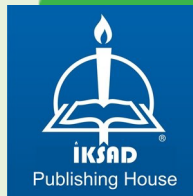


# MÜHENDİSLİKTE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPI TEKNOLOJİLERİ

EDİTÖR

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ



# MÜHENDİSLİKTE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE YAPI TEKNOLOJİLERİ

## EDİTÖR

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

## YAZARLAR

Prof. Dr. Ali ATEŞ

Prof. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR

Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Prof. Dr. Ramazan KATIRCI

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Doç. Dr. Erdiñç ARICI

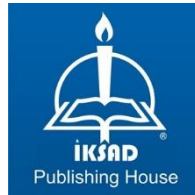
Doç. Dr. İ. İskender SOYASLAN

Arş. Gör. Taha OĞUZ

Bora ASLAN

Oğuzhan YILMAZ

Sümeyye ÇARKIT



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)

TURKEY 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: 978-625-378-047-0**

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2024

Ankara / Türkiye

Size = 16x24 cm

# İÇİNDEKİLER

## ÖNSÖZ

*Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ* ..... 1

## BÖLÜM 1

### YERALTISUYU HASSASİYETİ KAVRAMININ ÖNEMİ VE GELİŞİM SÜRECİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Doç. Dr. İ. İskender SOYASLAN* ..... 3

## BÖLÜM 2

### YERALTISUYU HASSASİYETİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

*Doç. Dr. İ. İskender SOYASLAN* ..... 19

## BÖLÜM 3

### AKILLI TARIMDA SENSÖRLERİN ROLÜ: VERİMLİLİĞİ ARTIRAN YENİLİKÇİ ÇÖZÜMLER

*Sümeyye ÇARKIT*

*Bora ASLAN* ..... 37

## BÖLÜM 4

### ABS TABANLI EKG ELEKTROTLARIN ÜRETİMİNDE GÜMÜŞ KAPLAMA SÜRECİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

*Prof. Dr. Ramazan KATIRCI*

*Arş. Gör. Taha OĞUZ* ..... 57

## BÖLÜM 5

### MÜHENDİSLİK OPTİMİZASYONLARINDA TAGUCHİ METODU VE YAPAY SİNİR AĞLARININ ORTAK KULLANIMI

*Doç. Dr. Erdinç ARICI*

*Prof. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR* ..... 71

**BÖLÜM 6**  
**YÜKSEK SÜRATLI DENİZ TAŞITLARININ FORMLARI**  
**AÇISINDAN ANALİZİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK**

*Oğuzhan YILMAZ*

*Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL* .....95

**BÖLÜM 7**  
**OSMANLI YAPILARINDA TAŞ İŞÇİLİĞİ: SANAT, TEKNOLOJİ VE**  
**USTALIK**

*Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ*.....117

**BÖLÜM 8**  
**6 ŞUBAT 2023 DEPREMİNDE SAHADA GÖRÜLEN ZEMİN YAPI**  
**HASARLARINA GENEL BAKIŞ**

*Prof. Dr. Ali ATEŞ*.....151

## ÖNSÖZ

Bilimsel bilgi, yalnızca keşiflerin kaydını tutmakla kalmaz, aynı zamanda toplumların gelişimine rehberlik eder. Elinizdeki bu kitap, çeşitli alanlardaki yenilikçi yaklaşımları ve derinlemesine analizleri bir araya getirerek modern bilimin sınırlarını keşfetmektedir. Bu bağlamda, farklı disiplinlerdeki özgün çalışmaları tek bir çatı altında sunmayı amaçladık.

Kitabımızın ilk bölümleri, yeraltısuyu hassasiyeti kavramının önemini ve bu alandaki metodolojik yaklaşımları inceleyerek, çevresel sürdürülebilirlik ve su yönetimi konularına dikkat çekmektedir. Bu analizler, doğal kaynakların korunması ve doğru yönetimi için bilimsel temellerin nasıl oluşturulması gerektiğine dair değerli bilgiler sunmaktadır.

Tarım sektörü ise, küresel gıda güvenliği ve verimlilik için teknolojik yeniliklere giderek daha fazla ihtiyaç duymaktadır. Bu çerçevede, akıllı tarımda sensörlerin rolü üzerine yazılmış bölüm, teknolojinin nasıl doğa ile uyum içinde kullanılabileceğine dair ilham verici bir vizyon sunmaktadır.

İnsan sağlığına yönelik teknolojiler de kitapta önemli bir yer tutmaktadır. ABS tabanlı EKG elektrotlarının üretim süreçlerindeki gelişmeler üzerine yapılan çalışmalar, medikal cihazların performansını artırmak ve daha erişilebilir hale getirmek için teknolojinin nasıl optimize edilebileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, mühendislik bilimleri ve deneysel tasarımda kullanılan yenilikçi yöntemler, kitabımızda geniş bir şekilde ele alınmıştır. Taguchi metodu ve yapay sinir ağlarının ortak kullanımına dair çalışmalar, mühendislik problemlerine daha hızlı ve etkili çözümler getirilmesinin yollarını gözler önüne sermektedir.

Denizcilik sektöründen taş işçiliğine kadar uzanan çeşitli uygulamalı bilim alanlarında da sürdürülebilirlik vurgusu önemli bir yer tutmaktadır. Yüksek süratli deniz taşıtlarının formlarının analizi ve Osmanlı yapılarındaki taş işçiliğinin sanat ve teknoloji ile harmanlanması hem geçmişin bilgi birikimini hem de geleceğin potansiyelini bir araya getirmektedir.

Bu kitap, çeşitli disiplinlerdeki bilim insanlarının bilgi ve uzmanlıklarını bir araya getirerek, bilim ve teknolojiye çok yönlü bir katkı sağlamaktadır. Eserin, araştırmacılar, öğrenciler ve ilgili profesyoneller için değerli bir kaynak olmasını umuyoruz.

Katkıda bulunan tüm yazarlarımıza, editör ekibimize ve yayınevimize teşekkürü borç biliriz. Bu kitabın, yeni araştırmalara ilham kaynağı olması ve bilimsel topluluğa fayda sağlaması dileğiyle...

Editör  
Doç. Dr. Abdul Vahap Korkmaz  
Afyon  
Kocatepe Üniversitesi

## BÖLÜM 1

# YERALTISUYU HASSASİYETİ KAVRAMININ ÖNEMİ VE GELİŞİM SÜRECİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Doç. Dr. İ. İskender SOYASLAN<sup>1</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502772>

---

<sup>1</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye. isoyaslan@mehmetakif.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5282-8094





## GİRİŞ

Yeraltısuyu, tüm dünyada endüstriyel, tarımsal ve evsel ihtiyaçların ve üretimin karşılanmasında temel kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır. Yeraltısuyu olmadan endüstriyel üretim, tarımsal faaliyetler ve insan hayatının günlük idamesinin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi imkansız görülmektedir. İnsan ve diğer tüm canlıların ekosistem içerisinde hayatını idame ettirebilmesi için gerekli olan yeraltısuyu hayati bir kaynak olarak yaşamın devamı, halk sağlığı ve ekonomik kalkınma için çok önemli bir doğal kaynaktır. Ayrıca, günümüzde etkilerini giderek hissetmeye başladığımız iklim değişikliği, kentleşme ve nüfus artışı tatlı suya olan talebi artırmıştır. Bu talep artışı yeraltısuyuna olan yönelimi artmasına sebep olmuştur. Sonuçta yeraltısuyu akiferlerinde tükenme, kirlenme ve akış mekanizmalarının değişmesi gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Gleeson vd., 2020).

Yeraltısuyu arama ve değerlendirme çalışmaları, yeraltısuyu kaynaklarının kullanılabilirliğini, kalitesini ve sürdürülebilirliğini anlamak için gerekli hale gelmiştir. Yeraltısuyu etütleri; jeolojik, meteorolojik, hidrolojik, hidrojeolojik modelleme, hidrojeokimya ve jeofizik araştırmaları gibi farklı teknikler ve analiz metodolojiler kullanılarak yeraltı suyu kaynaklarının sistematik olarak değerlendirilmesini içerir. Yeraltısuyu etütleri akiferin beslenme alanı sınırı olarak tanımlanan su toplama havzası sınırlarının tespiti ile başlamaktadır. Sonrasında ise akifer sınırlarını belirlemeyi, akiferden alınabilecek emniyetli su miktarını tahmin etmeyi ve potansiyel kirlilik kaynaklarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Arama çalışmaları sırasında toplanan veriler su kaynakları yönetim stratejilerini bilgilendirerek kuyu yerleşimi, üretim oranları ve arazi kullanım planlamasına ilişkin kararların alınmasında etkin rol oynamaktadır. Ayrıca değerlendirme çalışmaları, yeraltısuyunun içme ve tarımsal sulama gibi kullanım alanına göre standartlar kullanılarak uygunluğunun değerlendirilmesini içermektedir. Yeraltısuyu kullanımı hakkında karar vericiler, hem arama hem de değerlendirme çalışmalarından elde edilen verileri kullanılarak sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi politikaları geliştirme ve uygulama konusunda doğru kararları alabilirler.

Yeraltısuyu hassasiyet çalışmalarının önemi, özellikle kurak ve yarı kurak alanlar gibi sürekli su kıtlığı çeken bölgelerde daha da belirginleşmektedir. Yeraltısuyu kaynaklarının mekânsal ve zamansal dinamiklerini anlamak, iklim değişkenliğine karşı dayanıklılığı artırmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek için hayati önem taşımaktadır. Tarımsal sulamada kullanmak amacıyla aşırı yeraltısuyunun çekilmesi ve artan kuraklık olayları, akiferlerdeki su seviyesinin çok ciddi oranlarda düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca bu durum, akiferlerin koruma çalışmaları için kullanıcıların bilgilendirmesi, kapsamlı araştırma ve değerlendirmenin önemini ortaya koymaktadır.

Sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi politikaları, yeraltısuyu üretimine bağlı olan ekosistemlerin korunması ve böylece biyolojik çeşitliliğin ve ekolojik dengenin sürdürülmesi için gereklidir. Yeraltısuyu beslenimine ve yeraltısuyu seviyesine bağlı olan sulak alanlar, akarsular ve göller, su seviyelerinin azalmasından olumsuz olarak etkilenebilirler. Hatta bu doğal yaşam alanlarındaki ekosistem zarar görerek habitat kaybına ve tür çeşitliliğinin azalmasına sebep olabilir. Ayrıca, yüzey suyu ve yeraltısuyu sistemlerinin birbirine bağlı olmasından dolayı, herhangi birinde oluşacak olumsuz bir gelişim bir diğeri üzerinde olumsuz etkilere sebep olabilecektir. Bu sebepten dolayı sürdürülebilir su kaynakları yönetimi, tüm su kaynaklarını ayırmadan entegre bir şekilde kapsamayı gerektirmektedir. Bu kadar hayati bir kaynak olan yeraltısuyu, su tasarrufu ve kaynak yönetimi ile ilgili tartışmalarda genellikle göz ardı edilmektedir.

Sonuç olarak, etkili yeraltısuyu araştırması ve değerlendirmesi sadece acil su ihtiyaçlarının karşılanması için değil, aynı zamanda artan çevresel zorluklar karşısında sürdürülebilir bir geleceğin güvence altına alınması için de hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, sürdürülebilir su kaynakları yönetimindeki kritik roller üslenen yeraltısuyu hassasiyet kavramının tarihi gelişimi, yeraltısularının korunması ve sürdürülebilir kullanımı için önemi üzerinde durulmuştur.

## 1. YERALTISUYU HASSASİYET KAVRAMI

Yeraltısuyu hassaslığı (Groundwater Vulnerability) kavramı, su kaynakları yönetiminde önemli bir araç olarak ortaya çıkmış ve akiferlerin kirlenmeye karşı duyarlılığını değerlendirmek için bir standart sağlamıştır. Literatürde İngilizce olarak “Vulnerability” kavramı kullanılmakta olup, Türkçeye tercüme edildiğinde “savunmasızlık, hassasiyet ve hassasiyet” kelimelerine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada “hassasiyet” ifadesi uygun bulunarak kullanılmıştır.

“Hassasiyet” ifadesi, yeraltısuyu sistemi olan akiferin bozulma veya stres nedeniyle zarar görme olasılığının derecesini belirtir. Hassasiyet, farklı alanlarda veya hatta aynı alanda farklı şekillerde kavramsallaştırılabilir (Füssel, 2004). Aynı zamanda belirli bir tehlikeye veya bir grup tehlikeye maruz kalan belirli bir sistem için tanımlanabilir (Brooks, 2003). Potansiyel bir kirlenme kaynağına maruz kalan bir akifer sistemi düşünüldüğünde, hassasiyet kavramı, toprak ve akifer özelliklerinin, özellikle kara yüzeyinde bulunan kaynaklara karşı bir miktar koruma sağlayabileceği varsayımı üzerine kurulmalıdır. Yeraltısuyu hassasiyeti kavramı, kirletici konsantrasyonlarının yeraltısuyuna ulaşma olasılığının değerlendirmesi olarak ifade edilmesine rağmen, tek bir standartlaştırılmış tanımlama bulunmamaktadır (Worrall ve Besien, 2005; Liggett ve Talwar, 2009). Yeraltısuyu araştırmacıları, yeraltısuyu hassasiyetinin tanımları konusunda bir fikir birliğine varmayı ve dolayısıyla yeraltısuyu hassasiyetinin değerlendirilmesi için bir referans terimi sağlamayı başaramadılar (Gogu ve Dassargues, 2000). Dahası, bilim camiası içinde, yeraltısuyu hassasiyetinin yalnızca kimyasal ve fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olan akiferin içsel bir özelliği olarak mı yoksa kirletici özelliklerinin bir fonksiyonu olarak mı değerlendirilmesi gerektiği konusunda devam eden bir tartışma vardır. Ancak bu bağlamda, şu anda, içsel ve özgül hassasiyet olmak üzere iki kavramı içeren genel yeraltısuyu hassasiyeti kavramının yaygın olarak tanındığı ve çoğu araştırmacılar tarafından yararlı olarak kabul edildiği belirtilmelidir. Bununla birlikte, içsel ve özgül hassasiyet arasında net bir ayrımın her zaman mümkün olmadığı ve birine veya diğerine açıkça atıfta bulunulduğunda bile, birkaç farklı tanımın mevcut olduğunun farkında olmak önemlidir (NRC, 1993).

Literatürde bulunabilen yeraltısuyu veya akifer hassasiyetinin ilk tanımlarından biri, Albinet ve Margat (1970) tarafından yapılmıştır. Bu tanımda, hassasiyet (vulnerability) ifadesi "kirleticilerin yüzey katmanlarının doğasına ve hidrojeolojik koşullara göre akiferlere nüfuz etme ve yayılma yetenekleri" olarak ifade edilmiştir. O zamandan beri, yeraltısuyu hassasiyeti kavramı önemli ölçüde değişime uğramıştır ve birçok başka tanım önerilmiştir (Popescu vd., 2008). İçsel olarak yani doğal akiferin kirlenmeye karşı hassasiyetini "akifer sistemlerinin, parçalarında, geometrik ve hidrodinamik ortamlarında, akışkan veya hidro-vektörlü kirleticileri almaya ve yaymaya yönelik özgül duyarlılığı, bunun yeraltısuyu kalitesi üzerindeki etkisi, zaman ve mekanın bir fonksiyonudur" olarak tanımlamıştır (Civita, 1987). Akifer kirliliğine karşı hassasiyeti "bir akiferin çeşitli kısımlarının bir kirletici yükünden olumsuz etkilenmeye başlamasına karşı hassasiyetini belirleyen içsel özellik" olarak da tanımlamıştır (Foster, 1987). ABD Çevre Koruma Ajansı ilk olarak akifer hassasiyeti ile yeraltısuyu hassasiyeti arasında, sırasıyla bağımsız ve arazi kullanımı ve kirletici özelliklerine bağlı olarak ayırım yapmıştır. Buna göre, akifer hassasiyeti "kara yüzeyine veya yakınına uygulanan pestisit gibi bir kirleticinin, doymamış bölgede bulunan yakın bir jeolojik birimin içsel özelliklerine bağlı olarak akifere göç edebilmesinin göreceli kolaylığı" olarak tanımlanmıştır. ABD Yeraltısuyu Duyarlılığını Değerlendirme Teknikleri Komitesi (NRC, 1993), "duyarlılık değerlendirmelerinin farklı kirleticilerin farklı davranışlarını hesaba katabileceğini veya katamayacağını" kabul etmiştir. Yalnızca noktasal olmayan kaynaklardan veya alana yayılmış noktasal kirlilik kaynaklarından kaynaklanan kirlenmeye atıfta bulunarak, yeraltısuyunun kirlenmeye karşı duyarlılığını "kirleticilerin en üstteki akiferin üzerindeki bir yere getirildikten sonra yeraltısuyu sisteminde belirli bir konuma ulaşma eğilimi veya olasılığı" olarak tanımlamaktadır. Vrba ve Zoporozec (1994), "bir yeraltısuyu sisteminin insan ve/veya doğal etkilere olan duyarlılığına bağlı olarak, o sistemin içsel bir özelliği" olarak tanımlanan yeraltısuyu duyarlılığı tanımında açıkça "göreceli, ölçülemez ve boyutsuz" kavramlarını ortaya koydu. Sonuç olarak, içsel hassasiyet "yeraltısuyu örtüsünün kalınlığı, vadoz bölgesinin litolojik özellikleri, akifer özellikleri ve yeniden beslenme tarafından belirlenen göreceli, ölçülemeyen ve boyutsal olmayan bir özelliği" olarak; özel

hassasiyet ise “arazi kullanım uygulamaları dikkate alınarak yeraltısuyunun belirli kirleticilere karşı hassasiyeti” olarak tanımlanmıştır.

En son olarak, Avrupa COST Eylem 620 (EC, 2003) çalışma grubu, “karst yeraltısuyunun korunması için iyileştirilmiş ve tutarlı bir Avrupa yaklaşımı” geliştirme çabasıyla, “yeraltısuyunun kirleticilere karşı içsel hassasiyetinin bir alanın jeolojik, hidrolojik ve hidrojeolojik özelliklerini hesaba kattığı, ancak kirleticilerin doğasından ve kirlenme senaryosundan bağımsız olduğu” konusunda anlaşırken, “özel hassasiyetin belirli bir kirleticinin veya kirletici grubunun özelliklerini ve bunların alanın içsel hassasiyetinin çeşitli yönleriyle olan ilişkisini/ilişkilerini hesaba kattığı” konusunda anlaşmıştır. Dolayısıyla, Avrupa COST Eylem 620 (EC, 2003) tarafından önerilen terminoloji, içsel ve özel kırılabilirliğe atıfta bulunulurken neyin dikkate alınması gerektiğini basitçe tanımlamaktadır. Bu tanımlama niceliksel bir değerlendirme olasılığına işaret etmemekte ve daha önce tartışılan “göreceli, ölçülemez ve boyutsuz (relative, non measurable and dimensionless)” kavramlarını içermemektedir (NRC 1993; Vrba ve Zoporozec,1994; Voigt vd., 2004; Sorichetta vd., 2011).

Yeraltısuyu hassasiyeti belirsiz bir kavram olup muhtemelen benzersiz ve titiz bir şekilde kolayca tanımlanamamaktadır (Daly vd., 2002). Bu nedenle, pratik bir bakış açısından, standart ve oybirliğiyle kabul edilmiş bir tanımın olmadığından dolayı, bir yeraltısuyu hassasiyeti değerlendirmesi yaparken şunları yapmak son derece önemlidir:

- Çalışmanın temel amacı ve elde edilecek sonuçları dikkatlice belirlemek,
- Kullanılacak yeraltısuyu hassasiyeti tanımına açıkça atıfta bulunmak,
- Belirlenen hedeflere ve benimsenen tanıma göre uygun değerlendirme yöntemini seçmek.

## **2. YERALTISUYU HASSASİYET ÇALIŞMALARI**

Literatür incelendiğinde yeraltısuyu hassasiyetini değerlendirmek için kullanılan çeşitli yaklaşım ve çerçeveleri ortaya koymaktadır ve her biri

yeraltısuyu sistemlerinin karmaşıklıklarına dair benzersiz içgörüler sağlamaktadır. Bu kitap bölümünde, yeraltısuyu hassasiyetini belirlemek için kullanılan güncel metodolojiler incelenerek uygulamaları, güçlü yönleri ve sınırlamaları hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

Ulusal ve uluslararası düzeyde, yeraltısuyu kalitesinin korunmasının küresel tatlı su kıtlığı sorununu ele almak için dikkate alınması gereken ilk unsurlardan biri olması gereken bütünleşik bir su kaynakları yönetimi yaklaşımının geliştirilmesi ve benimsenmesinin önemi açıktır (GWP, 2000). Yeraltısuyunu etkili ve uygun bir şekilde korumak için, yeraltısuyunun kirlenmeye karşı en savunmasız olabileceği alanları tespit etmek gerekmektedir. Sonrasında bu bilgileri, arazi ve su kaynakları yöneticileri gibi potansiyel son kullanıcılar tarafından kullanılabilir. Sonuçta yeraltısuyu kalitesi üzerindeki zararlı etkileri önlemek veya en aza indirmek için kullanılacak savunmasızlık haritalarının hazırlanması hayati önem taşımaktadır (Arthur vd., 2007).

Yeraltısuyu savunmasızlık değerlendirmesini gerçekleştirmek için farklı yaklaşımlara dayanan ve çeşitli girdi parametreleri kullanan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Sorichetta vd., 2011). Ancak, çevresel planlama ve yönetiminde kullanılacak etkili araçlar olarak kabul edilmeleri için, bu yöntemlerin son ürünleri olan yeraltısuyu hassasiyet haritalarının bilimsel olarak sağlam, anlamlı ve güvenilir olması gerekir (Soyaslan, 2020). Aslında, bir yeraltısuyu hassasiyet haritası yeraltısuyu kaynaklarını korumak için bilimsel olarak savunulabilir kararlar alınmasına izin vermeli ve çalışma alanındaki kirliliğin gerçek mekansal dağılımını açık bir şekilde tanımlamalıdır (Focazio vd., 2002).

Yeraltısuyu hassasiyetini değerlendirmek için istatistiksel yöntemlerin kullanılması, bilimsel olarak savunulabilir son ürünler üretmek için model karmaşıklığı ve maliyetler arasında makul bir yaklaşımı temsil eder. Gerçekten de, istatistiksel yöntemler, havza, ulusal ve uluslararası kadar değişen çeşitli mekansal ölçeklerde, çalışma alanındaki hassasiyeti etkileyen faktörleri nesnel olarak belirleme ve değerlendirmede bulunan belirsizliği ölçme olanağı sağlar (Nolan, 2001; Worrall ve Besien, 2005; Arthur vd., 2007). Bununla birlikte, çıktılarının anlamlılığının her zaman basit olmadığı

ve sınıflandırılmış hassasiyet haritaları elde etmek için genellikle ek yorumlama gerekmektedir. Bu durum elde edilen sonuçlar sürdürülebilir yeraltısuyu planlama ve yönetimde kullanılmadan önce dikkatlice ele alınmalıdır. Bu nedenle, şu anda bu alandaki araştırma çabası öncelikle yeni istatistiksel modelleme tekniklerini uygulamaya değil, halihazırda mevcut olanların doğruluğunu ve elde edilen sonuçlarının yani yeraltısuyu hassasiyet haritalarının güvenilirliğini değerlendirmeye yönelik olmalıdır (Fabbri ve Chung, 2008).

Yeraltısuyu hassasiyeti değerlendirmelerinde istatistiksel yöntemlerin etkinliğini gösteren çalışmalarda, saha gözlemlerinin önemini ve istatistiksel tekniklerin çeşitli veri kaynaklarını entegre etme yeteneği vurgulanmaktadır. Geliştirilen olasılıksal çerçeve yalnızca belirsizliğin değerlendirilmesine olanak sağlamakla kalmaz, aynı zamanda arazi kullanım planlaması ve çevre politikası için çok önemli olan hassasiyet haritalarının güncellenmesini de kolaylaştırır. Her yöntemde olduğu gibi, yanıltıcı sonuçlardan kaçınmak için parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve sonuçların yorumlanması büyük önemli taşımaktadır (Sorichetta vd., 2011).

Yeraltısuyu kirlenme riski için vadoz bölgedeki sızma çok etkili olmaktadır. Nüfus artışı ve tarımsal uygulamalar nedeniyle yeraltısuyu kaynakları üzerindeki artan baskıları bu etkiyi artırmaktadır. Yeraltısuyu hassasiyetini içsel ve belirli türlere ayırarak, kirlenme risklerini anlamak için ayrıntılı bir çerçeve sunulabilir. ampirik, deterministik ve istatistiksel (olasılıkçı) yöntemleri içeren hassasiyet tahminine yönelik çok yönlü bir yaklaşımdır (Arrey vd., 2019).

### **3.Yeraltısuyu hassasiyetinin önemi**

Yeraltısuyu hassasiyet çalışmaları, hidrojeolojik ve çevresel faktörlere dayalı olarak akiferlerin kirlenmeye ne kadar duyarlı olduğuna dair öngörüler sağlar. Bu amaçla herhangi bir kirlenici unsurun yeraltısuyu akiferine ulaşmaya kadar geçen süreçlerde etkili olan parametreleri ve çalışma alanının karakteristiklerini dikkate alır. Bu parametreler jeolojik, meteorolojik, hidrolojik, hidrojeolojik ve morfolojik özelliklerdir. Yeraltısuyu hassasiyet çalışmaları içme suyu kaynaklarının korunması (i), sürdürülebilir



kaynak yönetimi (ii) ve politika-planlamanın (iii) geliştirilebilmesi için çok önemlidir.

### **3.1. İçme suyu kaynaklarının korunması**

İçme suyu kaynaklarının korunması, halk sağlığını güvence altına almak ve ekosistemleri sürdürmek için hayati önem taşır. Bu, çeşitli yönetim stratejileri ve düzenleyici çerçeveler aracılığıyla hem yüzey suyunu hem de yeraltı suyunu kirlenmeye karşı korumayı içerir. Etkili kaynak suyu koruması (SWP-Source Water Protection), kirlenme risklerini en aza indirmektedir. Bu yaklaşım, suyun kaynaktan musluğa kadar güvenli kalmasını sağlayarak arazi kullanımından arıtma süreçlerine kadar birçok seviyede riskleri değerlendirmektedir. Özellikle geri kalmış ve gelişmekte olan ülkelerde, birincil içme suyu kaynağı olarak yeraltısuyu kullanılmaktadır.

### **3.2. Sürdürülebilir kaynak yönetimi**

Kirlenme riski taşıyan alanları belirleyerek, kaynak yöneticileri kirleticilerin yeraltı suyuna ulaşma riskini en aza indirmek için arazi kullanım planlaması, atık su yönetimi ve tarımsal uygulamalar gibi çabalara öncelik verebilir. Özellikle gelişmiş ülkelerde kaynak suyu korumasına (SWP) yönelik yönetim çalışmaları bir öncelik olarak görülmektedir. Ancak bölgeler arasında tutarlılığı sağlamada önemli zorluklar halen vardır. Farklı ülkeler, iller veya bölgeler, sürdürülebilir kaynak yönetimine yönelik farklı yaklaşımları kabul etmekte ve bu durum sürdürülebilir kaynak yönetimi önlemlerinin eşit bir şekilde uygulanamamasına sebep olmaktadır. Kırsal alanlar genellikle kapasiteyle mücadele ederken, metropol bölgeler yoğun nüfus ve endüstriyel faaliyetler nedeniyle yüksek kirlilik riskleri gibi zorluklarla karşılaşabilir (Makanda vd., 2022). Bu nedenle, yerel ihtiyaçları daha geniş su koruma hedefleriyle dengelemek önemlidir.

### **3.3. Politika ve planlama**

Yeraltısuyu politika ve planlamaları; yeraltısuyu koruma, hem arazi kullanım planlamasını hem de kirlilik risklerini azaltmak için tasarlanmış su yönetimi uygulamalarını kapsamaktadır. Bu çalışmalar, yeraltısuyu akiferlerinin bulunduğu havzalarda koruma alanların belirlenmesi, tampon

bölgelerin uygulanması ve arazi kullanım faaliyetlerinin kontrol edilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır. Bu faaliyetler, su kaynaklarını çevreleyen arazinin yönetilmesinin, su kalitesi için yaygın tehditler olan tarımsal akış ve kentsel kirlilik gibi riskleri önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Al Ibrahim & Patrick, 1917). Yeraltısuyu hassasiyet değerlendirmelerinden elde edilen veriler, politika yapıcılara arazi kullanımı ve kirlilik kontrolü için düzenlemeler ve yönergeler oluşturmada rehberlik eder. Bu, yeraltısuyu sisteminin duyarlılığına göre uyarlanmış belirli koruyucu önlemlere sahip bölgeler oluşturmaya yardımcı olur.

## SONUÇ

Dünyada ve özellikle ülkemizde nüfus artışı, endüstrileşme ve iklim değişiklikleri sebebiyle temiz kullanılabilir suya ulaşım her geçen gün daha da zorlaşmaktadır. Özellikle su stressi yaşayan ülkemizde hem kırsal alanlarda hemde şehirlerde sürdürülebilir su yönetim politikalarının ivedilikle uygulanması gerekmektedir. Sürdürülebilir su politikalarının uygulanabilmesi için mevcut şartlarda hidrolojik döngüyü anlayabilmek için yeraltısuyu rezervuarları olan akiferlerin izlenmesi gerekmektedir.

Yeraltısuyu akiferlerinde su seviyelerinin azalması ve kirletici faktörlerden etkilenerek su kalitesinin bozulması dolayısıyla, bu risklere karşı yeraltısuyu akiferlerinin değerlendirilmesi giderek önem kazanmaktadır. Yeraltısuyu akiferlerini değerlendirmede kullanılan en önemli metotlardan bir tanesi ise yeraltısuyu hassasiyet çalışmalarıdır. Yeraltısuyu hassasiyet çalışmaları; yeraltısuyunun beslenme şartları, hidrolojik döngü ve kirletici faktörlerin etkileri gibi konularda detaylı çalışmayı gerektirmektedir. Yeraltısuyu hassasiyet çalışmalarında çalışma alanının özelliklerine bağlı olarak çok farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Yeraltısuyu kaynaklarının korunması konusunda etkin bir araç olarak kullanılan yeraltısuyu hassasiyet haritalarının önemi 3 farklı başlık altında toplanmaktadır. Bu başlıklar; içme suyu kaynaklarının korunması (i), sürdürülebilir kaynak yönetimi (ii) ve son olarak politika ve planlama (iii) olarak gruplandırılmaktadır.

Yeraltısuyu hassasiyet çalışmalarının temel hedefi, yeraltısuyu hassasiyet haritalarının hazırlanmasıdır. Genellikle CBS ortamında verilerin analiz edilmesi sonucunda hazırlanan bu tematik haritalar karar vericiler için temel altlığı oluşturmaktadır. Yeraltısuyu hassasiyet haritaları, etkin ve sürdürülebilir su politikasının oluşturulması ve kullanılmasında başta yerel yönetimler ve tüm karar vericiler tarafından etkin bir araç olarak kullanılmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Al Ibrahim, A. & Patrick, R. J. (1917). Source water protection planning and management in metropolitan Canada: A preliminary assessment. *Water (Switzerland)*, 9(7), 497. <https://doi.org/10.3390/w9070497>
- Albinet, M. & Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM Paris*, 2-4, 13-22.
- Arrey, I., Odiyo, J., Makungo, R. & Kataka, M. (2019). Vadose zone infiltration and its implication groundwater contamination risk assessment in Sloam village, Limpopo, South Africa. *Journal of Disaster Risk Studies*, 11(2), 1-9. <https://doi.org/10.4102/jamba.v11i2.682>
- Arthur, J. D., Wood, H., Baker, A. E., Cichon, J. R. & Raines, G. L. (2007). Development and implementation of a Bayesian-based aquifer vulnerability assessment in Florida. *Natural Resources Research*, 16, 93-107. <https://doi.org/10.1007/s11053-007-9038-5>
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework*. Norwich: Tyndall Centre Working Paper No:38.
- Civita, M. (1987). *La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità*. Mantova: Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione".
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldsheider N. Neale., Popescu I.C. & Zwahlen F., 2002. Main concepts of the "European Approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, vol. 10, pp. 340-345. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>.
- EC (2003). *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifer*. Brussels, Luxemburg: European Commission (EC) Directorate-General XII Science, Research and Development, Final Report (COST Action 620).
- Fabbri, A. G. & Chung, C. J. (2008). On blind test and spatial prediction models. *Natural Resources Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1007/s11053-008-9072-y>

- Focazio, M. J., Reilly, T. E., Rupert, M. G. & Helsel, D. R. (2002). *Assessing ground-water vulnerability to contamination: Providing scientifically defensible formation for decision makers*. Virginia: USGS Circular. <https://doi.org/10.3133/cir1224>
- Foster, S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. W. van Duijvenbooden, & H. G. van Waegeningh içinde, *Vulnerability of soils and groundwater to pollution* (Cilt 38, s. 69-86). The Hague: TNO Committee on Hydrological Research.
- Füssel, H. M. (2004). Coevolution of the political and conceptual frameworks for climate change vulnerability assessments. *Proceedings of the 2002 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change* (s. 302-320). Amsterdam, The Netherlands: Global Governance Project.
- Gleeson, Y., Wada, Y., Bierkens, M. P. & Van Beek, L. H. (2020). Water balance of global aquifer revealed by ground observations and satellite gravimetry. *Nature*, 588(7837), 238-242.
- Gogu, R. C. & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- GWP. (2000). *Integrated water resources management*. Stockholm: TAC Background Paper No:4, Global Water Partnership.
- Liggett, J. E. & Talwar, S. (2009). Groundwater vulnerability assessments and integrated water resource management. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 13(1), 18-29.
- Makanda, K., Nzama, S. & Kanyerere, T. (2022). Policy Implementation for Water Resources Protection: Assessing Spatio-Temporal Trends of Results from Process-Based Outcomes of Resource-Directed Measures Projects in South Africa. *Water*, 14(20), 3322. <https://doi.org/10.3390/w14203322>
- Nolan, B. T. (2001). Relating nitrogen sources and aquifer susceptibility to Nitrate in shallow ground waters of the United States. *Ground Water*, 39, 290-299.

- NRC. (1993). *Ground water vulnerability assessment: Predictive relative contamination potential under conditions of uncertainty*. Washington D.C.: National Research Council (NRC), National Academy Press.
- Popescu, I. C., Gardin, N., Brouyère, S. & Dassargues, A. (2008). Brouyère Brouyère Brouyère Brouyère Groundwater vulnerability assessment using physically based modelling; from challenges to pragmatic solution. *ModelCARE'2007: Sixty International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling* (s. 1-7). Wallingford: IAHS Press.
- Postel, S. (1993). Water in crisis: A guide to the world's freshwater resources. P. H. Gleick içinde, *Water and Agriculture* (s. 56-66). New York: Oxford University Press.
- Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. & Chorus, I. (2013). *Protecting groundwater for health, Managing the quality of drinking-water sources* (Cilt 12). London: IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780405810>
- Shiklamanov, I. A. (1993). Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources. G. P. H. içinde, *World freshwater resources* (s. 13-24). New York: Oxford University Press.
- Shiklamanov, I. A. (1997). *Assessment of water resources and water availability in the world. In: Comprehensive assessment of freshwater resources of world*. St. Petersburg: United National.
- Shiklamanov, I. A. (1999). *World water resources. A new appraisal and assessment for the 21st century*. France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Sorichetta, A., Masetti, M., Ballabio, C., Sterlacchini, S. & Beretta, G. P. (2011). Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods. *Journal of Environmental Management*, 92, 1215-1224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.009>
- Soyaslan, I. I. (2020). Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC-Analytical Hierarchy Process model in Bucak Basin, Turkey. *Arabian Journal Geosciences*, 13(1127), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06101-3>

- Soyaslan, I. I. (2022). Yeraltısularında ağır metal kirliliğinin etkileri ve mekanizması. Ş. Türkoğlu içinde, *Fen Bilimleri ve Çevre Alanlarında Akademik Araştırmalar; teori ve uygulama* (s. 85-97). Ankara: İKSAD Publishing House.
- Voigt, H. J., Heinkele, T., Jahnke, C. & Wolter, R. (2004). Characterization of groundwater vulnerability of the water framework directive of the European Union. *Geofisica International*, 43(4), 567-574.
- Vrba, J. & Zoporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability* (V:16). Hannover: IAH International Contrib Hydrogeol.
- Worrall, F. & Besien, T. (2005). The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.019>

## **BÖLÜM 2**

# **YERALTISUYU HASSASİYETİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR**

Doç. Dr. İ. İskender SOYASLAN<sup>1</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502791>

---

<sup>1</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye. [isoyaslan@mehmetakif.edu.tr](mailto:isoyaslan@mehmetakif.edu.tr), ORCID ID: 0000-0001-5282-8094





## GİRİŞ

Tatlı su, dünyadaki tüm suyun yaklaşık %2,5'ini temsil eder ve çoğunlukla buzullar ve kar paketlerinde sıkışmış olduğundan, yalnızca %0,77'si kullanılabilir durumdadır (Shiklamanov, 1993). Yeraltı suyu, mevcut tatlı suyun yaklaşık %98'ini (dünyadaki tüm suyun yaklaşık %0,76'sı) oluştururken, kalan %2'si yüzey suyu (yani akarsular ve göller) olarak bulunmaktadır (Shiklamanov, 1997). Bu nedenden dünyanın birçok bölgesinde yeraltı suyu, özellikle yüzey suyu kaynaklarının sınırlı olduğu veya bir dereceye kadar kirlenmiş olduğu bölgelerde, içme suyunun tek kaynağıdır (Schmoll vd., 2013). Yeraltı suyunu doğal olarak yenilediği bazı bölgelerde aşırı yeraltı suyu üretilmekte ve akiferler hızla tüketilmektedir (Postel, 1993).

