Yine insanda sirozlu karaciğer dokularında 4 ila 30 µm boyutları arasında MP' ler belirlenmiş ve bu dayanımlı partiküllerin karaciğer hastalıklarının nedenlerinden biri olabileceği düşünülmüştür (Horvatits ve ark.,2022). İnsan akciğer dokularında da MP' lerin varlığı yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur (Amato-Lourenço ve ark.,2021; Jenner ve ark.,2022). Bunun yanısıra insanlarda önemli bir sağlık sorunu olan akciğer sertleşmesi ile bu

mikro parçacıklar arasındaki ilgi içinde bulunduğumuz bu yılda Türk araştırmacılar tarafından bulunmuş ve rapor edilmiştir (Alpaydin ve ark.,2024). Mikroplastiklerin insan dokularındaki varlığının ciddiyetini gösteren bu çalışmalar mikroplastiklerden kurtulabilir miyiz? yada nasıl kurtulabiliriz? sorularını bu konuda çalışan tüm araştırmacılar gibi bizleri de düşündürmüştür.

Son yıllarda yapılan bazı çalışmalar PETaz enziminin plastiklerin degradasyonunda önemli olduğunu ve umut verici sonuçlar alınabileceğini göstermiştir (Schwaminger ve ark.,2021; Ullah ve ark.,2023; Effendi ve ark.,2024; Han ve ark.,2024a; Lee ve ark.,2024). Dünya için plastik kirliliği küresel bir çevre krizini oluştururken bazı mikroorganizmalar için sentetik polimerleri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanma kapasitelerinin olduğu keşfediliyor (Knott ve ark.,2020). PETaz, *Ideonella sakaiensis* bakterisinde bulunan ve polietilen tereftalat (PET) polimerini mono-2-hidroksietil tereftalat (MHET), bis (2-hidroksietil) tereftalat (BHET), tereftalik asit (TPA) ve etilen glikol (EG) dahil olmak üzere küçük yapı bloklarına dönüştürebilen bir enzimdir (Son ve ark.,2019) (Şekil 1). 2016 yılında Yoshida et al. (2016) *Ideonella sakaiensis* 201-F6 bakterisinin PET' i karbon ve enerji kaynağı olarak daha da katabolize edilen TPA ve EG' ye depolimerize etmek için iki enzimli bir sistem kullandığını ve bu bakterinin PET polimerine saldıran, BHET, MHET ve TPA' yı serbest bırakan kütinaz benzeri bir serin hidrolaz olan PETaz enzimini ürettiğini ortaya çıkardı. Bakteri PETaz, BHET' i MHET ve EG' ye ayırır ve çözünür. MHET ürünü, TPA ve EG' yi üretmek üzere MHETaz tarafından daha da hidrolize edilmektedir (Han ve ark.,2017; Son ve ark.,2019). Bu özelliği PETaz enzimini ekosistem ile uyumlu plastik geri dönüşümü sağlayabilen veya plastik atıklarını yok edebilen potansiyel bir biyokatalizör haline getirebilecektir (Ullah ve ark.,2023). PET, ambalajlama ve imalat gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan, uzun yıllar doğada bozunmadan kalabilen ve mikroplastiklere dönüşerek hem okyanuslardaki deniz canlıları hem de insanlara zarar verebilecek tehlikeli bir polimer grubudur (Lebreton ve ark.,2017; Lee ve ark.,2024). Bundan dolayı PET polimer grubunun bir enzim yada herhangi bir madde tarafından daha az zararlı bir yapıya dönüştürülmesi önemsenmesi ve ciddiye alınması gereken bir durumdur.



Şekil 1: PETaz degradasyonu (Orijinal)

Ullah ve ark.,(2023) çalışmalarında rekombinant PETaz' ın, gastrointestinal sistemde tutunan PET mikroparçalarını parçalayabilen fonksiyonel bir ajan olarak potansiyel kullanımını araştırmışlardır, PETaz asidik ve proteolitik ortama duyarlı olduğundan, PETaz' ın ağızdan verilmesi için koruyucu bir taşıyıcı olarak onu hidrojel bir kapsül içinde uygulamışlardır. Sonuçlar salınan PETaz' ın yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve hidrojel sisteminin terapötik proteinlerin ağızdan verilmesi için uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca PETaz enziminin kontrollü salınımıyla tutarlı olarak konsantrasyona ve zamana bağlı in vitro mikroplastik bozunma potansiyeli

gösterdiği bildirilmiştir. Gen yapısı değiştirilerek oluşturulan *Escherichia coli* suşlarında da *in vivo* süreç kullanarak PETaz enzimi elde edildiği ve PET' i tereftalat monomerine (TPA)' un parçalayabildiği ortaya çıkarılmıştır (Effendi ve ark.,2024).

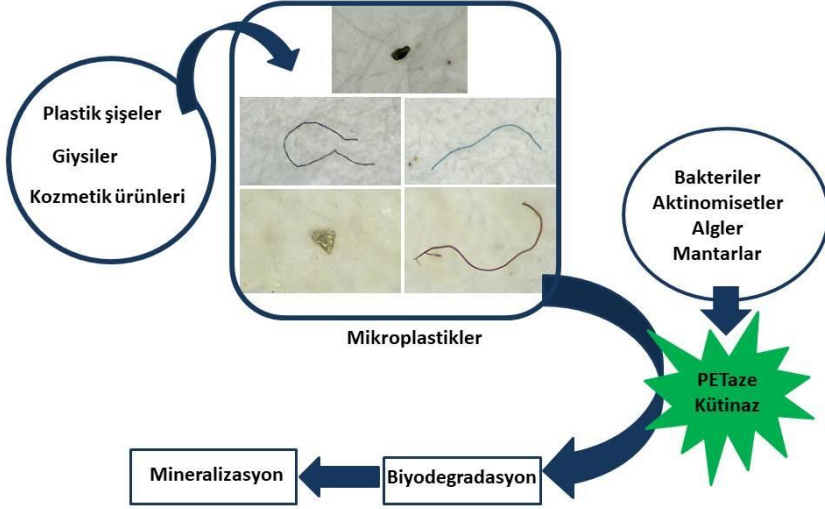
1.1. Mikroplastiklerin Biyobozunma Süreci

Mikroplastiklerin biyolojik bozunması, çok uzun bir bozunma süreci ile meydana geldiği, ekosistemde biyobirikim ve biyomagnifikasyonun olması endişe verici bir durumdur (Qin ve ark.,2021). MP bozunma aşamaları, MP' ler üzerinde mikroorganizmaların kolonize olması, biyolojik parçalanmanın başlaması, biyoasimilasyonu ve mineralizasyon şeklindedir (Chamas ve ark.,2020, Qin ve ark.,2021). MP' lerin yüzeyine kolonize olan mikroorganizmalar depolimerizasyon olarak bilinen plastiğin monomerik yapılara indirgenmesi için enzim salgılamaktadırlar (Kumar ve ark.,2023). Bu depolimerizasyon işlemi enzim ve plastiğin bağlanması ve polimer yapısındaki zincirin hidrolizi ile sonuçlanan bir süreçtir (Wei ve ark.,2021). Bu işlemin temel amacı mikroorganizmalar tarafından sentezlenen bazı hücre dışı enzimlerin (lipaz, esteraz, lakkaz ve lignin peroksidaz) hidrofobik özellikteki mikroplastikleri fonksiyonel gruplarını alkol veya karbonil grubuna dönüştürmek suretiyle plastiği hidrofilik özelliğe getirmektir (Chamas ve ark.,2020). Enzim etkisi ile hidrofilik özelliği artan MP' ler bakterinin yarı geçirgen membranından geçer ve hücre içi enzimler tarafından daha fazla parçalanmak üzere sitoplazmada lokalize olurlar (Zurier ve Goddard, 2021, Miri ve ark.,2022). Sitoplazmaya geçen monomer yapıdaki MP' ler buradaki enzimlerin etkisi ile trikarboksilik asit döngüsü (TCA) ve β -oksidasyon metabolik yollara katılırlar. Son aşamada ise H_2O , CO_2 , N_2 , CH_4 gibi tamamen oksitlenmiş metabolitlere dönüşerek biyolojik bozunmaları tamamlanmış olur (Zurier ve Goddard, 2021, Miri ve ark.,2022).

1.2. Mikroplastiklerin Biyobozunmasında Etkili olan Enzim ve Mikroorganizmalar

Mikroorganizmalar (MO), binlerce yıl boyunca birçok farklı kirleticiyi tüketerek ve bunları ekosistemde yeniden kullanılabilir olacak daha az zararlı bileşiklere dönüştürerek ve mineralize edilmesinde çok önemli rol oynamıştır (Amobonye ve ark.,2021). Araştırmak bazı MO' larda (bakteri, mantar, algler ve aktinomisetler) MP' lerdeki bağları parçalayarak monomer yapılara

dönüştürebilen depolimeraz potansiyele sahip enzimlerin varlığını ortaya koymuştur (Othman ve ark.,2021; De Jesus ve Alkendi, 2023) (Şekil 2).



Şekil 2: Mikroplastiklerin mikroorganizmalar tarafından enzimler aracılığı ile parçalanması (Orijinal)

Özellikle son yıllardaki çalışmalarda *Ideonella sakaiensis* ve *Thermobifida fusca* bakterilerinden keşfedilen IsPETase ve IsMHETase gibi mikrobiyal enzimlerin karbondioksit ve su gibi ekosistemde zararsız olan moleküller üreterek mikroplastiklerin polimer zincirlerini depolimerize edebildiği bildirilmiştir (De Jesus ve Alkendi, 2023). Aktinomisetler insan yapımı ve doğal habitatlarda bulunan farklı ortamlarda yaşayabilen gram pozitif bakterilerdir (Al-Ansari ve ark.,2020). Ancak aktinomisetlerin su ekosistemlerdeki çoğu türlerinin varlığı yeterli araştırmalar yapılmadığı için hala bir sırdır (Murti ve Agrawal, 2010; Hegazy ve ark.,2023). Aktinomisetlerin en fazla izole edilen türü *Streptomyces* cinsidir. *Streptomyces sp.* türlerinin polietilen tereftalat (PET) ve polietilen (PE) polimer gruplarını parçalayabildikleri bildirilmiştir (Abraham ve ark.,2017; Farzi ve ark.,2019; Jabloun ve ark.,2020). Son yıllarda yapılan bir çalışmada insan dışısındaki *Streptomyces calvus* DSM 41452 türünde ScPETase enzimi ve *Pseudomonas parvalcaligenes* MRCP1333 türünde ise PpPETase tanımlanmıştır (Han ve

ark.,2024b). Bu enzimlerin PET türü polimerleri ayrıştırılmasında ne derece önemli oldukları düşünüldüğünde, gelinen bu noktanın MP'lerin yok edilmesi yada zararsız ürünlere dönüştürülmesi açısından umut verici olduğu düşünülmektedir.

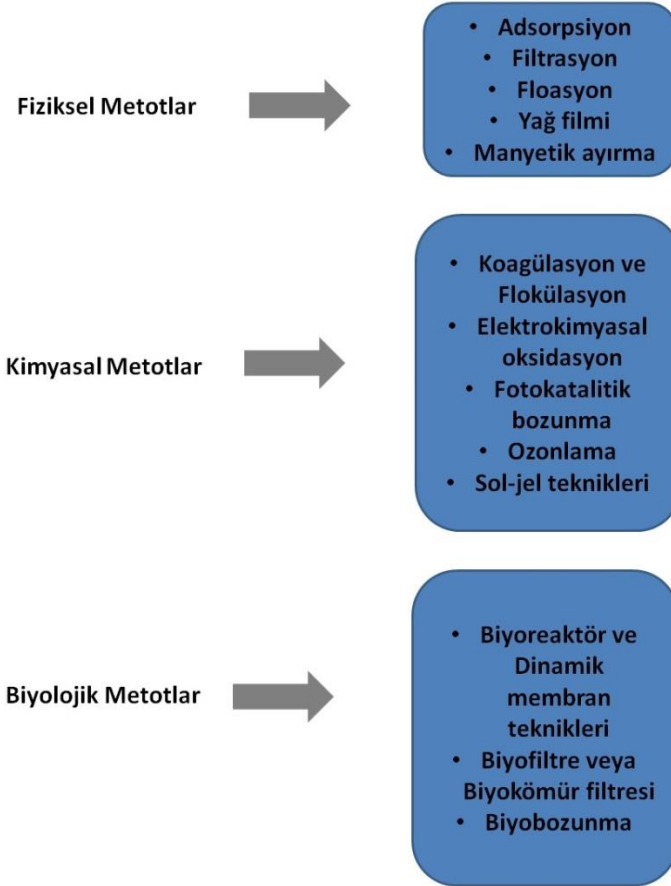
1.3. İnsan Dokularındaki Mikroplastikleri Mikrobiyal Enzim ile Uzaklaştırmak

İnsanda akciğer, karaciğer, dalak, kolon gibi organlarda yapılan araştırmalarla MP varlığı tespit edilmiştir. Akciğerde 1.17-2.84 MP/örnek, karaciğerde 4.6-11.9 MP/g, dalak dokusunda 1.1 MP/g ve kolonda 28.1 MP/g olarak bulunmuştur (Amato-Lourenço ve ark.,2021; Ibrahim ve ark.,2021; Horvatits ve ark.,2022; Kutralam-Muniasamy ve ark.,2023). İnsan kanında güvenilir bir analitik yöntem (Py-GC/MS: double shot pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry) kullanılarak plastik varlığı incelenen bir çalışmada 1 ml kanda 1.6 µg konsantrasyonunda plastiğin var olduğu bildirilmiştir (Leslie ve ark.,2022). İnsan dokularındaki bu MP verilerinin ortaya konulması sonucunda “insan doku ve vücut sıvılarındaki mikro/nanoplastiklerin daha az zararlı yapılara dönüştürülebilir mi?” sorusunu akıllara getirmiştir. Kan örneklerindeki MP'lerin polimer türüne bakıldığında günlük hayatımızda yoğun olarak kullanılan gıda ambalajları ve tekstil ürünleri kaynaklı polimer türü olan polietilen tereftalat (PET) olduğu görülmüştür (Leslie ve ark.,2022). Bazı çalışmalar PET türü MP'lere maruziyetin insan sindirim sistemindeki ve kolonik sistemde yararlı bakterilere (Bifidobacterium, Clostridium ve Enterobakteriler) karşı olumsuz etki gösterdiği ve bazı mikrobiyal grupların sayılarını azalttığını bildirmiştir (Tamargo ve ark.,2022). Ayrıca farklı canlıların dokularında PET türü MP'lerin toksik etkilerinin olduğu da bilinmektedir (Jakubowska ve ark.,2020; Duan ve ark.,2022; Lin ve ark.,2023). PET türü polimerlerin daha az toksik olan terephthalic acid (TPA), bis(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET), mono(2-hydroxyethyl) terephthalate (MHET), ve ethylene glycol (EG) gibi monomerlere PETaz enzimi ile parçalanabileceği bilinmektedir (Ball ve ark.,2012). Ancak bu enzimin insan hücrelerinde oluşturabileceği olumsuz etkilere dair yeterli çalışma bulunmamaktadır. PETaz enziminin PET polimer türünü insan vücudunda monomerlere dönüştürmesi ve idrar ile çok daha kolay uzaklaştırılabileceği senaryoları mevcuttur (Lopez-Lorenzo ve ark.,2024).

Yapılan son çalışmalar PETaz enziminin alternatif uygulama yöntemleri araştırılmış olup immünojeniteyi azaltan ve dolaşım sürecinde kullanımı uygun olan eritrositler tarafından kapsüllenmiş enzimlerin verilmesi düşünülmüştür (Rossi ve ark.,2021). Mevcut çalışmalar PETaz enziminin insan doku ve vücut sıvılarındaki plastik degradasyonu için yeterli olmadığını göstermektedir. Öncelikle bu enzimin terapötik ajan olarak kullanılması için bu enzimin insan vücudunda uygun ve etkin dağıtımının belirlenmesi ve canlıdaki farklı mekanizmalar üzerine etkilerinin *in vivo* çalışmalar ile ortaya konulması gerekmektedir.

1.4. Sucul Canlılarda Mikrobiyal Enzim ile Mikroplastiklerden Kurtulmak

Son yıllarda MP'lerin tespitine yönelik sucul canlılarda yapılan çalışmalar plastiklerin sucul organizmaların çoğu doku ve organında biriktiğini göstermiştir (Atamanalp ve ark.,2021; Atamanalp ve ark.,2022; Atamanalp ve ark.,2023; Eryaşar ve ark.,2024; Leuenerger ve ark.,2024). Bu mikroyapıdaki plastiklerin sucul ürünlerin işleme sürecinde de varlığı belirlenmiştir (Alak ve ark.,2021; Alak ve ark.,2022). Mikroplastiklerin sucul canlılardaki varlığı tespit edilmesinden sonra bu mikroplastiklerin canlılarda oluşturabileceği toksik etkiler merak edilmiş ve pek çok çalışma ile de toksik oldukları ortaya konulmuştur (Mak ve ark.,2019; Atamanalp ve ark.,2023; Köktürk ve ark.,2024; Liu ve ark.,2024). Bilim dünyasını tedirgin eden bu sonuçlar "MP'lerden nasıl kurtulunabilir veya daha az zararlı yapılara nasıl dönüştürülebilir" düşüncesini akıllara getirmiştir. Öncelikle MP'leri sucul ortamdan uzaklaştırmak için farklı teknikler düşünülmüş ve denenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Sucul ortamlardan MP' lerin uzaklaştırılma yöntemleri (Dayal ve ark.,2024).

Bu teknikler içinde adsorpsiyon, filtrasyon, manyetik ayırma, gelişmiş oksidasyon işlemi, biyolojik bozunma ve flokülasyon gibi yöntemler yer almaktadır (Grbic ve ark.,2019; Ricardo ve ark.,2021; Liu ve ark.,2022; Elgarahy ve ark.,2024; Zhang ve ark.,2024a). Belirtilen yöntemler su kütlesinden MP' leri uzaklaştırmak için uygun olmalarının yanı sıra bazı eksikliklere sahiptirler. Örneğin kimyasal flokülasyon ve filtrasyon yöntemlerinde yüksek enerji harcanması ve adsorpsiyon yönteminde kontaminasyondan sonra yeniden kullanılmasının zor olması gibi durumlar bu yöntemlerin eksik kısımları olarak ortaya çıkmaktadır (Sun ve ark.,2021; Li ve ark.,2021). Yine gelişmiş oksidasyon ve biyolojik bozunma yöntemlerinde

mikroplastiklerin tam bozunmasını sağlamak zordur (Zurier ve Goddard, 2021; Liu ve ark.,2022). Fiziksel bir ayırma yöntemi olarak hidrosiklon, kimyasal maddelerin kullanımından kaçınarak, daha düşük maliyetle ve daha az enerjiyle MP' lerin sudan uzaklaştırılabileceğini göstermiştir (Zhang ve ark.,2024b). Bu noktada farklı yöntemler denenmiş ve denenmeye devam etmektedir. Ancak sucul canlılardan veya sucul ortamdan MP' leri tamamen yok etmek veya daha zararsız yapılara dönüştürmek ile ilgili halen geçerli bir yöntem ortaya konulamamaktadır.

PETaz enziminin sucul organizmalarda toksik mekanizması araştırılarak canlılar için güvenli ve terapötik dozları belirlenmelidir. Sonrasında PETaz enziminin özellikle sucul canlıların yetiştiriciliğinde kullanılan yemlere immobilize edilmiş enzim şeklinde katılarak sucul canlılara verilmesi yaklaşımı düşünülebilir. Başka bir alternatif olarak PETaz enzimini üreten ve sucul canlıların bağırsak florasında olan yararlı bakterilerin olup olmadığı araştırılarak canlılarda bu bakterilerin sağlıklı üremesini sağlayan probiyotikler ile yemler hazırlanabilir. MP' lerin dünya için artık önemli bir problem olduğu kabul edilmiş olup bu sorunun çözümü için öneriler sunulması gerekliliği gözardı edilmemelidir.