Tüm bu olumsuzluklara ilave olarak küresel iklim değişikliği, endüstrileşme, kentleşme ve hızlı nüfus artışı gibi etmenlerin yakın gelecekte tatlı suya erişilebilirliği daha kısıtlayacağı düşünülmektedir (Shiklamanov, 1999). Bu durum özellikle de insanların çoğunun zaten güvenli içme suyuna erişemediği az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaşanacaktır. Bu konuyu daha da karmaşık hale getirmek için, tüm yeraltı sularının bir dereceye kadar kirlenmeye karşı hassas olduğu ve yeraltı suyu kirlendiğinde, iyileştirilmesinin çok zor, maliyetli, zaman alıcı ve hatta bazen uygulanamaz olduğu dikkate alınmalıdır (NRC, 1993; Soyaslan, 2022). İnsan tüketimi ve ekolojik denge için hayati bir kaynak olan yeraltı suyu, antropojenik faaliyetler ve iklim değişikliğinden kaynaklanan artan tehditlerle karşı karşıyadır.

Son yıllarda tatlı suya olan ihtiyacın giderek artması ile birlikte en önemli tatlı su kaynağı olan yeraltı suyu çalışmalarında bir artış görülmektedir. Yeraltı suyunun korunması, yönetimi ve sürdürülebilir kullanımına yönelik çalışmalar başta olmak üzere yeraltı suyu hassasiyeti metodolojine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu durum yeraltı suyu kaynaklarını verimli bir şekilde kullanım ve sürdürülebilir yönetim ihtiyacının arttığını göstermektedir. Yeraltı suyu hassasiyet çalışmalarının artışındaki en önemli etkenlerden bir taneside son yıllarda bilgisayar teknolojileri, yazılımlar, uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemlerinin daha yoğun kullanılmaya başlanması gösterilebilir.

## 1. YERALTISUYU HASSASİYET DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Yeraltısuyu hassasiyetini değerlendirmede karşılaşılan zorlukların başında, kirlletici taşınımının ve akış dinamiklerinin heterojen jeolojik ortamlarda meydana geldiği yeraltısuyu sistemlerinin karmaşıklığı gelmektedir. Özellikle aktif fay hatlarının yoğun olarak bulunduğu ülkemizde, yeraltısuyu akış sistemlerinin analiz edilebilmesi için yeraltı jeolojisinin net olarak ortaya konulması gerekmektedir. Yeraltısuyu hassasiyetinin değerlendirme yöntemleri bu zorlukların aşılabilmesi için geliştirilmiştir. Örnek olarak karstik bir yapı sunan özellikle akdeniz kuşağı için SINTACS yöntemi geliştirilmiştir. Daha önce geliştirilen DRASTIC yöntemin saha şartlarına göre farklı senaryolar için oluşturulabilmesine imkan veren SINTACS yöntemi daha esnek bir kullanım sunarak çalışma alanını daha iyi temsil yeteneğine sahiptir.

Özellikle tektonizmanın yoğun geliştiği havzalarda karmaşık jeolojik yapı çalışmalarda ciddi güçlükler getirmektedir. Bu güçlükleri açmak için yeraltısuyu akışının zamansal değişimini yansıtabilen, fiziksel tabanlı yöntemlerden türetilen operasyonel göstergeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, yeraltısuyu hassasiyetinin kaynak-akış yolu-alcı ortam paradigmasına bağlanmasıyla anlaşılmasını kolaylaştırarak risk değerlendirmesine sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır.

Yeraltısuyu hassasiyetinin sahada ölçülebilen fiziksel bir özellik olmadığı (NRC, 1993) ve *“bazı alanların yeraltısuyu kirliliğine diğerlerinden daha fazla kırılgan olduğu”* (Vrba ve Zaporozec, 1994) göz önünde bulundurulduğunda, Gogu ve Dassargues'e (2000) göre kırılgan alanlar şu şekilde ayrılabilir:

- Ne zeminin ne de kaya tabanının yeraltısuyu kirliliğine karşı yeterli koruma sağlamadığı doğal olarak kırılgan alanlar (örnek olarak yüze yakın akiferi),
- Kirleticinin pompalanan yeraltısuyuna hızla ulaşım karışabileceği kuyu koruma bölgeleri,
- Potansiyel sorun alanları (örn. noktasal olmayan veya havadan dağıtılmış noktasal kirlilik kaynaklarına yakın alanlar).

Yeraltısuyu/akiferin kirlenmeye karşı hassasiyetini değerlendirmek için kullanılan parametre türleri göz önünde bulundurulduğunda, üç ana yaklaşım tanımlanabilir (Gogu ve Dassargues, 2000),

- Doymuş bölge içindeki herhangi bir taşıma sürecini dikkate almadan yalnızca toprak ve vadoz bölge özelliklerini dikkate alan bir yaklaşım,
- Doymuş bölge içindeki yeraltısuyu akışının ve kirlenici taşıma süreçlerinin bir dereceye kadar dikkate alındığı bir yaklaşım,
- Toprak, vadoz bölge, doymuş bölge ve kirlenici özelliklerini dikkate alan bir yaklaşım.

Yukarıda açıklanan yaklaşımlara dayanan tüm yeraltısuyu hassasiyeti değerlendirme yöntemleri iki ana gruba ayrılabilir (Arthur vd., 2007).

Bu yöntemler;

- Öznel yöntemler (bilgi odaklı modeller),
  - Hidrolojik karmaşık ve CS yöntemler
  - Parametric Sistem yöntemler
  - Öznel ve hibrit yöntemi
- Nesnel yöntemlerdir (veri odaklı modeller)
  - Fiziksel işlem tabanlı yöntemler
  - İstatistik yöntemler

## 1.1 Öznel yöntemler

Öznel yöntemler, bindirme (overlay) ve endeks yöntemleriyle yeraltısuyu hassasiyetinin öznel sınıflamasını sağlayan hibrit yöntemleri içerir. Bu yöntemleri iki ana kategoriye ayrılabilir (Gogu ve Dassargues, 2000):

- Hidrolojik Kompleks ve Ayarlar yöntemleri (HKA),
- Parametrik Sistem yöntemleri

### 1.1.1. Hidrolojik kompleks ve ayarlar (HKA) yöntemleri

HKA yöntemleri genellikle orta ile geniş arasında değişen mekansal ölçekte yeraltı suyu hassasiyetinin analizinde tercih edilmektedir (Margat, 1968; Ferrara, 1990). Bu tür yöntemler, temel olarak benzer hidrojeolojik, hidrografik ve jeomorfolojik ortamlarla karakterize edilen homojen bölgelerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Daha sonra her homojen bölgenin hassasiyet derecesi, her bir ortamın yeraltı suyu hassasiyetini etkilemedeki göreceli önemi dikkate alınarak nitel olarak analiz edilir.

HKA yöntemine bir örnek olarak, İtalya'da bulunabilen ana hidrojeolojik ortamların nitel bir tanımını ve bunlara karşılık gelen içsel hassasiyet derecesini sağlayan USHAG-UAK [Ulusal Savunma Hidrojeolojik Afetler Grubu-Ulusal Araştırma Konseyi] (*GNDCI-CNR-Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche-Consiglio Nazionale delle Ricerche - National Defense Hydrogeological Disasters Group-National Research Council*) temel yöntemi verilebilir (Civita, 1987; Civita ve Maio, 2004). Litolojik, yapısal, piezometrik ve hidrodinamik endeksler, daha sonra yeraltı suyu kırılganlığını kontrol eden ana faktörlerle temsil edilen temel hidrojeolojik ortamların tanımlanmasında kullanılmaktadır. Yeraltı suyu kirliliğinin dinamikleri ve sıklığı dikkate alınarak, daha önce tanımlanan her hidrojeolojik ortama çok düşük için sıfır ve aşırı yükseğe kadar değişen altı sınıfa dağılmış farklı bir hassaslık derecesi atanmaktadır..

### 1.1.2. Parametrik sistem yöntemleri

Parametrik sistem yöntemleri arasında Matris Sistemi (MS) (Matrix System-MS), Derecelendirme Sistemi (DS) (Rating System- RS) ve Nokta Sayım Sistemi Modelleri (NSSM) (Point Count System Model-PCSM) yer almaktadır. Bu yöntemlerde, uzman görüşüne dayanarak, farklı parametrelerin benzersiz sınıf kombinasyonları açısından homojen olarak kabul edilebilecek bölgelerin hassasiyet derecesini değerlendirmeye izin veren oldukça benzer işlemler bulunmaktadır. Genel olarak, kullanılacak parametreler öznel olarak seçilir, sınıflara ayrılır ve çalışma alanındaki yeraltı suyu hassasiyetini kontrol etmedeki önemlerine göre derecelendirilirler.

Matris Sistemi yöntemleri, sınırlı sayıda ve dikkatlice seçilmiş parametrenin sınıflara ayrılmasını, derecelendirilmesini ve ardından yerel vaka çalışmaları için özel olarak geliştirilen çeşitli stratejilerle birleştirilerek uygulanır (Goossens & Van Damme, 1987)

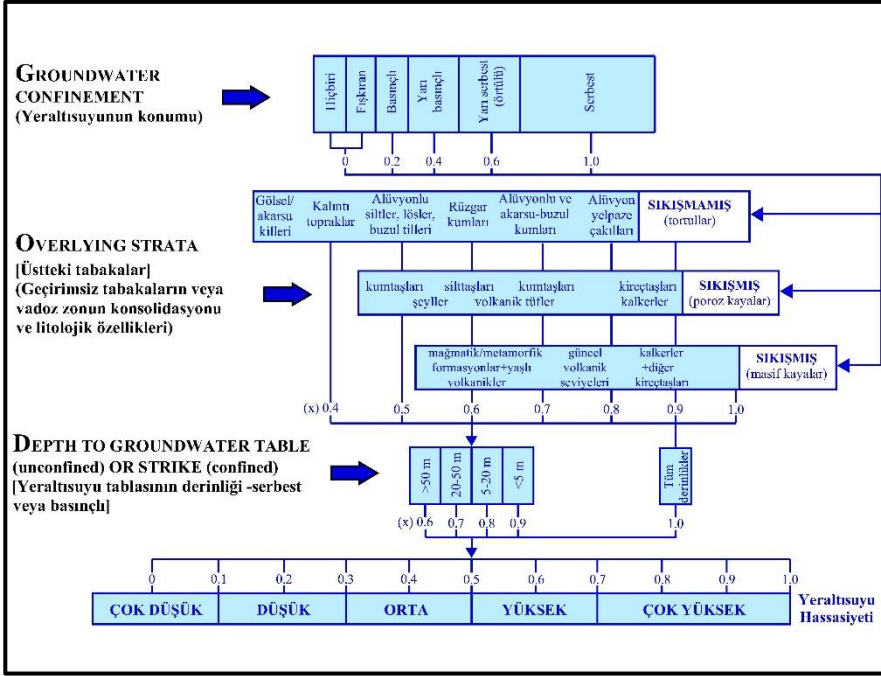
Derecelendirme Sistemi (DS) yöntemleri, değişken sayıda parametrenin düzgün bir şekilde önceden tanımlanmış sınıflara göre düzenlenmesini, dikkate alınan parametrenin değişim aralığına göre bölünen sabit bir değer aralığı kullanılarak derecelendirilmesini ve daha sonra farklı derecelerdeki hassasiyetlere karşılık gelen hassasiyet endeksleri elde etmek için önceden tanımlanmış bir şekilde birleştirilmesiyle uygulanmaktadır (Sorichetta vd., 2011).

GOD ve AVI yöntemi, her ikisi de genel bir kirleticiyi dikkate alma varsayımına dayanan DS yöntemlerdir. GOD yöntemi (Foster, 1987) üç parametreyi dikkate alır: yeraltısuyu oluşumu, yeraltısuyuna olan derinlik ve üstteki katmanların litolojisi (sadece serbest akifer durumunda dikkate alınır). Parametreler, her homojen bölge için karşılık gelen hassasiyet derecesini ifade eden hassasiyet endeksini hesaplamak amacıyla, Şekil 1'deki şemaya göre sınıflara düzenlenir, derecelendirilir ve birleştirilir.

DRASTIC'e göre daha basit bir alternatif olan GOD yöntemi Yeraltısuyu oluşumu (Groundwater confinement), akiferin genel litolojisi (Overlaying lithology) ve Yeraltısuyu tablasının derinliği (Depth to wwater table) olmak üzere üç parametreye dayanmaktadır. Bu yöntemin basitliği, özellikle veri kıtlığı olan bölgelerde hızlı değerlendirmeler için uygun hale getirir. Ancak, azaltılmış karmaşıklığı bazı hidrojeolojik ortamlarda kritik faktörleri göz ardı edebilir.

AVI yöntemi, doymuş bölgenin üstündeki litolojik tabakanın kalınlığı ve tahmini hidrolik iletkenliği parametrelerini dikkate almaktadır (Van Stempvoort vd., 1993). Bu iki parametre, her homojen bölge için hidrolik direnç c'yi hesaplamak için kullanılır (Denklem 1):

$$c = \sum_{i=1}^n (d_i/k_i) \quad (1)$$



Şekil 1: GOD yönteminin akış şeması (Foster, 1987; Rukmana vd., 2019)

Bu formüldeki  $d_i$  tabaka  $i$ 'nin kalınlığı ve  $k_i$  ise hidrolik iletkenlik değeridir. Hidrolik direnç  $c$ , daha sonra farklı AVI bölgelerinin elde edilmesine olanak tanıyan bir ilişki tablosuyla nitel bir akifer hassasiyet endeksine bağlanır ve her biri farklı bir hassasiyet derecesiyle karakterize edilir.

Nokta Sayım Sistemi Modelleri belirli arazi kullanım uygulamaları ve hidrojeolojik koşullar açısından yeraltısuyu hassasiyetini kontrol etmede her bir dikkate alınan parametrenin göreceli önemini doğru bir şekilde yansıtmak için genellikle ağırlık dizileri olarak adlandırılan ağırlık faktörlerinin kullanımını tanıtan RS yöntemleridir. Bu yöntem aynı zamanda Parametre Ağırlıklandırma ve Derecelendirme yöntemleri olarak da tanımlanmaktadır.

DRASTIC yöntem, Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilmiştir. Yeraltısuyu savunmasızlığını değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmaya devam etmektedir. yeraltısuyu derinliği (Depth to the water table) , Net Yeniden Dolu (Recharge) , Akifer ortamı (Aquifer media), Toprak ortamı (Soil

media), Topografya (Topography), Vadoz bölgesinin etkisi (Impact of the vadose zone), Akiferin Hidrolik İletkenliği (Conductivity of aquifer) olmak üzere yedi hidrojeolojik parametreyi dikkate almaktadır.

Her parametreye bir ağırlık ve derecelendirme atanır ve bu da bir savunmasızlık endeksi ile sonuçlanır. DRASTIC kapsamlı bir çerçeve sağlarken, etkinliği veri bulunabilirliği ve bölgesel değişkenlik ile sınırlı olabilir.

USEPA tarafından geliştirilen DRASTIC yöntemi ulusal ile ilçe arasında değişen çeşitli ölçeklerde yeraltısuyu hassasiyetini değerlendirmek için dünya çapında en çok kullanılan yöntemdir. DRASTIC yöntemi, kirleticinin yüzeye uygulandığını, yağışla akifer sistemine girdiğini ve suyun hareketliliğine sahip olduğunu varsaymaktadır.

Bu yöntemde; su derinliği, net yeniden dolun, akifer ortamı, toprak ortamı, topografya, vadoz zon ortamının etkisi ve akiferin hidrolik iletkenlik katsayısı olmak üzere yedi farklı parametre dikkate alınmaktadır. Dikkate alınan her parametrenin her sınıfına, Tablo 1'deki gibi önceden tanımlanmış şemalara göre 1 ile 10 arasında değişen bir oran atanmaktadır (Aller vd., 1987).

**Tablo 1:** Akifer ortamı parametresi için aralıklar ve derecelendirme (Aller vd., 1987)

Sınıf	Aralık	Derece
Masif şeyl	1-3	2
Metamorfik-Mağmatik	2-5	3
Aşınmış metamorfik-Mağmataik	3-5	4
Buzul Till	4-6	5
Tabakalı Kumtaşı, Kireçtaşı ve Şeyl istifleri	5-9	6
Masif Kumtaşı-Masif Kireçtaşı	4-9	6
Kum ve Çakıl	4-9	8
Bazalt	2-10	9
Karstik Kireçtaşı	9-10	10

DRASTIC yöntemi, biri genel koşullar için, diğeri ise yoğun ekili tarım alanları için (genellikle pestisit DRASTIC olarak tanımlanır. Bu tanıma uygun alanın yeraltısuyu hassasiyetinin değerlendirilmesi, kullanılacak iki



ağırlık dizisi kullanılarak yapılır. Her homojen bölge için DRASTIC hassasiyet endeksi  $D_i$ , şu şekilde hesaplanır (Denklem 2):

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j / R_j) \quad (2)$$

burada  $W_j$ ,  $j$  parametresi için ağırlıklandırma faktörünü ve  $R_j$  ise,  $j$  parametresi için derecelendirme değerini ifade etmektedir.

DRASTIC endeksi,  $D_i$ , 23-226 arasında değişir ve daha sonra genellikle her biri farklı bir hassasiyet derecesine karşılık gelen aralıklara bölünür. Orijinal DRASTIC yönteminin bulanık mantık DRASTIC ve modifiye DRASTIC metotlar geliştirilerek değiştirilmiş ve farklı ortam koşullarını temsil etmek için elde etmek amacıyla farklı yazarlar tarafından önerilmiştir (Soyaslan, 2020; Hassanzadeh vd., 2021).

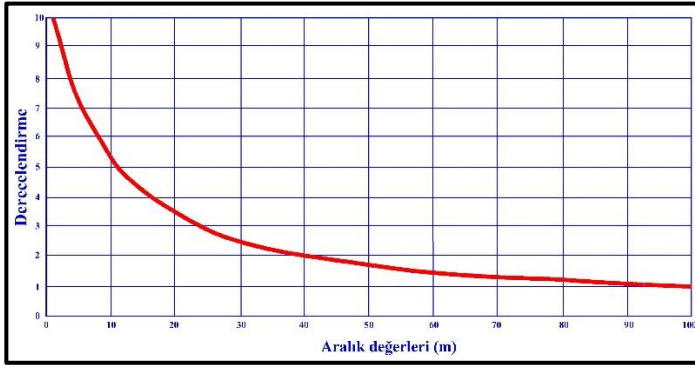
SINTACS yöntemi yedi parametreyi dikkate alır: Yeraltısuyuna derinlik (Soggiacenza), etkili sızma (Infiltrazione), doymamış bölge zayıflama kapasitesi (Non saturo), toprak/üst yük zayıflama kapasitesi (Tipologia della copertura), akiferin hidrojeolojik özellikleri (Aquifero), akiferin hidrolik iletkenlik aralığı (Conducibilità) ve topoğrafik eğimin hidrolojik rolü (Superficie topografica). Dikkate alınan her parametre için önceden tanımlanmış şemalar kullanılarak 1 ila 10 arasında değişen bir oranlar atanır (Civita, 1994).

SINTACS yöntemi, belirli bir hidrojeolojik ve arazi kullanım koşulu için seri veya paralel olarak kullanılabilen beş farklı ağırlık dizisi sağlar ve beş farklı hidrojeolojik ve arazi kullanım durumunda her parametrenin farklı etkisinin dikkate alınmasına olanak tanır.

Her homojen bölge için SINTACS hassasiyet endeksi,  $I_v$ , şu şekilde hesaplanır (Denklem 3):

$$I_v = \sum (P_{(1,7)} \times W_{(1,n)}) \quad (3)$$

burada  $P_{(1,7)}$  her parametrenin derecesi,  $W_{(1,n)}$  ilişkili ağırlık ve  $n$  kullanılan ağırlık dizelerinin sayısıdır.



**Şekil 2:** Yeraltı suyu derinliği için aralık ve derecelendirme grafiği (Civita ve Maio, 2004)

SINTACS indeksi 26 ile 260 arasında değişmekte olup daha sonra 6 aralığa bölünür, her biri çok düşükten aşırı yükseğe kadar değişen farklı bir hassasiyet derecesine karşılık gelir (Civita, 1994).

EPIK yöntemi, özellikle karst hidrojeolojik bağlamlarda yeraltı suyu hassasiyetini değerlendirmek için geliştirilmiştir. Yöntemde Epikarst (Epikarst), Koruyucu örtü (Protective cover), Sızma koşulları (Infiltration) ve Karst ağı (Karst network) gelişimi olmak üzere dört farklı parametre kullanılmaktadır. Dikkate alınan her parametrenin her sınıfına bir oran atanır ve önemlerini dengelemek için önceden tanımlanmış bir ağırlık dizisi kullanılır (Doerfliger ve Zwahlen, 1997). EPIK hassasiyet endeksi,  $F_p$ , şu şekilde hesaplanır (Denklem 4):

$$F_p = (3 \times E_i) + (1 \times P_j) + (3 \times I_k) + (2 \times K_l) \quad (4)$$

burada  $E_i$  epikarst parametresi için derecelendirme değeri,  $P_j$  koruyucu örtü parametresi için derecelendirme değeri,  $I_k$  sızma koşulu parametresi için derecelendirme değeri ve  $K_l$  karst ağı geliştirme parametresi için derecelendirme değeridir.

Daha sonra 9 ila 34 arasında değişen EPIK endeksi, her biri farklı bir hassasiyet derecesine (yüksek, orta ve düşük) karşılık gelen 3 aralığa bölünür; çok düşük hassasiyete karşılık gelen dördüncü derece, çok düşük hidrolik

iletkenliğe ve minimum 8 metre kalınlığa sahip kalın detritalden oluşan bir toprak koruyucu örtüsünün varlığıyla tanımlanır.

### 1.1.3. Öznel hibrit yöntemler

Öznel hibrit yöntemler, öznel, genellikle projeye özgü, güvenlik açığı kategorizasyonu üretmek için Overlay ve Endeksleme yöntemleri ile istatistiksel ve fiziksel süreç tabanlı yöntemlerin farklı bileşenlerini biraraya getirir. Öznel hibrit yöntemlere bir örnek; SINTACS (Civita, 1994) ve GNDCI-CNR temel yöntemi (Civita, 1987) birleştirilerek veri eksikliği nedeniyle SINTACS'ın tek başına kullanılamayacağı veya kısıtlandığı daha geniş alanları kapsamak için "İtalyan birleşik yaklaşım" yöntemi verilebilir (Civita ve Maio, 2004).

## 1.2. Nesnel yöntemler

Nesnel yöntemler, yeraltısuyu güvenlik açığının genellikle sahaya özgü kategorizasyonlarını üretmektedir. Nesnel yöntemlerin şu alt yöntemleri içerir:

- Fiziksel olarak işlenmiş tabanlı yöntemler,
- İstatistiksel yöntemler,
- Hibrit yöntemler.

### 1.2.1. Fiziksel işleme dayalı yöntemler

Fiziksel işleme dayalı yöntemler, yeraltısuyu akışının bir veya daha fazla fiziksel ve kimyasal sürecini ve olası ilişkili kirleticilerin kaderini ve taşınmasını simüle eder veya dikkate alır ve böylece yeraltısuyu hassasiyetini bir şekilde değerlendirir (Focazio vd., 2002). Bu nedenle, hem deterministik işlem simülasyon modellerinin hem de çevresel izleyicilerin doğrudan saha gözlemleri veya çoğunlukla yeraltısuyunun kaynağını ve yaşını belirlemek için kullanılan izotopik analizler gibi fiziksel tabanlı tekniklerin kullanımını içerirler.

Deterministik modeller, genellikle SEEP, MODFLOW ve/veya SWAT gibi bilgisayar programları aracılığıyla çözülen matematiksel denklemlerin analitik ve/veya sayısal çözümlerini içerir. Fiziksel süreç tabanlı

yöntemler genellikle küçük ölçeklerde, yeraltısuyu hassasiyetini daha geniş ölçeklerde değerlendirmekten ziyade kuyu koruma bölgelerini tanımlamak için uygulanır (Frind vd., 2006).

### 1.2.2. İstatistiksel yöntemler

İstatistiksel yöntemler basit tanımlayıcı istatistiklerin kullanımından regresyon ve koşullu olasılık analizleri gibi daha karmaşık tekniklere kadar uzanır ve her bir öngörücü faktörün hassasiyeti etkileme/kontrol etmedeki önemini nesnel olarak belirlemeye olanak tanır (Alberti vd., 2001; Masetti vd., 2009).

İstatistiksel yöntemler, çeşitli mekansal ölçeklerde, belirli bir çalışma alanındaki kirletici oluşumlarını, kirletici konsantrasyonlarını veya kirlenme olasılıklarını, bir veya daha fazla eşik açısından tahmin etme girişiminde, akifer sisteminin içsel özellikleri ve potansiyel kirlenme kaynaklarıyla ilişkilendirir (Gardner ve Vogel, 2005).

Yeterli su kalitesi verisi mevcut olduğunda, Lojistik Regresyon analizi kirlenme oluşum olasılığı açısından yeraltısuyu hassasiyetini değerlendirmek için kullanılan en yaygın istatistiksel yöntemdir. Temel varsayım, olasılık oranının doğal logaritmasının, dikkate alınan açıklayıcı değişkenlerle doğrusal olarak ilişkili olduğudur (Afifi ve Clark, 1984). Böylece, istatistiksel olarak anlamlı açıklayıcı değişkenler belirlendikten sonra ( $p < 0,05$ ), kirletici konsantrasyonunun belirli bir eşiği aşma olasılığı, olasılık oranının logaritması ( $P/1-P$ ) olarak ifade edilir ve şu şekilde hesaplanabilir (Denklem 5):

$$\log (P/(1 - P)) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i \quad (5)$$

burada  $b_0$  bir skaler parametredir (kesişim),  $b_i$  istatistiksel olarak türetilmiş bir katsayı (eğim) ve  $X_i$ ,  $i$  açıklayıcı değişkeninin değeridir.

## SONUÇ

Yeraltısuyu hassasiyeti; basit, nitel ve nispeten ucuzdan titiz, nicel ve maliyetli yaklaşımlara kadar değişen birçok farklı yöntem kullanılarak değerlendirilebilir. Hassasiyeti değerlendirmek için seçilecek en iyi yöntem,

mekansal ölçek, maliyet, zaman, bilimsel savunulabilirlik ve son kullanıcının gereksinimlerine ilişkin kabul edilebilir belirsizliğin bir fonksiyonu olmalıdır.

Yeraltısu hassasiyeti değerlendirmesi, uygun bir karmaşıklık düzeyi ve kabul edilebilir bir belirsizlikle birlikte nesneliği korumalıdır. Bu değerlendirmeler uzman görüşünden çok akifere ait bilgilere dayalı olduğu için nesnel yöntemler tercih edilmelidir. Bu sayede son kullanıcı kararlarını bilimsel olarak savunabilir.

Dünyada yeraltısu hassasiyetini değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntemler, çoğunlukla uygulanması nispeten kolay olduğu ve sınırlı miktarda veri gerektiren yöntemlerdir. Bu türde yeni bir yöntem neredeyse her yıl geliştirilip önerilmesine rağmen sonuçları sorgulanabilir çünkü gerçek hidrojeolojik süreçten çok uzman görüşüne dayanırlar. Gerçekten de, bu tür yöntemler kullanılarak elde edilen nihai hassasiyet haritaları, öngörülen hassasiyet örüntüsü ile kirliliğin gerçek mekansal dağılımı arasında büyük tutarsızlıklar gösterebilmektedir.

Bilimsel olarak savunulabilirlik açısından, hem fiziksel işleme dayalı hem de istatistiksel yöntem tercih edilmelidir. Bununla birlikte, fiziksel işleme dayalı yöntemler, yeraltısu hassasiyetini kontrol eden etkileşimli fiziksel ve kimyasal süreçlerin en doğru temsilini sağlayabilmesine rağmen, kullanımı çok karmaşıktır ve küçük ölçekte kullanımı sınırlıdır. Fiziksel işleme dayalı yöntemlerin sonuçlarının model varsayımına dayandığı, bu tür yöntemlerin yalnızca büyük miktarda veri mevcut olduğunda güvenilir sonuçlar ürettiği ve bu durumda bile sonuçların belirsizliğinin belirlenmesinin çok zor olduğu dikkate alınmalıdır.

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, yöntem parametrelerin seçiminde ve sonuçların test edilmesinde ve yorumlanmasında her zaman dikkatli olunmalıdır. Gerçekten de, kavramsal modelin varsayılması ve basitleştirilmesi veya hidrojeolojik sistemin (yani, dikkate alınan parametrelerin) yetersiz bir şekilde tanımlanması, sonuçların ve dolayısıyla nihai (yani, yeniden sınıflandırılmış) yeraltısu hassasiyet haritalarının güvenilirliğini büyük ölçüde etkileyebilir.

## **KAYNAKÇA**

- Afifi A.A. & V. Clark, 1984. Logistic Regression. In: Computer-Aided Multivariate Analysis. Lifetime Learning Publ., Belmont, CA, pp. 287-308.
- Alberti L., De Amicis M., Masetti M. & Sterlacchini S., 2001. Bayes' rule and GIS for evaluating sensitivity of groundwater to contamination. In: Proceedings of the International IAMG Ann. Conference, Cancun, Mexico.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H. & Petty, R. J. (1987). DRASTIC: A Standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. Ada (Oklahoma): US EPA/600/2-85/018.
- Arthur, J. D., Wood, H., Baker, A. E., Cichon, J. R. & Raines, G. L. (2007). Development and implementation of a Bayesian-based aquifer vulnerability assessment in Florida. Natural Resources
- Civita, M. (1987). La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità. Mantova: Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione".
- Civita, M. (1994). Le carte della vulnerabilità all'inquinamento. Bologna: Teoria e pratica. Pitagora Editrice.
- Civita, M. & Maio, M. D. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofisica International*, 43(4), 513-532.
- Doerfliger, N. & Zwahlen, F. (1997) EPIK: A New Method for Outlining of Protection Areas in Karstic Environment. IntSymp on Karst Water and Environmental Impacts, Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam, 117-123
- EC. (2003). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifer. Brussels, Luxemburg: European Commission (EC) Directorate-General XII Science, Research and Development, Final Report (COST Action 620).
- Ferrara, V. (1990). Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna alla scala 1:50000. Firenze: S.E.L.C.A.

- Frind, E.O., J.W. Molson & D.L.Rudolph. 2006. Well vulnerability: A quantitative approach for sourcewater protection. *Ground Water*44(5):732–742
- Focazio, M. J., Reilly, T. E., Rupert, M. G. & Helsel, D. R. (2002). Assessing ground-water vulnerability to contamination: Providing scientifically defensible formation for decision makers. Virginia: USGS Circular. <https://doi.org/10.3133/cir1224>
- Foster, S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. W. van Duijvenbooden, & H. G. van Waegeningh içinde, *Vulnerability of soils and groundwater to pollution* (Cilt 38, s. 69-86). The Hague: TNO Committee on Hydrological Research.
- Gardner K.K., & Vogel R.M., 2005. Predicting ground water nitrate concentration from land use. *Ground Water*, vol. 43 no.3, pp.1-10.
- Gogu, R. C. & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Goossens, M. & Van Damme, M. (1987). Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. W. Van Duijvenbooden, & G. H. Van Waegeningh içinde, *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants* (Cilt 35, s. 355-360). The Haue: TNO Committee on Hydrological Research, Proceedings and Invormation.
- Hassanzadeh, M., Reghabadi, M. M. & Robati, A. (2021). Vulnerability Identification of Hajiabad Plain Aquifer: The DRASTIC Model and the GIS-Based Fuzzy Logic Method. *Air, Soil and Water Research*, 14. <https://doi.org/10.1177/117862212111048469>
- Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution* (Vulnerability of groundwater to pollution). Orléans, France: BRGM Publication 68 SGL 198 HYD.
- Masetti M., Sterlacchini S., Ballabio C., Sorichetta A. & Poli S., 2009. Influence of threshold value in the use of statistical methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of the Total Environment*, vol. 407, pp. 3836-3846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.055>

- Postel, S. (1993). Water in crisis: A guide to the world's freshwater resources. P. H. Gleick içinde, *Water and Agriculture* (s. 56-66). New York: Oxford University Press.
- Rukmana, B. S., Bargawa, W. S. & Cahyadi, T. A. (2019). Assessment of groundwater vulnerability using GOD method. *Earth and Environmental Science*, 447(012020), 1-8. doi:10.1088/1755-1315/477/1/012020
- Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. & Chorus, I. (2013). Protecting groundwater for health, Managing the quality of drinking-water sources (Cilt 12). London: IWA Publishing. doi:<https://doi.org/10.2166/9781780405810>
- Shiklamanov, I. A. (1993). Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources. G. P. H. içinde, *World freshwater resources* (s. 13-24). New York: Oxford University Press.
- Shiklamanov, I. A. (1997). Assessment of water resources and water availability in the world. In: *Comprehensive assessment of freshwater resources of world*. St. Petersburg: United National.
- Shiklamanov, I. A. (1999). *World water resources. A new appraisal and assessment for the 21st century*. France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Sorichetta, A., Masetti, M., Ballabio, C., Sterlacchini, S. & Beretta, G. P. (2011). Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods. *Journal of Environmental Management*, 92, 1215-1224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.009>
- Soyaslan, I. I. (2020). Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC-Analytical Hierarchy Process model in Bucak Basin, Turkey. *Arabian Journal Geosciences*, 13(1127), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-020-06101-3>
- Van Stempvoort, D., Evert, L. & Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Water Quality Research Journal of Canada*, 18, 25-37.
- Vrba, J. & Zoporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability* (Cilt 16).