2. SONUÇ VE ÖNERİLER

Plastiklerin dünyadaki üretim ve kullanım artışı durdurulmaya çalışılsa bile mevcutta ekosistemde birikmiş olan plastiğin bertaraf edilmesi için acil önlem planlarının yapılması gerekmektedir. Plastik materyaller mikro ve nano boyutta küçük plastik parçacıklara dönüşerek karasal ve sucul canlılarda birikim ve çeşitli toksik tepkilere neden olduğu da bilinmektedir. Hatta bu mikro/nano plastiklerin insan dokularında da varlığı endişe uyandırmaktadır. Plastiğin yok edilmesi ya da daha az zararlı bileşiklere dönüştürülmesi fikrinde PETaz enzimi umut verici bir çözüm olabileceği düşünülmektedir. Bu enzim karasal ve sucul çevrede yararlı bakteri yada planktonlar tarafından üretilip üretilmeyeceği araştırılarak bu organizmaların sucul/karasal ekosistemlerde plastic temizleyicisi olmaları sağlanabilir. Ayrıca bu enzimin model organizmalarda ve insanlarda toksik etkilerinin varlığı ortaya konularak “insan bağırsak sistemindeki faydalı bir bakteri üretilmesinin sağlanması ile mikro/nano plastiklerin sindirim sisteminde yok edilmesi ve diğer organlara yayılması engellenebilir mi” fikri düşünülebilir. Yine balık yetiştiriciliğinde

kullanılan yemlerde bu enzim dekapülasyon yöntemi ve nanopartiküller ile modifiye edilerek enzim aktivitesi muhafaza edilmek suretiyle kullanılabilir. Balık yemlerinde bu enzimin kullanılması zaten yapılan çalışmalarda “MP” lerin en fazla rastlandığı organ olan sindirim sisteminde yok edilmeleri veya azaltılmalarına yardımcı olabilir mi” fikrini akıllara getirmektedir. Belirtilen bu fikirlerin uygulanması için en önemli 3 adım vardır. Bunlardan birincisi bu enzimin toksik etkilerinin ortaya konulması ve güvenli dozlarının belirlenmesidir. İkinci adım doğadaki farklı canlıların bu enzimi üretip üretemeyeceği araştırılmalıdır. Özellikle yararlı bakterilerde bu enzimin varlığı büyük önem taşımaktadır. Üçüncü adım ise bu enzimin aktivitesini kaybetmeden canlılara verilme yönteminin (yem, kapsül/hap) bulunmasıdır. Bilim dünyasında PETaz enzimi büyük bir ilgi ile araştırılmaya devam edilmektedir. Ancak bu araştırmalar hala emekleme aşamasında kaldığı için bu enzimin önemini vurgulayan derleme ve çalışmalar daha fazla yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abraham, J., Ghosh, E., Mukherjee, P., & Gajendiran, A. (2017). Microbial degradation of low density polyethylene. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 147-154.
- Ahmed, S. F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A., Momtahn, A., Chowdhury, A. A., ... & Mofijur, M. (2024). Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 347, 140648.
- Alak, G., Köktürk, M., & Atamanalp, M. (2021). Evaluation of different packaging methods and storage temperature on MPs abundance and fillet quality of rainbow trout. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126573.
- Alak, G., Köktürk, M., Ucar, A., Parlak, V., Kocaman, E. M., & Atamanalp, M. (2022). Thermal processing implications on microplastics in rainbow trout fillet. *Journal of Food Science*, 87(12), 5455-5466.
- Al-Ansari, M., Kalaiyarasi, M., Almalki, M. A., & Vijayaraghavan, P. (2020). Optimization of medium components for the production of antimicrobial and anticancer secondary metabolites from *Streptomyces* sp. AS11 isolated from the marine environment. *Journal of King Saud University-Science*, 32(3), 1993-1998.
- Alpaydin A. Ö., Uçan E. S., Köktürk M., Atamanalp, M., Kalyoncu, Ç., Yiğit, S., Uçar, A., Şimşek, G. Ö., Tertemiz, K. C., Karaçam, V., Ulukuş, E. Ç., Gürel, D., Alak G. (2024) Microplastics, as a risk factor in the development of interstitial lung disease- a preliminary study. *Environmental Pollution*, 363, Part 1, 15 December 2024, 125054.
- Amato-Lourenço, L. F., Carvalho-Oliveira, R., Júnior, G. R., dos Santos Galvão, L., Ando, R. A., & Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of hazardous materials*, 416, 126124.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*, 759, 143536.
- Atamanalp, M., Kırıcı, M., Köktürk, M., Kırıcı, M., Kocaman, E. M., Ucar, A., ... & Alak, G. (2023). Polyethylene exposure in rainbow trout; suppresses growth and may act as a promoting agent in tissue-based oxidative response, DNA damage and apoptosis. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 960-970.

- Atamanalp, M., Kokturk, M., Gündüz, F., Parlak, V., Ucar, A., Alwazeer, D., & Alak, G. (2023). The use of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) as a sentinel species for the microplastic pollution of freshwater: the case of Beyhan Dam Lake, Turkey. *Sustainability*, 15(2), 1422.
- Atamanalp, M., Köktürk, M., Parlak, V., Ucar, A., Arslan, G., & Alak, G. (2022). A new record for the presence of microplastics in dominant fish species of the Karasu River Erzurum, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
- Atamanalp, M., Köktürk, M., Uçar, A., Duyar, H. A., Özdemir, S., Parlak, V., ... & Alak, G. (2021). Microplastics in tissues (brain, gill, muscle and gastrointestinal) of *Mullus barbatus* and *Alosa immaculata*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 81, 460-469.
- Ball, G. L., McLellan, C. J., & Bhat, V. S. (2012). Toxicological review and oral risk assessment of terephthalic acid (TPA) and its esters: A category approach. *Critical reviews in toxicology*, 42(1), 28-67.
- Biswas, T., Pal, S. C., Saha, A., Ruidas, D., Shit, M., Islam, A. R. M. T., & Malafaia, G. (2024). Microplastics in the coral ecosystems: A threat which needs more global attention. *Ocean & Coastal Management*, 249, 107012.
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., ... & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494-3511.
- Dayal, L., Yadav, K., Dey, U., Das, K., Kumari, P., Raj, D., & Mandal, R. R. (2024). Recent advancement in microplastic removal process from wastewater-a critical review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100460.
- De Jesus, R., & Alkendi, R. (2023). A minireview on the bioremediative potential of microbial enzymes as solution to emerging microplastic pollution. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1066133.
- Duan, Z., Cheng, H., Duan, X., Zhang, H., Wang, Y., Gong, Z., ... & Wang, L. (2022). Diet preference of zebrafish (*Danio rerio*) for bio-based polylactic acid microplastics and induced intestinal damage and microbiota dysbiosis. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128332.
- Effendi, S. S. W., Hu, R. E., Hsiang, C. C., Ting, W. W., Huang, C. L., & Ng, I. S. (2024). Exploring PETase-like enzyme from shotgun metagenome and co-expressing Colicin E7 in *Escherichia coli* for effective PET degradation. *Process Biochemistry*.

- Elgarahy, A. M., Eloffy, M. G., Priya, A. K., Yogeshwaran, V., Elwakeel, K. Z., Yang, Z., & Lopez-Maldonado, E. A. (2024). A review on the synergistic efficacy of sonication-assisted water treatment process with special attention given to microplastics. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Eryaşar, A. R., Mutlu, T., Karaoğlu, K., Veske, E., & Gedik, K. (2024). Assessment of microplastic pollution in eleven commercial fish species in the Gulf of İzmir (Aegean Sea, eastern Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, 208, 116932.
- Farzi, A., Dehnad, A., & Fotouhi, A. F. (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 17, 25-31.
- Feil, A., & Pretz, T. (2020). Mechanical recycling of packaging waste. In *Plastic waste and recycling* (pp. 283-319). Academic Press.
- Grbic, J., Nguyen, B., Guo, E., You, J. B., Sinton, D., & Rochman, C. M. (2019). Magnetic extraction of microplastics from environmental samples. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(2), 68-72.
- Han, W., Zhang, J., Chen, Q., Xie, Y., Zhang, M., Qu, J., ... & Zhang, Y. (2024a). Biodegradation of poly (ethylene terephthalate) through PETase surface-display: From function to structure. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132632.
- Han, X., Liu, W., Huang, J. W., Ma, J., Zheng, Y., Ko, T. P., ... & Guo, R. T. (2017). Structural insight into catalytic mechanism of PET hydrolase. *Nature communications*, 8(1), 2106.
- Han, Z., Nina, M. R. H., Zhang, X., Huang, H., Fan, D., & Bai, Y. (2024b). Discovery and characterization of two novel polyethylene terephthalate hydrolases: one from a bacterium identified in human feces and one from the *Streptomyces* genus. *Journal of Hazardous Materials*, 134532.
- Hegazy, G. E., Olama, Z. A., Abou-Elela, G. M., Ramadan, H. S., Ibrahim, W. M., & El Badan, D. E. S. (2023). Biodiversity and biological applications of marine actinomycetes—Abu-Qir Bay, Mediterranean Sea, Egypt. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 150.
- Horvatits, T., Tamminga, M., Liu, B., Sebode, M., Carambia, A., Fischer, L., ... & Fischer, E. K. (2022). Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine*, 82.
- Ibrahim, Y. S., Tuan Anuar, S., Azmi, A. A., Wan Mohd Khalik, W. M. A., Lehata, S., Hamzah, S. R., ... & Lee, Y. Y. (2021). Detection of microplastics in human colectomy specimens. *JGH open*, 5(1), 116-121.

- Jabloune, R., Khalil, M., Moussa, I. E. B., Simao-Beaunoir, A. M., Lerat, S., Brzezinski, R., & Beaulieu, C. (2020). Enzymatic degradation of p-nitrophenyl esters, polyethylene terephthalate, cutin, and suberin by Sub1, a suberinase encoded by the plant pathogen *Streptomyces scabies*. *Microbes and environments*, 35(1), ME19086.
- Jakubowska, M., Białowas, M., Stankevičiūtė, M., Chomiczewska, A., Pażusienė, J., Jonko-Sobuś, K., ... & Urban-Malinga, B. (2020). Effects of chronic exposure to microplastics of different polymer types on early life stages of sea trout *Salmo trutta*. *Science of the Total Environment*, 740, 139922.
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 831, 154907.
- Knott, B. C., Erickson, E., Allen, M. D., Gado, J. E., Graham, R., Kearns, F. L., ... & McGeehan, J. E. (2020). Characterization and engineering of a two-enzyme system for plastics depolymerization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(41), 25476-25485.
- Köktürk, M., Özgeriş, F. B., Atamanalp, M., Ucar, A., Özdemir, S., Parlak, V., ... & Alak, G. (2024). Microplastic-induced oxidative stress response in turbot and potential intake by humans. *Drug and Chemical Toxicology*, 47(3), 296-305.
- Kumar, V., Sharma, N., Duhan, L., Pasrija, R., Thomas, J., Umesh, M., ... & Barceló, D. (2023). Microbial engineering strategies for synthetic microplastics clean up: A review on recent approaches. *Environmental toxicology and pharmacology*, 98, 104045.
- Kutralam-Muniasamy, G., Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., & Roy, P. D. (2023). Microplastic diagnostics in humans: "The 3Ps" Progress, problems, and prospects. *Science of The Total Environment*, 856, 159164.
- Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature communications*, 8(1), 15611.
- Lee, Y. L., Jaafar, N. R., Ling, J. G., Huyop, F., Bakar, F. D. A., Rahman, R. A., & Illias, R. M. (2024). Cross-linked enzyme aggregates of polyethylene terephthalate hydrolyse (PETase) from *Ideonella sakaiensis* for the improvement of plastic degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130284.

- Leslie, H. A., Van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment international*, 163, 107199.
- Leuenberger, K., Erni-Cassola, G., Leistenschneider, C., & Burkhardt-Holm, P. (2024). Microplastic ingestion in five demersal, bathydemersal and bathypelagic fish species from the eastern Weddell Sea, Antarctica. *Science of The Total Environment*, 946, 174320.
- Li, Q. C., Lai, Y. J., Yu, S. J., Li, P., Zhou, X. X., Dong, L. J., ... & Liu, J. F. (2021). Sequential isolation of microplastics and nanoplastics in environmental waters by membrane filtration, followed by cloud-point extraction. *Analytical Chemistry*, 93(10), 4559-4566.
- Lin, X., Xie, H., Zhang, Y., Tian, X., Cui, L., Shi, N., ... & Li, Y. F. (2023). The toxicity of nano polyethylene terephthalate to mice: Intestinal obstruction, growth retardant, gut microbiota dysbiosis and lipid metabolism disorders. *Food and Chemical Toxicology*, 172, 113585.
- Liu, M., Liu, X., & Xu, J. (2024). Influence of microplastic pollution on the toxicity of potamodromous fish grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) and its swimming capacity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113520.
- Liu, Q., Chen, Y., Chen, Z., Yang, F., Xie, Y., & Yao, W. (2022). Current status of microplastics and nanoplastics removal methods: Summary, comparison and prospect. *Science of The Total Environment*, 851, 157991.
- Lopez-Lorenzo, X., Hueting, D., Bosshard, E., & Syrén, P. O. (2024). Degradation of PET microplastic particles to monomers in human serum by PETase. *Faraday Discussions*.
- Mak, C. W., Yeung, K. C. F., & Chan, K. M. (2019). Acute toxic effects of polyethylene microplastic on adult zebrafish. *Ecotoxicology and environmental safety*, 182, 109442.
- Miri, S., Saini, R., Davoodi, S. M., Pulicharla, R., Brar, S. K., & Magdoui, S. (2022). Biodegradation of microplastics: Better late than never. *Chemosphere*, 286, 131670.
- Murti, Y., & Agrawal, T. (2010). Marine derived pharmaceuticals-development of natural health products from marine biodiversity. *Int J ChemTech Res*, 2(4), 198-217.
- Organization for Economic Co-operation and Development (2021). Global plastics outlook policy scenarios to 2060. Available at: <https://read.oecd->

- ilibrary.org/view/?ref=1143_1143481-88j1bxuktr&title=Global-Plastics-Outlook-Policy-Scenarios-to-2060-Policy-Highlights (Accessed November 10, 2022).
- Othman, A. R., Hasan, H. A., Muhamad, M. H., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2021). Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3057-3073.
- Qin, M., Chen, C., Song, B., Shen, M., Cao, W., Yang, H., ... & Gong, J. (2021). A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: another ecological threat to soil environments?. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127816.
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano-and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Science of the Total Environment*, 757, 143872.
- Ricardo, I. A., Alberto, E. A., Júnior, A. H. S., Macuvele, D. L. P., Padoin, N., Soares, C., ... & Trovo, A. G. (2021). A critical review on microplastics, interaction with organic and inorganic pollutants, impacts and effectiveness of advanced oxidation processes applied for their removal from aqueous matrices. *Chemical Engineering Journal*, 424, 130282.
- Rossi, L., Pierigè, F., Bregalda, A., & Magnani, M. (2021). Preclinical developments of enzyme-loaded red blood cells. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 18(1), 43-54.
- Schwaminger, S. P., Fehn, S., Steegmüller, T., Rauwolf, S., Löwe, H., Pflüger-Grau, K., & Berensmeier, S. (2021). Immobilization of PETase enzymes on magnetic iron oxide nanoparticles for the decomposition of microplastic PET. *Nanoscale Advances*, 3(15), 4395-4399.
- Son, H. F., Cho, I. J., Joo, S., Seo, H., Sagong, H. Y., Choi, S. Y., ... & Kim, K. J. (2019). Rational protein engineering of thermo-stable PETase from *Ideonella sakaiensis* for highly efficient PET degradation. *Acs Catalysis*, 9(4), 3519-3526.
- Sun, C., Wang, Z., Zheng, H., Chen, L., & Li, F. (2021). Biodegradable and reusable sponge materials made from chitin for efficient removal of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126599.
- Tamargo, A., Molinero, N., Reinoso, J. J., Alcolea-Rodriguez, V., Portela, R., Bañares, M. A., ... & Moreno-Arribas, M. V. (2022). PET microplastics affect human gut microbiota communities during simulated gastrointestinal digestion, first evidence of plausible polymer biodegradation during human digestion. *Scientific Reports*, 12(1), 528.

- Ullah, A., Lee, G. J., Kim, H., Kwon, H. T., & Lim, S. I. (2023). Development and evaluation of bioinspired pH-responsive sericin–chitosan-based hydrogel for controlled colonic delivery of PETase: Harnessing PETase-triggered degradation of microplastics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124698.
- UNEP (United Nations Environment Programme) . (2021). Drowning in plastics – marine litter and plastic waste vital graphics. Available at: <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36964/VITGRAPH.pdf> (Accessed November 10, 2022).
- Wei, X. F., Bohlén, M., Lindblad, C., Hedenqvist, M., & Hakonen, A. (2021). Microplastics generated from a biodegradable plastic in freshwater and seawater. *Water Research*, 198, 117123.
- Wilhelm, K., Woor, S., Jackson, M., Albini, D., Young, N., Karamched, P., ... & de Kock, T. (2024). Microplastic pollution on historic facades: Hidden 'sink' or urban threat?. *Environmental Pollution*, 343, 123128.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., ... & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199.
- Zhang, T., Li, J., Yang, D., Wang, Z., Zhao, W., Fu, P., & Wang, H. (2024b). High-Efficiency Microplastic Removal in Water Treatment Based on Short Flow Control of Hydrocyclone: Mechanism and Performance. *Water Research*, 122492.
- Zhang, X., Zhai, Y., Wang, Z., Zhou, Y., Huang, C., Zhao, L., & Ma, C. (2024a). Effect of microplastic ingredient on the removal of microplastics by calcium alginate flocculation. *Chemical Engineering Journal*, 155701.
- Zhao, B., Rehati, P., Yang, Z., Cai, Z., Guo, C., & Li, Y. (2023). The potential toxicity of microplastics on human health. *Science of The Total Environment*, 168946.
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37-44.

BÖLÜM 5

SERALARDA KULLANILAN BAZI ISITMA SİSTEMLERİ

Doç. Dr. Turgay KABAY^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14387412>

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Erciş Meslek Yüksekokulu, Van, Türkiye

*Sorumlu Yazar: turgaykabay@gmail.com

Orcid no: <https://orcid.org/0000-0002-3239-0037>

GİRİŞ

Seralarda üretim yapılırken ısıtma sistemleri maliyetin en önemli kısımlarını oluşturmaktadır. Sera kurulurken arazi müsaitse kuzey güney yönünde olması eğer sera kurulan arazi istenilen yöne uyumlu değilse, güneye bakan cephede olması veya güneye eğimli olmasına dikkat edilir. Bunun dışında hakim rüzgar yönlerine, rüzgar kıranların bulundurulması sera ısısının korunumu için önemlidir. Serada ısıyı artırmanın diğer bir faktörü, güneş ışığının daha verimli bir şekilde alınacağı yarım daire veya gotik çatı şekli tercih edilmelidir. Sera örtü malzemelerinden, kırılmaz cam örtü malzemesi kullanılarak seranın ısı kaybını azaltmanın diğer bir faktörüdür. Bu gibi sera ısısını koruyacak ve arttıracak kriterlere dikkat ettikten sonra seranın ısıtılma şekline önem verilmelidir. Çünkü serada yapılan üretim süresinde bezen bitkinin gelişmesini sağlayacak sıcaklık derecesi olmadığı durumda ısıtma sistemleri devreye giriyor.

Serada ısıtma işlemi yapılırken, sera hacmi, içinde yetiştirilecek bitkilerin sıcaklık isteği, yetiştirme dönemi, örtü malzemesi ve iskelet cinsi, seranın bulunduğu yerdeki hava şartları, seradaki ısı kayıplarının durumlarına dikkat edilmelidir

Üreticiler, sera ısıtma sistemini tercih ederken kendi buldukları üretim bölgesindeki ısıtma enerjisinin ekonomik olanını tercih etmektedir. Örneğin jeotermal su kaynaklarına yakın bölgede yaşayanlar, jeotermal ısıdan faydalanırken, doğalgaz tesisinin olduğu yerlerde doğalgazdan, güneş enerjisinin kurulu bir bölgede sera yapacaksa güneş enerjisinden faydalanma gibi birçok örnek verebiliriz.

Genel olarak seralarda kullanılan ısıtma elemanları, soba ve kalorifer kazanlarında kullanılan odun, kömür, fosil ve organik yakacaklar (tezek (küçük ve büyük baş hayvan dışkılarının kurutulmuş hali), torf, sap, yaprak v.b.), doğal gaz, biyogaz, yosun yakıtları, petrol ürünleri, güneş enerjisi, jeotermal enerjilerle ısıtma şekilleri daha yaygın olarak tercih edilenlerdir. Seralarda kullanılan ısıtma şeklinde, ısılar bir ortamdan bir ortama, konveksiyonla, kondüksiyon ve radyasyon (ışınım) şeklinde olur.

Serada kullanılan ısıtma borularında veya diğer sera içinde kullanılan araç ve gereçler (saksılar, örtü malzemesi, iskelet, besin, ilaç ve gübre tankları, sisleme ve yağmurlama sistemleri, damla sulama sistemleri v.b.) bir birine değen bir akışkan ile bir katı cisim arasında gerçekleşen ısı iletimi konveksiyon

ile ısı iletimidir. Borulu (kalorifer, güneş enerjisi v.b.) ısıtma sistemi, bacalı (soba v.b.) veya bacasız (sıcak hava üfleyen klima v.b.) ısıtma tipi sistemi olarak örneklenebilir.