## BÖLÜM 3

# AKILLI TARIMDA SENSÖRLERİN ROLÜ: VERİMLİLİĞİ ARTIRAN YENİLİKÇİ ÇÖZÜMLER

Sümeyye ÇARKIT<sup>1</sup>

Bora ASLAN<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502807>

---

<sup>1</sup>Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uyg. ve Araş. Merkezi, Merkez, Kırklareli, Türkiye. scarkit@klu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-5236-4813

<sup>2</sup>Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Merkez, Kırklareli, Türkiye. bora.aslan@klu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-8069-8204



## GİRİŞ

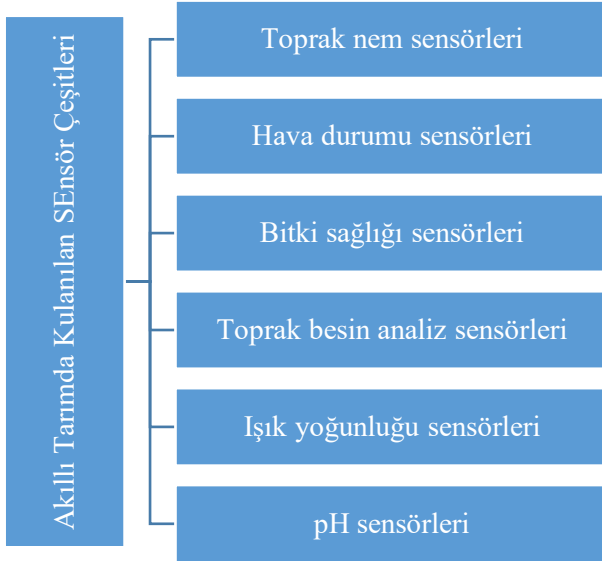
Nüfustaki artışla birlikte gıda ihtiyacı hızla artmaktadır (Gür vd., 2024). Gıdaya olan talebi karşılamak için tarımda üretime ve üretim verimliliğine olan ihtiyaç da artmaktadır. Geleneksel tarım yöntemleriyle artan gıda gereksinimini sağlamak gün geçtikçe zorlaşmaktadır (Kassim, 2020). Ayrıca, tarım sektöründeki verimsiz su kullanımı, zayıf toprak kalitesi ve öngörülemeyen hava koşulları gibi ürün verimini doğrudan etkileyen çeşitli zorluklar da ortaya çıkmaktadır. Bu zorluklarla baş edebilmek için çiftçilerin ürün verimini artırıp kaynak israfını azaltmalarına yardımcı olacak en etkili çözüm akıllı tarım sistemleridir (Suma vd.,2017).

Akıllı tarım sistemleri, geleneksel tarım uygulamalarına kıyasla daha çok büyüme kabiliyeti nedeniyle ilgi görmektedir. Tarımda üretim verimliliğini artırmak ve var olan kaynakları iyi bir şekilde görevlendirmek için yeni fikirlere ve teknolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Akıllı tarım sistemleri sensörler, nesnelerin interneti, sulama sistemleri, uydu görüntüleme, insansız hava araçları ve yapay zeka gibi birden fazla bileşeni barındıran oldukça kapsamlı bir sistemdir. Akıllı tarım sistemlerinde sensör kullanımı; tarım alanındaki durumu algılayarak çiftçilikteki sorunları azaltmak, herhangi bir sorunun meydana gelmeden önce tespit edebilmesi, elde edilen verilerle verimliliği arttırmak, bitki gelişimi için etken olan parametreleri tespit etmek, mevcut bitki sağlığı, toprak ve hava durumu tahmini gibi etkenleri takip edebilmek için bazı üstünlükler sağlamaktadır. Bunun yanında, ürünün gelişerek büyümesinde kuvvetli bir etkiye sahip olan çevresel faktörlerin kontrolü ve bilgisi daha iyi ürün üretim yönetimine olanak tanımaktadır (Kulmany vd., 2022). Akıllı ve verimli dijital gıda arzına olanak sağlayan tarım işleminde bazı parametrelerinin izlenme amacı şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Verimi artırmak,
- Çevre koşullarını takip etmek,
- Sulama sürecini yönetmek,
- Zararlı canlıları ve gübreleri takip etmek,
- İstenmeyen bitki yönetimini sağlamak,
- Toprak durumunu kontrol edip analiz etmek,

- Sera üretim ortamını optimize etmek,
- Proses girdilerinin maliyetlerini azaltmak (Nukala vd., 2016).

Akıllı tarım sistemlerinde kullanılan sensör çeşitleri Şekil 1'deki gibi sınıflandırılabilir (Soussi vd., 2024). Bu sensörler; tarım alanlarında üretilen ürüne göre değişiklik gösterebileceği gibi tarım alanının büyüklüğüne göre sensörlerin sayısı artabilmektedir. Bu çalışmada, akıllı tarım sistemlerinde sensör uygulamaları hakkında literatür taraması yapılarak kullanılan bazı sensör çeşitleri incelenmektedir.



Şekil 1. Akıllı tarımda kullanılan sensör çeşitlerinin sınıflandırılması

Nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin tarım üzerindeki etkisi oldukça geniş kapsamlıdır ve birçok açıdan sektörü dönüştürmektedir:

- Verimliliğin Artması: IoT teknolojileri, çiftliklerde toprak, hava durumu, sulama ve mahsul verimliliği gibi kritik faktörleri izleyerek çiftçilerin daha bilinçli kararlar almasını sağlamaktadır. Sensörler, drone'lar ve GPS tabanlı sistemler sayesinde tarım süreçleri daha verimli hale gelmektedir, kaynak kullanımı optimize edilerek iş gücü maliyetleri azaltılmaktadır. Örneğin, otomatik sulama sistemleri su kullanımını azaltırken, mahsul verimliliğini artırmaktadır.

- Hassas Tarımın Yaygınlaşması: Avrupa'da hassas tarım teknolojilerinin yaygın olarak benimsenmesi, özellikle büyük ölçekli çiftliklerde IoT tabanlı uygulamaların daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. IoT cihazları, gübreleme, ilaçlama ve ekim gibi işlemleri doğru zamanda yaparak çiftçilerin maliyetlerini düşürmekte ve üretkenliği artırmaktadır.
- Çevresel Etkinin Azalması: IoT teknolojileri, tarımsal faaliyetlerde çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmektedir. Hassas tarım ve akıllı seracılık gibi uygulamalar, daha az su, gübre ve pestisit kullanarak doğal kaynakların korunmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, hava ve toprak koşullarını izleyen sensörler, tarımsal faaliyetlerin çevreye olan etkisini minimize etmektedir.
- Veri Tabanlı Karar Alma: IoT, büyük boyutta veri toplama ve toplanan bu verileri analiz etme imkanı sunmaktadır. Avrupa'daki çiftçiler, toprak nemi, hava durumu ve bitki sağlığı gibi verilere dayalı kararlar alarak mahsul üretimini optimize edebilmektedir. Bu sayede tarımsal verim artarken, maliyetler azaltılır ve riskler daha iyi yönetilebilir hale gelmektedir.
- İş Gücü Maliyetlerinde Azalma: Avrupa'da artan iş gücü maliyetleri, tarımsal süreçlerin otomatikleşmesini hızlandırmaktadır. IoT çözümleri, otomatik sulama, hasat ve besleme sistemleri gibi iş gücünü azaltan teknolojiler sunarak, çiftçilerin verimliliğini artırmakta ve maliyetlerini düşürmektedir.

## 1. LİTERATÜR TARAMASI

2015 yılında, Dwarkani ve arkadaşları yaptığı çalışmada tarım faaliyetlerinde hayati bir rol oynayan toprağın nem içeriği, besin içeriği ve toprağın pH'ı gibi fiziksel parametrelerin ölçümüne odaklanarak akıllı algılama sistemi ile akıllı sulama sistemini kablosuz iletişim teknolojisi aracılığıyla birbirine bağlayarak akıllı tarım için yeni bir çözüm önerilmiştir (Jagannathan ve Priyatharshini, 2015).

2016 yılında, Patil vd.'nin yapmış olduğu çalışmada akıllı tarım sistemlerinde sensör teknolojisi ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin kablosuz ağ entegrasyonu incelenerek bilgi iletişim teknolojisi (BİT) ile

entegre akıllı bir tarım modeli önerilmektedir. Çiftçiler yüzyıllardır aynı mahsulü ekmiş olsalar dahi zamanla hava durumu, toprak koşulları, zararlı salgınlar ve hastalıklar değişmektedir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımı kullanarak, alınan güncel bilgiler çiftçilerin söz konusu değişikliklerle başa çıkmasına ve hatta bunlardan faydalanmasına olanak tanımaktadır (Patil ve Kale, 2016). Sahitya ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada, mahsule doğru girdi verebilmek için akıllı tarıma yönelik kablosuz sensör ağı tasarlayarak güvenilir bir ağ oluşturmuşlardır. Çalışmada iki düğüm tasarlanmış ve uygulanmıştır. Hassas tarım için sensör değerleri önceden tanımlanmış zaman örneklerinde sürekli olarak takip edebilmektedir. Etkili sonuçlar alabilmek için bu düğümlerin senkronize edilmesi ve düzgün bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ihtiyaç durumunda düğümlere yeni sensörler eklenebilmektedir (Sahitya vd., 2016). Gondchawar vd.'nin 2016 yılında yaptıkları çalışmanın amacı ise otomasyon ve IoT teknolojilerini kullanarak tarımı akıllı hale getirmektir. Çalışmanın öne çıkan özelliği; GPS tabanlı uzaktan kumandalı akıllı robotla yabancı otları temizleme, ilaçlama, nem algılama, kuşları ve hayvanları korkutma, tetikte olma vb. görevleri yerine getirmesidir. İkinci olarak, gerçek zamanlı doğru saha verilerine dayalı akıllı kontrol ve akıllı karar verme ile akıllı sulamayı içermektedir. Son olarak depoda sıcaklık bakımı, nem bakımı ve hırsızlık tespitini içeren akıllı depo yönetimi çalışmalarını sunmaktadır. Tüm bu işlemlerin kontrolü, internete bağlı herhangi bir akıllı cihaz veya bilgisayar aracılığıyla uzaktan gerçekleştirilmektedir. Tasarım ve prototipleme işlemleri sensörler, Wi-Fi veya ZigBee modülleri, mikro denetleyicili kamera, aktüatörler, Raspberry Pi kart ile ara yüz oluşturularak gerçekleştirilmiştir (Gondchawar ve Kawitkar, 2016).

Krishna ve arkadaşları 2017 yılında, tarımda çeşitli işlemleri gerçekleştirmek için IoT tabanlı yeni bir kablosuz mobil robot tasarlamış ve uygulamışlardır. Önerilen kablosuz robot farklı çevresel parametreleri ölçmek ve izlemek için termo higro sensörü, toprak nemi sensörü, UV sensörü, engel sensörü, CO<sub>2</sub> sensörü, PH sensörü gibi çeşitli sensörlerle donatılmıştır. Bu robot; kablosuz olarak izleme ve ölçme işlemiyle işçilik maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanırken aynı zamanda tarlada meydana gelen

değişikliklerin anında ve gerçek zamanlı olarak doğru bir şekilde takip edilmesine yardımcı olmaktadır (Krishna vd., 2017).

2018 yılında Sushanth vd.'nin yapmış olduğu çalışmada ise; Arduino kartı kullanarak sıcaklık, nem, rutubet ve hatta tarımsal alanda mahsule zarar verebilecek hayvanların hareketlerini sensörler aracılığıyla takip edebilen ve herhangi bir farklılık durumunda SMS bildirimini gönderebilen bir sistem geliştirilmiştir. Ne fazla ne de az sulama tarım için istenmeyen bir durum olduğundan bu sistem çiftçiler için yararlıdır. Tarladan algılanan gerçek zamanlı verilere ve hava durumu deposundan gelen verilere dayanarak sulama programı oluşturulmuştur. Bu sistem çiftçiye sulama ihtiyacı olup olmadığı konusunda bilgi göndermektedir. Sürekli internet bağlantısı gerektirmesi sistemin bir dezavantajıdır (Sushanth ve Sujatha, 2018). 2018 yılında Aliev ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, bitkilere ve ortama ait sıcaklık, nem ve toprak nemi verilerini elde etmek için bir yaklaşım önerilerek prototip bir cihaz ve fiziksel verileri toplayıp buluta gönderen bir android uygulama geliştirilmiştir. Çalışmanın devamında ise mahsulün büyümesi, gelişmesi ve tarımın verimine büyük etkisi olan sıcaklık tahmini uygulamasına odaklanılmıştır. Yapay sinir ağı kullanılarak 10 gün önceden maksimum ve minimum sıcaklık tahmini yapan bir uygulama geliştirilmiştir ( Aliev vd., 2018).

2019 yılında Thakur vd. tarafından yapılan çalışmanın amacı; hassas tarım için benimsenen çeşitli kablosuz sensör ağı teknolojilerini ve bu teknolojilerin akıllı tarıma ulaşımadaki etkisini belirlemektir. Çalışma oldukça kapsamlı olup hassas tarıma ulaşmak için sulama, izleme, toprak özellikleri, sıcaklık gibi farklı çevresel parametrelere de odaklanmaktadır. Ayrıca kablosuz sensör ağı teknolojileri kullanılarak farklı mahsuller üzerinde de detaylı bir inceleme süreci yürütülmüştür. Aynı zamanda hassas tarım için mevcut olan farklı iletişim teknolojilerini ve sensörlerini de araştırmışlardır. Araştırmanın sonucunda en yaygın kullanılan iletişim teknolojisinin ZigBee olduğu ve EC-5 sensörü toprak nemini ölçmek için yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür (Thakur vd., 2019). 2019 yılı içerisinde Khoa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise tarımda çevresel faktörlerin kontrolünü sağlamak için bir sistem tasarlanarak uygulanmıştır. Tasarlanan sistemle su seviyesi, toprak nemi, sıcaklık, nem ve yağmur sensörleri gibi düşük maliyetli ve etkili bir



akıllı tarım sistemi için LoRa iletim modülü kullanan bir çözüm sunulmaktadır. Sistemin ana devre kartının tasarımı, iki katmanın birleştirilmesi ve yazılım optimizasyonunun uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Khoa vd., 2019).

Kassim vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada IoT'nin tarım uygulamalarındaki en son trendleri inceleyerek akıllı tarıma yönelik ağ ve açık kaynaklı yazılımlardaki sorunları ve zorlukları sunmuştur. Ayrıca bu çalışmada IoT teknolojilerinin tarım sektörünü nasıl değiştireceğine ve çiftçilerin çiftliklerini daha etkin bir şekilde yönetmelerine ve gelirlerini artırmalarına nasıl yardımcı olacağı araştırılmıştır (Kassim, 2020).

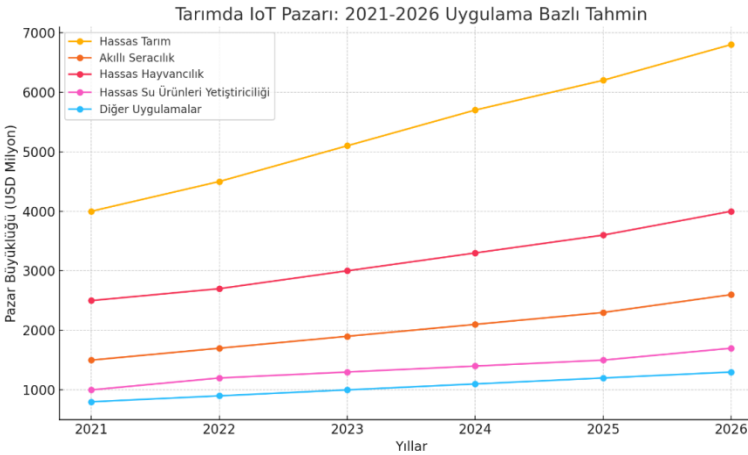
Gür vd.'nin 2024 yılında yaptıkları çalışmada, farklı bir bakış açısı önererek; normal ve akıllı tarım ürünlerinin depolama alanları olan silolarda doluluk işlemlerinin verimli, güvenilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirilmesi için SCADA tabanlı PLC otomasyon sistemi kurarak kontrol sürecinin takibini yapmışlardır. Kontrol sürecinde sensörlerden yararlanmışlardır.

## **2. TARIMDA NESNELERİN İNTERNETİ (IoT) PAZARININ DURUMU**

Tarımda kullanılan IoT pazarının büyümesi son 5 yılda önemli ölçüde ivme kazanılmıştır. Özellikle hassas tarım, akıllı seracılık, hassas hayvancılık ve hassas su ürünleri yetiştiriciliği gibi uygulamalarda IoT tabanlı çözümler, tarımsal verimliliği artırmada kritik rol oynamaktadır. Bu teknolojiler sayesinde çiftçiler, toprak izleme, verim tahmini, sulama yönetimi ve ekipman takibi gibi konularda gerçek zamanlı verilere erişim sağlayarak daha bilinçli kararlar alabilmektedir. Ayrıca, IoT teknolojilerinin benimsenmesi, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve maliyetlerin azaltılmasını sağlamaktadır. COVID-19 pandemisinin tarımda IoT çözümlerinin benimsenmesini hızlandırdığı bir gerçektir. Pazarın büyümesini tetikleyen faktörler arasında devletlerin hassas tarım uygulamalarını destekleyen politikaları, gelişmiş ülkelerdeki büyük ölçekli çiftliklerin IoT teknolojilerine yaptığı yatırımlar ve tarımda drone, sensör ve yapay zeka gibi yenilikçi teknolojilerin yaygınlaşması yer almaktadır. Bununla birlikte, pazarın büyümesini sınırlayan faktörler arasında yüksek başlangıç maliyetleri, teknik

bilgi eksikliği ve tarım sektöründeki parçalanmış yapı yer almaktadır. Ancak, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki çiftçiler arasında IoT çözümlerine olan ilginin artması, pazar için önemli fırsatlar sunmaktadır.

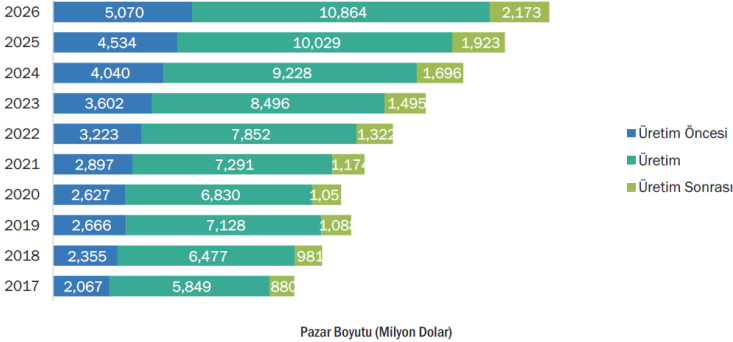
2021-2026 yılları arasında kapsayan tarımda IoT pazarına yönelik tahmin verileri ve farklı uygulama alanlarının büyüme trendleri Şekil 2’de gösterilmektedir (URL-1, 2021). Grafiğe göre, hassas tarım sektörü, bu dönemde pazarın en büyük payını elinde tutmakta ve sürekli bir büyüme göstermektedir. 2021 yılında yaklaşık 4 milyar USD olan pazar büyüklüğünün, 2026 yılına kadar 6,8 milyar USD’ye ulaşması beklenmektedir. Akıllı seracılık uygulamaları da sürekli bir artış sergileyerek 2021’deki 1,5 milyar USD’den 2026’da 2,6 milyar USD’ye yükselmesi öngörülmektedir. Hassas veya akıllı hayvancılık ve hassas su ürünleri yetiştiriciliği uygulamaları da benzer şekilde büyümekte, özellikle hayvancılıkta 2026 yılına kadar 4 milyar USD’ye yaklaşan bir pazar hacmine ulaşılması beklenmektedir. Diğer uygulamalar ise daha küçük bir pazar payına sahip olmakla birlikte, yıllık düzenli büyüme göstermektedir. Hassas tarımın IoT pazarında lider olduğu ve diğer uygulama alanlarının da önemli bir gelişme kaydedeceği Şekil 2’de gözler önüne serilmektedir.



**Şekil 2.** Tarımda IoT pazarı: 2021-2026 uygulama bazlı tahmin (URL-1, 2021)

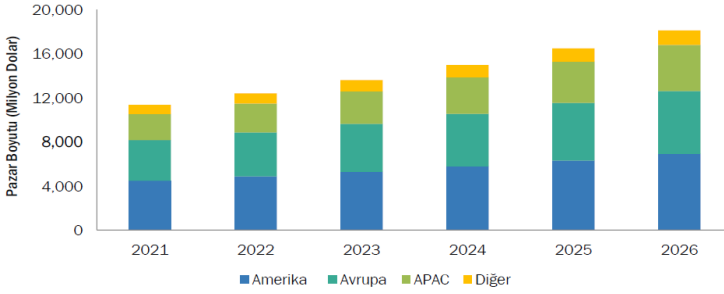
Şekil 3, tarımda IoT pazarında üretim aşamasının en büyük pazar payına sahip olduğunu göstermektedir (URL-1, 2021). 2021’de 7,29 milyar USD olan üretim aşaması pazar büyüklüğü, 2026’da 10,86 milyar USD’ye

ulaşacaktır. Bu aşama, IoT teknolojilerinin çiftliklerde üretim süreçlerini optimize etmede yaygın olarak kullanıldığını vurgulamaktadır. Üretim öncesi aşama, tarla hazırlığı, ekim ve toprak izleme gibi süreçlerde IoT kullanımını içermekte ve 2021'de 2,89 milyar USD iken, 2026'da 5,07 milyar USD'ye çıkacağı öngörülmektedir. Üretim sonrası aşama ise; depolama, paketleme ve lojistik süreçlerini kapsamaktadır ve pazar payının 2021'de 1,17 milyar USD iken, 2026'da 2,17 milyar USD'ye yükseleceği ön görülmektedir. 2026 tahminlerine göre tarımda IoT pazarında en büyük payın üretim aşamasına ait olduğunu göstermektedir. Bu aşamanın pazar büyüklüğü 2026 yılında 10,86 milyar USD'ye ulaşarak, sektördeki en önemli segmenti oluşturacaktır. Üretim öncesi aşama ise 5,07 milyar USD'ye ulaşarak ikinci en büyük segment olacaktır. Üretim sonrası aşama, 2,17 milyar USD ile en küçük pazar payına sahip olmasına rağmen, bu aşamanın hızlı bir büyüme kaydedeceği öngörülmektedir. Bu veriler, IoT teknolojilerinin tarımsal süreçlerin tüm aşamalarında yaygın olarak benimseneceğini ve özellikle üretim aşamasında büyük bir ivme kazanacağını göstermektedir.

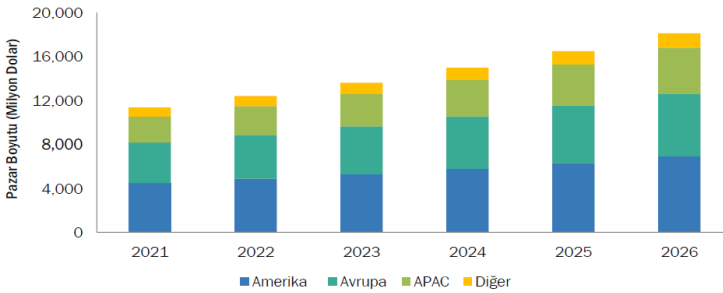


Şekil 3. Üretim için IoT pazar büyüklüğü 2017- 2026

Tarımda IoT pazarında bölgesel analizi



**Şekil 4**'de verilmiştir (URL-1, 2021). Şekil 4'e göre Amerika'nın 2021-2026 yılları arasında en büyük pazar payına sahip olacağını göstermektedir. 2020 yılında yaklaşık %40 pazar payı ile lider olan Amerika bölgesi, gelişmiş tarım teknolojilerini kullanan büyük ölçekli çiftçilerin varlığı nedeniyle güçlü bir büyüme sergilemektedir. Özellikle ABD ve Kanada gibi ülkeler, akıllı sulama ve hassas tarım teknolojilerinin erken benimsenmesiyle bu büyümeyi desteklemektedir. Bu bölgede IoT teknolojilerinin kullanımıyla, ekim ve ürün yönetim süreçlerinde hız ve doğruluğun artırılması hedeflenmektedir. Asya-Pasifik (APAC) bölgesi, tarımda IoT çözümlerinin en hızlı büyüdüğü pazar olarak öne çıkmaktadır. Çin, Hindistan ve Güneydoğu Asya ülkeleri gibi hızla gelişen nüfusların bulunduğu bu bölgelerde, tarımsal IoT tekniklerinin benimsenme oranı yüksek olacaktır. Ayrıca, bu ülkelerdeki hükümetlerin çiftçilere sunduğu sübvansiyonlar ve tarım teknolojilerini destekleyen politikalar da büyümenin ana nedenleri arasında yer almaktadır.



**Şekil 4.** Tarım IoT pazarında bölgesel analiz

Avrupa'da tarımda ileri teknoloji çözümleri yaygın olarak kullanılmakta ve bu durum özellikle hassas tarım, akıllı seracılık ve hassas hayvancılık gibi alanlarda büyük bir etki yaratmaktadır. Avrupa'nın IoT pazarındaki büyümesinin arkasındaki başlıca nedenler arasında, artan iş gücü maliyetleri ve modern tarım tekniklerinin benimsenmesi bulunmaktadır. Avrupa'nın tarımsal IoT pazarının, 2021-2026 yılları arasında yılda %7.5'lik bir büyüme oranı (CAGR) ile genişleyeceği öngörülmektedir. Almanya, Avrupa tarım IoT pazarının en büyük payına sahiptir ve 2026 yılına kadar 1,768 milyon USD'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir. Almanya'daki büyük ölçekli çiftliklerde hassas tarım teknolojilerinin yaygın kullanımı, bu büyümenin arkasındaki ana faktördür. Hollanda, Avrupa'da en hızlı büyüyen pazar olarak öne çıkmakta ve %10.8'lik yıllık bileşik büyüme oranıyla (compound annual growth rate, CAGR) önemli bir artış kaydetmesi beklenmektedir. Hollanda'da modern tarım uygulamalarını teşvik eden devlet girişimleri, bu büyümeyi destekleyen ana unsurlardan biridir.

### 3. AKILLI TARIMDA KULLANILAN SENSÖRLER

Akıllı tarım yöntemleri geleneksel yöntemlerden çok daha verimlidir (Pyngkodi vd., 2022). Tarım alanlarında teknolojinin kullanılması; ilave insan gücü çabalarının azaltılmasının yanı sıra doğru verilerin elde edilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır (Hassan vd., 2021). Topraktan alınan verilerin sürekliliği ile bitki için doğru kararlar verilerek ürünün büyümesi için ihtiyacı olan sulama ve gübreleme gibi girdilerin kontrolü de sağlanabilmektedir (Imam vd., 2015). Bu bölümde akıllı tarımda izleme işlemleri için kullanılan sensörler ve bunlarla ilgili çalışmalara odaklanılmaktadır. Tarımda kullanılan sensörlerin sağladığı bazı avantajlar şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Su ve gübre kullanımını kontrol etme fırsatı verir,
- Bitkinin sağlığını iyileştirir,
- Tarımda verimliliği artırır,
- Zaman tasarrufu sağlar ve insan gücünü doğru kullanır,
- Çevresel faktörlerin kontrolünü sağlar,
- Toprak ve bitki hakkında veri toplamasını ve analizine imkan verir.

Öte yandan, ilk yatırım maliyeti ve sensörlerde pil gibi kısıtlı güç sağlayıcısı kullanılması ise tarımda kullanılan sensörlerin dezavantajlarından (Imam vd., 2015).

### 3.1. Toprak Nem Sensörleri

Bitkiler su ile fizyolojik aktivitelerini sürdürebilmektedir. Toprak nemi, toprak sağlığının değerlendirilmesinde önemli bir parametredir ve bitki büyümesinde anahtar rol oynar. Toprak nem seviyesi topraktaki tuzun çözünmesini, bitkilerin su ve iyon alımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, tarımsal üretim için uygun toprak koşullarının sağlanmasında toprak nem seviyesinin izlenmesi gerekmektedir. Toprak nem sensörleri, topraktaki su içeriğini tahmin etmek için kullanılmakta ve bitki büyümesi için uygun düzeyde sulama zamanı ve su miktarı konusunda bilgi vermektedir (Yin vd., 2021). Toprak nem sensörleri çalışma mekanizmalarına göre kapasitif tabanlı nem sensörleri, elektromanyetik indüksiyon tabanlı nem sensörleri, ultrasonik tabanlı nem sensörleri ve optik sensörler olmak üzere dört ana gruba ayrılabilir. Bu sensörler içerisinde Şekil 55'te görülen kapasitif tabanlı nem sensörleri daha düşük maliyetle gerçek zamanlı toprak nem bilgisi sağladığı için ve daha az enerji tükettiği için tercih edilmektedir (Kulmany vd., 2022).



Şekil 5. Kapasitif nem sensörleri

### 3.2. Hava Durumu Sensörleri

Bitki büyümesinde; tarladan toplanan ve algılanan iklim verileri ile web sitelerinden gelen hava durumu verileri birlikte rol oynamaktadır. Çevre koşulları sıcak, kuru, güneşli veya rüzgarlıysa ürünler için yüksek miktarda suya ihtiyaç vardır. Öte yandan etken faktörler soğuk, nemli, bulutlu veya az

rüzgarlıysa ürünler için su ihtiyacı daha azdır (Sushanth ve Sujatha, 2018). Bitki sağlığı için hava durumu bilgilerini elde edebilmek amacıyla sıcaklık sensörü, rüzgar sensörü, nem sensörü ve güneş ışığı sensörü gibi çeşitli sensörden gelen veriler toplanmaktadır.

### **3.3. Bitki Sağlığı Sensörleri**

Biyolojik veya çevresel etkilerden bazı bitki hastalıkları ortaya çıkmaktadır. Bitki hastalıkları ürün verimliliğini tehdit etmekte ve ürünlerde kayıpları artırmaktadır. Verimliliği artırmak için bitki büyümesindeki etken olan durumları tespit edebilen sensörler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algılayıcılardan birisi olan giyilebilir sensörler; fizyolojik ve patolojik parametreleri yerinde ve sürekli olarak izleme kabiliyetleri nedeniyle bitki yetiştirme çalışmalarında kullanılabilir (Lee vd., 2021). Ayrıca, giyilebilir sensörlerle bitki gelişimi ve bitki sağlığı gibi verilere uzaktan erişim ve kontrol etme imkanı sağlanmaktadır.

### **3.4. Toprak Besin Analiz Sensörler**

Tarımsal verim öncelikle toprak verimliliğine, toprağın nem seviyesine ve uygun gübrelerin kullanımına bağlıdır. Çoğu mevcut durumda, toprak besinlerini ölçme işlemi manuel yöntemlerle yapılmaktadır. Tarım alanından alınan toprak numunesi ile laboratuvar ortamında numunenin analiz edilmesi ve sonuçlarının sunulması arasındaki zaman farkı nedeniyle, manuel ölçüm işlemlerinin doğruluğu azdır ve sürekli kontrol söz konusu değildir (Shylaja ve Veena, 2017). Toprakta bulunan besinlerin algılanması ve toprak besin değişkenliğinin takip edilmesi için toprak besin analiz sensörleri kullanmak yararlı olmaktadır. Toprak besin analizleri için iyon seçici elektrotlar küçük boyutları, hızlı tepkileri ve doğrudan ölçme gibi avantajları nedeniyle iyi bir seçenek sunmaktadır (Kim vd., 2007).

### **3.5. Toprak pH sensörleri**

Toprak pH verisini bilmek; kimyasal ve biyolojik süreçlerdeki önemi nedeniyle akıllı tarım sistemlerinde etkili bir durumdur. Çoğu ürünün beslenmesi ve verimi pH düşük olduğunda azalırken, pH optimum seviyeye

yükseldikçe verimlilik artmaktadır. Birçok ürün pH nötre yakın yani değeri 6 ila 7,5 arasında ise iyi şekilde büyümektedir (Kumar vd., 2015). Topraktaki pH'ı belirlemek için kolorimetrik ve elektrometrik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kolorimetrik yöntem, çözelti rengi hidrojen iyonlarının konsantrasyonuna dayanan zayıf asitleri ve bazları gösterge olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem düşük maliyeti ve taşınabilirliği avantaj oluştururken, öte taraftan insan yorumuna tabii olması hatalara neden olabilmektedir. Elektrometrik yöntemler ise pH'ı belirlerken metal veya camdan yapılmış iki elektrot arasındaki iyon akışının ölçülmesinden yararlanmaktadır. Bu sensörler, doğrudan toprağa yerleştirildikleri için sahadan bir numunenin çıkarılmasını gerektirmemektedir. Metal elektrotlar cam elektrot sensörlerinden daha az maliyetlidirler ancak, cam elektrot sensörleri kadar hassas değildirler (Scheberl vd., 2019).

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, gelişen teknolojiyle koordineli olarak ilerleyen tarım sektöründe verimliliği artırarak her türlü kaynak kullanımını optimize etmek için kabul edilebilir bir çözüm olan akıllı tarım sistemlerinde kullanılan sensörler araştırılmıştır.

Nesnelerin interneti alanındaki gelişmelerin tarım sektörüne aktarılması; topraksız tarım, tarımda otomasyon, uzaktan algılama ve kontrol gibi kabiliyetlerin artırılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle uzaktan sulama, uzaktan ürün kontrolü, uzaktan hasat gibi kavramlar işgücü kaynaklarının kullanımında verimliliği ön plana çıkarmaktadır. Nesnelerin interneti pazarının içerisindeki tarım sektörünün vurgusu önemlidir. Ayrıca, bu alandan elde edilecek verilerin analizi de çeşitli veri setlerinin ve büyük veriler üzerindeki çalışmalara katkı yapma potansiyeline sahiptir. Özellikle, tarımda kullanılan sensörlerin kablolu/kablosuz çeşitli bağlantı protokolleri kullanılarak birbirine bağlanması, birbiriyle haberleşmesi ve veri aktarımının sağlanması izlenebilirliği ve teknolojinin hareket kabiliyetinin artırmaktadır.

Akıllı tarım sistemlerinde kullanılan toprak nemi sensörleri, hava durumu sensörleri, bitki sağlığı sensörleri, toprak besin analiz sensörleri ve toprak pH ölçüm sensörleri incelenmiştir. Bu sensörlerin akıllı tarım sistemlerine sağladıkları avantajlar ve dezavantajlar hakkında bilgi verilmiştir.



Sensör teknolojilerindeki olumlu gelişmelerin etkisi tarım sektöründe de hissedilmektedir. Bu teknolojiler kullanılarak; daha sürdürülebilir ve verimli tarım uygulamalarının geliştirilme durumlarında ve gıda üretimindeki verimlilik seviyelerinde olumlu gelişmeler yaşanabilmektedir. Sensörler tarafından sürekli toplanan hava koşulları, toprak kalitesi, bitki sağlığı gibi verilerle işletmenin durumunun, ekipman verimliliğinin ve diğer etkenlerin ürüne olan etkilerinin izlenebildiği, optimize edilebildiği ve büyük veri analizinin yapılarak ileriki zamanlara dair tahminlere ulaşılabildiği görülmüştür. Ayrıca, bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasının; tarım sektöründe dijital dönüşümün hızlanmasına ve daha teknolojik akıllı tarım sistemlerinin kurulmasına olanak sağlayacağı açıktır.