Serada kullanılan, örtü, iskelet ve serada bulunan gübreleme, ilaçlama ve besin solüsyonu tankları ile seradaki üretim amaçlı diğer elemanlar, kullanılan malzemeler ve ısıtma sistemlerindeki kullanılan malzemelerin iç katmanları arasında ve bu malzemelerde sıcaklık sera içinde sıcak olan taraftan soğuk olan tarafa titreşim yoluyla gitme olayı kondüksiyon ile ısı iletimidir. Taban ısıtma, toprak ısıtma ve özellikle topraksız tarımda saksı masalarını, katı ortam tank veya küvetlerini ısıtma şeklinde örnektir. (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).

Sera örtüsü, malç rengi ve çeşidi, iskelet malzemesi ile sera içinde bulunan ünitelerin rengi, cinsi, büyük ve küçük ebat olması radyasyonu (ısıyı ıslımayı) etkilemektedir. Çünkü renk ve ebatlar ısı ışınlarını soğurma, yansıtma ve içine çekme işleminde etkili olduğu için seradaki ısı kayıpları ve ısınma olayına da etki etmektedir. Siyah renkli cisimle ısıyı soğurma ve yaymada daha etkilidir. Siyah dışındaki renkler koyudan açık renklere gidildikçe, hem soğurma hem yansıma ve de içinden geçirme işlemi daha da fazladır. Bu nedenle siyah renkli maddeler daha fazla ısı yaymaktadır. Seralarda gece doğal ısınma olmadığı için bu gibi siyah materyallerin ısı korunumunda önemli rol oynamaktadır (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).

Seraların Sobalarla Isıtılması

Seralarda soba ile ısıtma daha çok don tehlikesi olan aşırı soğuk zamanlarda kullanılan bir ısıtma şeklidir. Sobada kullanılan, yakıtlar ise o bölgede kolay ucuz ve ekonomik olan tercih edilmelidir. Odun, kömür, talaş, fuel oil, mazot, lpg, gaz ve yanık yağ sobaları kullanılır.

Bu yakıtlarla sobalarda kullanılması iş gücü, harcanan zaman, seralardaki ısının homojen yayılmaması gibi nedenlerden dolayı, küçük seralarda daha çok tercih edilmektedir. Sobalar kurulurken, konveksiyon yoluyla ısı iletimi olduğu için, bitki dikim yerlerine, sera örtü ve iskelet

malzemelerine olan mesafeler korunmalıdır (Şekil 1-2) (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).



Şekil 1 Büyük seralarda kullanılan soba (Anonim 1, 2024)



Şekil 2 Küçük seralarda kullanılan soba (Anonim 2, 2024)

Seraların Kaloriferle Isıtılması

Kalorifer sistemlerinin sera içine kurulması masraflı olduğu için iki dönüm den fazla olan seralarda kullanılması daha uygundur. Bu ısıtma sistemi, sıcak su ile ısıtma ve buharla ısıtma olmak üzere ikiye ayrılır (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).



Şekil 3 (Anonim 7, 2024)

Sıcak su ile ısıtma

Sıcak su ile ısıtma sisteminde kalorifer kazanları önem ar etmektedir. Bu kazanlar kömür, fuel oil, doğalgaz v.b. gibi yakıtlardan kullanılan yakıt türüne uyumlu olması gerekir. Su sıcaklığı 80-100 °C sıcaklığındaki suyun borularda yavaş bir şekilde akışını sağlayacak sistemdir. Jeotermal su kaynaklarının seraya taşınarak yapılan ısıtma sistemidir. Sera' ya ulaşan jeotermal suyun akışı yeterli değilse bir depoda dinlendirildikten sonra hidrofor sistemi ile sera ısıtmasında kullanılır. Genelde jeotermal su sıcaklığı kaynak noktasında en az 90 °C' dir. Bu su sıcaklığı sera ısıtılması için yeterli bir sıcaklıktır. Sıcak su boruları sera tabanı, yan duvarlara ve tavana döşenen borularda sıcak su ile ısıtılma şeklidir. Kar yağışının fazla olduğu bölgelerde çatı olukları ile çatı iskeletlerinin alt kısmında sıcak su boruları geçirilerek yapılmalıdır (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).

Buharla ısıtma sistemi

Bu sistem pahalı olan bir sistemdir. Yoğuşan suyun geri dönüş borusuna kolaylıkla taşınacak sistemlerin kurularak, buharın kolaylıkla taşınmasını sağlayan borular döşenerek, gerekirse az bir meyil verilmelidir (Günay 1980; Sevgican 1999; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan, 2005; Özdemir ve Bahadır 2007; Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).

Sıcak hava sistemi kullanılarak yapılan ısıtma

Serada kullanılan sıcak hava veren konvektörlerin yerleştirilmesiyle yapılır. Bu sıcak hava veren konvektörler genellikle sera tavanına ve sera yan duvarlarına kurularak sağlanır. Serada kurulan konvektörlerin sıcak hava verme yönleri bitkilerden uzakta olmalıdır. Bitki üzerine doğrudan gelen sıcak havaların bitkiye vereceği zararlardan dolayı kaçınılmalıdır (Günay 1980; Sevgican 1999; Özdemir ve Bahadır 2007; Eltez ve Eltez 2005; Kürklü ve Çağlayan 2005, Yağcıoğlu 2005; Kendirli ve Çakmak 2010; Topcuoğlu 2013; Baytorun ve Gügercin 2015).

Elektrikli ısıtma

Elektrikli ısıtmada doğrudan elektrikli ısıtıcıların (elektrikli katalitik) kullanılmasıyla yapılan ısıtıcıdır. Bunu dışında elektrikle çalışan fanlar, klimalar ve sıcak hava üfleyen konvektörlerde bu grup içine girmektedir.

Güneş enerjisiyle ısıtma

Güneş enerjisi panelleri kullanılarak yapılan ısıtma şeklidir. Bu ısıtma şeklinde, güneş panellerine gelen güneş enerjisini elektrik ve ısı enerjisine dönüştürerek yapılan ısıtma şeklidir. Isıtılan sıcak suyunu veya buharın, borularla seraya gezdirilip kalorifer sistemi şeklinde yapılır. Bu sıcak borular seranın, tabanına, yan duvarlarına ve tavanlarına döşenerek seranın ısıtılması sağlanır.

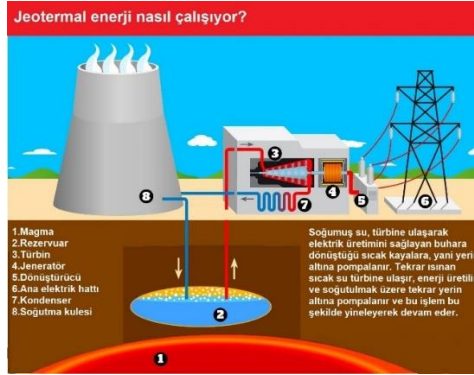
Jeotermal enerji kullanılarak yapılan ısıtma

Jeotermal enerjilerle ısıtmada, yeraltında çıkan kaynak sıcak suların kullanılması ile yapılan ısıtma şeklidir. Bu sularla ısıtmada özellikle jeotermal alanlarına yakın yerlerde kurularak yapılır. Bu şekildeki ısıtmada kaynaktan çıkan suyun eğimli ortamlarla serada döşenen borularla gezdirilmesi şeklinde olur. Suyun dolaşma hızını arttırmak için hidrofor kullanılarak yapılır.

Serada Kullanılan Bazı Isıtma Sistemleri



Şekil 4 Kömürlü kalorifer kazanı (Anonim 3)



Şekil 5 Jeotermal enerji çalışma sisitemi (Anonim 4, 2024)



Şekil 6 Doğalgaz çalışma kazanı (Anonim 5, 2024)



Şekil 7 Güneş enerjisi çalışma sistemi (Anonim 6, 2024)

SONUÇ

Sera üretiminde, serada üretilen bitkinin istene sıcaklık derelerini sağlamak amacıyla yapılır. Bu sıcaklık ihtiyacının kullanılmasında kullanılan ısı sistemlerinin ekonomik olması ve kolay temin edilmesi masrafı azaltmada önemlidir.

Sera ısıtılma yöntemi seçilirken seranın boyu, seranın iskelet ve örtü malzemesi, sera kurulan bölgenin iklim değerleri ve seranın kurulacağı yerdeki doğal ısıtma ünitelerine yakınlık. Sera kurulan yerde örneğin, jeotermal enerji, güneş enerjisi sistemi, doğalgaz boruları gibi ısıtma da kullanılacak üniteler

varsa, bu ve buna benzer ısıtma kaynakları ısıtma masraflarını azalma yönünden çok fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonim 1 <https://www.serasobasi.com/>
- Anonim 2 <https://www.manisadagudem.com/ekonomi/cilek-seralarinda-don-tehlikesine-karsi-sobali-onlem-h37234.html>
- Anonim 3 <https://www.cihangirmekanic.com/sera-kalorifer-kazan-sistemleri>
- Anonim 4 <https://www.seratrend.com/blog/icerik/jeotermal-seracilik>
- Anonim 5 <https://www.emineltarim.com/tr/sera-isitma-ve-sogutma-muhendisligi/sera-isitma-sistemleri.html>
- Anonim 6 <https://www.tesisat.org/kalorifer-kazanini-guvenli-ve-verimlik-kullanmak.html>
- Anonim 7 <https://www.emineltarim.com/tr/sera-isitma-ve-sogutma-muhendisligi/sera-isitma-sistemleri.html>
- Baytorun, A. N., & Gügercin, Ö. (2015). Seralarda enerji verimliliğinin artırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 125-136.
- Eltez, S., & Eltez, R. Z. (2005). Bergama ve Dikili ilçeleri (İzmir) sera potansiyeli ve seracılık faaliyetleri üzerine bir araştırma. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 42(2), 203-214.
- Günay A, 1980. Serler. Ankara Üniversitesi. Ziraat Fakültesi yayınları Ankara.
- Kendirli, B., & Çakmak, B. (2010). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sera Isıtmasında Kullanımı. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 2(1), 95-103.
- Kürklü, A., & Çağlayan, N. (2005). Sera otomasyon sistemlerinin geliştirilmesine yönelik bir çalışma. Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture, 18(1), 25-34.
- Özdemir, M. A., & Bahadır, M. (2007). Türkiye’de Önemli Bir Seracılık Alanı: Yalova İli. Coğrafi Bilimler Dergisi, 5(1), 17-36
- Sevgican, A. 1999. Örtüaltı Sebzeçiliği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları İzmir.
- Topçuoğlu, K. (2013). Muğla yöresi yüksek tünel tipi örtüaltı yapısının statik analizi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, (2), 133-139.
- Yağcıoğlu A. 2005 Sera Mekanizasyonu. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları İzmir.

BÖLÜM 6

TARIMDA PERMÜTASYONEL ÇOK DEĞİŞKENLİ VARYANS ANALİZİ (PERMANOVA) KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Rabia ALBAYRAK DELİALİOĞLU¹
Doç. Dr. Yasin ALTAY^{2,3}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14388617>

¹Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Biyometri ve Genetik Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye. Rabia.Albayrak@ankara.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-1969-4319

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Biyometri ve Genetik Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye.

³ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Tarımsal Çalışmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi, Eskişehir, Türkiye. yaltay@ogu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-4049-8301

GİRİŞ

Tarımda verilerin değerlendirilmesinde çoğu zaman varyans analizi tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü çalışılan değişkenin temelinde yatan karmaşık sistemi anlamak için bu değişken bakımından gözlenen varyasyonu unsurlarına ayırmak oldukça önemlidir. Bu amaçla en sık kullanılan yöntem tek değişkenli varyans analizidir. Bu yöntem ile üzerinde çalışılan faktörlerin seviye ortalamaları arasındaki farklar (etkiler) ve etkileşimleri (interaksiyonları) değerlendirilebilir. Ancak araştırmacı yürüttüğü denemedeki faktörün/faktörlerin birden fazla özellik (değişken) üzerine etkisini de merak edebilir. Bu amaçla ise Çok Değişkenli Varyans Analizi tekniği (MANOVA - Multivariate Analysis of Variance) kullanılmaktadır. Ancak Çok Değişkenli Varyans Analizi (ÇDVA) yöntemi ile verilerin analiz edilebilmesi için birçok varsayımın yerine gelmiş olması gerekir. Bu varsayımlar kısaca 5 madde halinde özetlenebilir.

- Deney üniteleri popülasyondan tamamen tesadüfen seçilmeli ve gözlem değerleri birbirinden bağımsız olmalıdır.
- Çalışmada elde edilen veriler sürekli veri olmalıdır.
- Bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenin her seviyesinde çok değişkenli normal dağılım göstermelidir.
- Deney ünitesi sayısı değişken sayısından fazla olmalıdır.
- Her grupta popülasyonun varyans-kovaryans matrisi homojen olmalıdır (Tabachnick ve Fidell 2020).

Çoğu çalışmada bu varsayımlar yerine gelmez. Özellikle de üzerinde çalışılan değişken sayısının deney ünitesi sayısından daha fazla olması durumunda varyans-kovaryans matrisinin determinatı alınamaması (singular matris) gerekliliği ÇDVA tekniğinin kullanılması zorlaştırmaktadır. Bu ve benzeri durumlarda araştırmacının elde ettiği verileri analiz edebilmesi için Anderson (2001a) tarafından MANOVA tekniği genişletilerek “**PER**mutational **M**ultivariate **A**nalysis **O**f **V**ariance” (PERMANOVA) başlığı altında literatüre kazandırılmıştır.

PERMANOVA, “Permutational-MANOVA” ifadesinin kısaltmasıdır. PERMANOVA özetle; belirli bir varyans analizi yöntemine göre belirlenen bir farklılık ölçüsü uzayındaki çok değişkenli varyasyonun, uygun permütasyon tekniklerinin kullanılmasıyla elde edilen p-değerlerinin de verildiği geometrik bölümlenmesi olarak tanımlanır. PERMANOVA yöntemi yarı parametrik bir

yöntem olup hem benzerliklerin analizi yönteminde (ANOSIM) olduğu gibi parametrik olmayan yapıyı korur hem de varyans analizinde olduğu gibi klasik bir bölümlenme gerçekleştirir. Bu sebeple karmaşık deneysel tasarımlarda çok değişkenli verilerin değerlendirilmesinde ve varyansın unsurlarına ayrılmasında, yanıt değişkeni ne olursa olsun (bağımlı değişken sayısı deney ünitesi sayısından fazla olduğunda, veriler normal dağılım göstermediğinde, gözlem değerleri arasında çok fazla sıfır olduğunda veya veriler sıralı/nitel vb. yapıda olduğunda) PERMANOVA yönteminden yararlanılabilir (Anderson, 2014).

Bu testin en önemli avantajlarından biri de araştırmacının istediği uzaklık/benzemezlik ölçüsünü kullanabilmesi ve çok faktörlü bir ANOVA modelinde varyasyonu doğrudan bireysel terimler arasında bölebilesidir. PERMANOVA testi için yapılacak hipotez kontrolünde 4 adım dikkate alınır (Anderson, 2001a):

1. Üzerinde çalışılan değişkenin yapısı dikkate alındığında verilere uygulanacak uygun bir dönüşüm/standardizasyon yöntemi belirlenir.
2. Analizde kullanılacak uzaklık ölçütüne (Öklid, Bray-Curtis vb.) karar verilir.
3. Gözlem değerleri arasındaki benzerlik modellerini görselleştirmek için sıralama (ve/veya kümeleme) yapılır.
4. Grupların çok değişkenli etkilerine ilişkin kesin bir olasılık elde etmek amacıyla gruplar arasındaki farklılıklar için parametrik olmayan çok değişkenli bir test yapılır.

Bu çalışmada, çok değişkenli veri setlerinde PERMANOVA yönteminin uygulanması, hipotetik veri setleri kullanılarak tek yönlü ve faktöriyel deneme tasarımları için örnek genişliklerinin dengeli olduğu durumlar ele alınarak anlatılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. PERMANOVA Yönteminin Varsayımları

PERMANOVA, orijinal değişkenlerin veya bunlardan hesaplanan uzaklıkların dağılımları ile ilgili belirgin bir varsayımda bulunmaz. Diğer bir ifade ile dağılım ve varyansların homojenliğine ilişkin herhangi bir varsayım gerektirmez. Bunun yanı sıra değişkenler arasındaki ilişkileri (korelasyonları) dikkate almadığı için çoklu bağlantıya duyarsız olup gözlem değerleri arasında

çok sayıda sıfır olmasından etkilenmez. Anderson'a (2001a) göre, PERMANOVA'nın tek varsayımı, kontrol hipotezinin doğru olduğu varsayımı altında veri kümesindeki nesnelere değiştirilebilir olmasıdır. Aslında değişebilirlik kavramı örtük olarak bağımsızlık ve benzer çok değişkenli dağılıma sahip olma kavramlarını da kapsamaktadır. Çünkü değiştirilebilir varsayımının sağlanması ile dolaylı olarak bağımsızlık ve benzer çok değişkenli dağılıma sahip olma varsayımları da yerine getirilmiş olur. Eğer denemede çalışılan gruplardaki bireyler aynı ise bu durumda PERMANOVA tekniğinin temeli olan bireyleri rasgele gruplara atama yapılması doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bu nedenle PERMANOVA yöntemi kullanılacak ise gruplardaki gözlemlerin birbirinden bağımsız olması gerekmektedir. Buna karşılık, çok değişkenli analiz yaparken aynı deney ünitelerinden ölçülen değişkenlerin birbirinden bağımsız olması gerekliliği bulunmamaktadır (Anderson, 2001a ve 2005; McArdle ve Anderson, 2001).

PERMANOVA yöntemi, tekerrür adetlerinin eşit olduğu dengeli deneme düzenlerinde varyansların heterojenliğine karşı oldukça dayanıklıdır. Ancak dengesiz tasarımlar için de PERMANOVA yöntemi uygulanabilir (McArdle ve Anderson, 2001). PERMANOVA yönteminin uygulanabilmesi için grup bazında varyansların homojenliği ile ilgili açık bir varsayım yoktur ancak yöntem gruplar arası varyasyonda gözlenen farklılıklara karşı duyarlıdır. Bu nedenle, yapılan PERMANOVA testi sonunda gruplar arasında önemli bir fark tespit edilirse bu durumun; konumlardaki farklılıklardan, varyasyondaki farklılıklardan veya ikisinin birleşiminden kaynaklanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle belki de en iyi yaklaşım, ikili karşılaştırmalar dahil olmak üzere homojenlik için ayrı bir test yapmak (örneğin, PERMDISP), grup içi ve gruplar arası uzaklıkları ve ilgili MDS grafiklerini incelemektir. Böylece herhangi iki grup arasındaki farklılığın doğasının belirlenmesi ve bu farklılığın konumlardan, yayılımdan ya da ikisinden birden kaynaklanıp kaynaklanmadığının tespiti mümkün olacaktır.

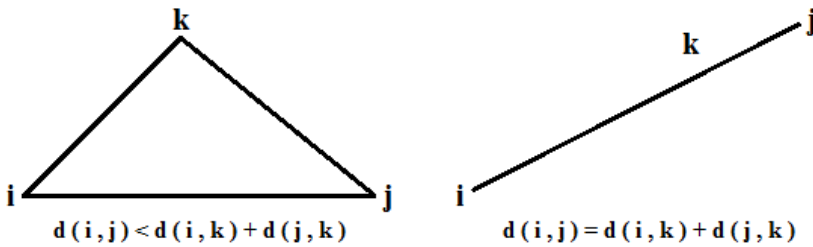
Tek faktörlü denemelerde parametrik olmayan MANOVA (NPMANOVA) olarak da adlandırabileceğimiz PERMANOVA testi, faktör sayısı 1'den fazla olduğunda parametrik olmayan bir yöntem olmaktan ziyade semi-parametrik bir çerçeveden ele alınmalıdır. Çünkü her ne kadar permütasyon yöntemi kullanılsa da parametre tahmininde, interaksiyon terimine ait hipotez kontrolü yapılabilmesi için belirli bir modele uygunluk

gerekir. Buna rağmen yine de varsayımlarının azlığı ve esnek bir kullanıma sahip olması nedeniyle parametrik olmayan yaklaşıma dayalı özelliklerini taşımaktadır. Ayrıca faktöriyel deneme düzenlerinde bile dağılımdan bağımsız yapısını korumaktadır (Anderson, 2005).

2.2. PERMANOVA Testinde Kullanılan Uzaklık Ölçümleri

Elde edilen uzaklık matrisi doğrudan modellendiği için, PERMANOVA yaparken kullanılacak uzaklık ölçütünün seçimi oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılabilir birçok benzemezlik ölçüsü bulunmaktadır. Benzemezlik ölçütlerinin ($d(i, j)$: i ve j noktaları arasındaki mesafe) metrik olabilmesi için aşağıdaki dört özelliği taşıması gerekir (Deza ve Deza 2009).

- 1. Pozitiflik ($i \neq j$ ise $d(i, j) > 0$):** i ve j aynı olmadığı sürece aralarındaki uzaklık her zaman pozitifdir.
- 2. Simetri ($i = j$ ise $d(i, j) = d(j, i)$):** i ve j noktaları arasındaki mesafe her zaman j ve i noktaları arasındaki mesafeye eşittir.
- 3. Özdeşlik ($i = j$ ise $d(i, j) = 0$ 'dır):** i ve j noktaları özdeş ise aralarındaki mesafe her zaman sıfırdır.
- 4. Üçgen Eşitsizliği ($d(i, j) \leq d(i, k) + d(j, k)$):** i ve j noktaları arasındaki mesafe, i ve j noktalarının k noktasına olan mesafelerinin toplamına eşit ya da ondan küçük olmak zorundadır. Üçgen eşitsizliği kısaca Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Hesaplanan benzemezlik değerlerinde üçgen eşitsizliğinin gösterimi

Eğer hesaplanan benzemezlik değerleri bu koşullardan sadece ilk üçünü taşıyorsa metrik değil yarı-metrik olarak değerlendirilir. PERMANOVA testi yaparken kullanılabilir benzemezlik ölçütleri: Öklid uzaklığı, Bray-Curtis farklılığı, Bray-Curtis farklılığının karekökü, Orloci's Chord uzaklığı, Ki-kare uzaklığı, Hellinger uzaklığı, Gower farklılığı, Gower benzerlik ölçüsü (çift

sıfırlar çıkarıldığında), Canberra uzaklığı, Canberra uzaklığının karekökü, CY farklılığı, Kulczynski farklılığı, McArdle-Gower farklılığı, Manhattan (City-Block) uzaklığı, Jaccard farklılığı, Genetik uzaklık vb. şeklinde sıralanabilir (Bray ve Curtis 1957, Clarke 1993, Legendre ve Gallagher 2001, Anderson 2005). Bu ölçülerden uygulamada sıklıkla kullanılan birkaçı kısaca açıklanmıştır.

Öklid uzaklığı: Öklid uzaklığı en sık kullanılan metrik uzaklık ölçülerinden biri olup Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanır (Alpar 2013).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

x_{ik} : i. gözlemin k. değişkendeki değeri

x_{jk} : j. gözlemin k. değişkendeki değeri

p : değişken sayısı

Öklid uzaklığı, daha büyük farklılıklara daha fazla vurgu yapma özelliğine sahiptir. Bu nedenle birimleri birbirinden farklı olan veri setlerinde hesaplanmadan önce verilerin standardize edilmesi gerekmektedir.

Bray-Curtis Farklılık Ölçüsü: Bray-Curtis farklılık ölçüsü, farklı lokasyonlar arasındaki tür bazında farklılığı belirlemek amacıyla özellikle ekoloji ve biyolojide yaygın olarak kullanılır. Üçgen eşitsizliği koşulunu sağlamadığı için yarı-metrik bir farklılık ölçüsüdür. Bray-Curtis yöntemi ile i ve j örnekleri arasındaki uzaklık Eşitlik (2)'de verildiği gibi hesaplanır (Bray ve Curtis 1957; Faith vd. 1987; Clarke 1993; Hammer 1999).

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|}{\sum_{k=1}^p (x_{ik} + x_{jk})} \quad (2)$$

x_{ik} : i. gözlemin k. değişkendeki değeri

x_{jk} : j. gözlemin k. değişkendeki değeri

p : değişken sayısı

Bu uzaklık ölçüsü ($n_{ik}=n_{jk}$) ile 1 (örnekler tamamen ayrık ise) arasında değer alabilir. Uygulamada Bray-Curtis farklılık ölçüsü genellikle 100 ile çarpılır ve yüzde olarak yorumlanır. İstenirse Eşitlik (2)'de hesaplanan değer 1'den çıkarılarak Bray-Curtis benzerlik ölçüsü de hesaplanabilir. Bu değer 100 ile çarpıldığında ise Bray-Curtis indeksi adı verilen bir benzerlik ölçüsü elde edilir.

Bray-Curtis farklılığı, üçgen eşitsizliği kuralını ihlal etse de anlaşılması oldukça kolay bir uzaklık ölçüsüdür. Mesela '0' değeri; deney ünitelerinin tamamen aynı olduğu anlamına gelirken '1' değeri; iki deney ünitesi arasında gözlemlenebilecek en büyük farkı ifade eder.

Manhattan (City-Blok) uzaklık ölçüsü: Bireylerin, değişkenleri arasındaki farkların mutlak değerlerinin toplamına eşittir. Üçgen eşitsizliği koşulunu sağladığı için metrik bir uzaklık ölçüsüdür. City-Blok uzaklığı $i, j = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere Eşitlik (3)'te verildiği gibi hesaplanır.

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}| \quad (3)$$

x_{ik} : i. gözlemin k. değişkendeki değeri

x_{jk} : j. gözlemin k. değişkendeki değeri

p : değişken sayısı

Gower Farklılık Ölçüsü: Kalitatif değişkenlerin olduğu veri setleri için benzerlik ölçüsü Gower (1971) tarafından Eşitlik (4)'de olduğu gibi tanımlanmıştır.

$$s_{ijk} = 1 - \frac{|x_{ik} - x_{jk}|}{R_k} \quad (4)$$

i. ve j. bireyler k. değişken bakımından aynı değere sahipse $s_{ijk}=1$, farklı ise $s_{ijk}=0$ olarak alınır. R_k ise veri setinin k. değişken bakımından değişim genişliği olarak tanımlanır. (Gower 1971).

Gower Benzerlik Ölçüsü (çift sıfırlar çıkarıldığında): Bazı değişkenleri sürekli, bazı değişkenleri kategorik olan veri setlerinde hesaplanan Gower genel benzerlik ölçüsü Eşitlik (5)'deki gibi elde edilir (Gower 1971).

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p w_{ijk} S_{ijk}}{\sum_{k=1}^p w_{ijk}} \quad (5)$$

s_{ijk} ; k. değişken bakımından i. ve j. bireyler arasındaki benzerlik ölçüsüdür. İki kategorili değişkenlerde s_{ijk} ; üzerinde çalışılan değişken her iki bireyde de 1 değerini almışsa (yani her iki bireyde de söz konusu değişken gözleniyor ise) '1', diğer durumlarda (yani söz konusu değişken bireylerden sadece birinde gözleniyor veya her ikisinde de gözlenmiyor ise) '0' değerini alır. w_{ijk} ise; i. ve j. bireyler ikisi veya herhangi biri k. değişken bakımından 1/+ değerini aldığı anda '1', diğer durumlarda (her iki bireyde de üzerinde çalışılan değişken gözlenmiyor yani 0/- değerini alıyorsa) ise '0' olarak alınır (Gower 1971).

2.3. PERMANOVA Testi için Hesaplanan Test İstatistiği (Sahte F-değeri)

PERMANOVA testinin diğer parametrik olmayan yöntemlerden farklı olarak en önemli avantajı interaksyon için hipotez kontrolü yapılabilir olmasıdır. Ayrıca sıralamaya dayalı yöntemlerdence uzaklık değerlerini dikkate alan PERMANOVA yöntemi araştırmacıya çok daha fazla bilgi sağlayacaktır.

Test istatistiğini hesaplamaya geçmeden önce genel varyansı unsurlarına ayırmak için hangi uzaklık ölçüsünün kullanılacağına karar verilmeli ve bu uzaklık ölçüsü kullanılarak bir uzaklık matrisi oluşturulmalıdır. Çünkü test istatistiği hesaplanırken bu uzaklık değerleri kullanılır. Hesaplanan test istatistiği, ANOVA'daki F-değerine benzer şekilde elde edilir ve bu nedenle de sahte F-istatistiği adını alır. Denemede tek değişken olduğu durumlarda Öklid uzaklığı kullanılarak PERMANOVA testi yapılırsa ANOVA ile eşdeğer sonuçlar ve aynı P-değerleri elde edilir (Anderson 2001).

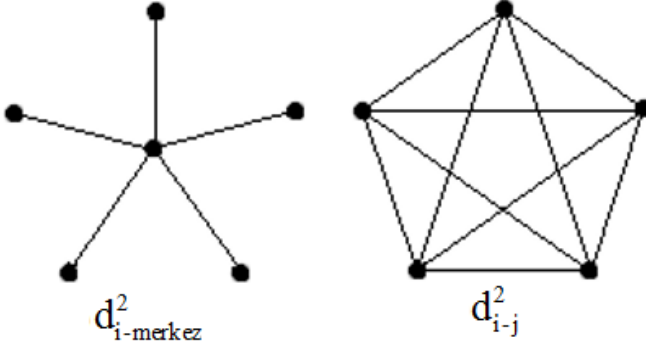
2.4. Çok Değişkenli Varyasyonun Unsurlarına Bölünmesi ve PERMANOVA Yöntemiyle Test İstatistiğinin Hesaplanması

Tek değişkenli ANOVA için geçerli olan $GKT=GAKT+GİKT$ (GKT: Genel Kareler Toplamı, GAKT: Gruplar Arası Kareler Toplamı, GİKT: Gruplar İçi Kareler Toplamı) eşitliği Öklid uzayında MANOVA testi için de geçerlidir. Ancak Öklid uzaklığı özellikle tür kompozisyonuna vurgu yapılamaması nedeniyle, ekolojik tür bolluğu verilerinin analizinde uygun değildir. Bu bölümlere Öklid uzaklıkları için tamamen geçerli olsa da Bray-Curtis (Bray ve Curtis, 1957), Kulczynski (Faith ve ark.. 1987), Jaccard (Anderson ve ark. 2006) gibi benzemezlik ölçümlerinde geçerli değildir. Her ne kadar belirli bir şekilde dönüştürülmüş verilere Öklid uzaklıkları uygulanarak bazı benzemezlik ölçülerine dayalı analizler yapılabilir de PERMANOVA testinin araştırmacının istediği herhangi bir benzemezlik ölçüsü kullanılarak yapılabilmesi amaçlanmıştır. PERMANOVA testinde herhangi bir doğrusal modeldeki herhangi bir terime ait kareler toplamı doğrudan uzaklık matrisi kullanılarak hesaplanabilir. Çünkü simetrik ve idempotent bir Y matrisinin $p \times p$ boyutlu iç çarpım matrisinden ($Y'Y$) elde edilen bilgi, aynı zamanda $n \times n$ boyutlu dış çarpım matrisinden (YY') de elde edilebilir. Ayrıca herhangi bir uzaklık matrisi kullanılarak bir dış çarpım matrisi (YY') elde etmek de mümkündür. Böylece PERMANOVA testi Bray-Curtis gibi yarı-metrik benzemezlik ölçüleri içeren herhangi bir uzaklık ölçüsüyle de yapılabilir.

Ekolojistler tarafından tercih edilen birçok benzemezlik ölçüsünde, merkezlere olan uzaklıklar kolayca hesaplanamaz. Çünkü bu ölçüler tarafından tanımlanan uzaydaki örneğin ağırlık merkezi, tüm değişkenler için oluşturulan aritmetik ortalamaların vektörü ile aynı değildir. Bu nedenle bunun yerine Huygens teoremi olarak bilinen teorem ele alınır. Bu teoreme göre: bireylerin merkeze olan uzaklıklarının karelerinin toplamı, noktalar arası uzaklıklarının karelerinin toplamının nokta sayısına bölümüne eşittir. PERMANOVA testinin yapılabilmesi için gerekli olan bu teorem Eşitlik (6) ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu yaklaşımı kullanmak için benzemezlik ölçütünün sahip olması gereken özellikler sadece; negatif olmama, simetrik olma ve tüm öz benzemezliklerin sıfır olmasıdır. Kullanılan benzemezlik ölçülerinin büyük bir kısmı bu üç özelliğe sahiptir.

$$\sum d_{i\text{-merkez}}^2 = \frac{1}{N} \sum d_{i-j}^2 \quad (6)$$

N: Toplam birey adedinin ikili kombinasyonu

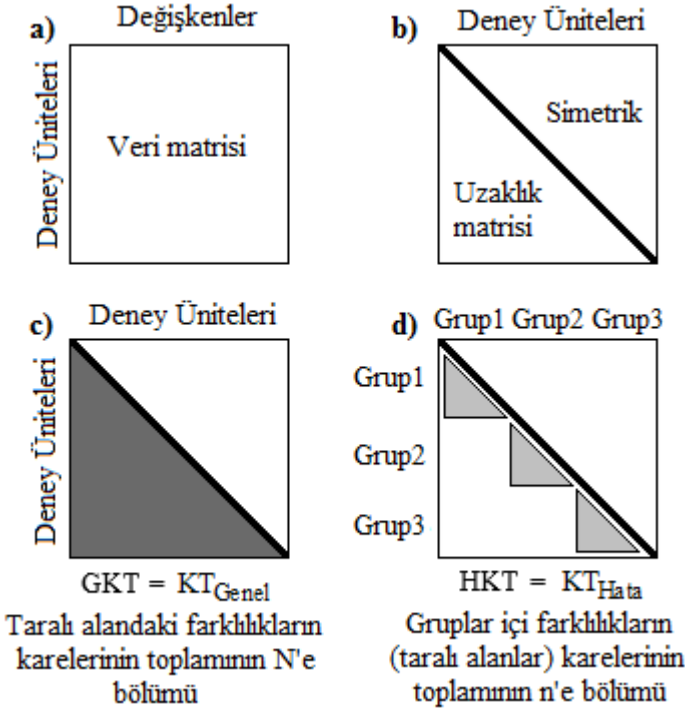


Şekil 2. Eşitlik (6)'da verilen ifadenin geometrik gösterimi

Bundan sonra uzaklık matrisinden yararlanarak genel varyasyonun unsurlarına ayrılması aşamasına geçilebilir.

2.5. PERMANOVA Yöntemi ile Tek Yönlü Çok Değişkenli Varyans Analizinin Yapılışı

Tek yönlü çok değişkenli bir deneme için hesaplanan benzemezlilik/uzaklık matrisi kullanılarak yapılacak PERMANOVA testi için kareler toplamlarının nasıl hesaplanacağı Şekil 3'de özetlenmiştir. Burada n; her bir gruptaki tekerrür sayısı ve k; grup sayısı olmak üzere toplam birey sayısı yani N, $N=k*n$ şeklinde hesaplanır.



Şekil 3. Tek yönlü çok değişkenli PERMANOVA testinde uzaklık matrisinden kareler toplamlarının hesaplanmasının şematik gösterimi

d_{ij} : i. ve j. bireyler arasındaki uzaklık olmak üzere, Genel Kareler Toplamı, tüm bireylerin birbirlerine olan farklılık değerlerinin karelerinin toplamının N'e bölümüne eşit olup Eşitlik (7)'de verildiği gibi hesaplanır (Şekil 3.a).

$$GKT = KT_{Genel} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \quad (7)$$

Gruplardaki tekerrür sayıları eşit olduğunda yani dengeli denemelerde Gruplar İçi yani Hata Kareler Toplamı Eşitlik (8)'de verildiği gibi hesaplanır (Şekil 3.d). Burada her bir gruptaki tekerrür adedi 'n' ile gösterilmiştir.

$$HKT = KT_{Hata} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

Tekerrür sayılarının eşit olmadığı denemelerde ise Eşitlik (9) kullanılarak Hata Kareler Toplamı hesaplanır. Burada n_g : üzerinde çalışılan gruptaki tekerrür adedidir.

$$HKT = KT_{Hata} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{d_{ij}^2 \varepsilon_{ij}}{n_g} \quad (9)$$

Eşitlik (8) ve (9)'daki ε_{ij} terimi: i. ve j. bireyler aynı gruptaysa '1' farklı gruplardaysa '0' değerini alır. Gruplar Arası Kareler Toplamı ise $GKT=GAKT+HKT$ ifadesinden yararlanılarak Eşitlik (10)'daki gibi hesaplanır.

$$GAKT = KT_{Grup} = GKT - HKT \quad (10)$$

Hipotez kontrolünde kullanılacak sahte F-istatistiği ise KO_{Grup} : Gruplar Arası Kareler Ortalaması ve KO_{Hata} : Hata Kareler Ortalaması olmak üzere Eşitlik (11)'de görüldüğü üzere klasik varyans analizinde olduğu gibi hesaplanır.

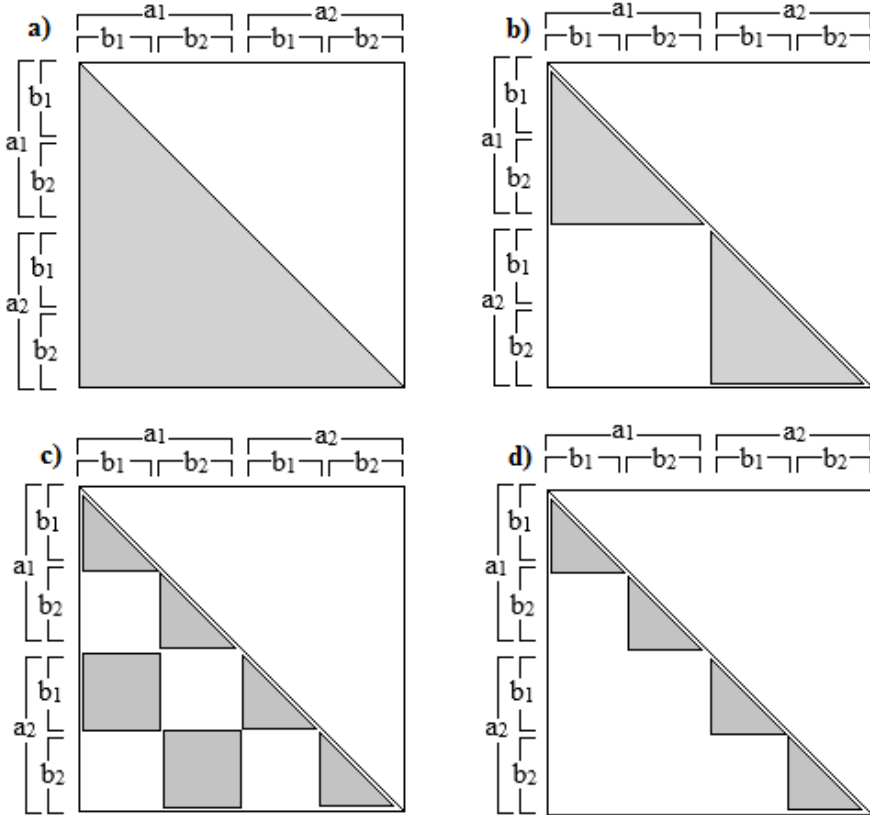
$$Sahte - F = \frac{KO_{Grup}}{KO_{Hata}} \quad (11)$$

Ancak klasik varyans analizinden farklı olarak p-değeri Fisher'in F-dağılımından yararlanılarak bulunmaz. Çünkü uzaklık ölçülerinden yararlanarak hesaplanan bu F-değeri F-dağılımı göstermez. Bu nedenle sahte F-istatistiği için p-değerinin hesaplanmasında permütasyon yönteminden yararlanır. Sahte-F istatistiği için p-değerinin hesaplanması konusu 2.7. başlığı altında ele alınmıştır.

2.6. PERMANOVA Yöntemi ile İki Yönlü Çok Değişkenli Varyans Analizinin Yapılışı

İki faktörlü çok değişkenli varyans analizi için benzemezlik/uzaklık matrisinden yararlanılarak yapılan PERMANOVA testinde kareler toplamalarının nasıl hesaplanacağı Şekil 4'de özetlenmiştir. Burada n; alt gruplardaki tekerrür sayısı, a; A faktörünün seviye sayısı ve b; B faktörünün seviye sayısı olup dengeli denemelerde $N=a*b*n$ şeklindedir. Faktöriyel

denemelerde faktör sayısı arttıkça permütasyon yöntemi ile p-değerinin hesaplanması zorlaşmakta ve daha uzun zaman almaktadır (Pasin vd. 2016).



Şekil 4. İki yönlü çok değişkenli PERMANOVA testinde uzaklık matrisinden yararlanarak kareler toplamlarının hesaplanmasının şematik gösterimi (a) Farklılık matrisinin alt diyagonal elemanlarının kareler toplamı yani Genel Kareler Toplamı (KT_{Genel}), (b) A faktörüne ait kareler toplamı (KT_A), (c) B faktörüne ait kareler toplamı (KT_B), (d) Hata Kareler Toplamı (KT_{Hata})

Şekil 4'te de görüldüğü gibi iki yönlü çok değişkenli PERMANOVA testinde de genel kareler toplamı aynı Eşitlik (8)'deki gibi hesaplanır.