İlerleyen dönemlerde araştırmacılar tarafından çalışılacak popüler konular arasına; akıllı tarım, dijital ikiz, dijital izlenebilirlik, sensör teknolojilerinin topraksız tarım alanındaki etkilerinin yanında uzay çalışmaları sonucunda kurulması planlanan kolonilerde ürün yetiştiriciliğine etkilerinin de, dahil edileceği ön görülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Aliev, K., Jawaid, M.M., Narejo, S., Pasero, E., Pulatov, A. (2018). Internet of plants application for smart agriculture. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(4).
- Gondchawar, N., Kawitkar, R.S. (2016). IoT based smart agriculture. *International Journal of advanced research in Computer and Communication Engineering*, 5(6), 838-842.
- Gür, Ç., Okta, O., Türkmen, C., Çarkıt, T. (2024). Tahıl silo dolum işlemlerinin verimli, güvenilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirilmesi için SCADA tabanlı PLC otomasyon sistemiyle kontrol edilmesi. *Elektrik-Elektronik ve Kontrol Mühendisliği Alanında Farklı Yaklaşımlar, Bölüm 2, Bidge Yayınları*, 31-71.
- Hassan, S.I., Alam, M.M., Illahi, U., Al Ghamdi, M.A., Almotiri, S.H., Su'ud, M.M. (2021). A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *IEEE Access*, 9, 32517-32548.
- Imam, S.A., Choudhary, A., Sachan, V.K. (2015). Design issues for wireless sensor networks and smart humidity sensors for precision agriculture: A review. *IEEE International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations*, 181-187.
- Jagannathan, S., Priyatharshini, R. (2015). Smart farming system using sensors for agricultural task automation. *IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development*, 49-53.
- Kassim, M.R.M. (2020). IoT applications in smart agriculture: Issues and challenges. *IEEE Conference on Open Systems*, 19-24.
- Khoa, T.A., Man, M.M., Nguyen, T.Y., Nguyen, V., Nam, N.H. (2019). Smart agriculture using IoT multi-sensors: A novel watering management system. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 8(3), 45.
- Kim, H.J., Hummel, J.W., Sudduth, K.A., Motavalli, P.P. (2007). Simultaneous analysis of soil macronutrients using ion-selective electrodes. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1867-1877.
- Kulmány, I.M., Bede-Fazekas, Á., Beslin, A., Giczi, Z., Milics, G., Kovács, B., ...Vona, V. (2022). Calibration of an Arduino-based low-cost

- capacitive soil moisture sensor for smart agriculture. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(3), 330-340.
- Kumar, S., Babankumar, R.T., Kumar, M. (2015). Soil pH sensing techniques and technologies. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(5), 1-3.
- Krishna, K.L., Silver, O., Malende, W.F., Anuradha, K. (2017). Internet of things application for implementation of smart agriculture system. *IEEE International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, 54-59.
- Lee, G., Wei, Q., Zhu, Y. (2021). Emerging wearable sensors for plant health monitoring. *Advanced Functional Materials*, 31(52), 2106475.
- Nukala, R., Panduru, K., Shields, A., Riordan, D., Doody, P., Walsh, J. (2016). Internet of things: A review from 'farm to fork'. *IEEE 27th Irish Signals and Systems Conference*, 1-6.
- Patil, K.A., Kale, N.R. (2016). A model for smart agriculture using IoT. *IEEE International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication*, 543-545.
- Pyingkodi, M., Thenmozhi, K., Nanthini, K., Karthikeyan, M., Palarimath, S., Erajavignesh, V., Kumar, G.B.A. (2022). Sensor based smart agriculture with IoT technologies: A review. *IEEE International Conference on Computer Communication and Informatics*, 1-7.
- Sahitya, G., Balaji, N., Naidu, C.D. (2016). Wireless sensor network for smart agriculture. *IEEE 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology*, 488-493.
- Scheberl, L., Scharenbroch, B.C., Werner, L.P., Prater, J.R., Fite, K.L. (2019). Evaluation of soil pH and soil moisture with different field sensors: Case study urban soil. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 267-279.
- Shylaja, S.N., Veena, M.B. (2017). Real-time monitoring of soil nutrient analysis using WSN. *IEEE International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing*, 3059-3062.
- Sushanth, G., Sujatha, S. (2018). IoT based smart agriculture system. *IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking*, 1-4.

- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. *Sensors*, 24(8), 2647.
- Suma, N., Samson, S.R., Saranya, S., Shanmugapriya, G., Subhashri, R. (2017). IoT based smart agriculture monitoring system. *International Journal on Recent and Innovation Trends in computing and communication*, 5(2), 177-181.
- Thakur, D., Kumar, Y., Kumar, A., Singh, P.K. (2019). Applicability of wireless sensor networks in precision agriculture: A review. *Wireless Personal Communications*, 107, 471-512.
- URL-1: Markets and Markets. (2021). Agriculture IoT Market with COVID-19 Impact Analysis by Hardware, Application (Precision Farming, Precision Forestry, Precision Livestock, Precision Aquaculture, Smart Greenhouse), Farm Size, Production Stage, and Geography - Global Forecast to 2026. [https://www.researchandmarkets.com/reports/5345710/agriculture-iot-market-with-covid-19-impact?srsItd=AfmBOorD5R3wRJ-xcwTzPbs\\_5ntq8Dj5ytBou5MGZs9p1nBaU58P\\_Bjj#product-description](https://www.researchandmarkets.com/reports/5345710/agriculture-iot-market-with-covid-19-impact?srsItd=AfmBOorD5R3wRJ-xcwTzPbs_5ntq8Dj5ytBou5MGZs9p1nBaU58P_Bjj#product-description), Ekim 2024.
- Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A.J., Cao, C. (2021). Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. *Advanced Materials*, 33(20), 2007764.



## BÖLÜM 4

# ABS TABANLI EKG ELEKTROTLARIN ÜRETİMİNDE GÜMÜŞ KAPLAMA SÜRECİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Prof. Dr. Ramazan KATIRCI<sup>1</sup>

Arş. Gör. Taha OĞUZ<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502874>

---

<sup>1</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye.  
ramazankatirci@sivas.edu.tr. ORCID ID: 0000-0003-2448-011X

<sup>2</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye.  
taha.oguz@sivas.edu.tr. ORCID ID: 0000-0003-4447-645X



## GİRİŞ

Kalp hastalıklarının teşhisinde EKG ölçümleri önemli bir yere sahiptir (Marozas vd., 2011; Swapna vd., 2012). EKG sinyalleri, kalbin elektriksel faaliyeti sonucunda oluşan ve deri yüzeyine yerleştirilen elektrotlarla ölçülebilen biyopotansiyel sinyalleridir (Liu vd., 2021; Umar vd., 2021). Elektrotlar bir EKG sisteminin en önemli parçalarındandır. En yaygın kullanılan elektrot türü, gümüş (Ag) ve gümüş-klorürden (AgCl) yapılmaktadır (Lee vd., 2022). Bunun yanı sıra, ABS (Akrilonitril bütadien stiren) gibi plastik malzemelerin yüzeyi Ag ile kaplanarak da elektrot üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Yudhanto vd., 2023). Kaplama işlemi genellikle elektro kaplama (Katırcı ve Oğuz, 2023b, 2023a; Oğuz ve Katırcı, 2023a) ya da akımsız kaplama yöntemleriyle yapılmaktadır (Bazzaoui vd., 2012).

ABS yüzeyinin gümüşle kaplanabilmesi için belirli işlem adımları takip edilmektedir. Bu işlemler sırasıyla etanol ile temizleme, kimyasal aşındırma (kromik asit-sülfürik asit), MBS (metabisülfid) uygulaması, kalay çözeltisi, paladyum işlemi, TF karışımı (TEA + formaldehit) ve son olarak gümüş kaplamadır (Lam vd., 2013). Bu işlemler arasında, kimyasal aşındırma, yüzeyin pürüzlü hale gelmesini sağlayarak metal iyonlarının yüzeye tutunmasını sağlamaktadır. Bu yüzden yüzeyi pürüzlü hale getirmek için kimyasal aşındırma yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu vd., 2020). Fakat bu işlem için kullanılan asitler çevreye ve insan sağlığına zararlıdır (Nigusse vd., 2021). Bu nedenle, kaplama süreçlerinde çevresel etkiyi azaltmak için siyanürsüz alkalın banyolar ve alternatif kompleksleme ajanları üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmıştır (Ramazan ve Uğur, 2014). Alternatif katkı maddeleri kaplama yüzeyini iyileştirmek için de kullanılmaktadır (Oğuz ve Katırcı, 2023c, 2023b; Sezer vd., 2012). Ayrıca çözelti özelliklerindeki değişim kaplama performansına da etki eder (Yabaş vd., 2021). Fakat çözeltilerin zamanla kirlenmesi ve yenilenmesi ihtiyacı, maliyet ve zaman kaybı gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır (Xu vd., 2020). Bu nedenlerle, kimyasal aşındırma yerine fiziksel/mekanik aşındırma yöntemleri üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Ramazan ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında ABS yüzeyi farklı zımpara kağıtlarıyla aşındırılmış ve kaplama denemeleri gerçekleştirilmiştir.



Küçük gözenekli zımpara kağıdı ile aşındırılmış ABS numunelerine akımsız nikel kaplama yapılmış ve bu yöntem kimyasal aşındırma ile elde edilen kaplamalarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, kimyasal aşındırmaya alternatif olarak fiziksel aşındırmanın kullanılabilceğini göstermiştir (Katırcı ve Oğuz, 2024). Ancak, numunelerin boyutları ve sayısı dikkate alındığında, her bir ABS numunesini ayrı ayrı aşındırma işleminin verimli olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, olası çözümler değerlendirilmiş ve ABS yüzeyinin henüz üretim aşamasında, ekstrüzyon kalıbının pürüzlü olarak tasarlanmasıyla pürüzlendirilmesi önerilmiştir. Bu yöntemle hem cam elyafı hem de cam elyafsız pürüzlü ABS numuneleri üretilmiş ve bu numuneler üzerine gümüş kaplama yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, kimyasal aşındırmanın olumsuz etkilerinden kaçınarak, çevre dostu ve maliyet açısından daha verimli bir yöntemle, EKG cihazlarında kullanılmak üzere yüzeyi pürüzlü olarak üretilmiş ABS elektrotların gümüşle kaplanmasını değerlendirmektir.

## 1. ÇALIŞMANIN İÇERİĞİ

Bu çalışmada, pürüzlü yüzeye sahip numuneler üzerinde kaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, Şekil 1'de verilen temel işlem adımları sırasıyla uygulanmıştır. Bu işlem adımları şu şekildedir:

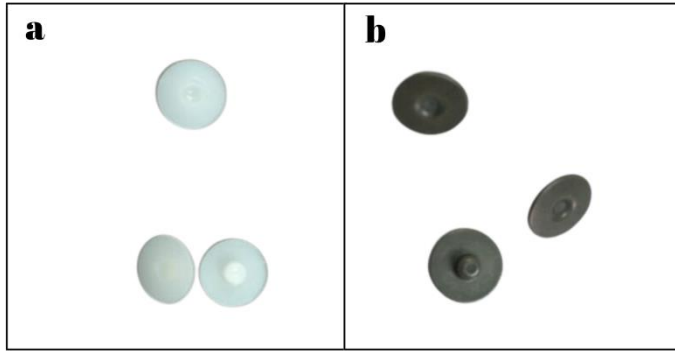
1. Kalay Çözeltisi (5-7 dakika)
2. Paladyum Çözeltisi (30-35 °C, 10 dakika): %20 paladyum ve %30 HCl ile hazırlanmıştır.
3. TF Karışımı: %20 TEA (Tri Etanol Amin) ve %20 formaldehit karışımı (1-2 dakika)
4. Gümüş Kaplama: 20 g/L gümüş nitrat (5-10 dakika)

İşlem sırasında her bir adımdan sonra yıkama veya kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, Şekil 1'de bu adımların detaylı bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 1: Temel işlem adımları.

Ayrıca, gümüş kaplanmış ve kaplanmamış yüzeyi pürüzlü ABS elektrot numune örnekleri, fikir oluşturması açısından Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2: (a) Kaplanmamış, (b) Gümüş kaplanmış yüzeyi pürüzlü ABS elektrot numune örnekleri.

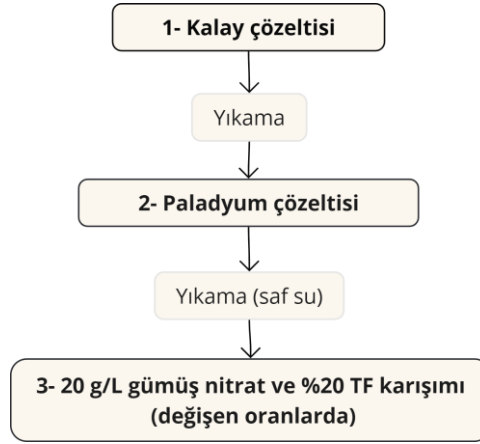
### 1.1 Kaplanacak ABS Parçaları İçin Gerekli Çözeltinin Hacmi

100 mL'lik beherde, 40 mL hacim çizgisine kadar (yaklaşık 160 ABS numunesi) paladyum kaplı numuneler yerleştirilmiştir. Ardından, üzerlerini kaplayacak kadar su ilave edildi ve bu suyun hacmi 25 mL olarak

ölçülmüştür. Böylece, 160 ABS numunesi için gerekli olan çözelti hacmi belirlenmiştir.

Numuneler, ilk olarak kalay çözeltisinde 7 dakika bekletilmiş ve ardından durulama işlemi yapılmıştır. Kalay çözeltisi sonrası, numuneler 30-35 °C sıcaklıktaki paladyum çözeltisinde 10 dakika bekletilmiş ve ardından saf su ile yıkanarak bir sonraki adıma hazır hale getirilmiştir. Numuneler, daha sonra %20 TF (Tri Etanol Amin) ve %20 formaldehit karışımında 2 dakika bekletilmiş ve kurutma işleminden geçirilerek gümüş kaplama aşamasına geçilmiştir.

Numunelerde kaplama gözlemlenmiş, ancak kaplama kalınlıklarının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, son iki aşamanın (TF ve gümüş kaplama) belirli oranlarda karıştırılarak birleştirilmesi uygun görülmüş ve işlem adımları Şekil 3'te gösterildiği gibi güncellenmiştir.



Şekil 3: Yüzeyi pürüzlü ABS numunelere kaplama yapılması için yeni işlem adımları.

## 1.2 Değişen Oranlarda 20 g/L Gümüş Nitrat ve %20 TF Karışımı

Numuneler, gümüş nitrat sulu çözeltisi ve %20 TF'nin belirli oranlardaki karışımlarında bekletilmiş ve bu sayede TF Karışımı ve Gümüş Kaplama aşamaları tek bir işlem adımına dönüştürülerek kaplama denemeleri yapılmıştır. Kullanılan karışım oranları sırasıyla şu şekildedir:

- %90 Gümüş Nitrat, %10 TF: 22,5 mL gümüş nitrat ve 2,5 mL TF kullanılarak toplamda 25 mL karışım hazırlanmıştır.
- %80 Gümüş Nitrat, %20 TF: 20 mL gümüş nitrat ve 5 mL TF kullanılarak toplamda 25 mL karışım hazırlanmıştır.
- %70 Gümüş Nitrat, %30 TF: 17,5 mL gümüş nitrat ve 7,5 mL TF kullanılarak toplamda 25 mL karışım hazırlanmıştır.

Bu oranlar sırasıyla **9/1**, **8/2** ve **7/3** olarak adlandırılmıştır. Bu kısaltmalar, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu oranları ifade etmek amacıyla kullanılmıştır. “1.2.1 %90 Gümüş Nitrat %10 TF Uygulanması” başlığında, bu çalışmanın detaylarına değinilmiştir.

### 1.2.1 %90 Gümüş Nitrat %10 TF Uygulanması

Cam elyafli ve cam elyafsız yüzeyi pürüzlü ABS numuneler, 100 mL'lik ayrı beherlere, her biri 40 mL hacim çizgisine kadar doldurulmuştur. Öncelikle, numunelerin üzerine 22,5 mL 20 g/L gümüş nitrat çözeltisi ilave edilmiş ve ardından 2,5 mL %20 TF karışımı eklenmiştir. Beherlerin üzeri streç film ile kapatılarak karışımlar 3 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından 5 dakika bekletilmiştir. Bu işlem, hem cam elyafli hem de cam elyafsız numuneler için 5 kez tekrarlanmıştır.

Bu işlem sonucunda, numunelerin yüzeylerinde oldukça parlak beyaz bir gümüş kaplama elde edilmiştir. Daha sonra kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Cam elyafli ve cam elyafsız numunelerden elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları mikron ( $\mu\text{m}$ ) cinsinden Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1:** Cam elyafli ve cam elyafsız ABS numunelerinin %90 gümüş nitrat ve %10 TF oranındaki karışımla kaplanması sonucu elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları.

Cam Elyafli (9/1 karışım)	Cam Elyafsız (9/1 karışım)
0,519	0,361
0,554	0,332
0,522	0,593
0,600	0,305
0,548	0,602
0,654	0,381
0,581	0,358
0,519	0,606

0,872	0,245
0,523	0,494
Ortalama: 0,589 $\mu\text{m}$	Ortalama: 0,427 $\mu\text{m}$

Kalınlık ölçümü için, kaplama işlemi yapılmış numuneler arasından rastgele seçilen 10 adet cam elyafli ve 10 adet cam elyafsız ABS elektrot kullanılmıştır. Bu numunelerin kalınlıkları ölçülmüş ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Kalınlık ölçümleri, MAXXI 5 model X-ray floresans (XRF) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 1.2.2 %80 Gümüş Nitrat %20 TF

Cam elyafli ve cam elyafsız yüzeyi pürüzlü ABS numuneler, 100 mL'lik ayrı beherlerde 40 mL hacim çizgisine kadar doldurulmuştur. Numunelerin üzerine, ilk olarak 20 mL 20 g/L gümüş nitrat çözeltisi eklenmiş, ardından 5 mL %20 TF karışımı ilave edilmiştir. Beherlerin üzeri streç film ile kaplanarak karışımlar 3 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından 5 dakika bekletilmiştir. Bu işlem, cam elyafli ve cam elyafsız numuneler için 5 kez tekrarlanmıştır.

Yapılan bu işlem sonucunda, numunelerin yüzeylerinde oldukça parlak beyaz bir gümüş kaplama elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve bu değerlerin ortalamaları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2:** Cam elyafli ve cam elyafsız ABS numunelerinin %80 gümüş nitrat ve %20 TF oranındaki karışımla kaplanması sonucu elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları.

Cam elyafli (8/2 karışım)	Cam elyafsız (8/2 karışım)
0,653	0,512
0,617	0,446
0,681	0,846
0,688	0,460
0,587	0,728
0,605	0,647
0,651	0,668
1,46	1,12
1,64	0,566
0,825	0,902
Ortalama: 0,840 $\mu\text{m}$	Ortalama: 0,689 $\mu\text{m}$

### 1.2.3 %70 Gümüş Nitrat %30 TF Uygulaması

Cam elyafı ve cam elyafsız pürüzlü ABS numuneler, 100 mL'lik ayrı beherlerde 40 mL hacim çizgisine kadar doldurulmuştur. Numunelerin üzerine ilk olarak 17,5 mL 20 g/L gümüş nitrat çözeltisi eklenmiş ve ardından 7,5 mL %20 TF karışımı ilave edilmiştir. Beherlerin üzeri streç film ile kaplanarak karışımlar 3 dakika karıştırılmış ve ardından 5 dakika bekletilmiştir. Bu işlem, hem cam elyafı hem de cam elyafsız numuneler için 5 kez tekrarlanmıştır.

İşlem sonucunda, numunelerin yüzeylerinde parlak beyaz renkli gümüş kaplama elde edilmiştir. Numunelerin kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3:** Cam elyafı ve cam elyafsız ABS numunelerinin %70 gümüş nitrat ve %30 TF oranındaki karışımla kaplanması sonucu elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları.

Cam elyafı (7/3karışım)	Cam elyafsız (7/3karışım)
0,681	0,499
0,850	0,616
0,819	0,743
1,74	0,614
0,631	0,646
0,749	0,513
1,57	0,656
0,781	0,516
0,680	0,789
0,756	0,430
Ortalama: 0,925 $\mu\text{m}$	Ortalama: 0,602 $\mu\text{m}$

Her üç farklı oran için elde edilen ortalama kalınlık değerleri, daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4:** 9/1, 8/2 ve 7/3 oranlarında hazırlanan karışımlarla kaplanmış cam elyafı ve cam elyafsız ABS numunelerinin ortalama kalınlık değerleri.

%Gümüş -TF oranı	Cam elyafı ABS (ortalama kalınlık)	Cam elyafsız ABS (ortalama kalınlık)
9/1 karışım	0,589	0,427
8/2 karışım	0,840	0,689
7/3karışım	0,925 $\mu\text{m}$	0,602 $\mu\text{m}$

Tablo 4'te görüldüğü gibi, cam elyaflı ABS numunelerinde TF oranı arttıkça kaplama kalınlığında artış gözlemlenmiştir. Cam elyafsız numunelerde ise en yüksek kalınlık değerinin %80 gümüş nitrat ve %20 TF karışımında elde edildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, her iki numune türü için de 8/2 oranı standart olarak kabul edilmiş ve sonraki çalışmalar bu oran üzerinden sürdürülmüştür.

#### 1.2.4. Tekrarlı Kaplama Yaparak Kaplama Kalınlığının Arttırılması

Cam elyaflı ve cam elyafsız yüzeyi pürüzlü numuneler, %80 gümüş nitrat ve %20 TF oranında hazırlanan karışım ile kaplanmıştır. Her iki numune türüne de 5 kez karıştırma ve bekletme işlemleri uygulanmış, ardından tekrar %80 gümüş nitrat ve %20 TF karışımı eklenmiş ve aynı işlemler tekrar edilmiştir. Bu işlem toplamda üç kez tekrar edilmiştir ve böylelikle numuneler üç tur kaplamaya tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın amacı, tur sayısının kaplama kalınlığı üzerindeki etkisini tespit etmektir.

Tablo 5'te, üç tur kaplama sonucunda rastgele seçilmiş on adet cam elyaflı ve on adet cam elyafsız numunenin kalınlık değerleri ve bu değerlerin ortalamaları gösterilmiştir. Bu işlemler sonucunda elde edilen kaplamalar, tek tur kaplamaya göre daha mat bir görünüm sergilemiştir.

**Tablo 5:** Cam elyaflı ve cam elyafsız ABS numunelerinin %80 gümüş nitrat ve %20 TF oranında karışım hazırlanarak üç kez kaplama uygulanması sonucu elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları.

Cam elyaflı ABS (8/2 karışım 3.tekrar)	Cam elyafsız ABS (8/2 karışım 3.tekrar)
5,66	4,11
3,45	3,53
4,26	3,97
3,91	4,27
3,54	4,11
3,83	2,39
3,88	3,03
4,29	4,77
4,74	4,29
3,61	2,75
Ortalama: 4,11 µm	Ortalama: 3,72 µm

Tablo 5'te görüldüğü gibi, hem cam elyafı hem de cam elyafsız numunelerde artan kaplama turu ile kalınlık değerlerinde artış tespit edilmiştir. Ancak artan kalınlık ile birlikte, numunelerin daha mat bir görünüm kazandığı gözlemlenmiştir.

Yeni üretilmiş cam elyafı numuneler ile elde edilen kaplama kalınlığı ve görünüm, daha önce kimyasal aşındırma ile yüzeyi pürüzlü hale getirilmiş cam elyafı numunelerle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, kimyasal aşındırma yöntemiyle hazırlanmış cam elyafı numuneler de %80 gümüş nitrat ve %20 TF oranında hazırlanan karışımla bir kez (5 aşamalı karıştırma ve bekletme işlemleri) kaplanmıştır. Numunelerin yüzeylerinde parlak olmayan, mat beyaz renkli bir kaplama elde edilmiştir. Bu numunelerin kalınlık değerleri ve ortalamaları Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6:** Kimyasal aşındırma ile yüzeyi pürüzlü hale getirilmiş cam elyafı numunelerin %80 gümüş nitrat ve %20 TF oranında hazırlanan karışımla bir kez kaplanması sonucu elde edilen kalınlık değerleri ve ortalamaları.

Cam elyafı eski parçalar (8/2 karışım)
0,601
0,744
0,794
0,757
0,685
0,650
0,447
0,672
0,665
0,516
Ortalama: 0,653 $\mu\text{m}$

Yüzeyi kimyasal aşındırma ile pürüzlü hale getirilmiş cam elyafı numuneler pürüzlü halde üretilen cam elyafı numuneler ile karşılaştırıldığında, yeni üretilen yüzeyi pürüzlü numunelerin daha parlak bir kaplama sağladığı görülmüş olup kaplama kalınlığının da daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



## 2. SONUÇ

Bu çalışmada, kimyasal aşındırma yerine yüzeyi pürüzlü bir şekilde üretilmiş ABS elektrotların gümüş kaplanmasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çevreye ve insan sağlığına zarar veren kimyasal aşındırma yöntemleri yerine daha güvenli bir alternatif sunmak amacıyla yapılan bu çalışmada, ABS numuneleri ekstrüzyon sürecinde yüzeyi pürüzlü bir şekilde üretilmiş ve gümüş kaplama sürecine tabi tutulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, yüzeyi pürüzlü bir şekilde üretilmiş ABS numunelerinin, kimyasal aşındırma ile pürüzlendirilmiş numuneler kadar verimli olduğunu göstermiştir. Cam elyafı ve cam elyafsız ABS numunelerine farklı oranlarda (%90, %80, %70) gümüş nitrat çözeltisi ve TF karışımı kullanılarak yapılan kaplama çalışmalarında, cam elyafı ABS numunelerinde TF oranı arttıkça kaplama kalınlığında artış gözlemlenmiştir. Cam elyafsız numunelerde ise en yüksek kalınlık değerinin %80 gümüş nitrat ve %20 TF karışımında elde edildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, her iki numune türü için de 8/2 oranı en uygun oran olarak kabul edilmiştir.

Yapılan tekrar kaplama denemeleri ile kaplama kalınlığının artırılmasının mümkün olduğu, ancak bu durumun kaplamanın matlaşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal aşındırma yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, pürüzlü bir şekilde üretilmiş ABS'lere uygulanan kaplamaların daha parlak olduğu ayrıca daha üstün kaplama kalınlığı değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu bulgu, çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen numuneleri henüz üretim aşamasında pürüzlü bir şekilde üretmenin, kimyasal aşındırmaya alternatif olarak kullanılabileceğini desteklemektedir. Ayrıca cam elyafı ve cam elyafsız ABS numuneleri arasında yapılan karşılaştırmalar, cam elyafı numunelerde daha yüksek bir kaplama kalınlığı elde edildiği tespit edilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda bu çalışmada kullanılan, ABS'lerin pürüzlü bir şekilde üretilmesi yöntemi çevreye zarar vermeyen, maliyet verimli ve uygulanabilir bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Bazzaoui, M., Martins, J. I., Bazzaoui, E. A., Albourine, A. 2012. "Environmentally friendly process for nickel electroplating of ABS". *Applied Surface Science*, 258(20), 7968-7975.
- Katırcı, R., Oğuz, T. 2023a. "Elektrokaplama ile Nikel Kaplama" (ss. 226-251).
- Katırcı, R., Oğuz, T. 2023b. "Krom Kaplama Teknolojisi ve Analitik İncelemeleri" (ss. 202-225).
- Katırcı, R., Oğuz, T. 2024. "Abs Plastik Yüzeylerde Metalik Kaplama Ön İşlemlerin Optimizasyonu" (ss. 59-83).
- Lam, C. L., Rajdi, N. N. Z. M., Wicaksono, D. H. B. 2013. "MWCNT/Cotton-based flexible electrode for electrocardiography". *İçinde SENSORS, 2013 IEEE* (ss. 1-4). IEEE.
- Lee, M. S., Paul, A., Xu, Y., Hairston, W. D., Cauwenberghs, G. 2022. "Characterization of Ag/AgCl dry electrodes for wearable electrophysiological sensing". *Frontiers in Electronics*, 2, 700363.
- Liu, X., Wang, H., Li, Z., Qin, L. 2021. "Deep learning in ECG diagnosis: A review". *Knowledge-Based Systems*, 227, 107187.
- Marozas, V., Petrenas, A., Daukantas, S., Lukosevicius, A. 2011. "A comparison of conductive textile-based and silver/silver chloride gel electrodes in exercise electrocardiogram recordings". *Journal of electrocardiology*, 44(2), 189-194.
- Nigusse, A. B., Malengier, B., Mengistie, D. A., Langenhove, L. Van. 2021. "A washable silver-printed textile electrode for ECG monitoring". Geliş tarihi gönderen <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236702722>
- Oğuz, T., Katırcı, R. 2023a. "Effects of Electrolytic Bronze Plating Parameters on Plating Color and Distribution".
- Oğuz, T., Katırcı, R. 2023b. "Investigation of The Effect of Organic Additives on Zinc Coating Thickness and Distribution".
- Oğuz, T., Katırcı, R. 2023c. "The Effect of Organic Additives on The Brightness of Zinc Coating".

- Ramazan, K., Uğur, Y. 2014. "Statistical studies of Zn–Ni alloy coatings using Non-cyanide alkaline baths containing polyethyleneimine complexing agents". *Transactions of the IMF*, 92(5), 245-252.
- Sezer, E., Ustamehmetoğlu, B., Katirci, R. 2012. "Effects of a N, N-dimethyl-N-2-propenyl-2-propene-1-ammonium chloride-2-propenamide copolymer on bright nickel plating". *Surface and Coatings Technology*, 213, 253-263.
- Swapna, G., Ghista, D. N., Martis, R. J., Ang, A. P. C., Sree, S. V. 2012. "ECG Signal generation and heart rate variability signal extraction: Signal processing, features detection, and their correlation with cardiac diseases". *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 12(04), 1240012.
- Umar, A. H., Othman, M. A., Harun, F. K. C., Yusof, Y. 2021. "Dielectrics for non-contact ECG bioelectrodes: A review". *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 18353-18367.
- Xu, X., Luo, M., He, P., Yang, J. 2020. "Washable and flexible screen printed graphene electrode on textiles for wearable healthcare monitoring". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(12), 125402.
- Yabaş, E., Biçer, E., Katırcı, R. 2021. "Experimental and In Silico studies on optical properties of new thiadiazole tetrasubstituted metal-free and zinc phthalocyanine compounds". *Optical Materials*, 122, 111808.
- Yudhanto, A., Li, X., Tao, R., Melentiev, R., Lubineau, G. 2023. "Identifying adhesion characteristics of metal-polymer interfaces: Recent advances in the case of electroplated acrylonitrile butadiene styrene". *Materials Today Communications*, 35, 106218.

**BÖLÜM 5**

**MÜHENDİSLİK OPTİMİZASYONLARINDA  
TAGUCHİ METODU VE YAPAY SİNİR AĞLARININ  
ORTAK KULLANIMI**

Doç. Dr. Erdiñç ARICI<sup>1</sup>

Prof. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502878>

---

<sup>1</sup> Fırat Ünivesitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliğı Bölümü, Elazığ, Türkiye.  
earici1@firat.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6153-5805>

<sup>2</sup> Fırat Ünivesitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliğı Bölümü, Elazığ, Türkiye.  
okelestemur@firat.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8498-7660>



## 1. GİRİŞ

Mühendislik alanında yapılan deneysel çalışmalarda karşılaşılan en büyük problemlerden biri zaman ve malzeme kaybına neden olan deney sayılarının fazlalığıdır. Özellikle deney parametrelerinin (bağımsız değişkenlerin) ve seviyelerinin fazla olması durumunda yapılacak deney sayısı önemli bir problem haline gelmektedir. Örneğin, her biri dört seviyeli olan dört deney parametrelili bir çalışmada her bir deney için 256 deney serisinin hazırlanması gereklidir. Bu durum deneysel çalışmaların süresini uzatmanın yanı sıra aşırı derecede malzeme ihtiyacını da doğurmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda farklı tasarım yöntemleri kullanılarak az sayıda deneyle optimum sonuçların elde edilebilmesini sağlayan yöntemlerin kullanımı ihtiyacı doğmuş ve buna bağlı olarak optimizasyon işlemlerinde farklı istatistiksel veya sayısal yöntemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılan en önemli istatistiksel yöntemlerden biri Taguchi metodudur (Arıcı & Keleştemur, 2019). Taguchi metodu maliyet, ekonomiklik, kalite ve performans tasarımlarının optimizasyonunda verimli, sistematik ve kolay bir şekilde uygulanabilmesinden dolayı mühendislik alanındaki birçok çalışmada kullanılmıştır (Ada et al., 2018; Chaulia & Das, 2008; Li et al., 2019; Mao & Yang, 2022; F. Zhang et al., 2021). Bu yöntem, kontrol edilebilir parametreleri ayarlayarak kontrol edilemeyen parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini azaltma prensibi ile optimizasyon yapmaktadır. Ayrıca, Taguchi metodu ile birden fazla faktörün eşzamanlı olarak optimize edilebilmesi ve kontrol edilebilir faktörlerin etkisinin değerlendirilebilmesi çalışmalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır (Behshad et al., 2021).

Daha önce de belirttiğimiz gibi deney sayısı, deneysel parametrelerin sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Fazla sayıda parametreye sahip olan çalışmalarda, parametrelerin sayısı ve seviyelerine uygun olarak Taguchi ortogonal diziler seçilerek deney sayısı azaltılabilir. Bu sayede daha az sayıda deneyle tüm parametre alanı (deney matrisi) incelenebilir. Bu matris yardımıyla, minimum sayıda denemeden maksimum bilgi elde edilebilir ve her parametrenin optimum seviyesi belirlenebilir (Furugi & Yapıcı, 2021).

Taguchi metodunda, elde edilmek istenen sonuç veya ürünün kalitesi süreçteki kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörlere bağlıdır. Kontrol

edilemeyen faktörlerin etkisi arttıkça kalite parametrelerinin istenen değerden sapma miktarının da artacağı kabul edilir (Zaluski et al., 2022). Meydana gelecek olan bu sapmanın minimuma indirilebilmesi amacıyla sinyal faktörlerinin (S) gürültü faktörlerine (N) oranından (S/N) faydalanılır. Bu oranda gürültü kontrol edilemeyen faktörleri sinyaller ise belirli işlevleri yerine getirmek için kontrol edilen faktörleri temsil eder (Uslu et al., 2021). S/N oranı, yanıtın nominal veya hedef değere göre farklı gürültü koşulları altında nasıl değiştiğini ölçer. Maksimum S/N oranının elde edildiği parametre seviyeleri gürültü faktörlerinin etkilerinin ve sapmanın minimum olduğu optimum değerleri verir (F. Zhang et al., 2021b). S/N oranı beklenen deney sonucunun durumuna göre aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir (Keleştemur et al., 2014).

En küçük en iyi olduğu durumda:

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right] \quad (1)$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (2)$$

Nominal en iyi olduğunda:

$$\frac{S}{N} = \log \left( \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (3)$$

Burada;

S: Sinyal faktörleri

N: Gürültü faktörleri

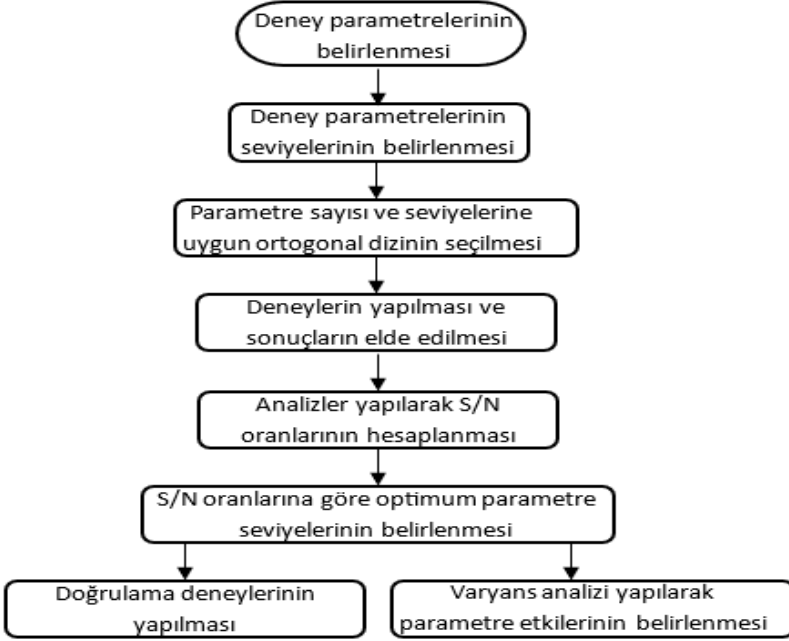
n: Yapılan deney sayısı

y: Faktör seviyeleri için elde edilen yanıtlar

$\bar{y}$ : Faktör seviyelerine göre yanıt ortalamaları

s: Faktör seviyelerinin yanıtlarının standart sapmasını ifade eder.

Beklenen deney sonucuna uygun olan denkleme göre hesaplanan S/N oranları esas alınarak belirlenen optimum parametre seviyelerinin güvenilirliğinin belirlenebilmesi amacıyla doğrulama deneyleri yapılır. Ayrıca varyans analizi de yapılarak parametrelerin sonuç üzerindeki etkileri belirlenir. Taguchi metodunun işlem basamakları Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir.



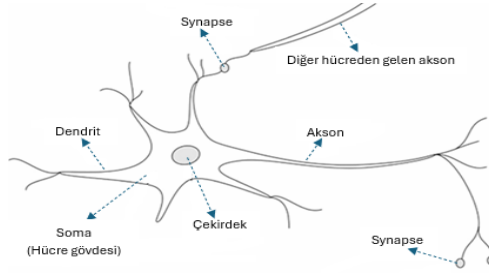
Şekil 1: Taguchi Metodu Akış Diyagramı

Taguchi metodu gibi istatistiksel yöntemlerle optimizasyon yapılırken fazla sayıda deneysel veriye ihtiyaç duyulmaması büyük bir avantajdır. Fakat, elde edilen optimum değerlerin parametre seviyeleri ile sınırlı kalması ise bu yöntemlerin dezavantajıdır. Elde edilen optimum değerler arasında yer alması durumunda, gerçek optimum değer belirlenmesinde sayısal yöntemlerin kullanılması daha uygundur. Yapay zekanın temeli olarak kabul edilen yapay sinir ağları (YSA) bu amaçla kullanılan sayısal yöntemlerden birisidir.