A faktörünün seviyeleri içindeki uzaklıkların karelerinin toplamının ' $b \cdot n$ 'e bölümü olan $KT_{W(A)}$ ve A faktörü için kareler toplamı Eşitlik (12) ve (13)'de verilmiştir.

$$KT_{W(A)} = \frac{1}{b \cdot n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \varepsilon_{ij(A)} \quad (12)$$

$$KT_A = KT_{Genel} - KT_{W(A)} \quad (13)$$

Eşitlik (12)'de $\varepsilon_{ij(A)}$; i. ve j. bireyler A faktörünün aynı seviyesinde ise '1' farklı seviyelerinde ise '0' değerini alır.

B faktörünün seviyeleri içindeki uzaklıkların karelerinin toplamının 'a*n' e bölümü olan $KT_{W(B)}$ ve B faktörü için kareler toplamı ise Eşitlik (14) ve (15)'de verilmiştir.

$$KT_{W(B)} = \frac{1}{a \cdot n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \varepsilon_{ij(B)} \quad (14)$$

$$KT_B = KT_{Genel} - KT_{W(B)} \quad (15)$$

Eşitlik (14)'te $\varepsilon_{ij(B)}$; i. ve j. bireyler B faktörünün aynı seviyesinde ise '1' farklı seviyelerinde ise '0' değerini alır.

Hata kareler toplamı Eşitlik (16)'da verildiği gibi hesaplanır.

$$KT_{Hata} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \varepsilon_{ij(AB)} \quad (16)$$

Eşitlik (16)'da $\varepsilon_{ij(AB)}$; i. ve j. bireyler aynı alt grupta (yani A ve B faktörlerinin aynı seviye kombinasyonunda) ise '1' farklı alt gruplarda ise '0' değerini alır.

AxB interaksiyonuna ait kareler toplamı, genel kareler toplamından diğer unsurlar çıkarılarak Eşitlik (17)'de olduğu gibi hesaplanır.

$$KT_{AxB} = KT_{Genel} - (KT_A + KT_B + KT_{Hata}) \quad (17)$$

Sahte F-istatistiği A faktörü, B faktörü ve AxB interaksiyonu için klasik faktöriyel düzende çok değişkenli varyans analizindeki gibi Eşitlik (18) - (20)'de verildiği şekilde hesaplanır. Permütasyonel faktöriyel düzende çok değişkenli varyans analizi tekniğinde de tıpkı klasik faktöriyel düzende çok değişkenli varyans analizi tekniğinde olduğu gibi öncelikle interaksiyona ilişkin hipotez kontrolü yapılır. Yapılan hipotez kontrolü sonucunda eğer interaksiyon var ise diğer hipotez kontrolleri yapılmaz. Ancak interaksiyon

istatistik olarak önemli değil ise A ve B faktörleri için ayrı ayrı hipotez kontrolü yapılarak hangi seviyeleri arasında farkların istatistik olarak önemli olduğu belirlenir. Bu kararları verirken hesaplanan sahte F-değerinin istatistik olarak önemli olup olmadığını belirlemede kullanılan p-değeri, tek yönlü PERMANOVA'da olduğu gibi permütasyon tekniğinden yararlanılarak hesaplanır.

$$\text{Sahte - } F_{A \times B} = \frac{KO_{A \times B}}{KO_{Hata}} \quad (18)$$

$$\text{Sahte - } F_A = \frac{KO_A}{KO_{Hata}} \quad (19)$$

$$\text{Sahte - } F_B = \frac{KO_B}{KO_{Hata}} \quad (20)$$

2.7. P-değerlerinin Hesaplanması (Hipotez Kontrolü)

PERMANOVA yöntemi kullanılarak hesaplanan test istatistiği sahte F-istatistiği olarak adlandırılır. Ancak bu F-istatistiği ile yapılacak olan hipotez kontrolü için Fisher'in F-tablosu kullanılamaz. Çünkü hesaplanan sahte F-istatistikleri F-dağılımı göstermez. Uzaklık ölçümlerine dayalı olarak hesaplanan bu parametrik olmayan test yöntemi sonucunda elde edilen test istatistiğinin örnekleme dağılımını elde etmek ve p-değerini hesaplamak için yeniden örnekleme yöntemlerinden permütasyon tekniği kullanır. Böylece uzaklıklar kullanılarak hesaplanan sahte F-istatistiğinin örnekleme dağılımı elde edilip hipotez kontrolü yapılabilir (McArdle ve Anderson, 2001). Bu PERMANOVA testini diğer yöntemlerden farklılaştıran en önemli özelliğidir.

Permütasyon testinin esası; kontrol hipotezinin doğru olduğu yani grupların/faktörlerin etkisinin olmadığı varsayımı altında, gözlem değerlerini gruplara rasgele olarak atayıp baştan hipotez kontrolü yapma temeline dayanır. Çok değişkenli denemelerde de benzer şekilde her bir özellik için çok değişkenli gözlemler farklı gruplar/faktörler arasında değiştirilir. Permütasyon tekniğinin kullanılarak p-değerinin hesaplanmasında izlenen adımlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Deneme için gerekli permütasyon sayısı yani N_p belirlenir. Çünkü olası tüm permütasyonları hesaplamak uzun zaman alacağı için

genellikle daha az sayıda permütasyon yapılarak p-değeri elde edilir. Ancak permütasyon sayısı arttıkça elde edilen p-değerinin duyarlılığının da artacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle permütasyon sayısı; birinci tip hat olasılığı 0.05 olduğunda en az 1000, 0.01 olduğunda ise en az 5000 olarak belirlenmelidir (Pasin ve ark., 2016).

2. Verilerin orijinal hali ile PERMANOVA testi yapıp bu test sonucunda sahte F-istatistiği hesaplanır.
3. Sahte F-istatistiği elde edildikten sonra p-değerinin hesaplanması aşamasına geçilir. Bunun için yapılan permütasyonun her bir aşamasında; bireyler/gözlem değerleri tesadüfen karıştırılarak yeniden rasgele bir gruba atanırlar.
4. Yapılan bu atama sonucunda oluşan yeni deneme için uzaklık matrisi oluşturulup tekrar PERMANOVA testi yapılarak bir sahte F-değeri hesaplanır. Bu F-değeri; 1. permütasyon sonucu elde edilen sahte F-değeridir.
5. Ardından hesaplanan bu sahte F-değerinin denemenin orijinal hali için hesaplanan sahte F-istatistiğine eşit veya bu değerden büyük olup olmadığı sorgulanır. Eğer büyük veya eşitse bunların sayısını gösteren $N_{F_{per} \geq F_{hesap}}$ değeri "1" artırılır.
6. 3., 4. ve 5. adımlarda verilen işlemler N_p kez tekrarlanır. Yani yapılan N_p permütasyon sonucunda hesaplanan sahte F-değerlerinin kaç tanesinin ($N_{F_{per} \geq F_{hesap}}$), orijinal deneme için hesaplanan sahte F-istatistiğine eşit veya bu değerden büyük olduğu belirlenir. Daha sonra orijinal deneme için hesaplanan sahte F-istatistiğinin p-değeri yani PERMANOVA testine ait p-değeri Eşitlik (21)'deki gibi hesaplanır.

$$p\text{-değeri} = \frac{N_{F_{per} \geq F_{hesap}}}{N_p} \quad (21)$$

Eşitlik (21)'de de görülebileceği üzere p-değeri= $P(F_{per} \geq F_{hesap})$ şeklinde elde edilir. Burada F_{per} : N birim içinden eşit olasılıklı ve rastgele yapılan permütasyon sonucu hesaplanan sahte F-değerini ifade eder. N_p : yapılan

permütasyon sayısı ve $N_{F_{per} \geq F_{hesap}}$ ise; permütasyon sonucu hesaplanan sahte F-değerinin denemenin başında hesaplanan sahte F-istatistiğinden büyük olduğu permütasyonların sayısını gösterir.

PERMANOVA testi yapılırken kullanılabilir 3 farklı permütasyon tekniği bulunmaktadır. Bunlar:

1. Ham verilerin permütasyonu
2. İndirgenmiş modelde artıkların permütasyonu
3. Tam modelde artıkların permütasyonu

Bu teknikler kesin p-değerleri vermeseler de güvenilir sonuçlar verir. Uygulamada, bu üç yaklaşım çok benzer sonuçlar verdiği için istenen yöntem seçilebilir (Anderson, 2005).

- 1. Ham verilerin permütasyonu:** Bu teknik Manly (1997) tarafından karmaşık varyans analizi düzenleri için önerilmiştir. Genellikle başlangıçta belirlenen I. tip hata olasılığına (α) yakın tip I hataya sahiptir, ancak daha büyük örnek genişlikleri için 2. ve 3. tekniklere kıyasla daha tutucudur. Fakat bu yöntemin iyi çalışması için örnek genişliğinin büyük olması gerekmez. Ayrıca hesaplama açısından en hızlı tekniktir.
- 2. İndirgenmiş modelde artıkların permütasyonu:** İlk olarak Freedman ve Lane (1983) tarafından doğrusal modeller için tanımlanmış olan bu teknik, karmaşık tasarımlar için ampirik olarak en kapsamlı koşullarda en iyi gücü ve en doğru I. tip hata olasılığını verir (Legendre ve Anderson 1999, Anderson ve Ter Braak 2003). Bunun yanı sıra teorik olarak kesin teste en yakın olan teknik budur. (Anderson ve Robinson 2001).
- 3. Tam modelde artıkların permütasyonu:** Bu yöntem Ter Braak (1992) tarafından tanımlanmıştır. Yöntemin esası; her bir gözlem değerinden o gözlemin ait olduğu alt grubun ortalamasının çıkartılarak tam modelin artıklarının elde etmesi temeline dayanır. Bu artıklar araştırmacıya her bir gözlem değerine ilişkin hatanın tahminini verir. Söz konusu hatalar için permütasyon uygulanıp istatistikler tekrar hesaplanır. Bu şekilde hesaplanan sonuçlar 2. teknik kullanılarak elde edilen sonuçlara genellikle benzerdir. Bu yöntemin

doğruluğu, 2. yönetime nazaran tekerrür sayısının biraz daha fazla olmasını gerektirse de 2. yönetime nazaran daha hızlı sonuç verir.

Yöntem 2 ve 3; ortalamaların tahmin edilip bu tahminlerin gözlem değerlerinden çıkarılarak hata teriminin tahmin edilmesi temeline dayanır. Ancak tekerrür sayısının az olduğu durumlarda ortalamaların, dolayısıyla da hataların tahminleri güvenilir olmayacağı için nispeten küçük örneklerde bu yöntemler yerine I. permütasyon yöntemi tercih edilmelidir (Anderson 2005).

Bazı denemelerde güvenilir bir p-değeri elde etmek için yeterli olası permütasyon sayısı bulunmayabilir. Böyle durumlarda hesaplanan sahte-F istatistiği yeterince büyük olsa bile elde edilebilecek olası permütasyon sayısı mesela 10 ise p-değeri en düşük 0.10 olarak hesaplanabilecek ve gruplar arasındaki fark ortaya koyulamayacağından hipotez kontrolü yapmanın bir anlamı da olmayacaktır. Böyle durumlarda Monte Carlo yöntemi ile p-değerlerinin hesaplanması daha güvenilir olacaktır. Her ne kadar gerek permütasyon teknikleri gerekse Monte Carlo yöntemiyle hesaplanan p-değerleri birbirine çok yakın sonuç verse de, olası permütasyon sayısının çok az olduğu durumlarda bu değerler farklılaşabilir. Böyle durumlarda da Monte Carlo yöntemi tercih edilmelidir.

2.8. Farklı Grupların Belirlenmesi

PERMANOVA testi sonucunda hesaplanan p-değerinin 0.05'ten küçük olması durumunda araştırmacı, hangi grupların ortalama vektörleri arasındaki farkların istatistik olarak önemli olduğunu merak edecektir. Bu amaçla kullanılacak çoklu karşılaştırma yöntemi grupların ikişer ikişer PERMANOVA testi ile değerlendirilip sahte-F ve p-değerlerinin hesaplanması temeline dayanır. Örneğin A, B, C ve D grupları arasındaki farkların merak edildiği çok değişkenli bir denemede A-B, A-C, A-D, ..., C-D olmak üzere toplamda $C(4,2)=6$ adet PERMANOVA testi yapılması gerekir. Yapılan her PERMANOVA testi için karşılaştırılan gruplara ait gözlem değerleri dışında kalanlar deneme dışında bırakılır. Burada başlangıçta karşılaştırılan I. tip hata olasılığını korumak adına Bonferroni düzeltmesi yapılması, güvenilir sonuçlar elde edilmesi için önem arz etmektedir. Bu sebeple farklı grupları belirlemek adına yapılan PERMANOVA testlerinde her birinde kullanılacak α olasılığı $\alpha_k=\alpha/C(k,2)$ şeklinde belirlenmelidir. Mesela denemede 5 grup varsa $\alpha_k=0,05/C(5,2)=0,05/10=0,005$ olarak hesaplanır.

3. UYGULAMA

3.1. Tek Yönlü PERMANOVA Örneği

Tek faktörlü bir denemede çok değişkenli varyans analizinin varsayımları sağlanmadığında denemeden elde edilen verilerin PERMANOVA testi ile değerlendirilmesi hipotetik bir örnek ile gösterilmiştir. Bu hipotetik örnekte A faktörünün 3 seviyesinin $n=6$ tekerrürlü olarak denendiği bir çalışmada toplam 18 deney ünitesinden X_1 , X_2 ve X_3 değişkenlerine ilişkin ölçümler yapıldığı varsayılmıştır.

Tablo 1. Tek yönlü PERMANOVA testi için hipotetik veri seti

A	X_1	X_2	X_3
1	18	157	5.5
1	15	168	5.8
1	12	170	6.0
1	16	100	6.1
1	20	95	15.4
1	24	114	6.4
2	26	85	5.8
2	19	82	16.7
2	21	65	6.4
2	23	69	7.2
2	27	78	6.8
2	28	100	18.1
3	52	57	8.0
3	50	88	8.2
3	20	85	8.4
3	28	90	10.4
3	25	100	7.8
3	15	86	12.0

Veri seti çok değişkenli normal dağılım ve varyans-kovaryans matrislerinin homojenliği varsayımlarını sağlamamaktadır. Bu nedenle çok değişkenli varyans analizi tekniği ile değerlendirilmesi doğru olmayacaktır. Dolayısıyla faktörünün seviye ortalama vektörleri arasındaki farklar istatistik

olarak önemli farklılıklar olup olmadığı PERMANOVA testi ile değerlendirilmiştir.

Çözüm: Hesaplamalara başlamadan önce ilk olarak hipotezlerin kurulması gerekir.

H₀: Üzerinde durulan X₁, X₂, ve X₃ özellikleri bakımından A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farklar tesadüfen ileri gelmektedir.

H₁: Üzerinde durulan X₁, X₂, ve X₃ özellikleri bakımından A faktörünün en az iki seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki fark istatistik olarak önemlidir.

Hipotezler kurulduktan sonra X₁, X₂ ve X₃ değişkenleri birlikte dikkate alınarak uygun benzemezlik/uzaklık ölçütü kullanılarak uzaklık matrisi oluşturulur. Bu amaçla Bray-Curtis uzaklık ölçüsü tercih edilmiş ve elde edilen uzaklık matrisi Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’deki matrisin elemanlarının Eşitlik (2) kullanılarak nasıl elde edildiği aşağıda kısaca verilmiştir.

$$d_{12} = \frac{\sum_{k=1}^p |18-15| + |157-168| + |5.5-5.8|}{\sum_{k=1}^p (18+15) + (157+168) + (5.5+5.8)} = 0.0387$$

$$d_{13} = \frac{\sum_{k=1}^p |18-12| + |157-170| + |5.5-6.0|}{\sum_{k=1}^p (18+12) + (157+170) + (5.5+6.0)} = 0.0529$$

Bu şekilde üzerinde durulan özellikler (X₁, X₂, X₃) bakımından i. ve j. deney ünitesi arasındaki Bray-Curtis uzakları hesaplanır ve son olarak da 17. ve 18. deney üniteleri arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi elde edilir.

$$d_{(17)(18)} = \frac{\sum_{k=1}^p |25-15| + |100-86| + |7.8-12.0|}{\sum_{k=1}^p (25+15) + (100+86) + (7.8+12.0)} = 0.1147$$

Ardından deney üniteleri arasında hesaplanan uzaklıklar Tablo 2’deki gibi matris haline getirilir.

Bray-Curtis uzaklık ölçüsünün hesaplanmasında yararlanabilecek çeşitli programlar bulunmaktadır. Bu programlardan bazıları benzerlik matrisini (Eşitlik (2)'de verilen Bray-Curtis uzaklığının 1'den çıkarılmasıyla elde edilir) bazıları ise uzaklık matrisini (Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanır) verir. Hesaplama yaparken bu durum dikkate alınmalıdır.

Tablo 2'de verilen uzaklık matrisi kullanılarak PERMANOVA testine ilişkin hesaplama adımlarına geçilir. Öncelikle Genel Kareler Toplamı Eşitlik (7) yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{GKT} &= \text{KT}_{\text{Genel}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \\ &= \frac{1}{18} \left(0.0387^2 + 0.0529^2 + 0.1970^2 + \dots + 0.1147^2 \right) \\ &= \frac{6.8599}{18} = 0.3811 \end{aligned}$$

A grubunun her bir seviyesinde bulunan deney ünitesi sayısı (tekerrür adedi) eşit olduğu için Eşitlik (8) yardımı ile Hata Kareler Toplamı (HKT) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{HKT} &= \text{KT}_{\text{Hata}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \epsilon_{ij} \\ &= \frac{1}{6} \left(0.0387^2 \times 1 + 0.0529^2 \times 1 + 0.1970^2 \times 1 + 0.2377^2 \times 1 + \right. \\ &\quad \left. 0.1536^2 \times 1 + 0.2701^2 \times 0 + 0.2924^2 \times 0 + \dots + 0.1147^2 \times 1 \right) \\ &= \frac{1.1328}{6} = 0.1888 \end{aligned}$$

Bu işlemlerden sonra Eşitlik (10) kullanılarak Gruplar Arası Kareler Toplamı (GAKT) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{GAKT} &= \text{KT}_{\text{Grup}} = \text{KT}_{\text{Genel}} - \text{KT}_{\text{Hata}} \\ &= 0.3811 - 0.1888 = 0.1923 \end{aligned}$$

Hesaplanan değerler ile Tablo 3'te verilen varyans analizi tablosu oluşturulur.

Tablo 3. PERMANOVA testi sonucu oluşturulan varyans analizi tablosu (VK:Varyasyon Kaynağı, SD=Serbestlik Derecesi, KT=Kareler Toplamı KO=Kareler Ortalaması)

	VK	SD	KT	KO
Gruplar Arası		2	0.1923	0.0962
Hata		15	0.1888	0.0126
Genel		17	0.3811	

Eşitlik (11) kullanılarak PERMANOVA testi için hipotez kontrolü yapılmasında kullanılacak sahte F-istatistiği yaklaşık 7.63 olarak hesaplanır.

$$\text{Sahte - F} = \frac{KO_{\text{Grup}}}{KO_{\text{Hata}}} = \frac{0.0962}{0.0126} = 7.63$$

Hesaplanan sahte F-istatistiği F-dağılımı göstermediği için hipotez kontrolü yapılırken Fisher'in F-dağılımı yerine permütasyon tekniklerinden faydalanılır. Bu işlemin esası daha önce de bahsedildiği gibi; bireyleri gruplara yeniden rasgele atayıp sahte F-değerini hesaplamak ve bu işi defalarca (olası permütasyon sayısı kadar) yapma temeline dayanır. Permütasyon sayısı araştırmacı tarafından yeterince büyük olacak şekilde belirlenir. Bu işlem sonunda p-değeri Eşitlik (21) kullanılarak hesaplanır. Ancak permütasyon sayısı arttıkça yapılan hesaplamalar çok uzun süreceği için tahmin edileceği üzere bu işlemlerin bilgisayar yardımı olmadan yapılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle bu adımdan sonrası için PERMANOVA testini yapmakta kullanılan paket programlardan biri olan PAST 4.13 yardımı ile p-değeri 0.0004 olarak hesaplanmıştır. Burada permütasyon sayısının 9999 olarak alınmıştır. Bu sonuca dayalı olarak $F_{\text{per}} \geq F_{\text{hesap}}$ durumunun 4 kez gerçekleştiği söylenebilir.

$$p\text{-değeri} = \frac{N_{F_{\text{per}} \geq F_{\text{hesap}}}}{N_p} = \frac{4}{9999} = 0.0004$$

Tüm olası permütasyonlar denenmediği sürece, aynı deneme için hesaplanan p-değerlerinin her defasında farklı olması beklenen bir durumdur. Ancak permütasyon sayısı arttıkça bu farklılıklar hipotez kontrolü sonucunu

etkilemeyecek kadar küçük olacaktır. Sonuç olarak bu hipotetik veri seti için hesaplanan p-değeri %5'in altında olduğu için üzerinde çalışılan özellikler (X_1 , X_2 , X_3) bakımından A faktörünün en az iki seviyesinin ortalama vektörü arasındaki fark istatistik olarak önemlidir kararına varılır ($p < 0.05$).

Hangi grupların ortalama vektörleri arasındaki farkların istatistik olarak önemli olduğunun belirlenmesinde izlenecek yol yine permütasyon tekniğinden geçer. Mesela; A faktörünün 1. ve 2. seviyesinin ortalama vektörleri arasında fark olup olmadığı belirlenirken, A faktörünün diğer tüm seviyeleri deneme dışı bırakılır ve sadece karşılaştırılmak istenen iki seviyesi kullanılarak veri matrisi oluşturulur. Ardından denemede sadece bu değerler varmış gibi bu veri matrisi için uzaklık matrisi hesaplanır ve bilindiği şekilde PERMANOVA testinin tüm adımları yeniden yapılarak sahte F-istatistiği ve buna ait p-değeri hesaplanır. Hesaplanan bu p-değerine göre söz konusu iki grubun ortalama vektörleri arasındaki farkın istatistik olarak önemli olup olmadığı kararına varılır. A faktörünün diğer seviyeleri karşılaştırılırken de benzer adımlar izlenir. Olası ikili karşılaştırmalar için hesaplanan sahte F-istatistikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farkların karşılaştırılması için hesaplanan sahte F-istatistikleri

Sahte F-değeri	a_1	a_2	a_3
a_1	-		
a_2	11.72	-	
a_3	8.946	1.211	-

Tablo 4'te hesaplanan sahte F-değerlerinin istatistik olarak önemli olup olmadığını belirlemek için PAST 4.13 programı ile hesaplanan p-değerleri ise Tablo 5'te verilmiştir. Bu p-değerlerinin değerlendirilmesinde, deneme başına hatayı korumak bakımından Bonferroni düzeltilmesi ile hesaplanan $0.05/C(3,2)=0.05/3=0.0167$ değeri dikkate alınmıştır. Buna göre istatistik olarak önemli kabul edilen p-değerleri '*' ile gösterilmiştir.

Tablo 5. A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farkların istatistik olarak önemli olup olmadığını belirlemede kullanılacak p-değerleri

p-değeri	a ₁	a ₂	a ₃
a ₁	-		
a ₂	0.0044*	-	
a ₃	0.0052*	0.3841	-

** ile işaretlenen p-değerleri $p < 0.0167$ olduğu için istatistik olarak önemlidir.

Tablo 5 incelendiğinde X_1 , X_2 , X_3 özellikleri bakımından A faktörünün 1. seviyesinin (a_1) diğerlerinden istatistik olarak önemli düzeyde farklı olduğu kolaylıkla görülebilir ($p < 0.05$).

3.2. İki Yönlü PERMANOVA Örneği

İki faktörlü çok değişkenli varyans analizinin PERMANOVA testi kullanılarak analiz edilip sonuçların yorumlanması Tablo 6'da verilen hipotetik bir örnek ile gösterilmiştir. Bu hipotetik örnekte A ve B faktörlerinin 3'er seviyesinin $n=2$ tekrürlü olarak denendiği bir çalışmada toplam 18 deney ünitesinden X_1 , X_2 ve X_3 değişkenlerine ilişkin ölçümler yapıldığı varsayılmıştır. Denemede elde edilen veri seti çok değişkenli normal dağılım ve varyans-kovaryans matrislerinin homojenliği varsayımlarını sağlamamaktadır. Bu nedenle veri seti PERMANOVA testi ile değerlendirilmiştir.

Tablo 6. İki yönlü PERMANOVA testi için hipotetik veri seti

A	B	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1	20	13	54	7.9
1	1	18	9	62	0.5
1	1	15	26	60	1.2
1	2	19	15	58	1.5
1	2	17	25	57	0.5
1	2	15	15	66	0.6
1	3	18	21	59	0.7
1	3	17	24	63	0.3
1	3	20	13	62	2.1
2	1	18	21	58	2.3
2	1	18	4	60	1.1
2	1	20	8	63	1.5
2	2	16	15	66	1.6
2	2	14	5	58	0.9

2	2	17	12	62	2.6
2	3	14	14	60	1.8
2	3	14	13	63	0.7
2	3	19	10	55	2.6
3	1	14	6	55	3.2
3	1	19	4	67	6.5
3	1	15	10	59	7.9
3	2	16	9	64	6.4
3	2	18	18	62	8.3
3	2	17	5	58	4.6
3	3	16	11	63	5.1
3	3	17	16	62	7.5
3	3	14	11	57	5.2

Çözüm: Hesaplamalara başlamadan önce ilk olarak hipotezlerin kurulması gerekir. Bu amaçla üç hipotez takımının kurulması gerekir.

A faktörü için

H₀: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farklar tesadüften ileri gelmektedir.

H₁: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından A faktörünün en az iki seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki fark istatistik olarak önemlidir.

B faktörü için

H₀: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından B faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farklar tesadüften ileri gelmektedir.

H₁: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından B faktörünün en az iki seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki fark istatistik olarak önemlidir.

A×B interaksiyonu için

H₀: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farklar B faktörünün seviyesinden seviyesine değişmeyip aynı kalmaktadır. Yani A×B interaksiyonu istatistik olarak önemli değildir.

H₁: Üzerinde durulan X_1 , X_2 , ve X_3 özellikleri bakımından A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farklar B faktörünün seviyesinden

seviyesine aynı kalmayıp değişmektedir. Yani A×B interaksiyonu istatistik olarak önemlidir.

Hipotezler kurulduktan sonra uygun benzemezlik/uzaklık ölçütü kullanılarak uzaklık matrisi oluşturulur. Bu amaçla Bray-Curtis uzaklık ölçüsü tercih edilmiştir. Uzaklık matrisinin elemanlarının Eşitlik (2) kullanılarak nasıl elde edileceği aşağıda kısaca gösterilmiştir.

$$d_{12} = \frac{\sum_{k=1}^4 |20-18| + |13-9| + |54-62| + |7.9-0.5|}{\sum_{k=1}^4 (20+18) + (13+9) + (54+62) + (7.9+0.5)} \cong 0.11605$$

Elde edilen uzaklık matrisi kullanılarak PERMANOVA testine ilişkin hesaplama adımlarına geçilir. İlk olarak Eşitlik (7) yardımıyla Genel Kareler Toplamı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{GKT} &= \text{KT}_{\text{Genel}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \\ &= \frac{1}{27} (0.1161^2 + 0.1558^2 + 0.1184^2 + \dots + 0.0807^2) \\ &= \frac{3.10269}{27} \cong 0.1149 \end{aligned}$$

A faktörüne ilişkin kareler toplamını bulmak için önce Eşitlik (12) kullanılarak $SS_{W(A)}$ değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \text{KT}_{W(A)} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \varepsilon_{ij}^{(A)} \\ &= \frac{1}{3 \times 3} \left(0.1161^2 \times 1 + 0.1558^2 \times 1 + 0.0711^2 \times 1 + 0.1307^2 \times 1 + 0.1373^2 \times 1 + \right. \\ &\quad \left. 0.1147^2 \times 1 + 0.1536^2 \times 1 + 0.0719^2 \times 1 + 0.1009^2 \times 0 + \dots + 0.0807^2 \times 1 \right) \\ &\cong \frac{0.76011}{9} = 0.0845 \end{aligned}$$

Daha sonra hesaplanan $SS_{W(A)}$ değeri GKT'ndan çıkartılarak (Eşitlik (13)) A faktörüne ilişkin kareler toplamını (KT_A) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A \text{ 'lar AKT} = KT_A = KT_{\text{Genel}} - KT_{W(A)}$$

$$KT_A = 0.1149 - 0.0845 = 0.0304$$

B faktörüne ilişkin kareler toplamını bulmak için yine ilk olarak Eşitlik (14) kullanılarak $SS_{W(B)}$ değeri hesaplanır.

$$\begin{aligned} KT_{W(B)} &= \frac{1}{a \cdot n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \cdot \varepsilon_{ij}^{(B)} \\ &= \frac{1}{3 \times 3} \left(0.1161^2 \times 1 + 0.1558^2 \times 1 + 0.0711^2 \times 0 + 0.1307^2 \times 0 + 0.1373^2 \times 0 + \right. \\ &\quad \left. 0.1147^2 \times 0 + 0.1536^2 \times 0 + 0.0719^2 \times 0 + 0.1009^2 \times 1 + \dots + 0.0807^2 \times 1 \right) \\ &= \frac{0.98393}{9} = 0.1093 \end{aligned}$$

Ardından hesaplanan $SS_{W(B)}$ değeri GKT'ndan çıkartılarak (Eşitlik (15)) B faktörüne ilişkin kareler toplamını (KT_B) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$B \text{ 'ler AKT} = KT_B = KT_{\text{Genel}} - KT_{W(B)} = 0.1149 - 0.1093 = 0.0056$$

Daha sonra Eşitlik (16) kullanılarak Hata Kareler Toplamı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} HKT = KT_{\text{Hata}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \cdot \varepsilon_{ij}^{(AB)} \\ &= \frac{1}{3} \left(0.1161^2 \times 1 + 0.1558^2 \times 1 + 0.0711^2 \times 0 + 0.0807^2 \times 1 \right) \\ &= \frac{0.22408}{3} = 0.0747 \end{aligned}$$

İnteraksiyona ait kareler toplamı ise varyans analizindeki gibi Genel Kareler Toplamından diğerleri çıkarılarak (Eşitlik (17)) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A \times B \text{ interaksiyonu } KT = GKT - (A \text{ 'lar AKT} + B \text{ 'ler AKT} + HKT)$$

$$KT_{A \times B} = KT_{\text{Genel}} - (KT_A + KT_B + KT_{\text{Hata}})$$

$$= 0.1149 - (0.0304 + 0.0056 + 0.0747) = 0.0042$$

Hesaplanan kareler toplamları kullanılarak Tablo 7’de verilen varyans analizi tablosu oluşturulur.

Tablo 7. İki yönlü PERMANOVA testi sonucu oluşturulan varyans analizi tablosu (VK:Varyasyon Kaynağı, SD=Serbestlik Derecesi, KT=Kareler Toplamı KO=Kareler Ortalaması)

VK	SD	KT	KO
A	2	0.0304	0.01520
B	2	0.0056	0.00280
AxB	4	0.0042	0.00105
Hata	18	0.0747	0.00415
Genel	26	0.1149	

Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra F-değerleri hesaplanır.

$$\text{Sahte} - F_A = \frac{KO_A}{KO_{Hata}} = \frac{0.01520}{0.00415} = 3.663$$

$$\text{Sahte} - F_B = \frac{KO_B}{KO_{Hata}} = \frac{0.00280}{0.00415} = 0.675$$

$$\text{Sahte} - F_{AxB} = \frac{KO_{AxB}}{KO_{Hata}} = \frac{0.00105}{0.00415} = 0.253$$

Ardından bu F-değerlerine ilişkin p-değerleri permütasyon tekniği kullanılarak PAST 4.03 programı yardımıyla 10000 permütasyon denemesi için $P_A=0.0051$, $P_B=0.6872$, $P_{AB}=0.9889$ olarak elde edilir. Tahmin edileceği gibi bu p-değerleri her bir permütasyon yöntemi ile elde edildiği için her defasında farklı bulunabilir. Ancak buradaki permütasyon sayısı yeterince yüksek olduğu için bulunan sonuçlar, yapılan hipotez kontrolü sonucunda verilecek kararı değiştirmeyecek olup birbirine yakın çıkacaktır.

Bilindiği üzere faktöriyel denemelerde ilk olarak interaksiyona ilişkin hipotez kontrolünün yapılması gerekir. Çünkü interaksiyon istatistik olarak önemli ise diğer hipotez kontrollerinin yapılması ve buna göre sonuçların yorumlanması yanlıtıcı olacaktır. İnteraksiyona ilişkin p-değeri $P_{AB}>0.05$ olduğu için A×B interaksiyonunun istatistik olarak önemli olmadığı kararına varılır. Dolayısıyla üzerinde çalışılan X_1 , X_2 , X_3 ve X_4 değişkenleri bakımından A faktörünün seviye ortalamaları arasındaki farklar B faktörünün seviyelerine

göre, B faktörünün seviye ortalamaları arasındaki farklar da A faktörünün seviyelerine göre değişmeyip aynı kalmaktadır. Bu nedenle A ve B faktörleri için ayrı ayrı hipotez kontrolü yapılabilir. A ve B faktörleri için hipotez kontrolü yapıldığında $P_A < 0.05$ ve $P_B > 0.05$ olduğu görülür. Yani A faktörünün en az iki seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki farklar istatistik olarak önemli bulunurken, B faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farkların tesadüften ileri geldiği sonucuna varılmıştır.

PERMANOVA testinde maalesef hali hazırda kullanılan çoklu karşılaştırma yöntemleri bulunmamaktadır. Bu nedenle A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri karşılaştırılmak istenildiğinde aynı tek yönlü PERMANOVA testinde olduğu gibi, A'nın hangi seviyelerinin ortalama vektörleri karşılaştırmak istenirse, sadece o seviyeler ile tek yönlü PERMANOVA analizi yapıp sahte-F istatistikleri elde edilir. Ardından bu sahte-F istatistiklerine ilişkin p-değeri hesaplanır. Hesaplanan bu p-değerine göre söz konusu A faktörünün üzerinde durulan iki seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki farkın istatistik olarak önemli olup olmadığı kararına varılır. Olası ikili karşılaştırmalar için hesaplanan sahte F-istatistikleri Tablo 8'te verilmiştir.

Tablo 8. A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farkların karşılaştırılması için hesaplanan sahte F-istatistikleri

Sahte F-değeri	a ₁	a ₂	a ₃
a ₁	-		
a ₂	2.522	-	
a ₃	6.963	3.355	-

Tablo 8'de hesaplanan sahte F-değerlerinin istatistik olarak önemli olup olmadığını belirlemek için PAST 4.13 programı ile hesaplanan p-değerleri ise Tablo 9'da verilmiştir. Bu p-değerlerinin değerlendirilmesinde, deneme başına hatayı korumak bakımından Bonferroni düzeltilmesi ile hesaplanan $0.05/C(3,2)=0.05/3=0.0167$ değeri dikkate alınmıştır. Buna göre istatistik olarak önemli kabul edilen p-değerleri '*' ile gösterilmiştir.

Tablo 9. A faktörünün seviyelerinin ortalama vektörleri arasındaki farkların istatistik olarak önemli olup olmadığını belirlemede kullanılacak p-değerleri

p-değeri	a₁	a₂	a₃
a₁	-		
a₂	0.0647	-	
a₃	0.0012*	0.0204	-

* ile işaretlenen p-değerleri $p < 0.0167$ olduğu için istatistik olarak önemlidir.

Tablo 9 incelendiğinde X_1 , X_2 , X_3 ve X_4 değişkenleri bakımından sadece A faktörünün 1. seviyesi (a_1) ile 3. seviyesinin ortalama vektörleri arasındaki farkın istatistik olarak önemli olduğu sonucuna varılır ($p < 0.05$).

KAYNAKLAR

- Alpar, R. (2013). Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Yöntemler, Detay Yayıncılık. Dördüncü baskı.
- Anderson, M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology*, 26(1), 32-46.
- Anderson, M.J. (2001a). Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 58(3), 626-639.
- Anderson, M.J. (2005). Permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland, Auckland, 26, 32-46.
- Anderson, M.J. (2014). Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA). *Wiley statsref: statistics reference online*, 1-15.
- Anderson, M.J., Ellingsen, K.E., McArdle, B.H. (2006). Multivariate dispersion as a measure of beta diversity. *Ecology letters*, 9(6), 683-693.
- Anderson, M., Ter Braak, C. (2003). Permutation tests for multi-factorial analysis of variance. *Journal of statistical computation and simulation*, 73(2), 85-113.
- Anderson, M.J., Robinson, J. (2001). Permutation tests for linear models. *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 43(1), 75-88.
- Ter Braak, C.J. (1992, January). Permutation versus bootstrap significance tests in multiple regression and ANOVA. In *Bootstrapping and Related Techniques: Proceedings of an International Conference, Held in Trier, FRG, June 4–8, 1990* (pp. 79-85). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bray, J.R., Curtis, J.T. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological monographs*, 27(4), 326-349.
- Clarke, K.R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian journal of ecology*, 18(1), 117-143.
- Deza, E., Deza, M.M. (2009). *Encyclopedia of Distances* Springer-Verlag.
- Faith, D.P., Minchin, P.R., Belbin, L. (1987). Compositional dissimilarity as a robust measure of ecological distance. *Vegetatio*, 69, 57-68.
- Freedman, D., Lane, D. (1983). A nonstochastic interpretation of reported significance levels. *Journal of Business & Economic Statistics*, 1(4), 292-298.

- Gower, J.C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 857-871.
- Hammer, Ø. (1999-2023). PAST Paleontological statistics Version 4.13 Reference Manual. Natural History Museum, University of Oslo, 306.
- Legendre, P., Anderson, M.J. (1999). Distance-based redundancy analysis: testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological monographs*, 69(1), 1-24.
- Legendre, P., Gallagher, E.D. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271-280.
- Manly, B.F.J. (1997). Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods. *Biology*, 2nd edn. Chapman and Hall, London.
- McArdle, B.H., Anderson, M.J. (2001). Fitting multivariate models to community data: a comment on distance-based redundancy analysis. *Ecology*, 82(1), 290-297.
- Pasin, Ö., Ankaralı, H., Cangür, Ş., Sungur, M.A. (2016). Parametrik olmayan çok değişkenli varyans analizi ve sağlık alanında bir uygulaması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 9(1), 13.
- Tabachnick, B.G., Fidell, L.S. (2020). Çok değişkenli istatistiklerin kullanımı [Using multivariate statistics 6th Ed.]. Trans. M. Baloğlu]. Nobel.

BÖLÜM 7

TARIMSAL UYGULAMALARDA MAKİNE/TOPRAK İLİŞKİLERİNİN BELİRLENMESİNDE TOPRAK KANALLARININ KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi M. Murat TURGUT ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14389243>

¹Dicle Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği
Bölümü, Diyarbakır, Türkiye,
ORCID iD: 0000-0002-27731-4910, E-mail: mmturgut@dicle.edu.tr

GİRİŞ

Tarım, Dünyanın farklı yerlerinde birbirinden oldukça farklı iklim, çevre ve toprak koşullarında devam ettirilen bir faaliyettir. Tarımsal üretimin ana unsurlarından biri olan toprağın sürdürülebilirliği, erozyonun önlenmesi, organik maddenin ve biyoçeşitliliğinin korunması, tuzlanmanın ve kirlenmenin önlenmesi ve toprak işlemenin azaltılması gibi başlıca önlemlerle sağlanabilir. Tarımsal üretim, neredeyse tüm aşamalarda makine/toprak etkileşimini içerir. Örneğin toprak işleme aletleri ve ekim makinaları bu etkileşim içerisinde en çok bulunan makinalardandır. Toprakla temas halinde çalışan makinaların toprak üzerinde sert tabaka oluşması, toprak sıkışıklığı ve agregat stabilitesinin bozulması gibi olumsuz etkileri olabilmektedir. Diğer yandan toprak içerisinde çalışan alette de, aletin yüzey yapısına, uygulanan kuvvete, ilerleme hızına, toprağın nem içeriğine, tekstür ve strüktür durumuna ve diğer dinamik koşullara bağlı olarak aşınmalar ve kırılmalar meydana gelebilmektedir (Chung ve ark., 2008; Yazıcı, 2024). Toprak-alet etkileşimindeki bu karmaşık yapının anlaşılmasına yönelik çalışmalar önem arz etmektedir (Ajiboye ve ark., 2023). Bu karmaşık yapının anlaşılmasına yönelik toprak mekaniği ve uygulamalarını araştıran çalışmalar, tasarım ve geliştirilme ayağında 1779'da Coulomb, 1857'de Rankine ve 1873'te Mohr tarafından geliştirilen teorilerle çok eski yıllardan günümüze kadar uzanmaktadır (Manuva ve ark., 2011).