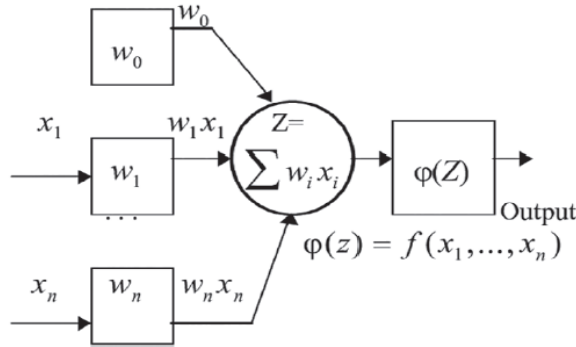
YSA, karmaşık problemlerin modellenmesi için birçok alanda yaygın olarak kullanılan hesaplamalı modelleme aracıdır. YSA'lar, verilerin işlenmesi ve bilgilerin gösterilmesinde paralel hesaplamalar yapabilen yoğun bir şekilde birbirlerine bağlı basit işlem elemanlarından (yapay nöronlar veya düğümler) oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. YSA'daki temel fikir, esas alındıkları biyolojik sistemlerin çalışmasını kopyalamak değil karmaşık problemlerin çözümünde bu ağların işlevselliğini esas alarak kullanmaktır. YSA'nın temelini, biyolojik sistemin doğrusal olmama, sağlamlık, yüksek paralellik, öğrenme, hata ve arıza toleransı, bulanık bilgiyi işleme ve genelleme yetenekleri oluşturmaktadır (Basheer & Hajmeer, 2000). YSA, insan beynindeki nöronlarla aynı şekilde bir araya getirilen yapay nöronları çeşitli bağlantı geometrileri aracılığıyla birbirine bağlayarak oluşturulan ağ yapılarıdır. İnsan beyninin modellenmesiyle geliştirilen YSA, ağlar tarafından alınan bilgiyi yapay nöronlar arasındaki bağlantılar vasıtasıyla depolayarak işlevsel hale getiren bir işlemci gibidir (Staub et al., 2015). Karmaşık bilimsel problemleri çözebilmesinden dolayı YSA geniş bir kullanım alanına sahiptir (Babikir & Mwambi, 2017; Liu et al., 2020; Ryland, 2021; Solopchuk & Zénon, 2021; R. Zhang et al., 2024).

İnsan beyni, nöron adı verilen milyarlarca özel sinir hücresinden oluşur. Biyolojik sinir ağını oluşturan nöronlar Soma (Hücre gövdesi), Akson ve Dendritler olmak üzere üç ana bileşenden meydana gelir (Şekil 2). Çekirdeği ve hücre plazmasını içeren Soma, hücreyi denetler ve hücre etkinliklerini yönetmekle sorumludur. Çekirdek, hücre içinde kalıtsal bilgileri depolarken, plazma, hücrenin ihtiyaç duyduğu malzemeleri üreten moleküler makineleri içerir. Nöronun her iki ucunda ağaç dalları biçiminde uzanan Dendritler bulunur. Bunlar, bitişik nöronlardan gelen sinyalleri alarak uzun fiberlerden oluşmuş aksonlar vasıtasıyla bilgiyi hücrenin karşı tarafındaki Dendritlere iletmekten sorumludur. Sinir hücreleri birbirleriyle doğrudan temas etmezler. Ağ nöronları küçük boşluklar şeklindeki snapslarla ayrılırlar. Sinyal snapsa ulaştığında kimyasal olarak salgılanan nörotransmitterler sinapsı geçer ve reseptör nöronlar tarafından alınır (Haglin et al., 2019).



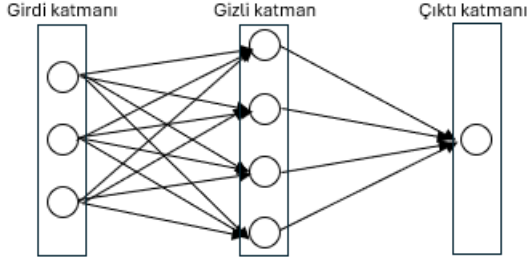
**Şekil 2:** Biyolojik Nöron Yapısı

YSA, biyolojik nöronlara benzer olarak birçok basit işlem biriminden oluşan bir sistemdir. Özel bağlantılar kullanılarak birbirlerine bağlantılı olan bu yapay nöronlar dağıtılmış ve paralel bir şekilde her türlü hesaplamayı yaparlar. Nöronların bu bağlantılarının her biri ağı görevini yerine getirmek için kullandığı bilgilerin temsil edildiği bir sinematik ağırlıkla ilişkilidir. YSA hesaplamaları öğrenme süreci denilen belirli bir süreçte gerçekleşir ve bu süreçte istenilen sonuca ulaşılabilmesi için ağırlıklar değiştirilir. Ağırlıkların ne zaman ne şekilde değişeceğini ve eğitimin nasıl yapılacağını mevcut öğrenme algoritmaları belirler. Yani bu sistemde biyolojik bir nöronun yapısı esas alınarak matematiksel model oluşturulmuştur. Şekil 3'te gösterilen bu model YSA'nın temelini oluşturan yapay sinir hücresini temsil eder (Shafi et al., 2021).



**Şekil 3:** Yapay Sinir Hücresi

Aynı doğrultuda bir araya gelen yapay nöronlar katmanları oluşturur. Bir yapay sinir ağı; girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanlarından oluşan çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Şekil 4'te gösterilen bir yapay sinir ağında girdi katmanına bilgi dışarıdan verildiği için operasyonel olarak kabul edilmez. Fakat, gizli ve çıktı katmanları operasyonel olarak kabul edilir (Abhilash et al., 2021).



**Şekil 4:** Yapay Sinir Ağı

Bu çalışmada, Taguchi metodu ve YSA birlikte kullanılarak daha az sayıda deneysel veri ile tam optimizasyon yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, L16 Taguchi ortogonal dizinine ait serilerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve porozite deney sonuçları kullanılarak tam faktöriyel ve optimum sonuçlar bulunmuştur. Bu işlem sonucunda her bir deney için 16 deney sonucundan faydalanılarak 64 deney sonucu bulunmuştur. İkinci aşamada hem ortogonal hem de tam faktöriyel sonuçları kullanılarak her deney (Basınç, eğilmede çekme ve porozite) için ayrı ayrı YSA ile optimizasyon yapılmıştır. Bu aşamada elde edilen optimizasyon sonuçları ile Taguchi metodundan elde edilen optimizasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Üçüncü aşamada ise beton numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve porozite değerleri için YSA ile ortak optimizasyon yapılmıştır. Ortogonal ve tam faktöriyel dizin için elde edilen optimizasyon sonuçlarının değerlendirilebilmesi amacıyla doğrulama deneyleri yapılarak elde edilen veriler yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışma ile Taguchi metodu ve YSA'nın birlikte kullanımı neticesinde az sayıda deneysel veri ile güvenilir bir şekilde optimizasyon yapılabileceği görülmüştür.

## 2. YÖNTEM ve BULGULAR

Taguchi metodu ve YSA'nın birlikte kullanımının avantajlarını incelemek amacıyla yapılan bu çalışmanın analizlerinde kullanılan deneysel veriler daha önceden yayınlanmış olan "Optimization of mortars containing steel sacle using Taguchi based grey relational analysis method" başlıklı makalemizden alınmıştır. Deneysel parametreleri ve seviyeleri Tablo 1'de, Taguchi L16 ortogonal dizini ve deneysel sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1:** Deneysel Parametreleri ve Seviyeleri

Deneysel Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
İnce Tufal (%)	0	5	10	15
İri Tufal (%)	0	5	10	15
Su/Çimento (S/Ç) Oranı	0.50	0.60	-	-
Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	400	500	-	-

**Tablo2:** L16 Taguchi Ortogonal Dizini ve Deneysel Sonuçları

Seri No	İnce Tufal (%)	İri Tufal (%)	S/Ç	Dozaj (kg)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilmede Çekme Dayanımı (Mpa)	Porozite (%)
S1	0	0	0.5	400	21.7	6.97	8.36
S2	0	5	0.5	400	22.29	7.23	8.11
S3	0	10	0.6	500	21.11	6.68	8.44
S4	0	15	0.6	500	20.83	7.11	8.56
S5	5	0	0.5	500	26.24	7.46	7.88
S6	5	5	0.5	500	27.49	7.93	7.79
S7	5	10	0.6	400	20.51	6.84	8.87
S8	5	15	0.6	400	19.92	7.24	9.04
S9	10	0	0.6	400	21.59	6.18	8.39
S10	10	5	0.6	400	22.09	6.43	8.26
S11	10	10	0.5	500	25.18	6.77	7.88
S12	10	15	0.5	500	24.82	7.28	8.03
S13	15	0	0.6	500	23.71	6.74	7.97
S14	15	5	0.6	500	24.17	6.92	7.79
S15	15	10	0.5	400	24.02	6.69	7.95
S16	15	15	0.5	400	23.87	6.83	8.03

Tablo 2’de verilen ortogonal dizinin S/N oranlarının ve tam faktöriyel değerlerinin hesaplanmasından önce verilerin güvenilirlik derecelerinin belirlenmesi gereklidir. Güvenilirlik derecelerinin yüksek olmaması durumunda tam faktöriyel sonuçlarında sapma oranı fazla olacağı için optimizasyon sonuçları da hatalı olacaktır. Bu amaçla Denklem 4-6’dan faydalanılarak hesaplanan ortalama, standart sapma ve güven aralığı değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

$$Ortalama = \frac{\sum D}{n} \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (D - Ortalama)^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$Güven Aralığı = Ortalama \pm 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Burada;

D= Her bir seriye ait deney sonucunu,

n= Deney sayısını,

s= Standart sapmayı ifade eder.

**Tablo 3:** Verilerin Güvenilirlik Değer Sonuçları

Deney Adı	Ortalama	Standart sapma	Güven Aralığı
Basınç Dayanımı	23.10	2.18	2.32
Eğilmede Çekme Dayanımı	6.96	0.42	0.45
Porozite	8.21	0.38	0.40

Tablo 3’te verilen değerler incelendiğinde her üç deneyin sonuçları için güven aralıklarının %95’in üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç verilerin güvenilir bir şekilde analizlerde kullanılabileceğini ifade eder.

L16 ortogonal dizininden faydalanılarak tam faktöriyel deney sonuçlarının hesaplanması aşağıda açıklamalı olarak işlem basamakları şeklinde verilmiştir.

**İşlem basamağı 1:** Ortogonal dizinin S/N oranları Denklem 1-3’ten faydalanılarak hesaplanır. Tablo 4’de verilen S/N oranları hesaplanırken beton numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının büyük olması istendiğinden dolayı Denklem 2 (En büyük en iyi), porozite değerinin küçük olması gerektiğinden dolayı da Denklem 1 (En küçük en iyi) kullanılmıştır.

**Tablo 4:** Ortogonal Dizin S/N Oranları

Seri No	Basınç Dayanımı	Eğilmede Çekme Dayanımı	Porozite
S1	26.729	16.865	-18.439
S2	26.962	17.183	-18.176
S3	26.49	16.496	-18.523
S4	26.374	17.037	-18.645
S5	28.379	17.455	-17.935
S6	28.783	17.985	-17.828
S7	26.239	16.701	-18.957
S8	25.986	17.195	-19.122
S9	26.685	15.82	-18.479
S10	26.884	16.164	-18.338
S11	28.021	16.612	-17.931
S12	27.896	17.243	-18.091
S13	27.499	16.573	-18.024
S14	27.666	16.802	-17.829
S15	27.611	16.509	-18.003
S16	27.557	16.688	-18.091
<b>Ortalama S/N</b>	27.235	16.833	-18.275

**İşlem basamağı 2:** Tablo 4’te verilen S/N oranlarından faydalanılarak her bir deney parametre seviyesi için ortalama S/N oranları hesaplanır. Taguchi metoduna göre Tablo 5’te verilen ortalama S/N oranlarından (\*) ile işaretlenmiş olan maksimum değerler ilgili parametre için optimum seviyeyi ifade eder.

**Tablo 5:** Parametre Seviyelerinin Ortalama S/N Oranları

Deney Parametresinin		Basınç Dayanımı	Eğilmede Çekme Dayanımı	Porozite
Adı	Seviyesi			
İnce Tufal	0	26.64	16.90	-18.45
	5	27.35	17.33*	-18.46
	10	27.37	16.46	-18.21
	15	27.58*	16.64	-17.99*
İri Tufal	0	27.32	16.68	-18.22
	5	27.57*	17.03	-18.04*
	10	27.09	16.58	-18.35
	15	26.95	17.04*	-18.49
S/Ç Oranı	0.50	27.74*	17.07*	-18.06*
	0.60	26.73	16.60	-18.49
Dozaj	400	26.83	16.64	-18.45
	500	27.64*	17.03*	-18.10*

**İşlem basamağı 3:** Tablo 4 ve Tablo 5'teki değerler yardımıyla Tablo 6'da verilen tam faktöriyel dizinin S/N oranları ve tahmini deney sonuçları hesaplanır.

**Tablo 6:** Tam Faktöriyel Dizini S/N Oranları ve Tahmini Deney Sonuçları

Seri No	İnce Tufal	İri Tufal	S/Ç	Dozaj	Basınç Dayanımı		Eğilmede Çekme		Porozite	
					S/N	Sonuç	S/N	Sonuç	S/N	Sonuç
1	0	0	0.5	400	26.83	21.96	16.78	6.90	-18.35	8.27
2	0	0	0.5	500	27.63	24.09	17.16	7.22	-18.00	7.94
3	0	0	0.6	400	25.81	19.53	16.31	6.54	-18.77	8.69
4	0	0	0.6	500	26.62	21.44	16.69	6.84	-18.42	8.34
5	0	5	0.5	400	27.08	22.60	17.13	7.19	-18.17	8.1
6	0	5	0.5	500	27.88	24.80	17.52	7.52	-17.82	7.78
7	0	5	0.6	400	26.06	20.11	16.66	6.81	-18.60	8.51
8	0	5	0.6	500	26.87	22.06	17.05	7.12	-18.25	8.18
9	0	10	0.5	400	26.59	21.37	16.68	6.83	-18.48	8.4
10	0	10	0.5	500	27.40	23.46	17.06	7.14	-18.13	8.07
11	0	10	0.6	400	25.58	19.02	16.21	6.47	-18.91	8.82
12	0	10	0.6	500	26.39	20.87	16.59	6.76	-18.56	8.47
13	0	15	0.5	400	26.46	21.04	17.14	7.20	-18.61	8.53
14	0	15	0.5	500	27.26	23.09	17.53	7.52	-18.26	8.19
15	0	15	0.6	400	25.44	18.72	16.67	6.82	-19.04	8.96
16	0	15	0.6	500	26.25	20.54	17.06	7.13	-18.69	8.61
17	5	0	0.5	400	27.53	23.82	17.22	7.26	-18.36	8.28
18	5	0	0.5	500	28.34	26.14	17.60	7.59	-18.01	7.96
19	5	0	0.6	400	26.52	21.19	16.75	6.88	-18.79	8.7
20	5	0	0.6	500	27.33	23.26	17.13	7.19	-18.44	8.36
21	5	5	0.5	400	27.79	24.52	17.57	7.57	-18.18	8.12
22	5	5	0.5	500	28.59	26.90	17.96	7.91	-17.83	7.80
23	5	5	0.6	400	26.77	21.81	17.10	7.17	-18.61	8.53
24	5	5	0.6	500	27.58	23.94	17.49	7.49	-18.26	8.19
25	5	10	0.5	400	27.30	23.19	17.12	7.18	-18.49	8.41
26	5	10	0.5	500	28.11	25.45	17.50	7.51	-18.14	8.08
27	5	10	0.6	400	26.29	20.63	16.65	6.80	-18.92	8.84
28	5	10	0.6	500	27.09	22.64	17.03	7.11	-18.57	8.49
29	5	15	0.5	400	27.16	22.83	17.58	7.57	-18.63	8.54
30	5	15	0.5	500	27.97	25.05	17.96	7.91	-18.28	8.21
31	5	15	0.6	400	26.15	20.31	17.11	7.17	-19.06	8.98
32	5	15	0.6	500	26.96	22.29	17.50	7.50	-18.71	8.62
33	10	0	0.5	400	27.56	23.89	16.34	6.57	-18.11	8.05
34	10	0	0.5	500	28.37	26.21	16.73	6.86	-17.76	7.73
35	10	0	0.6	400	26.54	21.25	15.87	6.22	-18.54	8.46

36	10	0	0.6	500	27.35	23.32	16.26	6.50	-18.19	8.12
37	10	5	0.5	400	27.81	24.59	16.70	6.84	-17.93	7.89
38	10	5	0.5	500	28.62	26.98	17.08	7.15	-17.58	7.58
39	10	5	0.6	400	26.79	21.88	16.23	6.48	-18.36	8.28
40	10	5	0.6	500	27.60	24.01	16.61	6.78	-18.01	7.96
41	10	10	0.5	400	27.33	23.26	16.24	6.49	-18.24	8.17
42	10	10	0.5	500	28.13	25.52	16.63	6.79	-17.89	7.85
43	10	10	0.6	400	26.31	20.69	15.77	6.15	-18.67	8.59
44	10	10	0.6	500	27.12	22.71	16.16	6.43	-18.32	8.25
45	10	15	0.5	400	27.19	22.89	16.709	6.85	-18.38	8.3
46	10	15	0.5	500	28.00	25.12	17.094	7.16	-18.03	7.97
47	10	15	0.6	400	26.17	20.37	16.241	6.49	-18.81	8.72
48	10	15	0.6	500	26.98	22.35	16.625	6.78	-18.46	8.38
49	15	0	0.5	400	27.77	24.48	16.53	6.71	-17.89	7.84
50	15	0	0.5	500	28.58	26.86	16.91	7.01	-17.54	7.53
51	15	0	0.6	400	26.76	21.78	16.06	6.35	-18.31	8.24
52	15	0	0.6	500	27.56	23.9	16.44	6.64	-17.96	7.92
53	15	5	0.5	400	28.02	25.19	16.88	6.99	-17.71	7.69
54	15	5	0.5	500	28.83	27.65	17.27	7.30	-17.36	7.38
55	15	5	0.6	400	27.01	22.42	16.41	6.62	-18.14	8.07
56	15	5	0.6	500	27.81	24.60	16.80	6.92	-17.79	7.76
57	15	10	0.5	400	27.54	23.83	16.43	6.63	-18.02	7.97
58	15	10	0.5	500	28.34	26.15	16.81	6.93	-17.67	7.65
59	15	10	0.6	400	26.52	21.20	15.96	6.28	-18.45	8.37
60	15	10	0.6	500	27.33	23.27	16.34	6.57	-18.10	8.04
61	15	15	0.5	400	27.40	23.46	16.89	6.99	-18.15	8.09
62	15	15	0.5	500	28.21	25.74	17.27	7.31	-17.80	7.77
63	15	15	0.6	400	26.39	20.87	16.42	6.63	-18.58	8.50
64	15	15	0.6	500	27.19	22.90	16.80	6.93	-18.23	8.16

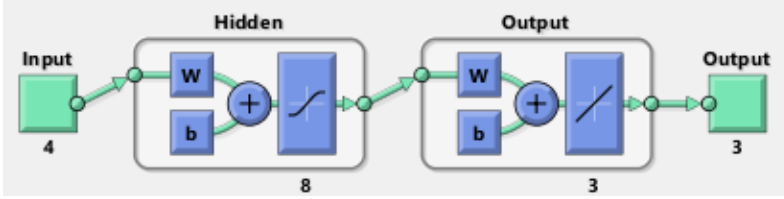
Ortogonal dizinde verilen gerçek deney sonuçları (Tablo 2) ile tam faktöriyel dizininde hesaplanan tahmini deney sonuçları (Tablo 6) kıyaslandığında yaklaşık %97 benzerlik olduğu görülmüştür.

**İşlem basamağı 4:** Bu aşamada Matlab ortamında hazırlanan YSA modelinin eğitimi yapılmıştır. Modelin eğitimi hem ortogonal hem de tam faktöriyel dizin verilerine göre ayrı ayrı yapılarak kıyaslanmıştır.

YSA modeli oluşturulurken, ağırlık çıktıları ile hedef değerler arasındaki hatayı minimize etmek amacıyla eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt seçilmiştir. Girdi ve çıktı katmanlarındaki nöron sayılarının belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (İnce tufal, İri tufal, S/Ç oranı ve Dozaj) ve deney sonuçları olan bağımlı değişkenlerin (Basınç



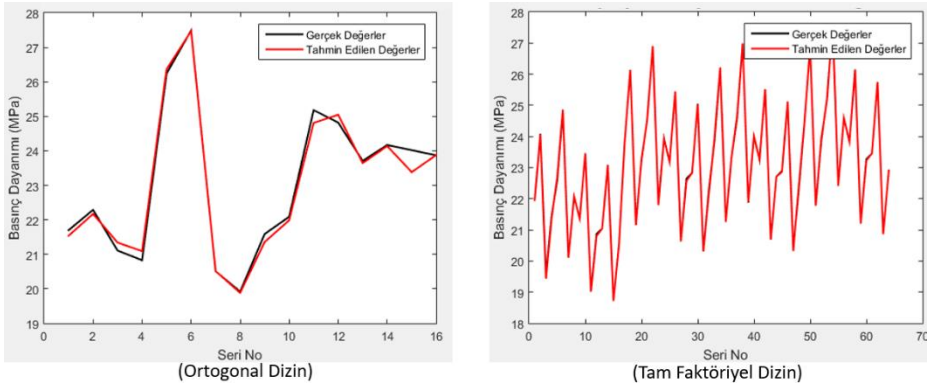
dayanımı, Eğilmede çekme dayanımı ve Porozite) sayıları esas alınmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı belirlenirken farklı sayılarda nöronlarla denemeler yapılarak en iyi tahmin değerinin elde edildiği nöron sayısı esas alınmıştır. Yapılan bu çalışmada kullanılan 4 nöronlu girdi katmanı, 3 nöronlu çıktı katmanı ve 8 nöronlu gizli katmandan oluşan YSA modeli Şekil 5'te verilmiştir.



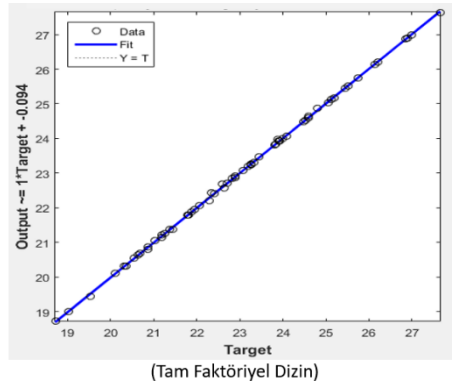
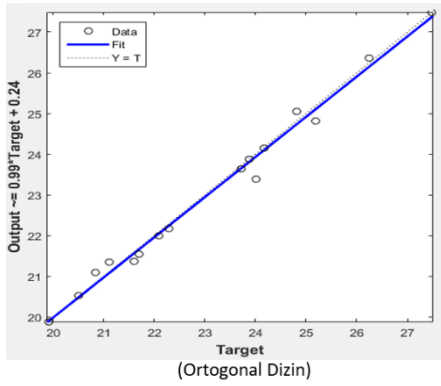
Şekil 5: Oluşturulan YSA modelinin yapısı

Oluşturulan modelde verilerin %70 i eğitim, %15 i doğrulama ve %15 i test için kullanılmıştır. Bu aşamada kullanılacak verilerin hangilerinin kullanılacağı özel olarak belirtilmemiş, model tarafından rastgele seçilmiştir.

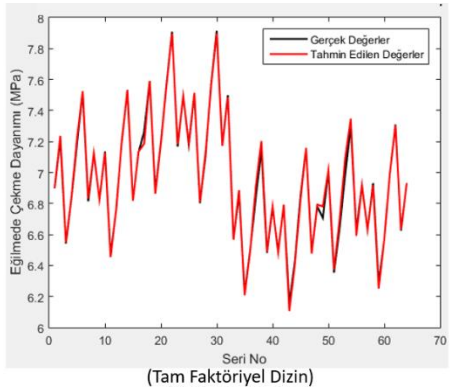
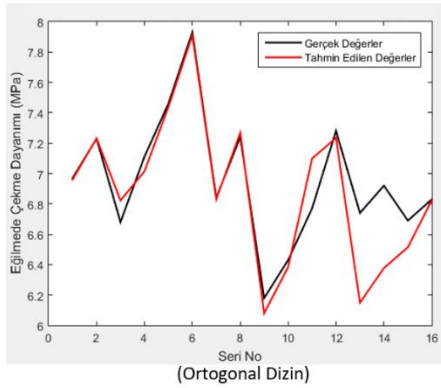
L16 ortogonal ve Tam faktöriyel dizin verileri esas alınarak eğitilen modelden elde edilen gerçek-tahmini değerler ile regresyon analizi sonuçlarına ait grafikler Şekil 6-11 de verilmiştir.



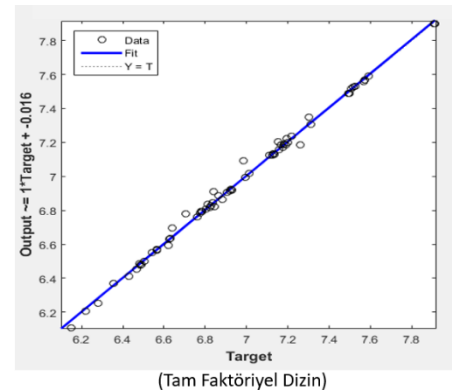
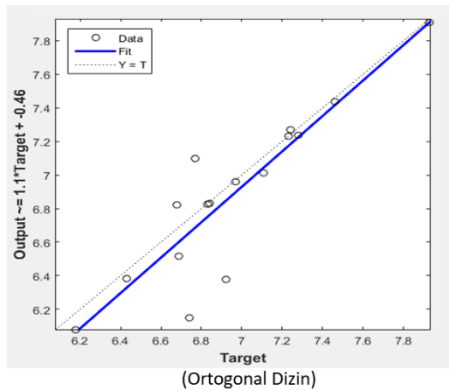
Şekil 6: Basınç Dayanımı gerçek ve tahmini değer sonuçları



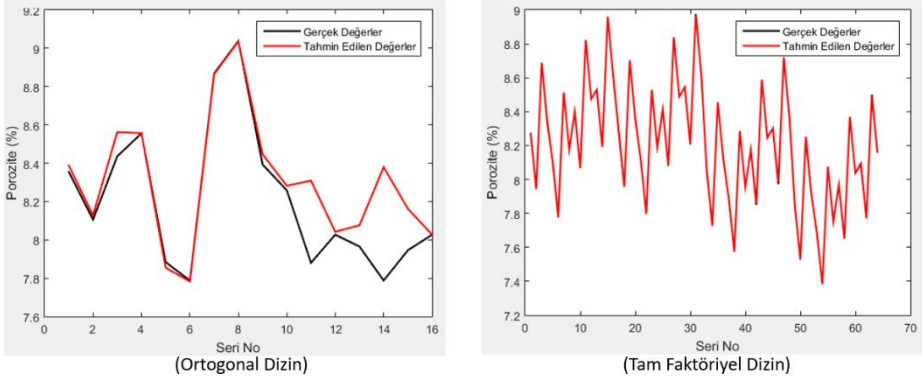
Şekil 7: Basınç Dayanımı regresyon analizi sonuçları



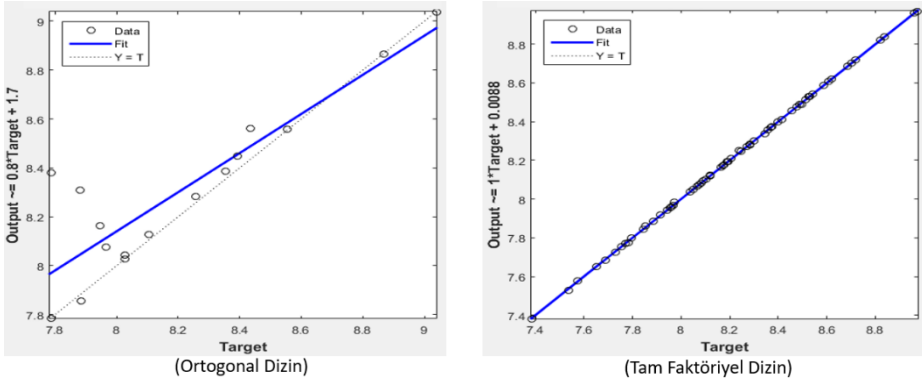
Şekil 8: Eğilmede Çekme Dayanımı gerçek ve tahmini değer sonuçları



Şekil 9: Eğilmede Çekme Dayanımı regresyon analizi sonuçları



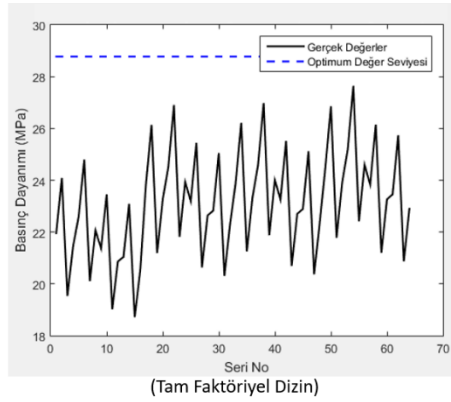
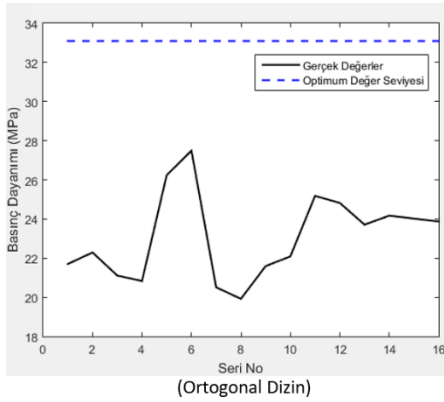
Şekil 10: Porozite oranı gerçek ve tahmini değer sonuçları



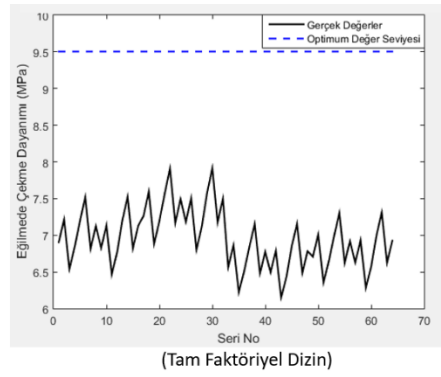
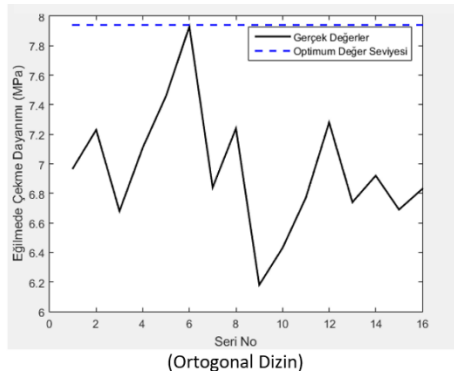
Şekil 11: Porozite oranı regresyon analizi sonuçları

YSA modelinin eğitimi sonrası elde edilen gerçek-tahmini değer sonuçları ile regresyon analizi grafikleri incelendiğinde tam faktöriyel verilerinin kullanılmasıyla daha güvenilir sonuçların elde edilebileceği görülmüştür.

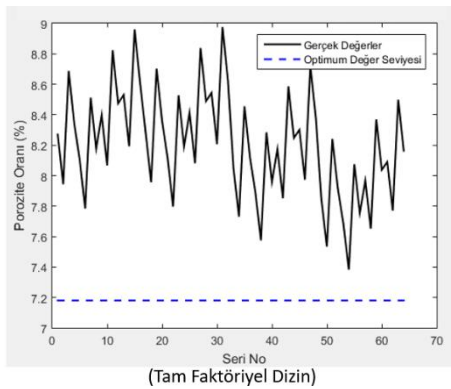
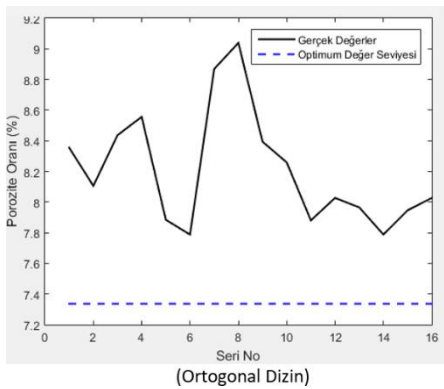
**İşlem basamağı 5:** YSA modelinin eğitimi sonrasında deney sonuçlarının optimum değerleri ve bu değerlerin elde edileceği parametre seviyelerinin belirlenmesi amacıyla optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon hem ortogonal hem de tam faktöriyel dizin verilerine göre ayrı ayrı yapılarak elde edilen sonuçlar Taguchi metodu sonuçları ile toplu olarak kıyaslanmıştır. YSA ile yapılan ortogonal ve tam faktöriyel dizin optimizasyon sonuçları Şekil 12-14'te gösterilmiştir. Ayrıca YSA ve Taguchi metodu ile bulunan optimum sonuçlar ve parametre seviyeleri Tablo 7'da toplu olarak verilmiştir.



**Şekil 12:** Basınç dayanımı gerçek ve optimum değer sonuçları



**Şekil 13:** Eğilmede çekme dayanımı gerçek ve optimum değer sonuçları



**Şekil 14:** Porozite oranı gerçek ve optimum değer sonuçları

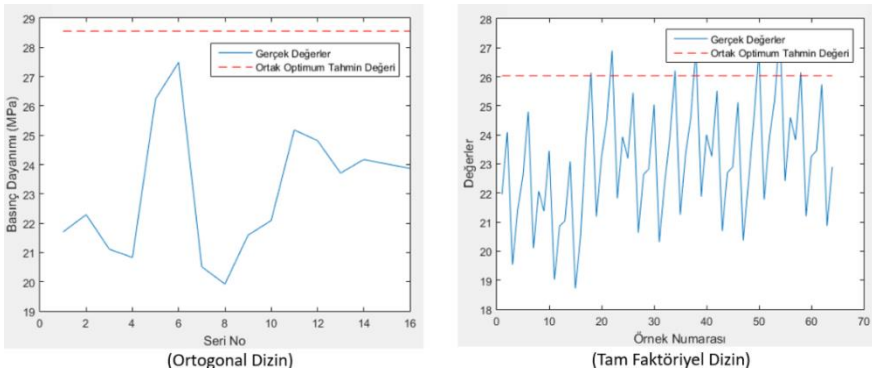
**Tablo 7:** Taguchi metodu ve YSA ile bulunan optimum sonuçlar

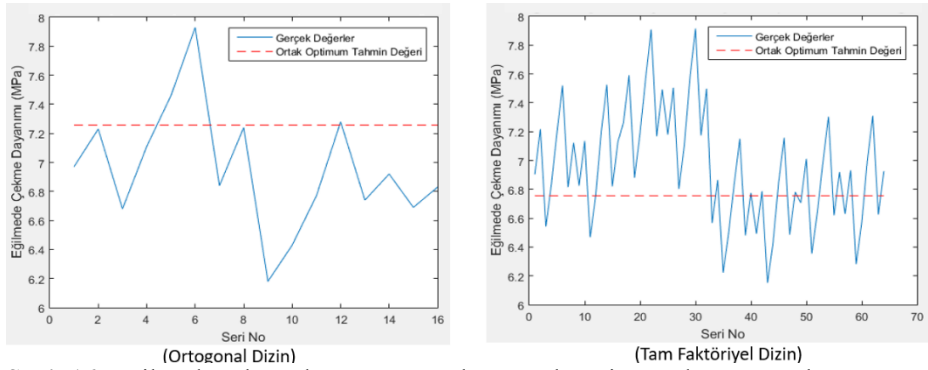
	Basınç Dayanımı	Eğilmede Çekme Dayanımı	Porozite Oranı
Taguchi Metodu	27.65 MPa	7.91 MPa	%7.38
	15-5-0.50-500	5-15-0.50-500	15-5-0.50-500
YSA ile Ortogonal Dizin	33.09 MPa	7.94 MPa	%7.34
	1.4-4.4-0.55-500	0-2.6-0.50-500	15-4.8-0.60-460
YSA ile Tam Faktöriyel Dizin	28.78 MPa	9.50 MPa	%7.18
	15-3-0.50-500	5.8-15-0.51-456	15-5.6-0.50-442

\* Tabloda her üç yöntem için ilk satır optimum deney sonuçlarını, ikinci satır ise deney parametrelerinin (İnce tufal-İri tufal-S/Ç ve Dozaj) seviyelerini içerir.