Farklı topraklar üzerinde yapılan ilk çalışmaların çoğu, tam ölçekli olarak açık arazilerde yapılmaktaydı. Ancak arazideki toprak türleri ve koşullarının çok çeşitli olması nedeniyle elde edilen sonuçlar bazen anlamsız çıkabilmekteydi. Ayrıca deneyin tekrarlanması için aynı toprağın aynı şartlarda elde edilme şansı da çok nadirdi (Ale ve ark., 2017). Toprak kanalları, özellikle tarım makineleri ve aletleri bağlamında toprak-alet etkileşimlerini incelemek için bu tip dezavantajları ortadan kaldıran kontrollü ortamlardır. Toprak-alet etkileşimi, toprak işleme aletlerinin (pulluklar, kültivatörler veya ekim makineleri gibi) çalışmaları sırasında toprakla nasıl etkileşime girdiğini anlamada kritik bir husustur. Toprak kanalları bu etkileşimleri incelemek için tutarlı, tekrarlanabilir bir ortam sağlar (Mardani ve ark., 2010).

Toprak kanallarının arazi koşullarında ki denemelere göre sağladığı avantajlar:

Kontrollü Ortam: Toprak kanalı testlerinin en önemli avantajlarından biri, nem, sıcaklık ve toprak kompozisyonu gibi çevresel değişkenlerin kontrol

edilebilmesidir. Bu, araştırmacıların belirli faktörleri izole etmelerine ve bunların etkilerini derinlemesine incelemelerine olanak tanır.

Tekrarlanabilirlik: Toprak kanalı testleri, tekrarlanabilen sayıda testlerin yapılmasına olanak sağlar. Bu da farklı tarım uygulamalarını, makine tasarımlarını veya toprak işlemlerini aynı koşullar altında karşılaştırmayı kolaylaştırır. Bu tekrarlanabilirlik, mühendislere güvenilir tasarımların geliştirilmesi fırsatını sunar.

Maliyet Etkinliği: Tam ölçekli arazi deneyleri pahalı ve zaman alıcı olabilirken, toprak kanalı testleri daha ekonomik ve verimlidir. Farklı koşulları kontrollü bir ortamda test ederek, araştırmacılar büyük ölçekli arazi denemelerine gerek duymadan hızlıca veri toplayabilirler.

Daha Güvenli Testler: Toprak kanalı testleri, imalat için hazır bekletilen yeni tarım ekipmanları veya uygulamaları test etmek için güvenli bir ortam sağlar. Potansiyel problemleri toprak kanalında tespit ederek, araştırmacılar gerçek tarım senaryolarında iyileştirmeler yapabilirler.

TOPRAK KANALLARININ KISA GELİŞİM TARİHİ

George Kuehne, 1914 yılında Berlin’de bir toprak kanalında araştırma başlatan ilk araştırmacıdır (Ozoemena, 2018; Ademosun, 2014). 1920 ile 1933 yılları arasında ise Mark L. Nichols ve John W. Randolph tam boyutlu bir toprak kanalı laboratuvarı geliştirme fikrini tasarlayan ilk kişilerdir (Gill, 1990). 1933 ile 1934 yılları arasında ABD’de Auburn Alabama’da inşa edilen Ulusal Toprak Dinamiği Laboratuvarı (Şekil 1), 1935 yılında faaliyete geçerek dünyadaki ilk tam boyutlu araştırma merkezi olmuştur (Anonim, 2014). 80’li yılların ortalarına gelindiğinde ise dünyadaki toprak kanalı laboratuvarlarının sayısı 150 adede ulaşmıştır (Wood ve ark., 1983; Wismer, 1984; Onwualu ve ark., 1998).



Şekil 1. Ulusal Toprak Dinamiği Laboratuvarı (ABD)

TOPRAK KANALI TASARIMI VE PARÇALARI

Toprak kanalı, makinelerle etkileşim halindeki toprak davranışının araştırılmasını, analizini ve karakterizasyonunu sağlamak için tasarlanmış bir laboratuvar sistemidir. Bu sistem, toprakla ilişkili uygulamalarda ve yapılarda mevcut olan farklı koşulları canlandırma olanağı sağlayarak, bu koşulların toprak davranışı ve makine performansı üzerindeki etkisinin incelenmesini kolaylaştırır (Golanbari ve ark., 2023; Mardani ve Golanbari, 2024). Toprak kanalları genel olarak aşağıdaki gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanırlar:

- i. Geliştirilen modellerin veya toprakla temas eden aletlerin test edilmesi ve kuvvet tahmin modellerinin doğrulanmasıyla ilgili çalışmalar için tutarlı, homojen ve izotropik toprak koşulları sağlamak.
- ii. Toprak-alet etkileşimi çalışmaları amacıyla mümkün olan alet, makine ve sistemlerden yararlanmak.
- iii. İlk yatırım maliyetlerini en aza indirmek ve işçilik gereksinimlerini azaltmak.

Günümüzde toprak kanallarının kullanımına ilişkin çalışmalar genel olarak;

- Toprak işleme aleti üzerindeki dikey ve yanal kuvvetler
- Toprak işlemeye bağlı alet aşınma miktarı
- Çeki kuvveti hesaplamaları

- Tekerlek temas alanı tahmini
 - Tekerlek yuvarlanma direnci
 - Toprak bozulma modelleri
 - Toprak parçacıklarının yer değiştirmesi
 - Farklı derinliklerde toprak gerilimi
- şeklinde sıralanabilir.

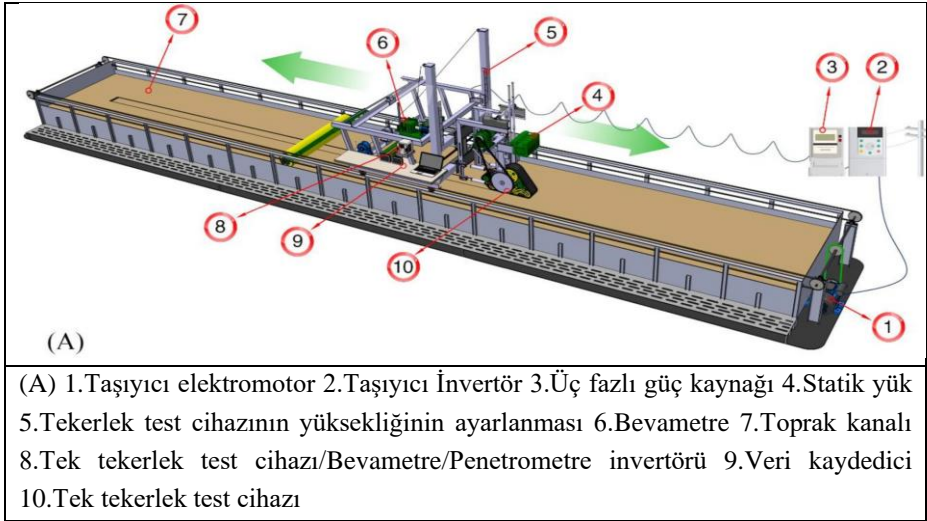
Bir toprak kanalı sistemi yer seviyesinde veya yer seviyesinden belli bir yükseklikte inşa edilebilmektedir. Yer seviyesinde kurulan toprak kanallarında test edilecek olan ekipmanın sisteme sökülüp takılması ve taşınması daha kolay olmaktadır. Yer seviyesinden yüksekte olan toprak kanallarında, test edilecek ekipmanın montajı için ayrıca bir taşıyıcı yükleyici aparat gerekebilmektedir. Bunun için bu tarz kanallarda sabit bir caraskal veya ağır yük taşıma işinde bir forklift veya traktör bulunması gerekebilmektedir. Genel olarak bir toprak kanalı test laboratuvarı aşağıdakilerden oluşur;

- Zemini veya toprağı modelleyen toprak kanalı
- Mobil araç
- Toprak işleme aletini veya alet çerçevesini modelleyen taşıyıcı iskelet
- Güç kaynağı ve ana taşıyıcıyı modelleyen kuvvet sistemi ile iletim sistemi
- Toprak hazırlama ve şartlandırma ekipmanları, (deneylerden önce toprağın ön koşullandırılması)
- Hareket kontrol sistemi raylar boyunca hareket eden bileşenlerin elektronik kontrolü için (x, y ve z yönlerinde)
- Ölçüm/veri toplama ve gerçek zamanlı ölçüm, analiz ve görüntüleme için analiz sistemleri (deneyler sırasında toprağın, makinenin ve bunların etkileşimleri)
- Ağır alet ve makinaların kaldırılması için bir kaldırma sistemi

Şekil 2a ve Şekil 2b'de farklı araştırmalar için yer seviyesinden yüksekte kurulmuş doğrusal toprak kanalı sisteminin şematik görünüşü ve sistemin parçaları görülmektedir.



Şekil 2a. Yer seviyesinden yüksekte doğrusal toprak kanalı (Turgut, 2014)



Şekil 2b. Yer seviyesinden yüksekte doğrusal toprak kanalı (Mardani ve Golanbari, 2024)

Şekil 3'te ise yer seviyesinde konumlandırılmış doğrusal bir toprak kanalı görülmektedir.



Şekil 3. Yer seviyesinde doğrusal toprak kanalı

Doğrusal toprak kanalı için yeterli geniş alan imkanı olmayan çalışma ortamlarında dairesel toprak kanalları tercih edilmektedir. Ayrıca küçük parçalar üzerindeki çalışmalar için dairesel toprak kanalları daha kullanışlı olmaktadır. Tipik olarak silindirik bir şekle sahiptirler ve yapılan araştırmanın veya testin ölçeğine bağlı olarak boyutları değişebilir. Dairesel tasarım, simetri avantajı sunarak toprak hareketinin tekdüzeliğini ve konteyner içindeki toprağa etki eden kuvvetleri izlemeyi ve analiz etmeyi kolaylaştırmaktadır.



Şekil 4. Dairesel toprak kanalı

Toprak kanalları, son yıllarda çeşitli mühendislik ve tarımsal araştırma uygulamalarında temel araçlardan birisi konumuna gelmiştir. Bu kontrollü ortamlar, araştırmacıların gerçek dünya koşullarını simüle etmesine ve toprağın çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler altındaki davranışını incelemesine olanak tanımaktadır. Toprak deneyleri için kapalı bir alan sağlayan toprak kanalları, dış ortamların değişkenliği olmadan toprak sıkışması, infiltrasyon, erozyon, ve toprak yapısındaki değişiklikler gibi faktörlerin etkisini gözlemlene ve ölçme olanağı sunmaktadır. Bu onları toprak mekaniği, hidroloji, bitki bilimi ve çevre yönetimi gibi çalışmalarda vazgeçilmez kılmaktadır.

Tarımsal araştırmalarda toprak kanalları; toprak işleme, sulama ve gübreleme gibi çeşitli tarımsal uygulamaları simüle etmek için kullanılır ve araştırmacıların bu uygulamaların toprak verimliliğini, erozyonunu ve ürün verimini nasıl etkilediğini gözlemlemesine olanak tanımaktadır. Ayrıca toprak değişikliklerinin, ürün rotasyonunun ve diğer sürdürülebilir uygulamaların

toprak sağlığı ve üretkenliği üzerindeki etkilerini incelemek için ideal bir ortam sunarlar. Toprak kanalları yardımıyla yürütülen çalışmalar, çiftçilerin ve mühendislerin toprak yönetimini daha iyi anlamalarına ve tarımsal uygulamaları hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik açısından optimize etmelerine yardımcı olmuştur. Gelecek zamanlarda görüntü işleme ve yapay zekâ uygulamalarının da desteğiyle toprak yönetimi, arazi kullanımı uygulamaları ve mühendislik tasarımlarında daha fazla yol katedilecektir.

KAYNAKLAR

- Ademosun, O.C., 2014. Soil tillage dynamics in Nigeria: potentials, prospects and challenges. In: Proceedings of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) Nigeria Symposium. Akure, Nigeria.
- Ajiboye A.T., Yusuf A.O., Iyanda M.O., Popoola O.J., 2023. Instrumentation System for a Model Laboratory Soil Bin, FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET), 8(1), 5-9.
- Ale, M.O., Ademosun, O.C., Ewetumo, T., 2017. Performance Evaluation of An Instrumentation System for Soil Draught Measurement. Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS), 3(5), pp:1757-1763.
- Anonim, 2014a. The American Society of Mechanical Engineers web sayfası. <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/146-national-soil-dynamics-laboratory>, (Erişim: Kasım, 2024)
- Anonim, 2024b. <https://dresden-technologieportal.de/en/equipment/view/id/1496>
- Chung, S.O., Sudduth, K.A., Plouffe, C., Kitchen, N.R., 2008. Soil Bin and Field Tests of an on-The-Go Soil Strength Profile Sensor. American Society of Agricultural and Biological Engineers ,Vol. 51(1): 5-18.
- Gill, W.R., 1990. A History of the USDA National Tillage Machinery Laboratory xii. Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, Auburn, Alabama 36830, 1935-1985 Auburn, AL (283 Hillcrest Dr., Auburn 36830), pp. 250–255.
- Golanbari, B., Mardani, A., Hosainpour, A., Taghavifar, H., 2023. Modeling Soil Deformation for Off-Road Vehicles Using Deep Learning Optimized by Grey Wolf Algorithm. J. Agric. Mach. <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84339.1188>
- Manuva, S.I., Ademosun, O.C., Agbetoye, L.A.S., Adesina, A., 2011. Aspects of the Development of Outdoor Soil Bin facility (at FUTA) for Soil Tillage Dynamics Research. Conference: Symposium of the Nigerian Branch of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)At: University of Ilorin, Nigeria

- Mardani, A., Shahıdı, K., Rahmani, A., Mashoofi, B., Karımmaslak, H., 2010. Studies on a Long Soil Bin For Soil-Tool Interaction. *Cercetări Agronomice în Moldova* Vol. XLIII, No. 2 (142).
- Mardani, A., Golanbari, B., 2024. Indoor Measurement and Analysis on Soil-Traction Device Interaction Using a Soil Bin. *Sci Rep* 14, 10077.
- Onwualu, A.P., Watts, K.C., 1989. Development of a Soil Bin Test Facility. ASAE paper No. 89-1106, ASAE, St. Joseph: Michigan
- Ozoemena, A.A., Uzoejinwaa, B.B., Ezeamaa, A.O., Onwualub, A.P., Ugwua, S.N., Ohagwua, C.J., 2018. Overview of Soil-Machine Interaction Studies in Soil Bins. *Soil and Tillage Research* Volume 175, pp:13-27.
- Turgut, M.M., 2014. Doğrudan Ekim Makinalarında Çizi Açıcı Ayak Tipleri İçin Anlık Bası Yüklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi. 87 syf.
- Wisner, R.D., 1984. Soil Bin Facilities: Characteristics and Utilization. In: *Proc. 8th International Conference, International Society For Terrain Vehicle Systems*, vol. III. England: Cambridge, pp:1201-1216.
- Wood, R.K., Wells, L.G., 1983. A Soil Bin to Study Compaction. ASAE paper No. 83-1044. ASAE, St. Joseph: Michigan.
- Yazıcı, A., 2024. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. *Soil and Tillage Research*, Volume 242, 106161.

BÖLÜM 8

YAVAŞ SALINIMLI AZOTLU GÜBRELERİN BİTKİ BESLEMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Hasine KÜÇÜKYILDIRIM¹

Dr. Öğr. Halime ÖZTÜRK²

Prof. Dr. Salih AYDEMİR³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14390092>

¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Şanlıurfa, Türkiye. hasineelci7@gmail.com, Orcid ID: 0000-0001-5822-9439

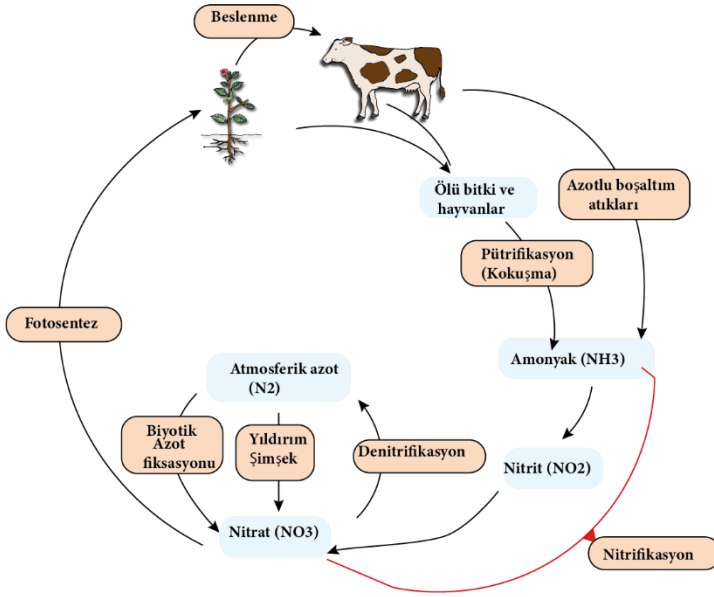
² Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Şanlıurfa, Türkiye. ho166832@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-9251-1750

³ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Şanlıurfa, Türkiye. salihaydemir@harran.edu.tr Orcid ID: 0000-0002-3236-8438

GİRİŞ

Tarımda verimliliği artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla gübre kullanımı, bitki beslemesinin temel unsurlarından biri olarak büyük önem taşımaktadır. Özellikle azot, bitkilerin büyüme ve gelişmesi için en kritik besin maddelerinden biri olup, verim artışı sağlayan başlıca faktörlerden biridir. Azot döngüsü, bu elementin atmosfer, toprak, su ve canlı organizmalar arasında sürekli hareket ettiği bir süreçtir. Bu döngü, ekosistemlerin verimliliğini ve sağlığını korumak için azotun doğru miktarda ve formda olmasını sağlar. Ancak, azot döngüsü hassas bir dengeye dayanır ve bu denge, insan faaliyetleri tarafından kolayca bozulabilir. Tarım, fosil yakıtların yanması ve endüstriyel faaliyetler, atmosfere büyük miktarda azot emisyonu üretir. Bu, ekosistemlerin yapısını ve işleyişini etkileyebilir, bitki ve hayvan türlerinin çeşitliliğini azaltabilir ve hava ve su kirliliğine yol açabilir. Dolayısıyla, azot döngüsünün anlaşılması ve korunması, hem canlıların hayatta kalması hem de ekosistemlerin sağlıklı işleyişi açısından hayati öneme sahiptir. Ancak, geleneksel azotlu gübrelerin aşırı ve düzensiz kullanımı, çevresel kirliliğe ve besin kayıplarına yol açabilmektedir. Bu sebeple, azotlu gübrelerin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılması amacıyla farklı gübre türleri geliştirilmiştir. Bu bağlamda, yavaş salımlı azotlu gübreler, son yıllarda bitki beslemesinde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Yavaş salımlı gübreler, bitkilerin ihtiyaç duyduğu azotu, toprak ve çevresel koşullara bağlı olarak yavaş bir şekilde serbest bırakan formülasyonlardır. Bu tür gübreler, geleneksel gübrelerden farklı olarak, bitkilerin azot ihtiyacına göre daha uzun süreli bir beslenme sağlar, böylece azotun kayıplarını minimize eder ve bitki büyümesinde daha dengeli bir etki yaratır. Ayrıca, yavaş salınım özellikleri, azotun toprakta daha uzun süre kalmasını sağlayarak, verim kayıplarının önlenmesine yardımcı olur ve çevresel etkilerin azaltılmasında önemli rol oynar. Bu tür gübrelerin etkisi, özellikle tarımsal üretim alanlarında daha verimli ve sürdürülebilir tarım yöntemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Yavaş salımlı azotlu gübrelerin bitki beslemesi üzerindeki etkileri, bitkilerin büyüme hızından ürün kalitesine kadar geniş bir yelpazede incelenmiştir. Azotun bitki tarafından etkin bir şekilde alınması, sadece verim artışı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bitkilerin hastalıklara karşı direncini ve stres toleransını da artırabilir. Bununla birlikte, bu gübrelerin kullanımında bazı dikkat edilmesi gereken faktörler bulunmaktadır. Uygulama zamanı,

toprak türü, iklim koşulları ve gübre tipinin seçimi gibi etmenler, yavaş salımlı azotlu gübrelerin etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, bu gübrelerin kullanımı ile ilgili kapsamlı araştırmalar ve alan denemeleri, daha verimli bir tarım uygulamasının oluşturulmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 1: Azot döngüsü (<https://biyot.com.tr/azot-dongusu-ve-ekosistem/>)

1. Yavaş Salımlı Azotlu Gübrelerin Önemi

Toplumun sağlık, çevre koruma ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı konusundaki farkındalığı arttıkça, gıda üretimini sağlarken akış veya sızma yoluyla besin kaybını en aza indiren çevre dostu azot gübrelerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir eğilim ortaya çıkmıştır. Son birkaç on yılda, yavaş salımlı gübre teknolojisi, geleneksel tarım kimyasallarının kullanımından kaynaklanan sorunlara bir çözüm olarak gelişmiştir. Bu gübrelerin temel amacı, aktif bileşenlerin hedefe kontrollü bir hızda salınmasını sağlamak ve ürün yetiştiriciliği için yeterli besin maddelerini optimal sınırlar içinde desteklemektir.

Üre, esas olarak karbon dioksit (CO_2) ile susuz amonyak arasındaki reaksiyonla yüksek sıcaklık ve basınç altında üretilir. Ortaya çıkan eriyik üre, gübre olarak kullanılmak üzere granüller veya paletler haline getirilir. Hangi

formda olursa olsun, üre, %46 azot içeriği ve yüksek su çözünürlüğü ile en yaygın kullanılan sentetik gübrelerden biridir. Yüksek azot içeriği sayesinde, üre diğer azot bazlı gübrelere kıyasla ton başına daha fazla azot sağlar. Bununla birlikte, uzun süreli azot salınımı sağlayabilen üre bazlı gübreler geliştirme konusundaki geleneksel çabalar büyük ölçüde başarısız olmuştur. Yavaş salımlı azotlu gübreler genellikle doğal kaynaklardan, hayvan atıkları, bitki artıklarından veya biyolojik katı atıklar ya da kül gibi diğer organik atık ürünlerden elde edilir (Madison W, 1971).

Pratik uygulamalarda üre alım verimliliği, belirli zaman dilimleri boyunca bitkiler tarafından topraktan alınan azot miktarının toplam azot miktarına oranı olarak tanımlanır. Ürenin tarım alanlarındaki performansını artırmak, onlarca yıldır önemli bir araştırma konusu olmuştur (A. Doberman, 2005). Son yıllarda, ürenin etkinliğini artırmak için birçok yeni teknoloji geliştirilmiştir. Gelecekte, gübrelerin kullanımı ve yönetimi, küresel azot dengesini hem kısa hem de uzun vadeli tarım uygulamalarında korumada önemli bir rol oynayacaktır.

Gelecekteki araştırmaların ana hedefi, azot alım verimliliğini artırmak olacaktır (M.K. Kottke ve ark., 1992; C. Grant, 2005). Ürenin kullanımına ilişkin sorunları çözmek için yavaş veya kontrollü salımlı kaplama teknolojileri umut verici bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır (S. Wu ve ark., 2008). Bu teknolojiler, bitkilere düzenli bir azot tedarikini sağlamak, besin kayıplarını en aza indirmek ve çevresel kirliliği azaltmak için tasarlanmıştır (U. Bröckel ve C. Hahn 2004). Üre granüllerinin çözünme hızını yavaşlatabilen malzemelerle kaplanması, besin salınımının bitkilerin büyüme ihtiyaçlarına uyacak şekilde düzenlenmesini sağlar. Kaplamanın oluşturduğu fiziksel bariyer, suda çözünebilen ürenin çözünme ve salınım hızlarını düzenler (C. Grant, 2005; M. Guo vd 2005).

Thind ve arkadaşlarına göre (H. S. Thind ve ark., 2010), kaplanmış üre, azotun toprak çözeltisine düşük sızma oranı nedeniyle bitkiler üzerindeki toksisiteyi azaltır. Azotun salınım mekanizmalarının, kaplama malzemesinin yapısı ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir. Gözeneksiz hidrofobik kaplamalar durumunda, kaplamanın kısmi bozunmasıyla kaplanmış üreden besin maddelerinin salınımı gerçekleşir. Zamanla kaplama gözenekli hale gelir ve bozularak gübreden besin maddelerinin ani bir şekilde serbest kalmasına yol açar. Önceki araştırmalar,

yavaş salınlı kaplamaların hem kısmen hidrofobik hem de kısmen hidrofilik özellikler taşıması gerektiğini ortaya koymuştur (B. Azeem ve ark., 2014), (F. Chen ve ark., 2010), (M.M.S. Choi ve A. Meisen., 1997). Hidrofilik özellik, suyun kaplama boyunca hareketini kolaylaştırarak besin maddelerinin taşınmasını mümkün kılar. Buna karşılık, hidrofobik özellik ise kaplama filminin bozulmasını ve gübrenin hızlı bir şekilde serbest bırakılmasını engeller.

2. Yavaş Salınlı Gübrelere Azot Salınımı Mekanizması

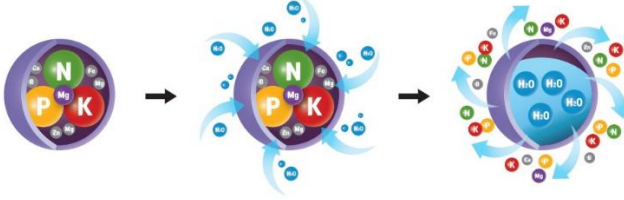
Yavaş salınlı gübrelere, gübre çekirdeği yarı geçirgen bir kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. Bu kaplama, gübre içindeki besin maddelerinin yavaş salınımını kontrol ederken aynı zamanda suyun çekirdeğe girişini düzenler. Besin salınım hızı, kaplama malzemesinin bileşimi, kalınlığı, difüzyon özellikleri, toprak nemi ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenir. Öte yandan, yavaş salınlı gübrelere besinlerin salınım hızı ise mikrobiyal aktivite, toprak nemi ve sıcaklık gibi etkenlere bağlıdır (K.T. Morgan, vd.,2009). Shaviv, kaplamalı gübrelere besin salınımını açıklayan ayrıntılı bir kavramsal model sunmuştur (A. Shaviv, 1995). Bu model, besin salınımını üç aşamada tanımlamıştır:

1. Gecikme dönemi: Gübre granülünün katı çekirdeği ile çevresi arasında oluşan buhar basıncı farkı, su buharının kaplama membranını geçerek çekirdek ile kaplama arasındaki boşlukları doldurmasını sağlayan bir itici güç oluşturur. Bu boşlukların belirli bir su hacmine ulaşması için geçen süreye gecikme dönemi denir. Bu süre zarfında gübreden besin salınımı ya çok az olur ya da hiç gerçekleşmez.

2. Sabit salınım dönemi: Granül içinde doymuş bir çözelti hacmine ulaşıldığında, gübre granülünden besin maddeleri sürekli olarak salınmaya başlar. Bu süreç, granül içindeki doymuş çözelti ile dış ortamda bulunan düşük konsantrasyonlu çözeltisi arasındaki sabit bir konsantrasyon gradyanı tarafından yönlendirilir. Granül içinde doymuş çözelti, çözünmemiş katı gübre ile denge halinde olduğunda korunur. Bu denge sürdüğü sürece, gübreden besin salınım hızı sabit kalır.

3. Azalma dönemi: Gübre tamamen çözüldüğünde, iç konsantrasyon, çözünmeyen gübre kalmadığı ve çekirdeğe sürekli su girişi olduğu için

kademeli olarak düşer. Bu durum, gübreden dış çözeltiliye besin maddesi salınım hızının azalmasına neden olur. Bu aşama, azalma dönemi olarak adlandırılır.



Şekil 2. Yavaş salımlı gübrelerde besin salınımı

3. Yavaş Salımlı Gübrelerin Bitki Beslemedeki Rolü

Yavaş salımlı gübreler, kontrollü besin maddesi verme sistemleri sayesinde bitki beslenmesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir:

- Gelişmiş Besin Maddesi Kullanılabilirliği:** Bu gübreler, besin maddelerini uzun bir süre boyunca sabit bir şekilde sağlar ve bu, bitkilerin besin alım desenleriyle uyumlu hale gelir. Bu sayede, kritik büyüme aşamalarında besin eksiklikleri azalır ve besin kullanım verimliliği artar.
- Azaltılmış Besin Kaybı:** Geleneksel gübreler, sızma, buharlaşma veya yüzey akışı yoluyla besin kayıplarına neden olabilir. Yavaş salımlı gübreler ise besin maddelerini yavaşça salarak bu kayıpları en aza indirir ve kök bölgesinde kalmalarını sağlar.
- Daha İyi Kök Emilimi:** Besin maddelerinin tutarlı bir şekilde salınması, bitkilerin aniden besin fazlalığı veya eksikliği yaşamamasını sağlayarak daha iyi kök gelişimini teşvik eder. Bu durum genel bitki sağlığını ve büyümesini iyileştirebilir.
- Artan Bitki Büyümesi ve Verimi:** yavaş ve kontrollü besin sağlanması, bitkilerin vejetatif ve üreme büyüme aşamalarını optimize eder ve daha yüksek ürün verimine yol açar. Bitkiler, aşırı gübrelemeden kaynaklanan stres olmaksızın dengeli bir büyüme yaşar.
- Besin Toksisitesi Riskinin Azaltılması:** Topraktaki aşırı besin birikimini önleyerek toksisiteyi azaltır ve bitki metabolizmasını olumsuz etkileyen durumlardan kaçınılmasını sağlar.

- f) Çevresel Faydalar: Sızma ve yüzey akışını azaltarak nitrat kirliliği gibi çevresel zararları en aza indirir. Bu sürdürülebilir gübreleme yaklaşımı, çevre dostu tarım uygulamalarını destekler.
- g) Hedefe Uygun Besin Sağlama: Bitkinin gelişim ihtiyaçlarına uygun hızlarda belirli besinleri salacak şekilde tasarlanabilir, bu da özelleştirilmiş gübreleme stratejilerine olanak tanır.
- h) Toprak Sağlığının İyileştirilmesi: Besin maddelerinin kademeli olarak salınması, toprak yapısını ve mikrobiyal aktiviteyi koruyarak bitki büyümesi için sağlıklı bir kök bölgesi oluşmasını destekler.
- i) Uzun Vadede Maliyet Etkinliği: Başlangıçta daha pahalı olmasına rağmen, sık gübre uygulamalarına olan ihtiyacı azaltarak işçilik ve uygulama maliyetlerini düşürür ve genel besin kullanımı verimliliğini artırır.
- j) Artan Stres Toleransı: Yavaş salımlı gübrelere ile yetiştirilen bitkiler, iyileştirilmiş besin alımı ve kök gelişimi sayesinde kuraklık veya tuzluluk gibi abiyotik streslere karşı daha dayanıklı hale gelir. Bu özellikler sayesinde, yavaş salımlı gübreler sürdürülebilir tarımı desteklerken optimal bitki büyümesini ve beslenmesini sağlar.

4. Yavaş Salımlı Gübrelere Ürün Verimi Artışı

Yavaş salımlı gübreler, bitkilerin ihtiyacı olan besin maddelerini sürekli olarak ve zaman içinde sağladığı için, bitkiler daha sağlıklı ve güçlü büyür. Bu, bitkilerin daha fazla verim elde etmelerini sağlayabilir. Ayrıca, ürünlerin kalitesi de genellikle iyileşir, çünkü besinlerin düzenli olarak verilmesi, bitkilerin stresle başa çıkmasını kolaylaştırır. Örneğin; aşırı azot gübresi kullanımı, domates üretiminde verim ve ekonomik fayda amacıyla yaygın bir uygulamadır (Fan ve ark., 2014), ancak bu durum verim ve kaliteyi düşürür ve toprak çevresel risklerini artırır (Zhang et al, 2011; Kusu ve ark., 2014). Geleneksel azot gübrelere karşılaştırıldığında, yavaş salımlı azot gübrelere azotu daha dengeli bir şekilde dağıtarak, gübrelemenin ilk aşamasında gereksiz azot kaybını azaltır, azot talebinin zirve yaptığı dönemde azot teminini artırır ve üst gübreleme uygulamalarıyla ilgili iş gücü ihtiyacını düşürür (Carson ve ark., 2014a; Chen ve ark., 2008). Bu nedenle, yavaş salımlı gübreler giderek daha fazla ilgi görmektedir. Önceki araştırmalar, geleneksel azot gübrelere karşılaştırıldığında, polimer kaplamalı yavaş salımlı azot

gübrelerinin domates büyümesini teşvik ettiğini ve domates verimini artırdığını doğrulamıştır (Zhu ve ark., 2012; Koivunen ve Horwath, 2005). Ancak, kaplama materyalinin zayıf bozunumu ve ikincil çevresel kirlilik, bu tür azot gübrelereyle ilişkili bazı sorunlardır. Yavaş salımlı azot gübrelere için yeni yöntemlerin keşfi, sürdürülebilir tarım gelişimini desteklemek açısından önemlidir. Biochar, tarım ve orman atıklarının yüksek sıcaklıkta piroliz edilerek üretilen, gözenekli ve karbon bakımından zengin katı bir üründür ve toprak ile su tutma kapasitesini artırabilir. Biochar'dan üretilen yeni bir karbon bazlı yavaş salımlı azot gübresinin, buğday (Gao ve ark., 2012), mısır (Lu ve ark., 2011) ve pirinç (Chen ve ark., 2013) verimlerini artırdığı bildirilmiştir. Bu biochar bazlı gübre ayrıca kanola, Çin lahanası, biber, yer fıstığı, tatlı patates, sorgum ve soya fasulyesi üzerinde de olumlu etkiler göstermektedir (Qiao, 2014, Liao ve ark., 2015). Bu gübrelerin kullanımı, sadece kısa vadede değil, uzun vadede de toprak sağlığını iyileştirerek sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlaması bu alanda yeni çalışmaların yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Sonuç

Yavaş salımlı azotlu gübreler, azotun toprağa daha yavaş bir şekilde salınması sayesinde, bitkilerde azot yetersizliği ya da fazlalığından kaynaklanacak stresin önlenmesi mümkün olmaktadır. Bu, özellikle azotun hızlı salınım gösterdiği durumlarda yaşanabilecek çevresel kirlenmeleri de engellemektedir. Ayrıca, bu gübrelerin kullanımı ile toprak yapısının ve biyolojik çeşitliliğin korunması sağlanabilir, çünkü yavaş salınım özellikleri, azotun toprakta daha uzun süre kalmasına ve mikroorganizmalara zarar vermeden bitkiler tarafından kullanılmasına olanak tanır. Araştırmalar, yavaş salımlı azotlu gübrelerin, özellikle meyve ve sebze gibi yüksek değerli bitkilerde, daha dengeli büyüme, ürün kalitesinde iyileşme ve verim artışı sağladığını göstermektedir. Bunun yanında, azotlu gübrelerin çevresel kayıplarını azaltmak, sera gazı salınımını en aza indirmek ve toprak sağlığını iyileştirmek amacıyla kullanılan bu gübreler, geleceğin tarım tekniklerinde önemli bir yer tutmaktadır. Sonuç olarak, yavaş salımlı azotlu gübreler, tarımda sürdürülebilir üretimi destekleyen ve çevresel etkileri minimize eden önemli bir araçtır. Gelecekte, bu gübrelerin daha yaygın ve etkin kullanımı ile, gıda üretiminin artırılması ve çevreye duyarlı tarım uygulamalarının teşvik

edilmesi mümkün olacaktır. Tarımsal üretim ve çevresel denge arasında daha iyi bir uyum sağlamak için yavaş salınlı gübrelerin kullanımı, modern tarımın temel taşlarından biri haline gelebilir.

KAYNAKÇA

- A. Shaviv, 110. Shaviv, A., Zlotnikov, E., Zaidel, E. (1995). Mech. Nutr. Release from Control. Release Fertil. "Controlled/Slow Release Fertil. Dahlia Gredin. Meml. Int. Work. Proceedings" (J.Hagin J.Mortvedt, Eds. (1995).
- B. Azeem, K. KuShaari, Z.B. Man, A. Basit, T.H. Thanh, Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer, J. Control. Release 181 (2014) 11–21.
- C. Grant, "Policy Aspects Related to the use of Enhanced-Efficiency Fertilizers: Viewpoint of the Scientific Community. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt", International Fertilizer Industry Association, Paris, France, 2005.
- Carson, L.C., Ozores-Hampton, M., Morgan, K.T., 2014b. Effect of controlled-release and soluble fertilizer on tomato production and post harvest quality in seepage irrigation. Hortscience 49 (1), 89–95.
- Chen, D., Suter, H., Islam, A., 2008. Prospects of improving efficiency of fertilizer nitrogen in Australian agriculture: a review of enhanced efficiency fertilizers. Aust. J. Soil Res. 46 (4), 289–301.
- Chen, L., Qiao, Z.G., Li, L.Q., Pan, G.X., 2013. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and Nitrogen use efficiency (chinese). J. Ecol. Rural Environ. 29 (5), 671–675.
- E. Ariyanto, H.M. Ang, T.K. Sen The influence of various process parameters on dissolution kinetics and mechanism of struvite seed crystals J. Inst. Eng. Ser. A, 98 (2017), pp. 293-302
- F. Chen, F. Ye, G. Chu, J. Guo, L. Huo, Synthesis of acrylate modified vinyl chloride and vinyl isobutyl ether copolymers and their properties, Prog. Org. Coat. 67 (2010) 60–65.
- Fan, F.C., Li, Z.H., Zhang, L.F., 2010. Study on the relationship between irrigation amount and NO₃-N leaching of tomato field in greenhouse (chinese). Plant Nutr. Fert. Sci. 16 (5), 1161–1169.
- Gao, H.Y., He, X.S., Chen, X.X., 2012. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield (chinese). J. Agro-Environ. Sci. 31 (10), 48–1955.

- H. S. Thind, S. Bijay, R. P. S. Pannu, S. Yadvinder, S. Varinderpal, R. K. Gupta, M. Vashistha, J. Singh, and A. Kumar, "Relative performance of neem (*Azadirachta indica*) coated urea vis-à-vis ordinary urea applied to rice on the basis of soil test or following need based nitrogen management using leaf colour chart," *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 87, pp. 1–8, (2010/05/01 2010).
- J. and Thomas, 59. Jensen, Dr. Thomas L., "Soil PH Availab. Plant Nutr. IPNI Plant Nutr. TODAY, Fall 2010, No. 2, 〈Www.Ipni.Net/Pnt〉 (2010).
- K.T. Morgan, K.E. Cushman, S. Sato Release mechanisms for slow- and controlledrelease fertilizers and strategies for their use in vegetable production *Horttechnology*, 19 (2009), pp. 10-12.
- Koivunen, M.E., Horwath, W.R., 2005. Methylene urea as a slow-release nitrogen source for processing tomatoes. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 71 (2), 177–190.
- Kuscu, H., Turhan, A., Ozmen, N., 2014. Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.). *Hortic. Environ. Biotechnol.* 55 (2), 103–114.
- Liao, S.Q., Chen, Y.H., Li, Y.M., 2015. Effect of biochar-based urea on yield and quality of celery and soil NO₃—N content (Chinese). *J. Agric. Res. Environ.* 32 (5), 443–448.
- Lu, R.K., 2000. Analysis Method of Soil Agrichemistry. China Agricultural Technology Publishing House, Beijing.
- M. Guo, M. Liu, F. Zhan, L. Wu, "Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation", *Ind. Eng. Chem. Res.* 44 (2005) 4206–4211.
- M.K. Kottke, H.R. Chueh, C.T. Rhodes, Comparison of disintegrant and binder activity of three corn starch products, *Drug Dev. Ind. Pharm.* 18 (1992) 2207–2223.
- M.M.S. Choi, A. Meisen, Sulfur coating of urea in shallow spouted beds, *Chem. Eng. Sci.* 52 (1997) 1073–1086.
- Qiao, Z.G., 2014. Effects of biochar-based fertilizer on growth, quality and nitrogen use efficiency of pepper (chinese). *Chin. J. Soil Sci.* 1, 174–179.

- R.A. Olson, Fertilizer technology and use, Soil Sci. Soc. Amer. Madison, W (1971). A. Dobermann, "Nitrogen Use Efficiency-State of the Art. IFA International
- S. Wu, L.J. Mickley, D.J. Jacob, D. Rind, D.G. Streets, "Effects of 2000–2050 changes in climate and emission on global tropospheric ozone and the policy-relevant background surface ozone in the United States", J. Geophys. Res. 113 (2008) D18312.
- U. Bröckel, C. Hahn, "Product design of solid fertilizers, Chem. Eng. Res. Des. 82 (2004) 1453–1457.
- W.J. Mulder, R.J.A. Gosselink, M.H. Vingerhoeds, P.F.H. Harmsen, D. Eastham, Lignin based controlled release coatings, Ind. Crop. Prod. 34 (2011) 915–920.
- Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt", International Fertilizer Industry Association, Paris, France, 2005.
- Zhang, T.Q., Liu, K., Tan, C.S., 2011. Processing tomato nitrogen utilization and soil residual nitrogen as influenced by nitrogen and phosphorus additions with drip fertigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 75 (2), 738–745.
- Zhu, Q., Zhang, M., Ma, Q., 2012. Copper-based foliar fertilizer and controlled release urea improved soil chemical properties, plant growth and yield of tomato. Sci. Hort. 143, 109–114.



ISBN: 978-625-367-983-5