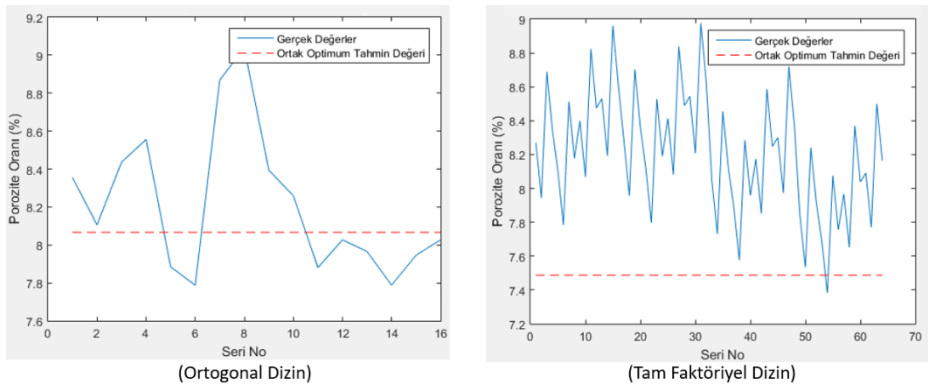
Optimum sonuçların verildiği Tablo 7 incelendiğinde, Taguchi metodu ve tam faktöriyel sonuçlarının birbirine yakın olduğu, ancak deneysel parametre seviyeleri bakımından ortogonal dizin sonuçları ile farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bu durum, YSA gibi sayısal yöntemlerde güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için fazla sayıda deneysel veriye ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

**İşlem basamağı 6:** Tam faktöriyel deney sonuçlarının hesaplanması işleminde son aşama olan bu basamakta beton numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve porozite değerleri bakımından en iyi performansı gösterebileceği ortak optimizasyon değerleri YSA ile hesaplanmıştır. Yapılan bu optimizasyon ile her üç deney için ortak optimum parametre seviyeleri ve bunlara karşılık gelen deney sonuçları belirlenmiştir. Ortogonal ve Tam faktöriyel dizin verilerine göre ayrı ayrı yapılan optimizasyon sonuçları Tablo 8’de verilirken, Şekil 15-17 de ise grafik olarak gösterilmiştir.

**Şekil 15:** Basınç dayanımı gerçek ve ortak optimum değer sonuçları



Şekil 16: Eğilmede çekme dayanımı gerçek ve ortak optimum değer sonuçları



Şekil 17: Porozite oranı gerçek ve ortak optimum değer sonuçları

Tablo 8: Ortak optimizasyon sonuçları

	Basınç Dayanımı	Eğilmede Çekme Dayanımı	Porozite Oranı
Ortogonal Dizin	28.55 MPa	7.26 MPa	%8.07
	İnce tufal: %5.47, İri tufal: %3.93, S/Ç Oranı: 0.55, Dozaj: 487 kg.		
Tam Faktöriyel Dizin	26.04 MPa	6.76 MPa	%7.49
	İnce tufal: %11.93, İri tufal: %7.87, S/Ç Oranı: 0.50, Dozaj: 466 kg.		

Ortogonal ve Tam faktöriyel dizin verilerinin esas alındığı ortak optimizasyon sonuçları Tablo 8'den incelendiğinde optimum parametre seviyeleri arasında büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Sonuçların değerlendirilebilmesi için Tablo 8'de verilen optimum parametre seviyeleri esas alınarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir.

**Tablo 9:** Optimizasyon ve doğrulama deney sonuçları

		Basınç Dayanımı (MPa)		Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)		Porozite Oranı (%)	
		Tahmin	Doğrulama Deneyi	Tahmin	Doğrulama Deneyi	Tahmin	Doğrulama Deneyi
Ortogonal Dizin	Sonuç	28.55	23.88	7.26	6.01	8.07	6.94
	Optimum parametre seviyeleri	İnce tufal: %5.47, İri tufal: %3.93, S/Ç Oranı: 0.55, Dozaj: 487 kg.					
Tam Faktöriyel Dizin	Sonuç	26.04	25.51	6.76	6.43	7.49	7.13
	Optimum parametre seviyeleri	İnce tufal: %11.93, İri tufal: %7.87, S/Ç Oranı: 0.50, Dozaj: 466 kg.					

## Sonuçlar

DeneySEL çalışmalarda yapılacak olan optimizasyon işlemlerinde Taguchi metodu ve YSA'nın birlikte kullanımının sağlayacağı avantajların incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Taguchi metodu ve YSA'nın birlikte kullanılabilirliği ve elde edilen optimizasyon sonuçlarının güvenilirliği Taguchi ortogonal dizin verilerinin güven aralığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ortogonal dizin verilerinin standart sapması ve güven aralığı değerlerinin hesaplanması gereklidir. Yapmış olduğumuz çalışmada, verilerin standart sapma değerleri beton numunelerin basınç dayanımı için 2.18, eğilmede çekme dayanımı için 0.42 ve porozite değerleri için 0.38 olarak bulunmuştur. Ayrıca, güven aralığı değerlerinin basınç dayanımı için 2.32, eğilmede çekme dayanımı için 0.45 ve porozite değeri için 0.49 olarak belirlenmiş olması verilerin güvenilirlik derecelerinin yüksek olduğunu göstermektedir.
- Taguchi metodu kullanılarak elde edilen tam faktöriyel dizin verilerinin YSA'da kullanılmadan önce ortogonal dizin verileri ile kıyaslanarak sonuçların doğrulanması gerekmektedir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada Ortogonal dizin verileri ile tam faktöriyel verilerinin kıyaslanması neticesinde gerçek sonuçlar ile tahmini sonuçların %97'nin üzerinde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

- Çalışmamız kapsamında oluşturulan YSA modelinin eğitimi sonucunda elde edilen gerçek ve tahmini değerler kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama neticesinde, ortogonal dizin sonuçlarında sapmaların olduğu gözlenmiştir. Yapılan regresyon analizi sonucunun ortalama 0.90, tam faktöriyel sonuçlarında ise bu değer ortalama 0.98 olduğu belirlenmiştir. Bu durum ortogonal dizindeki veri sayısının az (Her deney için 16 adet) olmasının sonucudur.
- Yapmış olduğumuz bu çalışmada, eğitim sonrası YSA ile yapılan optimizasyon sonuçları ile Taguchi metodundan her deney için ayrı ayrı elde edilen optimum sonuçlar ve parametre seviyeleri kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama neticesinde, Taguchi metodu ile tam faktöriyel YSA sonuçlarının uyumlu olduğu ancak ortogonal dizin YSA sonuçlarının uyumlu olmadığı belirlenmiştir.
- Numunelerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve porozite değerlerinin tamamı dikkate alınarak yapılan YSA ile optimizasyon işlemi neticesinde betonun her üç özelliğinin de iyi olacağı optimum parametre seviyeleri ve tahmini sonuçlar belirlenmiştir. Elde edilen tahmini sonuçların değerlendirilebilmesi amacıyla doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları ile tam faktöriyel YSA tahmin sonuçları %97'nin üzerinde benzerlik göstermiştir.

Yapmış olduğumuz çalışma neticesinde, YSA ile yapılacak optimizasyonlarda Taguchi tam faktöriyel dizin verileri kullanılarak güvenilir sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.



## KAYNAKÇA

- Abhilash, P. T., Satyanarayana, P. V. V., & Tharani, K. (2021). Prediction of compressive strength of roller compacted concrete using regression analysis and artificial neural networks. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00590-1>
- Ada, H., Çetinkaya, C., & Durgutlu, A. (2018). Taguchi Metoduyla Belirlenen Kaynak Parametrelerinin API 5L X65 Boru Birleştirmelerinde Radyografik ve Makrografik İncelemeleri. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.404001>
- Arıcı, E., & Keleştemur, O. (2019). Optimization of mortars containing steel scale using Taguchi based grey relational analysis method. *Construction and Building Materials*, 214, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.135>
- Babikir, A., & Mwambi, H. (2017). Factor Augmented Artificial Neural Network Model. *Neural Processing Letters*, 45(2), 507–521. <https://doi.org/10.1007/s11063-016-9538-6>
- Basheer, I. A., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: Fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43(1), 3–31. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00201-3)
- Behshad, A., Zardak, M. A., & Mohammadi, Y. (2021). Experimental Optimization of Using Natural Pozzolan in Chloride Ion Exposed Concrete via Taguchi Method. *Tehnicki Glasnik*, 15(1), 69–75. <https://doi.org/10.31803/tg-20200806135648>
- Chaulia, P. K., & Das, R. (2008). Process parameter optimization for fly ash brick by Taguchi method. *Materials Research*, 11(2), 159–164. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392008000200008>
- Furugi, A., & Yapici, F. (2021). Optimization of production parameters in oriented strand board (OsB) manufacturing by using taguchi method. *Drvna Industrija*, 72(4), 347–352. <https://doi.org/10.5552/drvind.2021.2033>
- Haglin, J. M., Jimenez, G., & Eltorai, A. E. M. (2019). Artificial neural networks in medicine. In *Health and Technology* (Vol. 9, Issue 1). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s12553-018-0244-4>

- Keleştemur, O., Yıldız, S., Gökçer, B., & Arici, E. (2014). Statistical analysis for freeze-thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber. *Materials and Design*, 60, 548–555.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.013>
- Li, K., Yan, S., Zhong, Y., Pan, W., & Zhao, G. (2019). Multi-objective optimization of the fiber-reinforced composite injection molding process using Taguchi method, RSM, and NSGA-II. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 91, 69–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.09.003>
- Liu, F., Ding, W., Qiao, Y., & Wang, L. (2020). An artificial neural network model on tensile behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete containing fly ash and slag power. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(6), 1299–1315.  
<https://doi.org/10.1007/s11709-020-0712-6>
- Mao, Y., & Yang, Y. (2022). Optimization of Magnetic Gear Patterns Based on Taguchi Method Combined with Genetic Algorithm. *Energies*, 15(14).  
<https://doi.org/10.3390/en15144963>
- Ryland, J. (2021). Modeling Axonal Plasticity in Artificial Neural Networks. *Neural Processing Letters*, 53(2), 1119–1146.  
<https://doi.org/10.1007/s11063-021-10433-w>
- Shafi, I., Ansari, S., Din, S., Jeon, G., & Paul, A. (2021). Artificial neural networks as clinical decision support systems. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(22).  
<https://doi.org/10.1002/cpe.6342>
- Solopchuk, O., & Zénon, A. (2021). Active sensing with artificial neural networks. *Neural Networks*, 143, 751–758.  
<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.08.007>
- Staub, S., Karaman, E., Kaya, S., Karapınar, H., & Güven, E. (2015). Artificial Neural Network and Agility. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1477–1485.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.448>
- Uslu, S., Yaman, H., & Yesilyurt, M. K. (2021). Optimization of Parameters Affecting the Performance and Emissions of a Spark Ignition Engine Fueled with n-Pentanol/Gasoline Blends Using Taguchi Method.

*Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 11711–11724.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-021-05675-8>

Załoski, D., Stolarski, M. J., & Krzyżaniak, M. (2022). Validation of the Taguchi method on the example of evaluation of willow biomass production factors under environmental stress. *Industrial Crops and Products*, 185.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115170>

Zhang, F., Wang, M., & Yang, M. (2021a). Successful application of the Taguchi method to simulated soil erosion experiments at the slope scale under various conditions. *Catena*, 196.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104835>

Zhang, F., Wang, M., & Yang, M. (2021b). Successful application of the Taguchi method to simulated soil erosion experiments at the slope scale under various conditions. *Catena*, 196.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104835>

Zhang, R., Wang, Z., Wu, T., Cai, Y., Tao, L., Xiao, Z. C., & Li, Y. (2024). Learning spiking neuronal networks with artificial neural networks: neural oscillations. *Journal of Mathematical Biology*, 88(6).  
<https://doi.org/10.1007/s00285-024-02081-0>

## BÖLÜM 6

# YÜKSEK SÜRATLI DENİZ TAŞITLARININ FORMLARI AÇISINDAN ANALİZİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Oğuzhan YILMAZ<sup>1</sup>

Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502898>

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı, Haydar Aliyev Bulvarı, No: 32, İzmir-Türkiye; oguzhan.yilmaz@ogr.deu.edu.tr; ORCID ID: 0009-0005-7219-0995.

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı, Haydar Aliyev Bulvarı, No: 32, İzmir-Türkiye; turgut.gursel@deu.edu.tr; ORCID ID: 0000-0002-9681-680X.



## GİRİŞ

Yüksek süratli deniz taşıtları (YSDT) pazarı dünya genelinde, rekreasyonel su sporları ve denizcilik faaliyetlerine yönelik artan tüketici talebi nedeniyle son dönemde istikrarlı bir büyüme göstermiştir. Artan gelir, su sporlarının artan popülaritesi ve deniz araçları ekipmanlarındaki teknolojik gelişmeler gibi faktörlerin tümü, YSDT pazarının büyümesine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, çevre dostu teknelere ve endüstride sürdürülebilirliğe karşı artan ilginin de bu büyümeyi hızlandırması beklenmektedir.

Günümüzde her sektörde olduğu gibi denizcilik sektöründe de sürdürülebilirlik kavramının çok önem kazandığı görülmektedir. Sürdürülebilirliğin çoğunlukla deniz araçlarının ana ve yardımcı makinalarının oluşturduğu emisyonlara dayalı olarak değerlendirildiği denizcilik sektöründe, deplasman başına motor gücü temel parametre olarak dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla bu kapsamda farklı taşıma kapasitelerine sahip ticari gemiler kadar, çevresel etkilerinin azaltılması için yüksek süratli gemilerin, hizmet teknelerinin ve sürat botlarının da sürdürülebilirlik alanında üzerinde mutlaka çalışılması gereken araç tipi olarak ön plana çıkması gerekmektedir.

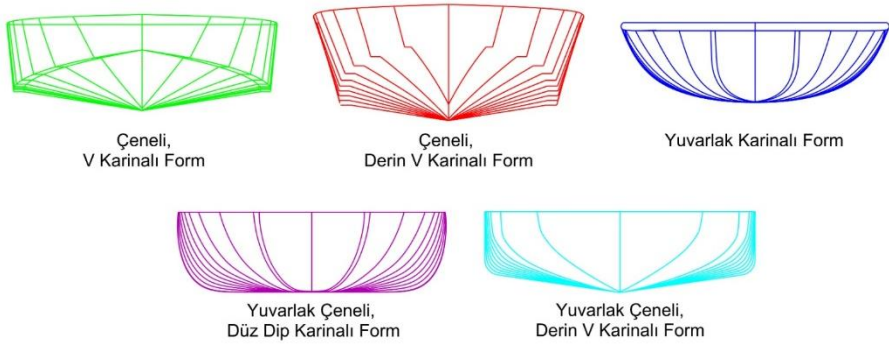
Görev tanımları gereği yüksek sürat gerektiren askeri gemiler, arama-kurtarma ve devriye botu gibi görev tekneleri ile gezi ve yüksek sürat teknesi tipindeki araçların sürdürülebilirliğinde, emisyonların azaltımı konusuna odaklanması önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu araştırmanın ilk bölümünde dünyadaki yüksek süratli deniz araçlarındaki, ikinci bölümünde ise Türkiye'deki yüksek süratli deniz taşıtlarındaki gelişmelere yer verilmiştir.

Büyük kısmı son yirmi yılda olmak üzere son yarım yüzyılda çok farklı enkesitlere sahip yüksek süratli deniz taşıtları tasarlanarak inşa edilmiştir. Bu araştırmayı sistematik bir çerçevede gerçekleştirebilmek için çalışmanın üçüncü bölümünde, “çeneli derin V karinalı tekne enkesiti, çeneli V karinalı enkesit, yuvarlak çeneli derin V karinalı enkesit, yuvarlak çeneli düz dip karinalı enkesit ve yuvarlak karinalı enkesit formları olacak biçimde tüm formları kapsayacak beş tip ana enkesit formu belirlenmiştir (Şekil 1). Araştırmanın amacı, 7m, 14m, 24m'lik üç farklı boya ve beş farklı enkesite sahip toplam on beş adet yüksek hız yapmaya elverişli tekne formu

tasarlamak, bu teknelerin hidrostatik ve hidrodinamik yönlerden analizlerini gerçekleştirmektir. Çalışmanın üçüncü bölümünde tüm analizler ve hesaplamalar bu beş temel enkesit üzerinde yoğunlaşarak ilerlemiştir. Bu formların arasında yer alan tasarlanmış enkesit formları için ilgili tablo veya analiz değerleri bulunduğu takdirde interpolasyon yapılması, aksi durumda değerlerin ortalamasının alınması önerilmektedir.

Yüksek hızlı gezinti teknesi pazarında yaygın olarak bulunan tekneler genel olarak 7m-24m arasında boylara sahiptir. Bu nedenle 7m-24m arasındaki yüksek hızlı teknelerin 30-50 kn arasında tekne karinası üzerinde oluşan hidrodinamik basınçları ISO (TS EN ISO 12215-5) standartlarına göre hesaplanmış ve ilgili değerler, bu teknelere ait bir araştırmadan alınan hesaplamalı akışkanlar dinamiği değerleri ile karşılaştırılarak ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

Bundan sonraki aşamada, hidrostatik ve hidrodinamik yönlerden en iyi özelliklere sahip denizci bir tekne tasarımı için kullanışlı bir algoritma oluşturmak hedeflenmektedir.



Şekil 1: Bu çalışmada tasarlanan yüksek süratli teknelerin enkesit formları

## 1. YÜKSEK SÜRATLİ DENİZ TAŞITLARINDAKİ GELİŞMELER

Yüksek süratli deniz taşıtları açısından önemli kaynak niteliğinde bulunan Jane's Fighting Ships (2010, 2022) ve Overman vd.'den (2002) yüksek süratli deniz taşıtı (YSDT) pazarına ilişkin elde edilen verileri

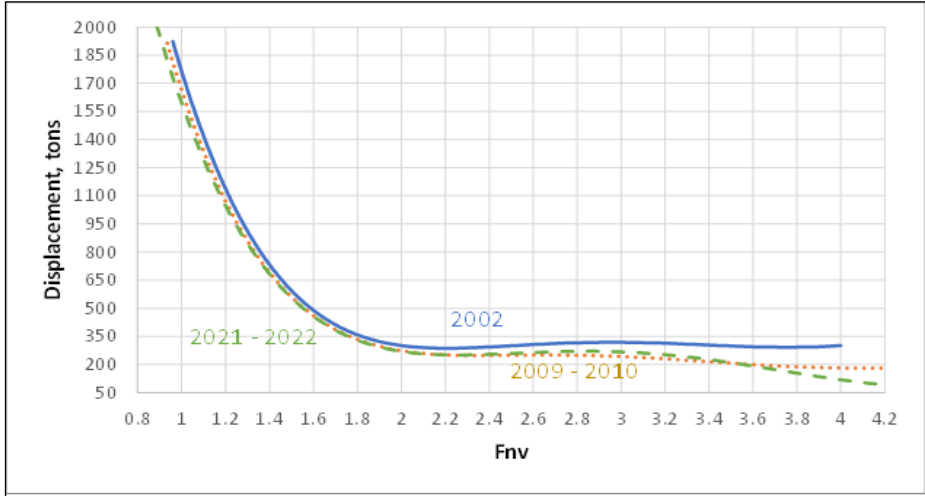
özetlemek ve bu üç kaynağı bir arada değerlendirmek gerekirse Overman'ın araçları temelinde 20 knot'u aşan hıza sahip tek gövdeli ve 100 ila 2000 ton tam deplasman yükü aralığının dikkate alınması uygun olacaktır.

Bu bağlamdaki veriler, korvet, küçük fırkateyn, devriye gemisi, özel tekne vb. gibi yüksek hızlı gemilerin boyutunu, gövde formunu ve performansını kapsamaktadır. Bu çalışmada ele alınan tek gövdeli gemiler, Tablo 1'de (Jane's Fighting Ships, 2010 ve 2022; Overman 2002) gösterildiği gibi Hacimsel Froude Sayısı ( $F_nV$ ) ile verilmektedir.

**Tablo 1:** Hacimsel Froude Sayısına ( $F_nV$ ) göre tek gövdeli gemiler

Tekne türü	$F_nV$	Dönemlere göre YSDT sayısı		
		2000-2001	2009-2010	2021-2022
Deplasman	1,4'ten küçük	218	397	614
Yarı deplasman	1,4 – 2,4 arasında	851	1926	2112
Kayıcı	2,4'ten büyük	134	494	444

Yaklaşık son çeyrek yüzyıl dikkate alındığında, kullanılan kaynaklara göre uygulanan kriterler dahilinde tek gövdeli gemilerin pazara tamamen hâkim olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 2).

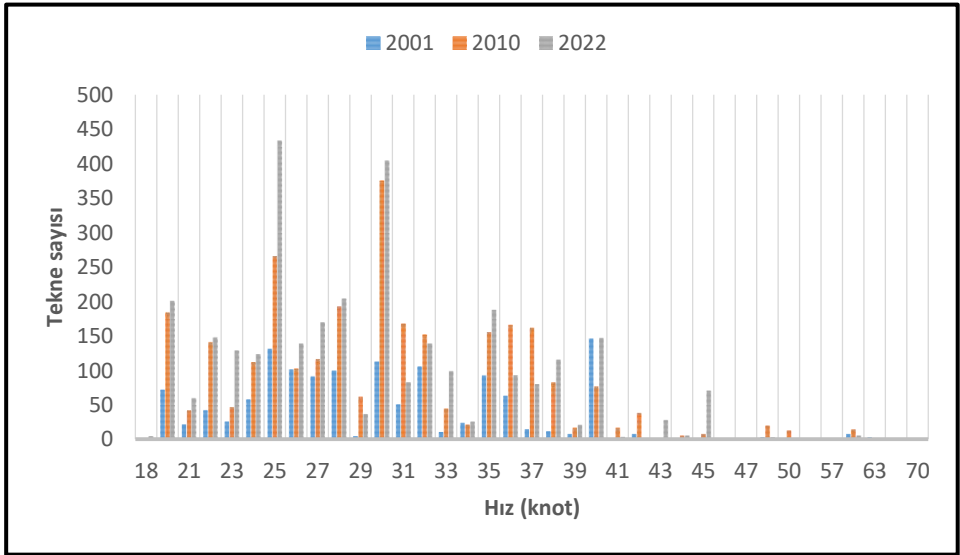


**Şekil 2:** Tek gövdeli YSDT'nın  $F_nV$ 'ye karşı tam yük deplasmanları



Ayrıca bu diyagramlardan, deplasman ile hacimsel Froude sayısı arasındaki ilişkinin 25 yılı aşkın süredir değişmediği sonucuna varılabilir (Şekil 2). Ayrıca son yıllarda,  $F_n V = 3,6$  üzerindeki teknelerin sayısında da etkili bir azalma dikkati çekmektedir. Bahsi geçen kaynaklar çoğunlukla tek gövdeli YSDT verilerini içermektedir. Bu veriler doğrultusunda katamaran ve trimaranı içeren YSDT'in toplam tekne sayısı içerisinde %2'lik pay ile ihmal edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3, tek gövdeli teknelerin 25-36 knot arasındaki hız aralığını göstermektedir. Hızı 40 knot'un üzerinde olan gemiler burada azınlıkta olup, hızı 40 knot ve üzerinde olan ACV'lerin (Air Cusion Vessel, Hava Yastıklı Tekneler), SES'lerin (Surface Effect Ship, Yüzey Etkin Tekneler) ve HF'lerin (Hydrofoil, Ayaklı Tekneler) çoğunluğu bu grupta sınıflandırılmaktadır (Overman d., 2002; Jane's Fighting Ships 2011 ve 2023).



Şekil 3: Tek gövdeli YSDT'lerin sayısı ve maksimum hızları

Yine Şekil 3 dikkate alındığında, 2010 yılında 2001 yılına göre  $20 < V < 38$  knot hıza sahip gemilerin ortalama 2,3 katı daha fazla geminin işletmeye alındığı sonucuna varılabilir. Hızı  $20 < V < 40$  knot arasında olan teknelere yönelik 2010 ile 2022 arasındaki eğilim önemli ölçüde korunmuştur. Birkaç özel proje dışında 40 knot'un üzerine çıkılmaması ve hafif malzeme

kullanılması, yüksek süratli tekne pazarında küresel bir ihtiyaç olan sürdürülebilirliğe yönelmenin bir sonucu olarak değerlendirilmelidir. YSDT'in maksimum uzunluğu öngörülebilir gelecekte yaklaşık 70 m ile sınırlı olacaktır.

Birçok sınıflandırma kuruluşu, YSDT inşası için kriterler oluşturmuştur ve bunların inşa ve işletmelerine ilişkin uluslararası standartları geliştirmek için birçok çalışma yürütülmektedir. Açıktır ki, bu çabaların sonucunda ve artan rekabet koşullarında YSDT'in en son versiyonlarının yüksek mühendislik gerektiren, teknik açıdan gelişmiş ve özelleşmiş gemiler olduğu görülmektedir.

Bir YSDT'in ağırlığı, inşaat aşamasında malzeme miktarını, işçiliği ve inşa süresini, işletme aşamasında yakıt tüketimini ve kullanım ömrünün son bulması durumunda çevresel etkileri doğrudan belirlediği için sürdürülebilirlik anlamında dikkate alınan en kritik faktörlerden biri olmalıdır (Neşer vd., 2024).

Form direncini azaltmak için, gövdenin hidrodinamik formunu iyileştirmenin yanı sıra ağırlığı ve ıslak yüzey alanını azaltmak da etkili bir yoldur. Sürdürülebilir mühendislik çözümleri alanında, son yıllarda enerji verimliliğini artırmaya ve dolayısıyla karbon emisyonlarını azaltmaya odaklanan araştırmaların sayısında kayda değer bir artış olmuştur (Gürsel vd., 2020). Bu sektörde rekabetçi kalabilmek isteyen firmaların yeni form tasarımlarının yanı sıra yeni malzemeler kullanması ve ağırlık optimizasyonuna yönelmesi kritik önem taşımaktadır. Üstün mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle kompozit malzemeler denizcilik endüstrisinde potansiyel olarak tercih edilen yapı malzemeleridir (Donetta vd., 2019; Stenius vd., 2011; Neşer vd., 2024).

Yaşam döngüsü çalışmaları, araçların kütesinin, yüksek süratli teknelerin hem yaşam döngüsü maliyetinde hem de çevresel etkisinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Burman vd., 2016). Bu bağlamda da Elyaf Takviyeli Polimer (ETP) kompozit malzemeler, denizcilik sektörünün hafiflik ve performans gereksinimlerini karşılayarak, ekonomik açıdan avantajlı bir seçenek haline gelmektedir. Deniz taşıtları endüstrisinde, özellikle boyu 50 metrenin altında olan araçlar için kompozit malzemeler %70'lik benzersiz bir

pazar payıyla hâkim durumdadır (Neşer, 2017). Kompozit malzemeler, korozyona ve malzeme degradasyonuna karşı direnç, karmaşık ve kesintisiz formlar oluşturma yeteneği ve yüksek mukavemet/ağırlık özellikleri dahil olmak üzere endüstriye özgü başka faydalar da sunar (Sutherland, 2018; Caramatescu vd., 2019). Tüm bu olumlu özelliklere karşın, özellikle ileri ETP'lerin maliyeti günümüzde hâlâ aşırı derecede yüksek olmayı sürdürmektedir (Han vd., 2020).

Bunun dışında denizcilik endüstrisinde ETP kompozit tekne üreten tersanelerin üretim verimliliğini ve kalitesini artırmak için teknolojik gelişmelere ve yönetim uygulamalarına odaklanan kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu gelişmeler arasında üstün mukavemeti ve malzeme verimliliği ile tanınan Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding, VARTM) yöntemi ön plana çıkmaktadır (Sunaryo vd., 2013).

Kompozit malzemelerden üretilen yüksek süratli deniz taşıtları, dalgaların neden olduğu sürekli darbelere de yorulma mukavemeti bağlamında dayanıklıdır. Dövünmenin neden olduğu darbe yükleri, araçların, özellikle de yüksek süratli kayan gövdelerin yapısal tasarımı, performansı ve güvenliği söz konusu olduğunda son derece önemlidir. Deneysel araştırmalar öncelikle düşme testlerine odaklanmışken, model veya tam ölçekli testlerden elde edilen veriler yetersizdir ve ağırlık azaltılmasının etkisi ihmal edilmektedir (Volpi vd., 2020). Bir teknenin yapısal ağırlığının azaltılması, sakin su koşullarındaki performansını artırdığı gibi dövünmede de darbe yüklerini azaltabilecektir (Neşer vd., 2024).

Yüksek süratli deniz araçlarının tasarımlarını ve dolayısıyla boyutlarını belirleyen çok sayıda kural ve düzenleme bulunmakla birlikte, 1960'lı ve 1970'li yıllarda kayıcı teknelere ilişkin oluşturulan temel ilkeler, hâlâ herhangi bir kurala dayalı tasarım kriterinin temelini oluşturmaktadır (Begovic, 2012). Bu anlamda, yükleme koşulları altında gövde boyunca basıncı ve düşey ivmeyi değerlendirmek için yapılan düzenlemeler tamamen istatistiksel verilere dayanmaktadır (Caramatescu ve Iulian, 2019). Bu anlamda kompozit malzemeler, temel nitelikleri gereği düşük sertlikleri nedeniyle dezavantajlı olabilir ve birçok uygulama için çoğu zaman

takviyelerin eklenmesini gerektirir. Bu durum, bu yapıların çeşitli yüklere dayanabilmelerini sağlarken optimum maliyet ve ağırlık dengesini sağlayacak şekilde tasarlanmasında karmaşık bir mühendislik ikilemini ortaya çıkarmaktadır (Sobey vd., 2013).

YSST'de alternatif yakıtların ve elektrik motorlarının yaygın kullanımını yakın zaman içinde beklenmediğinden, teknenin hafifletilmesi, teknenin yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğini artırmanın bir yolu olarak öne çıkmaktadır. Her ne kadar yüksek hızlı deniz taşıtları günümüzde alüminyum ve polimer bazlı kompozitler gibi hafif malzemeler kullanılarak inşa ediliyor olsa da, bu malzemelerin kullanım yaklaşımları ve çeşitliliği geliştirilerek daha da hafif yapılara ulaşmak mümkündür (Neşer vd., 2024).

Kompozit gövdeler, hız ve verimlilik için gerekli olan boyuna mukavemetleri nedeniyle boyu 50 metrenin altındaki gemilerde inşa edilmektedir. Yapı, donanım ve makinelerden tasarruf edilen ağırlık, öncelikle yük ve yakıt için ek performans veya ilave yük ya da daha az yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonu anlamına gelir.

Bu çalışmada, özellikle elyaf takviyeli polimer malzemeden imal edilmiş YSST'ler, üçüncü bölümde ifade edilen boyut aralıklarında gerek hidromekanik gerekse yapısal mekanik açıdan irdelenerek tasarımcıların mümkün mertebe hafif ve böylelikle daha sürdürülebilir yapılara ulaşmasına yardımcı olacak örnekler geliştirilmiştir.

## **2. TÜRKİYE'DE GEMİ VE GEZİNTİ TEKNESİ İNŞAATI VE İHRACATINDAKİ GELİŞMELER**

Son yıllarda Türkiye, inşa edilmiş gemi, fakat özellikle yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat ihracatında önemli bir ivme kazanmıştır. Özellikle 2020 sonrası dönemde, yurt dışındaki talebin artmasıyla birlikte Türk yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat üreticileri, yüksek kalite ve yenilikçi tasarımlarla dikkat çekmiştir. 2021 ve 2022 yıllarında, Türkiye'nin bu tip tekne ve yat ihracatı, önceki yıllara göre önemli bir artış göstermiştir. 2023 itibarıyla, Türkiye, dünya genelinde gemi inşaatında önde gelen ülkeler arasında yer almakta olup, Akdeniz ve Karadeniz bölgelerinde ise önemli bir pazar payına sahip durumdadır. İhracatta ise en fazla talep, Avrupa ve Kuzey Amerika

pazarlarından gelmektedir. Bu durum, Türk gemi inşa sanayiinin uluslararası rekabet gücünü artırmakta ve sektördeki yatırımları teşvik etmektedir.

Türkiye hem yelkenli hem de motorlu tekneler için önemli bir inşa merkezi haline gelmiştir. 2022’de inşa edilen teknelerin yaklaşık %40’ı yelkenli, %60’ı motorlu teknelerdir. Özellikle, lüks yat segmentinde Türkiye, dünya genelinde önemli bir inşa üssü haline gelmiş, bu tip teknelerin özellikle 15 metre ve üzerindeki boylara sahip teknelerin ihracatında belirgin bir artış sağlanmıştır.

2023 yılında Türkiye, yaklaşık 4.500-5.000 gemi, yelkenli ve motorlu yat ve yüksek hızlı bot ihraç etmiştir. Bu sayı, bir önceki yıla göre %15-20 oranında bir artış göstermiştir. İhracatın toplam değeri, 400 milyon USD seviyelerinde gerçekleşirken, bu toplamda lüks yatların ve motorlu teknelerin önemli bir payı bulunmaktadır.

İtalya, Fransa ve Almanya gibi ülkeler, Türkiye’de inşa edilen lüks yatların ve motorlu teknelerin en fazla ihraç edildiği ülkeler olurken, İtalya, özellikle lüks yat segmentinde en büyük pazar konumunu korumuştur. ABD pazarı, Türk yat üreticileri için yeni fırsatlar sunmuş ve 2023 yılında yapılan ihracat, önceki yıllara göre %30 oranında artmıştır. Çin ve Japonya gibi pazarlar, Türk tekne üreticileri için yeni fırsatlar oluşturmaya başlamış ve özellikle elektrikli ve hibrit teknelere olan talep artış göstermiştir.

Son yıllarda çevre dostu tasarımlara olan ilgi artmış, 2023’te elektrikli ve hibrit tekneler, ihracatın %10’unu oluşturmuştur. ABD, Kanada ve AB ülkelerinde belirli sürelerin sonunda şehir içi ve kıyısındaki göl, deniz ve kanallarda deniz ulaşımı tamamen elektrikli araçlarla gerçekleştirileceği için, 2025 ve sonrasında, elektrikli teknelere olan talebin artması beklenmektedir. Ayrıca, lüks yat segmentindeki büyümenin de devam etmesi öngörülmektedir.

Sonuç olarak 2023 yılı, Türk gemi ve gezinti teknesi ihracatı açısından olumlu bir yıl olmuş, pazar çeşitliliği, yenilikçi ürünler ve rekabetçi fiyatlar, Türk teknelerinin uluslararası pazarda öne çıkmasını sağlamıştır. (Deniz Ticaret Odası, Sektör Raporu, 2023), (T.C Ticaret Bakanlığı, Gemi Yat Sektörü Raporu, 2022)

## 2.1 Denizcilik Sektöründe İş Gücü ve İstihdam

Türkiye’de gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşaatı, ülkenin denizcilik sektörünün önemli bir parçasıdır ve bu sektör, istihdam ve iş gücü açısından dikkate değer bir etki yaratmaktadır. İş gücü ve istihdam üzerindeki etkilerini yıllara göre incelemek, sektördeki değişimleri ve gelişmeleri anlamak açısından önem taşımaktadır.

### i. 2010-2015 Dönemi

- Bu dönemde Türkiye, yat inşa segmentinde önemli bir büyüme gerçekleştirmiştir. Yurt dışından gelen talepler, sektörde yeni yatırımların artmasını sağlamıştır.

- Gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşaatı için doğrudan ve dolaylı olarak istihdam edilen kişi sayısı yaklaşık 20.000 civarındadır. Bu durum, sektördeki büyümenin yanı sıra yan sanayinin de gelişmesine katkıda bulunmuştur.

### ii. 2016-2019 Dönemi

- 2016’da yaşanan siyasi ve ekonomik dalgalanmalar, sektörde bir duraklamanın oluşmasına neden olmuştur. Fakat bu dönem içinde, yenilikçi tasarımlar ve çevre dostu üretim yöntemleri ön plana çıkmaya başlamıştır.

- İstihdam edilen sayısı, genel durgunluk nedeniyle belirli bir azalma göstererek, 2019 yılı itibarıyla 15.000-18.000 arasına gerilemiştir. Bununla birlikte, özellikle elektrikli ve hibrit tekne üretimi için yeni iş alanları ortaya çıkmıştır.

### iii. 2020-2022 Dönemi

- Küresel COVID-19 salgını, sektördeki tedarik zincirlerini olumsuz olarak etkilemiş, fakat, salgın sonrası artan deniz turizmi ve özellikle yat talebi, sektöre yeni bir ivme kazandırmıştır.

- Bunun sonucunda, 2021 ve 2022 yıllarında, özellikle lüks yat ve çok amaçlı gezinti teknesi inşaatında belirgin bir artış gerçekleşerek, istihdam edilenlerin sayısı yeniden 20.000 civarına yükselmiştir.

#### iv. 2023-2024 Yılı

- 2023 yılı, Türkiye'nin lüks yat ve çok amaçlı gezinti teknesi inşaatında önemli bir büyüme yılı olmuş ve ayrıca elektrikli ve hibrit teknelere olan ilgi ise, tekne inşa süreçlerini çeşitlendirmiştir.

- Gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşaatında istihdam edilen kişi sayısı 25.000'e yaklaşmıştır. Kuşkusuz, yan sanayi ve destekleyici sektörlerle birlikte bu sayı daha da artmış durumdadır.

Gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşa sektörü yüksek vasıflı iş gücüne ihtiyaç duyan bir sektördür. Mühendislik, tasarım ve üretim alanlarında nitelikli personel ihtiyacı sürekli artmaktadır. Sektörün büyümesi, denizcilik ve mühendislik alanlarında eğitim programlarına olan talebi artırmış durumdadır. Teknik okullar ve üniversitelerin denizcilik bölümleri, sektöre nitelikli iş gücü sağlamaya devam etmektedir. Ayrıca denizcilik sektörü, metal işleme, elektronik, tesisat, iç dekorasyon ve mobilya gibi diğer birçok yan sanayi dalı ile etkileşim halindedir. Bu durum da genel istihdamı etkili oranda artıran bir faktördür.

Sonuç olarak bu sektör, Türkiye'de yıllar içinde değişen ekonomik koşullara rağmen istihdamı artıran önemli bir endüstri kolu olmuştur. Gelecek yıllarda çevre dostu üretim ve yeni teknolojilere olan talebin, sektördeki istihdamı daha da artırması beklenmektedir (Deniz Ticaret Odası, Sektör Raporu, 2023).

#### 2.2 Denizcilik Sektöründe Yatırım ve İnovasyon Potansiyeli

Türkiye hem yerel hem de uluslararası pazarlar için önemli bir gemi ve özellikle yüksek hızlı gezinti teknesi ile yat inşa ülkesi haline geldiğinden, Türkiye'de denizcilik sektörüne yönelik yatırım ve inovasyon çalışmaları, beklendiği gibi sektörün büyümesinde kritik bir öneme sahiptir. Lüks yatlarla olan talep, üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik yatırımları da doğrudan teşvik etmiştir. Ayrıca, deniz turizminin gelişmesiyle birlikte, yat ve gezinti teknelerine olan talebin artması, yatırımcıları da bu sektöre yönlendirmiştir. Özellikle son yıllarda, yerli yatırımcıların yanı sıra yabancı sermaye de Türkiye'deki yüksek hızlı gezinti teknesi ile yat inşaatına yönelmeye başlamıştır. Bu durum, sektördeki rekabeti artırmış, yatırımcılar, modern üretim tesisleri kurarak, kapasite artırma ve teknolojik yenilikleri uygulama fırsatı yakalamışlardır. Türkiye'de çeşitli kurumlar, denizcilik sektörüne yönelik olarak, Ar-Ge faaliyetlerini ve teknolojik yatırımları teşvik eden

çeşitli teşvik ve destek programları sunmaktadır. Ayrıca Türk hükümeti, denizcilik sektörünü desteklemek amacıyla, özellikle Ar-Ge projelerine ve ihracata yönelik destekler ve teşvikler aracılığıyla sektörün büyümesine katkı sağlamaktadır.

Gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşaatında kullanılan bilgisayar yazılımları ve 3B yazıcılar, tasarım ve üretim süreçlerini optimize ederek, maliyetleri düşürmekte ve verimliliği artırmaktadır. Yeni malzeme teknolojileri, hafif ve dayanıklı konstrüksiyonların üretimine olanak tanımaktadır.

İnovasyon çalışmaları, çevre dostu ve sürdürülebilir üretim yöntemlerine yönelmeye öncelik vermektedir. Elektrikli ve hibrit tekneler, bu dönemin en önemli ürünleri arasında yer almıştır. Enerji verimliliği yüksek teknelerin geliştirilmesi hem çevresel kaygıları azaltmakta hem de tüketici taleplerine cevap vermektedir.

Denizcilik sektörünün üniversiteler ve araştırma kurumları ile iş birliği yapması, yenilikçi projelerin geliştirilmesine katkı sağlamakta, yeni teknolojilerin ve tasarımların ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır. Gemi, yüksek hızlı gezinti teknesi ve yat inşaatçıları fonksiyonel ve estetik tasarımlar geliştirmek için sürekli olarak Ar-Ge yatırımlarını artırmaktadır.

Dijitalleşme, üretim süreçlerinin yanı sıra pazarlama ve satış alanlarında da etkisini göstermektedir. Online satış kanalları ve dijital pazarlama stratejileri, yeni müşteri kitlelerine ulaşmayı sağlamaktadır. Bunların dışında Türkiye, uluslararası denizcilik fuarlarına ev sahipliği yaparak, yerli üreticilerin uluslararası pazarlarda daha görünür olmasına yardımcı olmaktadır. Bu fuarlar, yeni iş bağlantıları kurulmasını ve pazar trendlerinin takip edilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye’de denizcilik sektörü, yatırım ve inovasyon açısından sürekli bir gelişim içindedir. Artan yerli ve yabancı talepler, sektördeki rekabeti arttırmakta; teknolojik yenilikler ve sürdürülebilir üretim yöntemleri, Türk gemi ve gezinti teknesi inşaatçılarının uluslararası pazarda daha fazla yer edinmesine katkıda bulunmaktadır. Gelecek yıllarda, bu alandaki yatırımların ve inovasyon çalışmalarının daha da artması beklenmektedir (Deniz Ticaret Odası, Sektör Raporu, 2023).



### 3. ISO 12215-5:2019 GÖRE YÜKSEK SÜRATLI DENİZ TAŞITI BOYUTLANDIRMASI

Büyük kısmı son yirmi yılda olmak üzere son yarım yüzyılda çok farklı enkesitlere sahip yüksek süratli deniz taşıtları (YSDT) tasarlanarak inşa edilmiştir. Bu araştırmayı sistematik bir çerçevede gerçekleştirebilmek için “çeneli derin V karinalı tekne enkesit formundan başlayarak, yuvarlak çeneli düz dip karinalı ve çenesiz yuvarlak karinalı” tüm formları kapsayacak şekilde beş tip ana enkesit formu belirlenmiştir (Şekil 1):

- i. Çeneli derin V karinalı enkesit formu
- ii. Çeneli V karinalı enkesit formu
- iii. Yuvarlak çeneli derin V karinalı enkesit formu
- iv. Yuvarlak çeneli düz dip karinalı enkesit formu
- v. Yuvarlak karinalı enkesit formu

Çalışmada gerçekleştirilen tüm analizler ve hesaplamalar bu beş temel enkesit üzerinde yoğunlaşarak ilerlemiştir. Bu formların arasında yer alan tasarlanmış enkesit formları için ilgili tablo değerleri bulunduğu taktirde interpolasyon yapılması, aksi durumda değerlerin ortalamasının alınması önerilmektedir.

Araştırmanın bu bölümünde, ISO 12215-5:2019 kurallarının incelenmesi tamamlandıktan sonra yukarıda ifade edilen beş farklı enkesite sahip ve üç farklı boyda ( $L=7-14-24$  m) olacak şekilde 15 teknenin tasarımı yapılarak endazeleri tamamlanmıştır (Şekil 1). İzleyen aşamada ISO kurallarına göre tasarlanan 15 teknenin sırayla  $V=30, 40$  ve  $50$  kn hızları için hesapları yapılarak teknelerin tüm karinası boyunca oluşan P dinamik basınç değerleri hesaplanmış ve elde edilen değerler için basınç-hız (P-V) diyagramları hazırlanmıştır. ISO kurallarına göre  $L=24$  m'den daha uzun tekne tasarlanamadığı ve yine aynı kurallar kapsamında yaklaşık  $25$  kn hızın altında “kayıcı mod” kullanılmadan “deplasman modu” uygulanarak dinamik basınç hesaplandığından yukarıdaki hız sınırlamalarına başvurulmuştur.

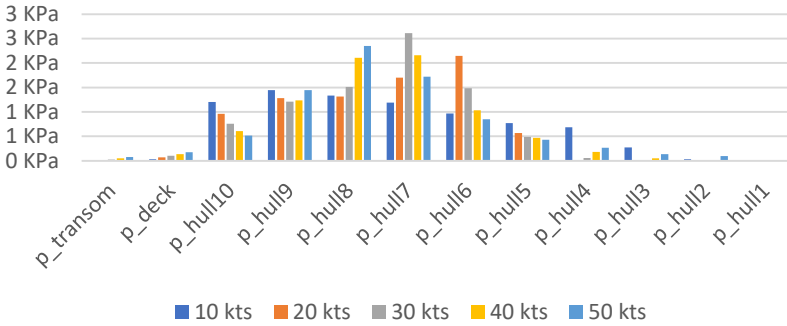
#### 3.1 Tekne Boyunca Basınç Dağılımlarının ISO ve HAD ile Belirlenmesi

Neşer vd. (2024) tarafından hazırlanan çalışmada beş temel enkesit formuna sahip tekne formları için ayrıntılı HAD analizleri yapılmış ve bu

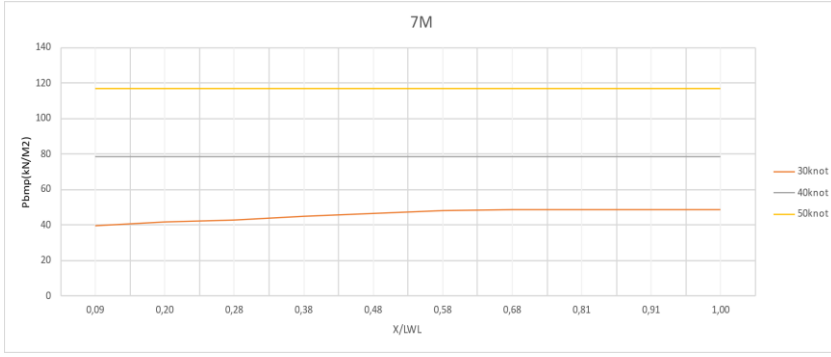
analizlerde Simerics yazılımı kullanılmıştır. Simerics, serbest yüzey etkilerini gözlemek için VOF (Volume of Fluid) çözücüne sahip RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations) tabanlı bir yazılımdır ve uygulanacak analiz yöntemi ilgili araştırma kapsamında çeşitli deneysel veri setleriyle doğrulanmıştır.

Doğrulama çalışmasının ilki için Fridsma (1969) tarafından yapılan sistematik bir çalışma referans olarak kullanılmıştır. Seriden tek bir gövde seçilmiş ve altı farklı hız ile HAD simülasyonları yapılmıştır. Analizler, tipik bir kayma teknesi davranışını kanıtlarken deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bunun dışında ilgili çalışma kapsamında, Begovic ve Bertorello'nun (2012) geliştirdikleri ve farklı sintine kalkım açılarının hidrodinamik direnç ve denizcilik özellikleri üzerine etkilerini incelemek için kullanılan “warped” modellerden olan Mono ve Warp-3 formlarının HAD analizleri de yapılmış ve deneysel verilerle tamamen uyumlu HAD sonuçları elde edilmiştir.

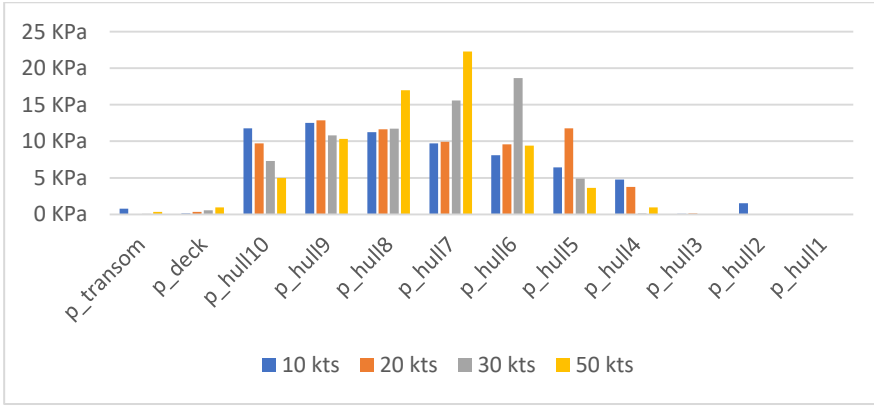
ISO 12215-5:2019 kuralları aracılığıyla “çeneli derin V karinalı enkesite sahip ve çeneli V karinalı enkesit forma sahip yüksek hızlı sürat tekneleri için elde edilen basınç dağılımları ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi sonuçları Şekil 4-15’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



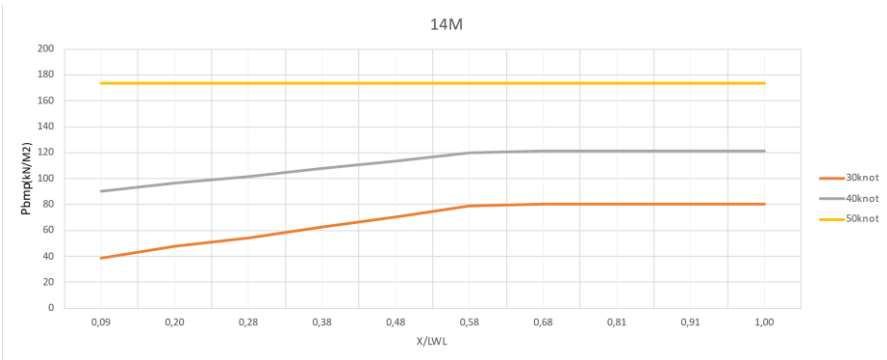
Şekil 4: L=7 m’lik çeneli derin V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



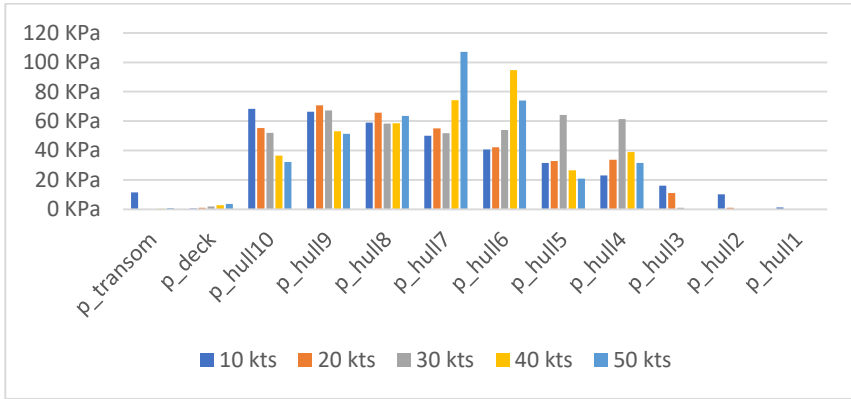
Şekil 5: ISO'ya göre L=7 m'lik çeneli derin V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı



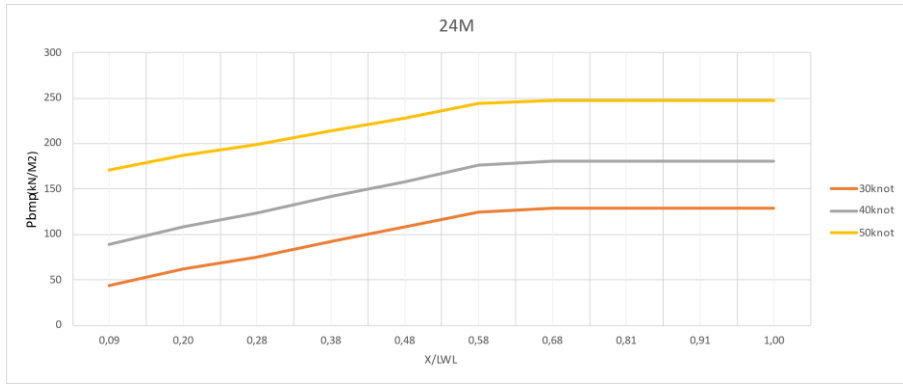
Şekil 6: L=14 m'lik çeneli derin V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



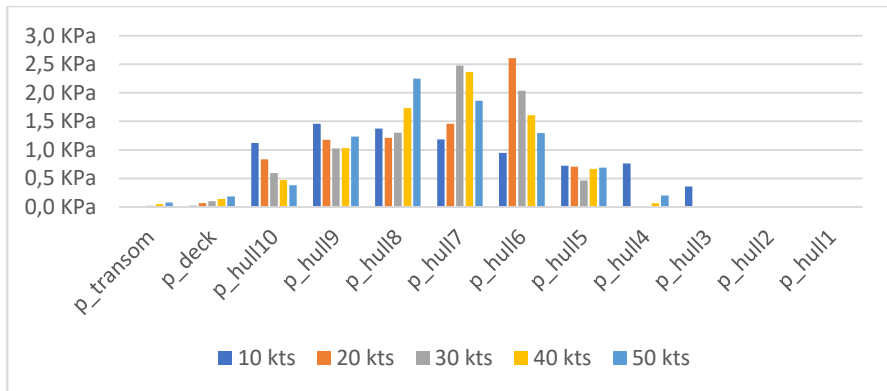
Şekil 7: ISO'ya göre L=14 m'lik çeneli derin V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı



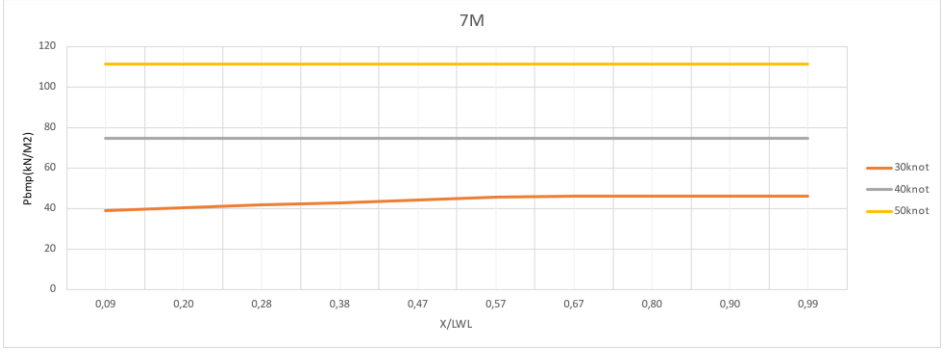
Şekil 8: L=24 m’lik çeneli derin V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



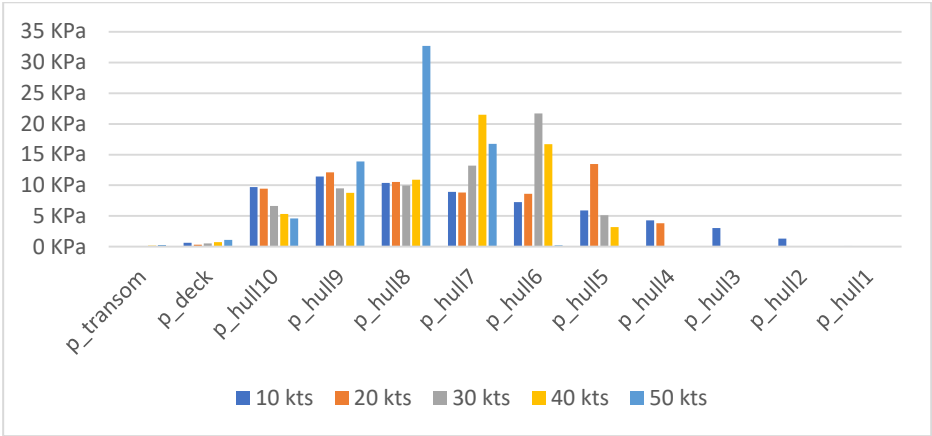
Şekil 9: ISO’ya göre L=24 m’lik çeneli derin V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı



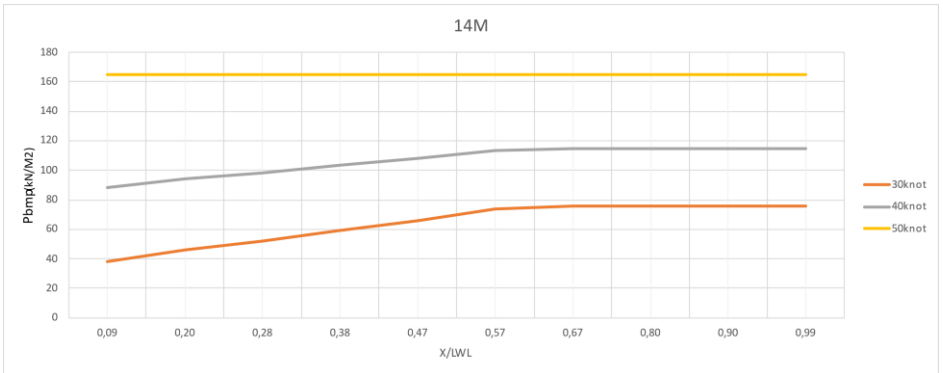
Şekil 10: L=7 m’lik çeneli V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



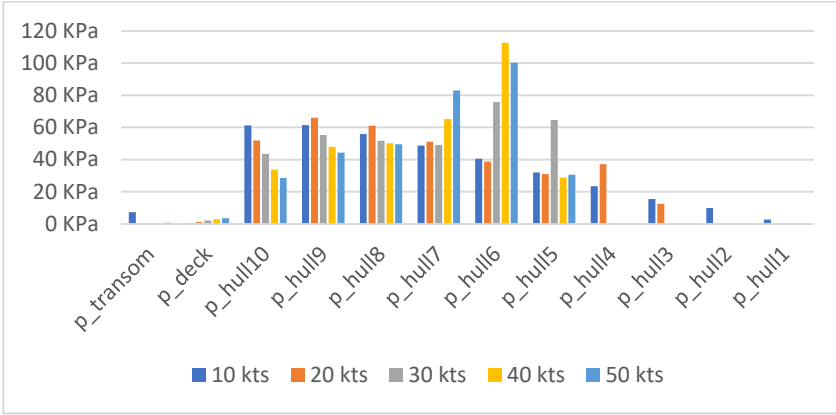
Şekil 11: ISO'ya göre L=7 m'lik çeneli V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı



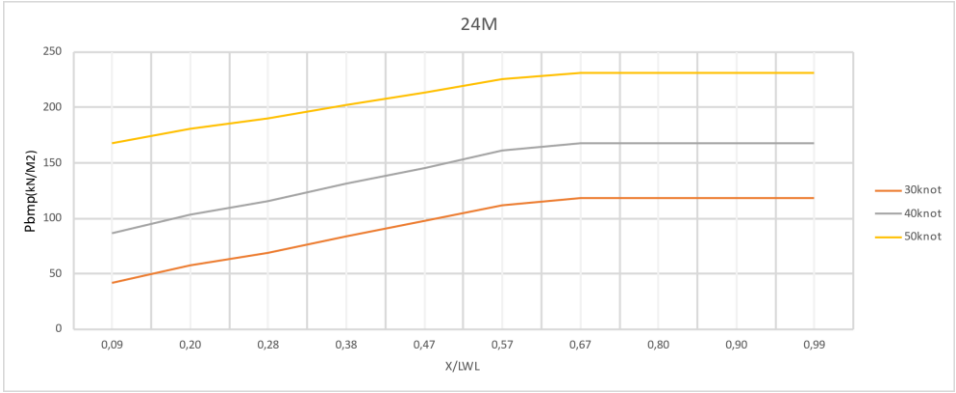
Şekil 12: L=14 m'lik çeneli V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



Şekil 13. ISO'ya göre L=14 m'lik çeneli V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı



Şekil 14: L=24 m'lik çeneli V karinalı tekne boyunca HAD analizi (Neşer vd., 2024)



Şekil 15: ISO'ya göre L=24 m'lik çeneli V karinalı tekne formu boyunca basınç dağılımı

Çeneli derin V karinalı enkesite sahip ve çeneli V karinalı enkesit forma sahip yüksek hızlı gezinti teknelerinde, tekne boylarına göre büyük farklılıklar gösteren basınç dağılımları söz konusudur ve ISO kurallarına göre gerçekleşen basınç dağılımı, HAD analizi basınç dağılımı ile uyumlu değildir.

L= 7 m boya sahip teknelerden elde edilen HAD analizi sonuçları, ISO kurallarından elde edilen sonuçlara göre oldukça düşük kalırken, L= 24 m boya sahip teknelerde artık sonuçlar teknenin kıçından mastorisine kadar birbirleri ile uyum göstermeye başlamakta, mertebe olarak yaklaşmakla birlikte hâlâ yüksekliğini korumaktadır. Fakat HAD analiz sonuçları teknenin

başına doğru azalma gösterirken ISO kurallarından elde edilen sonuçlar ise sabit kalmaktadır.

Yuvarlak çeneli derin V karinalı enkesit forma, yuvarlak çeneli düz dip karinalı enkesit forma ve yuvarlak karinalı enkesit forma sahip yüksek hızlı gezinti teknelerinin karina boyunca basınç dağılımlarında da tamamen benzer değerler saptandığından ilgili diyagramlara yer verilmemiştir.

## SONUÇ

ISO kurallarına göre yapılan hesaplarda  $L=7\text{m}$ 'lik farklı enkesitlere sahip tüm teknelerde tüm hızlarda,  $L=14\text{ m}$ 'lik farklı enkesitlere sahip teknelerde  $V=50\text{ kn}$ 'lık hızda basınç değerleri tekne kıçından başına kadar sabit kalmaktadır. Bunun dışındaki tüm tekne ve hızlarında basınç değerleri tekne kıçından mastoriye kadar artarak devam etmekte, daha sonra başa kadar sabit kalmaktadır.

ISO kurallarına göre  $L=24\text{ m}$  boyunda ve  $V=30\text{ kn}$  hızda saptanan basınç değerleri ile doğrulanmış HAD analizleri sonucu bulunan değerler genel olarak uyum içinde olmakla birlikte diğer boy ve hızlarda belirlenen ISO dinamik basınç değerleri çok yüksektir.

Dolayısıyla bu koşullar altında kullanılan profil ve sac cidarlarında kontrollü azaltmaya gitmek mümkündür. Bu azaltma malzeme ve işçilik maliyetlerini düşüreceğinden toplam maliyeti düşüreceği gibi, temel amaç olan teknelerin hafifletilmesi hedefine ulaşmayı da sağlayacaktır. Bunun sonucunda daha düşük güce sahip bir ana makine ile aynı hız elde edilebileceğinden yakıt tüketimi ile birlikte işletme maliyetleri düşerken, sürdürülebilirliğin temel koşullarından olan atmosfere egzoz gazı salınımı da etkili oranda azaltmak mümkün olacaktır.

## KAYNAKÇA

- Begovic, E., Bertorello, C. (2012). Resistance assessment of warped hullform. *Ocean Engineering*, 56, 28–42.
- Burman, M., Kuttenukeuler, J., Stenius, I., Garne, K., & Rosén, A. (2016). Comparative Life Cycle Assessment of the hull of a high-speed craft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(2), 378–387.
- Caramatescu, A., & Iulian Mocanu, C. (2019). Experimental and numerical evaluation of wave impact stress on a composite boat hull. *Materials Today: Proceedings*, 12, 440–445, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319305061>.
- Caramatescu, A., Mocanu, C. I. ve Modiga, A. (2019). A New Concept of Composite Material for High Speed Boats. *Materiale Plastice*, 56(1), 11–17.
- Deniz Ticaret Odası 2023 Sektör Raporu, (<https://www.dto.org.tr/>)
- Donetta, B., Sercombe, T. ve Abbott (2019). A Preliminary Assessment into the Use of Composites in Large High-Speed Vessels.
- Fridsma, G. (1969). A Systematic Study of The Rough-Water Performance of Planing Boats. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center.
- Gürsel, K. T., Taner, M., Ünsalan, D., Neşer, G. ve Altunsaray, E. (2020). Improving resistance properties of high-speed ships. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIII(2), 8–18.
- Han, Z., Choi, J., Hwang, I., Kim, J. ve Oh, D. (2020). Basic Design of High-Speed Riverine Craft Made of Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(4), 241–253,
- ISO 12215-5:2019(en). 2019. Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination.
- Janes Fighting Ships Yearbook, 2009-2010 Edition, Coulsdon, Surrey : IHS Jane's
- Janes Fighting Ships Yearbook, 2009-2010 Edition, Coulsdon, Surrey : IHS Jane's



- Neşer, G. (2017). *Polymer Based Composites in Marine Use: History and Future Trends*. 1877 7058, 194, 19–24.
- Neşer, G., Gürsel, K.T., Altunsaray, E., Sözen, A., Taner, M. (2024). *Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeden Üretilen Yüksek Hızlı Gemilerin Yapısal Elemanlarının Boyutlandırılması İçin Kuramsal Yaklaşım ve Yazılım Projesi, Sonuç Raporu, Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İzmir.*
- Overman, J. P., Cohen, S. H., Hoggard, M. M., Guilfoyle, J., McKesson, C. B., Oakes, M. C., Scott, R. J. (2002). *Patrol Craft Requirements and Technology Predictions Through 2020 (Vol. 114): American Society of Naval Engineers.*
- Sobey, A. J., Blake, J. ve Sheno, R. A. (2013). *Optimisation of composite boat hulls using first principles and design rules. Ocean Engineering, 65, 62–70.*
- Stenius, I., Rosén, A. ve Kutteneuler, J. (2011). *On structural design of energy efficient small high-speed craft. Marine Structures, 24(1), 43–59.*
- Sunaryo, Putra, G. L., Lestari, S. M. (2013). *Thickness and Fiber Content Optimization in VARTM Method for High Speed Craft. Advanced Materials Research, 789, 412–416.*
- Sutherland, L. S. (2018). *A review of impact testing on marine composite materials: Part I – Marine impacts on marine composites. Composite Structures, 188, 197–208.*
- T.C. Ticaret Bakanlığı, *Gemi Yat Sektörü Raporu, 2022.*
- Volpi, S., Sadat-Hosseini, H., Diez, M., Kim, D.-H., Stern, F., Thodal, R. S. ve Grenestedt, J. L. (2020). *Validation of high fidelity CFD/FE FSI for full-scale high-speed planing hull with composite bottom panels slamming ( No. 978-84-943928-3-2). CIMNE.*

## BÖLÜM 7

# OSMANLI YAPILARINDA TAŞ İŞÇİLİĞİ: SANAT, TEKNOLOJİ VE USTALIK

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ<sup>1</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14502917>

---

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, İncehisar, Afyonkarahisar, Türkiye, avkorkmaz@aku.edu.tr. ORCID ID



## GİRİŞ

Osmanlı mimarisi, büyük bir mühendislik başarısı ve estetik anlayışının birleştiği bir sanat formu olarak, dönemin en ileri düzeydeki yapısal ve sanatsal başarılarını sergilemektedir. Bu mimarinin temel taşlarından biri, kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve bu malzemelerin yerel kaynaklardan temin edilerek ustaca işlenmesidir. Özellikle doğal taşlar, Osmanlı yapılarının hem sağlamlık hem de görsellik açısından eşsiz bir seviyeye ulaşmasında belirleyici bir rol oynamıştır. Mermerin zarif dokusu, bazaltın dayanıklılığı, kalker taşının işlenebilirliği, travertenin estetik özellikleri ve granit ile moloz taşlarının sağlam yapısı, Osmanlı camilerinden saraylara, köprülerden su kemerlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan taş türleri olmuştur. Her bir taş türünün sahip olduğu özellikler, hem yapısal olarak gerekli dayanıklılığı sağlamış hem de dönemin estetik anlayışını yansıtan zarif detaylarla yapılar süslenmiştir. Bu taşların özellikleri, yapının fonksiyonel ihtiyaçlarına uygun şekilde seçilmiş ve uygulamaları, Osmanlı taş işçiliğinin ne denli ileri olduğunu gözler önüne sermiştir. Osmanlı İmparatorluğu'nun tarihi boyunca, taşlar sadece yapıların inşasında değil, aynı zamanda kültürel mirasın korunmasında da önemli bir araç olmuştur. Bu kitap bölümünde, Osmanlı mimarisinde taş kullanımı, taşların işlenmesindeki ustalık, yerel taş yataklarının önemi ve her bir yapıda nasıl birer sanat eseri haline geldikleri araştırılmış, aynı zamanda Osmanlı'nın taşla kurduğu derin kültürel ve mühendislik bağları daha yakından incelenmiştir.

### 1. ANADOLU MİMARİ KÜLTÜRÜNDE TAŞIN ÖNEMİ

Anadolu, binlerce yıllık tarih boyunca pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış, farklı mimari tarzların geliştiği ve şekillendiği bir coğrafyadır. Bu zengin kültürel miras içinde taş, mimarinin vazgeçilmez unsurlarından biri olmuştur. Doğal taşlar hem estetik özellikleri hem de dayanıklılıklarıyla Anadolu'daki yapılarda merkezi bir rol oynamıştır (Çakır vd., 2023).

Taşın Anadolu mimarisindeki önemi, coğrafyanın doğal kaynaklarıyla doğrudan ilişkilidir. Bölgede bulunan kalker, bazalt, mermer ve tüf gibi taş türleri, yapısal özellikleri sayesinde çeşitli mimari eserlerde kullanılmıştır (Demirkol, 2021). Özellikle Kapadokya bölgesindeki tüf kayalar, kolay

işlenebilir olmaları nedeniyle hem barınma hem de ibadet amaçlı mekanların inşasında kullanılmıştır (Korkmaz, 2019). Antik dönemde Efes ve Bergama gibi şehirlerde mermer, görkemli tapınaklar, sütunlar ve anıtların inşasında tercih edilmiştir. Bu eserler, taşın zarafetiyle dayanıklılığının bir araya geldiği mükemmel örneklerdir (Taşlıgil & Şahin, 2016).

Taş mimarisinin bir diğer önemli yönü de Anadolu'da inşa edilen kaleler, surlar ve köprüler gibi savunma ve ulaşım yapılarında görülmektedir. Örneğin, Diyarbakır surları, bazalt taşından yapılmış olup, binlerce yıl boyunca sağlamlığını korumuştur. Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde taş, cami, medrese, kervansaray ve hamam gibi yapılarda sanatsal bir ifade aracı olarak kullanılmıştır. Özellikle taş işçiliği, bu dönemlerde mimari süslemelerde önemli bir rol oynamış ve estetik bir zenginlik katmıştır (Demirkol, 2021).

Anadolu'da taşın mimarideki önemi sadece fiziksel değil, aynı zamanda kültürel bir anlam da taşımaktadır. Geleneksel taş evler, toplumsal ve ekonomik yapıyı yansıtırken, aynı zamanda yerel malzemelerin sürdürülebilir bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Günümüzde, taş yapılar hem tarihi hem de turistik değer taşımakta, modern mimaride de doğal malzeme kullanımına ilham kaynağı olmaktadır (Algan, 2009).

Sonuç olarak, taş, Anadolu'nun mimari kültüründe hem işlevsel hem de estetik bir öneme sahiptir. Tarihin her döneminde, yerel coğrafyanın sunduğu bu doğal malzeme, Anadolu'nun kültürel kimliğini şekillendiren en önemli unsurlardan biri olmuştur.

### **1.1 Doğal taşın Osmanlı mimarisindeki önemi ve işlevselliği.**

Osmanlı mimarisi, işlevselliği estetikle birleştiren, sağlamlık ve zarafeti aynı potada eriten bir üslup olarak dikkat çekmektedir. Bu mimari üslupta doğal taşların kullanımı hem yapıların dayanıklılığını artırmış hem de görkemli bir görünüm kazandırmıştır. Doğal taş, Osmanlı döneminde malzeme seçiminde öncelikli bir yere sahip olmuş, özellikle anıtsal yapılarda ve kamu binalarında yaygın olarak kullanılmıştır (Erbaş, 2018).

Doğal taşların Osmanlı mimarisinde tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, taşın dayanıklılığıdır. Osmanlı İmparatorluğu geniş bir

coğrafyaya yayıldığı için her bölgenin yerel taş rezervlerinden faydalanılmıştır. Bu yaklaşım hem ekonomik hem de pratik bir çözüm sunmuştur. Ayrıca taş, iklim koşullarına karşı dirençli olması ve uzun ömürlü yapılar inşa etmeye olanak tanınması nedeniyle tercih edilmiştir. Özellikle ibadethaneler, köprüler, saraylar ve kervansaraylar gibi önemli yapıların uzun süre ayakta kalabilmesi için taş kullanımı kaçınılmaz olmuştur (Tel, 2021).

Osmanlı mimarisinde kullanılan doğal taş türleri arasında mermer, kalker, bazalt, granodiyorit ve andezit öne çıkmaktadır. Mermer, genellikle cami, türbe ve saray gibi anıtsal yapıların süslemelerinde ve sütunlarında tercih edilmiştir. Özellikle Marmara Adası'ndan çıkarılan beyaz mermer, Süleymaniye ve Sultanahmet camilerinin zarif detaylarında yer almıştır. Kalker, dayanıklı ve kolay işlenebilir olduğu için duvarlarda ve zemin kaplamalarında sıkça kullanılmıştır. İstanbul'daki su kemerleri ve çeşitli hanlar bu taşın güzel örnekleridir. Bazalt, sert ve dayanıklı yapısıyla Diyarbakır Surları gibi savunma yapılarında kullanılmıştır. Ayrıca andezit, Ankara ve çevresindeki yapılarda yaygın şekilde tercih edilmiştir (Söyler, 2019; Çakıroğlu & Büyüksarı, 2024).

Doğal taşlar, Osmanlı mimarisinde estetik bir araç olarak da dikkat çekmektedir. Taş işçiliği, özellikle Selçuklu etkisinin sürdüğü erken Osmanlı döneminden başlayarak gelişmiş, taşın üzerindeki ince oymalar ve geometrik desenlerle süslemeler mimaride sanatsal bir boyut kazandırmıştır. Caminin mihrap ve minber detaylarından kervansarayların cephesine kadar pek çok yerde bu taş işçiliğinin izleri görülmektedir (Düz, 2019).



Resim 1. İnce Minareli Medrese (Türkiye kültür portalı, 2024)

## 1.2 Doğal Taşın Osmanlı Mimarisi ve Yapı Teknolojilerindeki Yeri

Taş, doğal yapısı, dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü sayesinde insanlık tarihinin başından beri yaşamın ayrılmaz bir parçası olmuştur ve yakın zamana kadar barınma ihtiyaçlarını karşılayan en önemli malzemelerden biri olarak kalmıştır. Binlerce yıl boyunca doğal afetler ya da insan müdahalesi olmadığı sürece ayakta kalabilen taş yapılar, medeniyetlerin gelecek nesillere aktarılmasında ve insanlık tarihinin anlaşılmasında kritik bir rol oynamıştır. Bu nedenle, geçmişten günümüze adlarını ölümsüzleştirmek isteyen mimarlar ve heykeltıraşlar genellikle eserlerini doğal taşlarla inşa etmeyi tercih etmişlerdir. Doğal taş, 1800'lere kadar büyük ölçüde masif ve yapısal bir eleman olarak kullanılmış, ancak sanayi devriminin etkisiyle bu özelliğini kaybedip daha çok kaplama malzemesi haline gelmiştir. Son yıllarda, çevre bilincinin artması ve doğaya dönüş hareketiyle birlikte, sağlıklı, ekolojik, ısı yalıtımı sağlayan ve estetik özellikleri öne çıkan doğal taşlar yeniden ilgi görsede hala modern mimaride hak ettiği yeri tam anlamıyla bulamamıştır (Kar vd., 2004; Angı, 2015; Natura, 2024)

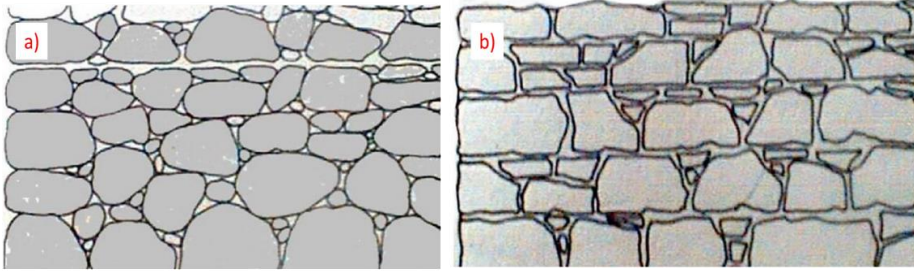
Doğal taş, Osmanlı mimarisinde hem strüktürel hem de estetik bir unsur olarak vazgeçilmez bir yere sahip olmuştur. Osmanlı dönemi yapılarında kullanılan taşlar, dönemin teknolojik imkanları ve malzeme bilgisiyle şekillenirken, aynı zamanda mimaride birer sanat eseri haline dönüşmüştür. Mermer, kalker, bazalt ve andezit gibi yerel taş türleri, yapıların

dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü sağlamak amacıyla tercih edilmiştir (Çakır vd., 2023). Mermer, özellikle camilerdeki sütunlar, mihraplar ve avizeler gibi detaylarda zarafetiyle öne çıkarken, kalker ve bazalt daha çok surlar, su kemerleri ve köprülerde yapısal dayanıklılık sergilemiştir (Vardar, 2014; Khooshroo vd., 2017). Osmanlı taş işçiliği, Selçuklu etkilerinden beslenerek gelişmiş ve geometrik desenlerle süslenmiş taş işleme sanatına dönüşmüştür. Süleymaniye, Sultanahmet gibi anıtsal yapılar, taşın hem görsel hem de mühendislik açısından ne kadar üstün bir malzeme olduğunu gözler önüne sermiştir. Ayrıca taşın yerel olarak temin edilmesi, yapıların maliyetini azaltmış ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemiştir. Osmanlı mimarisi, taşın estetik ve fonksiyonel özelliklerini en verimli şekilde kullanarak dönemin mimari anlayışını geleceğe taşıyan bir miras bırakmıştır (Natura, 2024).

### 1.3. Osmanlı Mimarisinde Kullanılan Doğal Taşlar ve Özellikleri

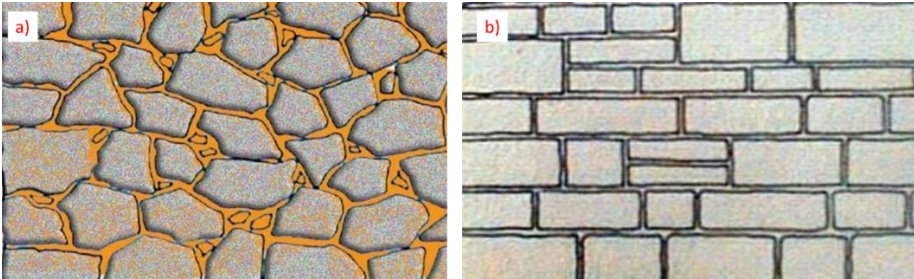
Taş, insanlığın en ilkel dönemlerinden beri güven ve kuvvetin sembolü olmuş hem Anadolu'da hem de dünyanın farklı bölgelerinde eski medeniyetlerin kültürel mirasını sonraki kuşaklara aktaran temel bir kaynak işlevi görmüştür. Anadolu insanı, her dönem taşın özelliklerinin farkında olup, bu bilgi ve tecrübeleri gelenek haline getirerek, o bölgeye özgü en uygun çözümleri üretmiştir. Bu üretim, dönemin estetik anlayışıyla birleşerek zenginleşmiş, yapı taşı veya yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılarak kentsel estetiğin ve kimliğin oluşmasında büyük katkı sağlamıştır. Zamanla taş, tarihin izlerini günümüze taşıyan başlıca kaynak haline gelmiştir. Anadolu'daki taş kullanımı, aynı zamanda kültürler arası etkileşimlerin izlerini de barındırmaktadır. Nüfus hareketleri ve etnografik verilerin analizi, taş işleme kültürünün Anadolu'nun çok katmanlı ve çok kültürlü yapısıyla bütünleşerek toplumsal ilişkilerin dinamiklerini yansıttığını ortaya koymaktadır. Selçuklu döneminde ise taş hem beden duvarlarında hem de tonozlarda farklı tekniklerle uygulanmış; moloz taş, kaba yonu ve kesme taş olmak üzere üç temel biçimde kullanılmıştır (Natura, 2024).





**Resim 2.** kaba yontu taş duvar (a) harçlı moloz taş duvar (b) (Taşevinşaatı, 2024)

Kaba yontu taş duvar, moloz taşların çekiçle mozaik, kare veya dikdörtgen biçiminde şekillendirilmesiyle inşa edilmektedir. Genellikle sıvasız bırakılan cephelerde, çevre duvarlarında ve istinat duvarlarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Yapı işlerinde harçlı moloz taş duvar ise temel, bodrum kat, normal kat duvarları ile çevre duvarlarında ve istinat duvarlarının yapımında tercih edilen bir tekniktir.



**Resim 3.** ince yontu taş duvar (a) kesme blok taş duvar (b) (Taşevinşaatı, 2024).

İnce yontu taş duvar, genellikle sıvasız taş duvarlar ve kemer yapılarında tercih edilmektedir. Bu duvarlar, moloz taşların daha özenli bir şekilde düzeltilmesiyle oluşturulmakta; özellikle duvarın görünen yüzeyindeki taşlar, dişli kalem kullanılarak hassasiyetle işlenmektedir. İşçilik ve maliyet açısından yüksek olmasına rağmen, estetik açıdan sağladığı görsellik nedeniyle bina cephelerinde kaplama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kesme blok taş duvar ise tüm yüzeyleri titizlikle işlenmiş ve düzenli şekiller kazandırılmış taşlardan oluşmaktadır. Görünür yüzeyin en küçük kenar boyutu genellikle 25 cm olarak alınmaktadır. Yüksek işçilik ve maliyet gerektirmesi nedeniyle bu tür duvar yapımına daha az rastlanmaktadır (Taşevinşaatı, 2024).



**Resim 4.** I. Murad Hüdevendigar Cami

Yapı duvarlarının nitelikleri, yapının işlevi, mimari değeri ve inşaat için ayrılan bütçe doğrultusunda farklılık göstermektedir. Mevcut yapılar üzerinde yapılan analizler, ahşap hatıllı moloz taş duvarlardan başlayarak düzenli yatay derzlere sahip kaba yontu taş, taş-tuğla almaşık örgüler ve düzenli bloklardan oluşan kesme taş duvarlara kadar uzanan bir hiyerarşik sınıflandırmayı ortaya koymaktadır. Aynı yapı içerisinde cephelerin konumu ve işlevsel önemi doğrultusunda, kullanılan malzeme ve işçilikte belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Örneğin, anayola ya da avluya bakan cephelerde genellikle kesme taş tercih edilirken, diğer cephelerde taş-tuğla almaşık örgü veya düzgün yatay derzli kaba yontu taş örgüsü kullanılabilir. Benzer bir malzeme ve işçilik hiyerarşisi, külliye gibi birden fazla yapının bir arada bulunduğu komplekslerde de izlenebilir. Külliye'nin ana unsuru olan cami genellikle yüksek nitelikli kesme taş malzeme ile inşa edilirken, diğer yapıların bir kısmı kesme taş, bazıları ise taş-tuğla almaşık örgü ya da daha düşük nitelikte duvar teknikleriyle inşa edilmektedir. Bu durum, Süleymaniye Külliyesi gibi büyük ölçekli mimari komplekslerde de açıkça görülmektedir.

Öte yandan, Kara Ahmet Paşa Külliyesi (Topkapı) ve Sokullu Mehmet Paşa Külliyesi (Kadırğa) gibi külliye'de de cami-medrese gibi işlevsel birliktelikler arasında malzeme ve işçilik açısından belirgin farklılıklar dikkat çekmektedir. Bu gözlemler, yapı hiyerarşisinin malzeme seçimi ve işçilik kalitesindeki rolünü vurgulamaktadır (Ahunbay, 1988).

Mimar Sinan, taş ve tuğla gibi duvar malzemelerini ustalıklı kullanarak, zaman zaman ahşap hatılları da duvar sistemine entegre etmiştir. Ekonomik olanakların uygun olduğu durumlarda, yapıların tamamen kesme taşla inşa edilmesi tercih edilmiş, kesme taş örgülerde genellikle tek bir taş türünün sürekliliği sağlanmıştır. Ancak bazı istisnai durumlarda, cephelerde estetik etkiler yaratmak amacıyla iki farklı renkte taş kullanımına başvurulmuştur. Sinan'ın doğrudan tasarladığı düşünülmeyen Güneydoğu Anadolu ve Suriye'deki eserlerinde ise, bölgesel geleneklerin etkisiyle, iki renkli taşlarla almalı örgü sisteminin uygulandığı görülmektedir. Mimar Sinan'ın İstanbul ve çevresindeki eserlerinde en sık kullandığı yapı malzemesi küfeki taşıdır. Bakırköy-Safraköy bölgesinden temin edilen bu taş, taş tabakalarının doğal kalınlık sınırlarına bağlı olarak belirli bir standardizasyonla kullanılmıştır. Edirne'de bademli küfeki, İzmit'te kireç ve od taşı gibi yöresel taşları da değerlendiren Sinan, yerel kaynaklardan elde edilen taşların boyut ve nitelik açısından en yüksek standartta kullanılmasına özen göstermiştir. Duvar kaplamalarında mermer ve çini gibi yüksek değerli malzemelerin kullanımı ise sınırlı tutulmuştur. Tamamen mermerle kaplanmış cepheler genellikle Kanunî Sultan Süleyman ve II. Selim gibi Osmanlı padişahlarının türbelerine özgü olmuştur. Çini kaplamalar ise dayanıklılığının sınırlı olması nedeniyle saçaklarla korunan türbe giriş cepheleri, son cemaat yerleri ve iç mekanlarla sınırlandırılmıştır (Ahunbay, 1988; İstanbultarihi, 2024; VizeTarihi, 2024).



Resim 5. Mihrimah sultan külliyesi (kültürel miras, 2024)

## 2. OSMANLI MİMARİSİNDE KULLANILAN DOĞALTAŞLAR

### 2.1 Küfeki Taşı

Osmanlı mimarisinde temel yapı malzemesi olarak doğal taşlar önemli bir yer tutmuş, özellikle küfeki taşları hem işlevsellik hem de estetik açısından öncelikli tercih edilen bir malzeme olmuştur. İstanbul ve Edirne gibi merkezlerde, bu taşların yakındaki taş ocaklarından temin edilebilmesi, ekonomik ve pratik bir avantaj sağlamıştır. Organik kalker yapısına sahip olan ve kolay işlenebilirliğiyle dikkat çeken küfeki taşı, Anadolu ve Balkanlar'da, kalker, silis ve midye çökeltilerinden oluşan gözenekli yapısıyla tanınmıştır. Bej tonlarındaki bu malzeme, dayanıklılığı ve estetik özellikleriyle Osmanlı mimarisinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Küfeki taşı, kolay işlenebilme niteliği sayesinde özellikle kemerler, sütunlar, dış cepheler, bahçe düzenlemeleri, mihraplar, minberler, cumbalar ve harpuşlar gibi sanatsal detay ve zarafet gerektiren mimari unsurlarda yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu özellikleriyle, Osmanlı mimarlarının hem teknik hem de estetik hedeflerini gerçekleştirmede önemli bir rol oynamış ve dönem mimarisine karakteristik

bir kimlik kazandırmıştır. (Anadolu Ajansı, 2023). Özellikle İstanbul'daki 16. yüzyıl anıtsal yapılarının büyük çoğunluğunun, günümüzde Bakırköy, Yeşilköy, Bahçelievler ve Haznedar bölgelerindeki taş ocaklarından temin edilen küfeki taşlarıyla inşa edildiği bilinmektedir (Büyükistanbultarihi, 2024).



**Resim 6.** Küfeki taş ocağı aynası (a) ve kesim işlemi (b) (kufeki, 2024)



**Resim 7.** Edirne Selimiye camii (Kültürportalı, 2024).

Mevcut belgeler, Osmanlı dönemi taş işçiliğinde belirli bir standartlaşmanın varlığına işaret etmektedir. Taşların kalınlık ve derinlik

ölçüleri yapılar arasında genellikle benzerlik göstermiş, bu nedenle 17. yüzyıldan itibaren taş ve işçilik ödemelerinde yalnızca taşın uzunluğu birim olarak belirtilmiş; hacim veya yüzey ölçümleri yapılmamıştır. Bu durum, taş işleme uygulamalarında genellikle yalnızca ön yüz uzunluğunun ölçülmesinin yeterli görülmesinden kaynaklanmıştır. Ocaklarda taşların yalnızca ön yüzleri ince bir şekilde işlenmiş, arka yüzleri ise kabaca biçimlendirilmiş ve bu, inşaat sırasında taşların yerine yerleştirilirken uydurma ve perdelama işlemlerini zorunlu kılmıştır. Örneğin, Süleymaniye Külliyesi'nde kullanılan taşlar, büyük ve küçük olarak sınıflandırılmış ve uzunluk ile genişlik ölçüleri detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Bu taşlar çoğunlukla temel ve ayak gibi masif yapı elemanlarında kullanılmış, kalınlıkları ise belgelerde "çıktığına göre" ifadesiyle kayıt altına alınmıştır. Duvar kalınlıklarına bağlı olarak cidarlarda kullanılacak taşların derinliklerinde değişkenlik gözlenirken, özellikle köşe taşlarında taşın yatay kalınlığının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır (Ahunbay, 1988).

## 2.2 Yeşil dasitik tüf (od taşı)

İstanbul'daki yapılarda, özellikle temellerde ve yüksek ısıya dayanıklılık gerektiren ocak ve külhan gibi yapılarda, yeşil dasitik tüf olarak bilinen od taşı yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Yeşil renkli bu volkanik taş, Osmanlı mimarisinde önemli bir yapı malzemesi olarak kabul edilmiş ve dayanıklılığı ile işlevselliği sayesinde kritik yapı unsurlarında tercih edilmiştir. Geçmişte Türkiye'nin farklı bölgelerinde çıkarılan od taşı, özellikle İç Anadolu Bölgesi'nde yaygın olarak bulunmuş; Ankara, Eskişehir, Kayseri, Konya, Niğde ve Nevşehir gibi iller başlıca rezerv alanları olmuştur. İstanbul'daki yapılarda kullanılan od taşı ise genellikle Anadolu Kavağı, Rumeli Kavağı, İzmit, Yalova, Karamürsel ve Şirin Çavuş bölgelerindeki taş ocaklarından temin edilmiştir (Baş, 2017). Bu durum, malzemenin yerel kaynaklardan sağlanarak hem ekonomik hem de lojistik açıdan avantaj sağlamış ve od taşının Osmanlı yapı geleneğindeki stratejik önemini artırmıştır.

Od taşları, volkanik tüflerden oluşan ve yumuşak bir dokuya sahip olan bu taşlar, dış etkilere karşı oldukça dayanıklı olmamakta, hava kirliliği ve yağışlar nedeniyle yüzeylerinde kahverengi lekeler, oyuklar ve kabuk

dökülmeleri oluşarak estetik açıdan olumsuz bir görünüm kazanmaktadır. Yeşil dasitik tüf olarak bilinen od taşı, Geç Roma, Erken Bizans (4.-6. yüzyıl) ve Erken Osmanlı Dönemi (16.-18. yüzyıl) boyunca daha sınırlı bir kullanım alanına sahipken, 19. yüzyıl sonu ile 20. yüzyıl başlarında daha yaygın bir şekilde tercih edilmiştir. İstanbul için gerekli olan od taşlarının bir kısmı, Karamürsel yöresindeki ocaklardan temin edilmiştir (Baş, 2017). Süleymaniye Külliyesi'nde kullanılan od taşlarının Karamürsel yakınlarındaki Kavak İskelesi'nden çıkarıldığı veya İzmit (Nicomedia) bölgesinden getirildiği bilinmektedir. Örneğin, bir arşiv belgesinde eski duvarların temellerinde bulunan od taşları, "8 karış uzunluğunda, 5 karış eninde ve 2,5 karış kalınlığında" olarak tanımlanmıştır.



**Resim 8.** Benlizade türbesi odtaşı kullanımı (İstanbulium, 2024)

### 2.3 Mermer Taşlar

Mermer taşlar, 16. yüzyılda iki ana kaynaktan sağlanmıştır. Ocaklardan çıkarılan mermerler ve eski yapı kalıntılarından devşirilip yeniden işlenerek kullanılan mermerler. Osmanlılar, genellikle beyaz mermer tercih etmişlerdir, çünkü İstanbul, Marmara Adası'ndaki beyaz mermer ocaklarına yakındır. Granit ve porfir gibi daha değerli malzemelerin büyük bir kısmı ise eski yapılardan devşirilmiştir. Devşirme malzeme hem Avrupa'da hem de

Doğu Akdeniz'de o dönemde yaygın bir uygulamadır. Bu malzemeler, genellikle yeniden işlenip biçimlendirilerek orijinal hale getirilmiştir. Sütunlar da çoğunlukla yeni yapılara uyum sağlamak için kesilmiş, kısaltılmış veya tıraşlanarak inceltilmiştir. 16. yüzyılın ortalarına kadar Osmanlılar'ın sütun yapma gereği duymadığı söylenebilmekte; zira pek çok önemli sultan yapılarında kullanılan sütunlar devşirmedir. Örneğin, Üçşerefeli Cami'nin son cemaat yerinde kullanılan sütunlar, Marmara mermerinden yapılmış olduğu ve yüksek ihtimalle antik sütun tamburları tıraşlanarak kullanıldığı belirtilmektedir (İstanbultarihi, 2024).



**Resim 9.** Marmara adası beyaz mermer banyo-hamam uygulaması

## 2.4 Devşirme Taşlar ve Konglomeralar

Edirne'deki II. Bayezid Camii avlusunda yer alan sütunlar, Osmanlı mimarisinde devşirme malzeme kullanımının önemli bir örneğini oluşturmaktadır. Avluda, 6 adet yeşil porfir (verde antico), 1 adet pembe Mısır graniti, 2 adet gri Kestanbol graniti ve 9 adet Marmara mermeri sütun bulunmaktadır. Bu sütunların çıkarıldığı ocakların, caminin inşa edildiği dönemde muhtemelen artık işletilmediği ve devşirme malzeme olarak yeniden değerlendirildiği söylenebilir. Devşirme malzeme kullanımı, sadece sütunlarla sınırlı kalmamış, aynı zamanda kemer taşı, söve, eşik ve döşeme kaplaması gibi çeşitli yapı elemanlarında da yaygın olarak tercih edilmiştir. Bu durum,



Osmanlı mimarisinin, mevcut kaynakları ekonomik bir şekilde değerlendirerek estetik ve işlevsel sonuçlar elde etme konusundaki becerisini ortaya koymaktadır. Devşirme malzemelerin, yalnızca maliyet avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda geçmiş uygarlıkların mirasını Osmanlı mimarisine harmanlayarak bir süreklilik oluşturduğu da söylenebilir. Bu durum, kalıntılardan malzeme temin etme yönteminin genellikle yakın çevredeki kaynakların taranmasını gerektirdiğini göstermektedir, çünkü ağır ve düşük maliyetli yapı elemanlarının uzak mesafelerden taşınması ekonomik açıdan verimli olmamıştır. Ancak 16. yüzyıl ortalarına gelindiğinde, İstanbul ve çevresindeki taş ocaklarının kaynakları tükenmiş, bu durum ya ocaklardan daha fazla malzeme çıkarılmasını ya da İstanbul'un biraz daha uzağındaki kaynakların kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir.

Roma döneminden günümüze taş çıkarma tekniklerinde önemli bir değişiklik olmadığı düşünülebilir. Osmanlı döneminde, mermer işleme pratiğinde, ocaklarda kaba yontu taş blokları üretmek yerine, yarı işlenmiş yapı elemanları üretme eğilimi daha baskın olmuştur. Örneğin, söve, merdiven basamağı ve sütun başlıkları gibi elemanlar, istenen ölçülere göre ocaklarda işlenip inşaat sahasına gönderilmiştir. Bu tür elemanlar, kaba inşaat tamamlandıktan sonra yapıya monte edilip süsleme işlemi uygulanan unsurlar olarak kullanılmıştır (Tanyeli, 2021).

Beyaz mermerden sonra, kırmızı çimentolu konglomeralar, İstanbul'daki Osmanlı yapılarında en yaygın kullanılan taş türlerinden biri olmuştur. Bu taşların, özellikle Mihaliç'teki (günümüzde Karacabey) ocaklardan temin edildiği bilinmektedir. Ancak, breş olarak da bilinen bu konglomera türünün çıkarımı düzenli bir faaliyet olmaktan ziyade, ihtiyaç duyulduğunda geçici olarak temin edilmiştir. Gereksinim halinde, elemanlar ve işletme sermayesi gönderilerek üretim süreci kısa vadeli şekilde organize edilmiştir. Mermer türü malzemelerin bir kısmı, özellikle granit ve porfir gibi dayanıklı taşların tamamı, eski yapılardan devşirilmiştir. Bu devşirme pratiği, Osmanlılar döneminde olduğu kadar Avrupa ve Doğu dünyasında da yaygın bir uygulama olmuştur. Özellikle bazı bölgeler, Osmanlı'nın devşirme malzeme temininde merkezi bir rol oynamıştır. Edincik'teki Temaşalık (antik Kyzikos), Ezine yakınlarındaki Eski İstanbulluk (antik Aleksandria Troas), Marmara Ereğlisi (antik Perinthos) ve İzmit (antik Nikomedia) gibi merkezler,

16. yüzyıl Osmanlı belgelerinde sıklıkla anılmaktadır. Bu pratik, Osmanlı mimarisinde hem ekonomik hem de estetik açıdan etkili bir yöntem olarak, geçmiş uygarlıkların mirasının yeni yapılarla bütünleşmesine olanak sağlamıştır.

Devşirilen mermerler ve diğer doğal taşlar, Osmanlı mimarisinde sıklıkla yeniden işlenerek biçimlendirilmiş ve bu süreçte genellikle özgün tanınabilirliklerini yitirmiştir. Özellikle sütunlar, yeni yapılara uyarlanabilmek amacıyla genellikle kesilip kısaltılmış veya tıraşlanarak inceltilmiştir. Bu durum, Osmanlı ustalarının devşirme malzemeleri işlevsel bir şekilde yeniden kullanma becerisini yansıtmaktadır. Yeni sütunlar yapımında, Osmanlı taş ustalarının bir tür torna mekanizması kullandığına dair bulgular olsa da, eski sütunları inceltmek gerektiğinde, bu işlemin sütunlar yapıya yerleştirildikten sonra gerçekleştirilmiş olması muhtemeldir. Bu uygulama hem taşların mevcut ölçülere uyarlanmasını hem de sütunların taşıma ve montaj sırasında zarar görmesini önlemek adına pratik bir çözüm sunmuştur. Aynı zamanda, sütunların yerinde işlenmesi, dönemin inşaat tekniklerinin esnekliğini ve malzeme üzerindeki hakimiyetini gözler önüne sermektedir (İstanbultarihi, 2024).

## 2.5 Bazalt

Osmanlı mimarisinde bazalt taşları dayanıklılığı, sertliği ve estetik özellikleri nedeniyle önemli bir yer tutmuştur. Bazalt, genellikle camiler, medreseler, saraylar ve surlarda taşıyıcı ve kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu taşlar hem estetik görünümü hem de aşınmaya karşı dirençli yapısı ile mimaride uzun ömürlü eserler oluşturmak için tercih edilmiştir (Demirci & Özsoy, 2024).

Özellikle Diyarbakır ve çevresi gibi bazaltın yaygın bulunduğu bölgelerde, bu taşlar Osmanlı döneminde birçok yapının temel malzemesi olmuştur. Diyarbakır Surları ve tarihi camiler bu kullanımın güzel örneklerindedir. Bazaltın işlenmesi zorlu olmasına rağmen, Osmanlı taş ustaları, bu malzemeyi detaylı işlemler ve desenlerle süslemeyi başarmış, estetik ve işlevsellik açısından ideal hale getirmiştir. Bunun yanı sıra bazalt, ısı yalıtımı özellikleri nedeniyle de özellikle sıcak iklimlerde tercih edilmiştir (Demir vd., 2022).

Mimar Sinan'ın eserlerinde ise daha çok mermer ve kesme taş gibi malzemeler kullanılmış olsa da bazalt gibi dayanıklı taşlar da anıtsal yapıların belirli bölümlerinde yer bulmuştur. Sinan'ın külliyelerinde ve köprülerinde kullanılan taş malzemelerde, bölgesel kaynakların dikkate alındığı görülmektedir. Bazaltın Osmanlı dönemindeki bu yaygın kullanımı hem estetik hem de mühendislik açısından dönemin ileri seviyedeki mimarlık anlayışını göstermektedir (Ahunbay, 1988).

### **3. OSMANLI DÖNEMİ TAŞ ESERLERİ**

#### **3.1 Süleymaniye Camii (İstanbul)**

Süleymaniye Camii, Mimar Sinan tarafından 1550-1557 yılları arasında inşa edilmiştir ve Osmanlı taş mimarisinin en önemli örneklerinden biridir. Süleymaniye'nin dış cephesinde kullanılan beyaz mermer, caminin görkemli yapısına katkıda bulunurken, iç mekânında kullanılan mermerler ise sanatsal işçilikleriyle dikkat çekmektedir. Camiye özgü taş işçiliği, özellikle mihrap ve minber gibi detaylarda mermerin zarif bir şekilde işlendiği, geometrik desenler ve İslami motiflerin kullanıldığı örnekler sunmaktadır. Bunun yanı sıra, caminin inşasında kullanılan taşların dayanıklılığı, yapının yüzlerce yıl boyunca sağlam kalmasına olanak tanımıştır. Süleymaniye Camii, sadece bir ibadet yeri değil, aynı zamanda mimari mühendisliğin ve taş işçiliğinin de mükemmel bir örneğidir. Büyük kubbe, minaresi ve avlusundaki sütunlar, taşın nasıl mühendislik gücüyle birleşerek mimarideki zarafeti artırdığını göstermektedir (Çetin, 2015).



**Resim 10.** Süleymaniye camii (Ademder, 2024)

Süleymaniye Camii'nin iç mekanındaki mihrap, minber ve vaaz kürsüsü gibi önemli bölümlerde, beyaz mermer yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Mermer, özellikle estetik özellikleri ve zarif işlenebilirliği ile dikkat çekmektedir. Camideki mermer işçiliği, dönemin sanatsal ve mimari anlayışını yansıtarak iç mekânın ihtişamını artırmıştır. Mermerin işlenmesi sırasında dikkatle seçilen desenler ve geometrik motifler, camiye zarif bir estetik katmıştır. Süleymaniye Camii'nin dış yapısında, özellikle ana kubbenin taşıyıcı kısımlarında kalker taşı kullanılmıştır. Kalker taşı, taşıma kapasitesi yüksek, işlenmesi kolay ve dayanıklı bir taş olduğundan, büyük yapılar için ideal bir malzeme olarak tercih edilmiştir. Bu taş, caminin ana yapısını oluşturan kolonlar ve duvarlarda kullanılarak, yapının sağlamlığını sağlamıştır. Bazalt taşı, caminin yapısal sağlamlığını artırmak amacıyla bazı kısımlarda kullanılmıştır. Özellikle caminin zemininde ve çeşitli dış duvarlarında, bazalt taşının dayanıklılığı ve sertliği, yapının uzun ömürlü olmasına yardımcı olmuştur. Bazalt, aynı zamanda nem ve hava koşullarına

karşı oldukça dirençli bir malzemedir, bu yüzden Süleymaniye Camii gibi büyük yapılarda tercih edilmiştir.

İç mekânın bazı bölümlerinde ise, farklı renk tonlarında mermerler kullanılmıştır. Beyaz ve sarımsı tonlarındaki mermerler, özellikle caminin mihrap kısmı ve diğer süslemelerde yer alır. Bu mermerler, görsel olarak birbirini tamamlayarak, caminin iç mekânında bir denge ve estetik uyum yaratmıştır. Camide granit taşı da kullanılmıştır. Granit, özellikle taşın dayanıklılığı ve görsel etkisi nedeniyle, zemin döşemeleri ve bazı sütunlarda tercih edilmiştir. Granit hem iç mekânda hem de dış mekanlarda kullanıldığı için Süleymaniye Camii'nin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır (Olgun, 2011; Ersan vd., 2011).

### **3.2 Sultan Ahmet Camii**

Sultanahmet Camii (Mavi Camii), Mimar Sedefkar Mehmed Ağa tarafından 1609-1616 yılları arasında inşa edilmiştir ve Osmanlı mimarisinin en önemli yapılarından biridir. Camide kullanılan taşlar hem yapısal hem de estetik açıdan önemli bir rol oynamaktadır. Sultanahmet Camii'nde kullanılan taşlar, yapının ihtişamını ve uzun ömürlülüğünü sağlarken, aynı zamanda dönemin taş işçiliği ve estetik anlayışını da yansıtmaktadır (İpekçi & Aydın, 2017; Freely, 2014).

Sultanahmet Camii'nin iç mekanındaki en dikkat çekici taşlardan biri beyaz mermerdir. Beyaz mermer, caminin mihrap, minber, vaaz kürsüsü ve minaresindeki zarif işçiliklerde yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Özellikle caminin içindeki detaylarda, mermerin işlenmesiyle oluşturulan geometrik desenler ve İslami motifler, camiye estetik bir derinlik katmaktadır. Beyaz mermerin pürüzsüz yüzeyi hem zarafet hem de dayanıklılık açısından caminin iç mekânında önemli bir rol oynamaktadır. Sultanahmet Camii'nin ana yapısında kalker taşı kullanılmıştır. Kalker taşı, oldukça yaygın olarak kullanılan bir inşaat malzemesidir ve yapının duvarları, kubbesi ve diğer taşıyıcı yapılarında kullanılmıştır. Bu taş, dayanıklı yapısı sayesinde caminin sağlığını sağlarken, aynı zamanda işlenmesi kolay olduğu için büyük yapılar için tercih edilmiştir. Kalker taşı, caminin dış yüzeyinde de yer yer kullanılarak, yapının dış cephesine de estetik bir görünüm kazandırmıştır.

Bazalt, caminin bazı zemin döşemelerinde ve dış yapısındaki dayanıklı taşlardan biridir. Bazalt, sert yapısı ve dayanıklılığı ile bilinir, bu nedenle Sultanahmet Camii'nin dış cephelerinde ve özellikle zemin katında yer alan alanlarda kullanılmıştır. Zeminlerin sık kullanımına bağlı olarak, bazaltın kullanılması, caminin uzun süre dayanıklı ve estetik bir yapıya sahip olmasını sağlamıştır. Ayrıca bazalt, nem ve hava koşullarına karşı dirençli olduğundan dış mekânlarda da tercih edilmiştir. Sultanahmet Camii'nin en bilinen özelliklerinden biri de iç mekânındaki mavi çini ve taş işçiliğidir. Bu çiniler, iç mekândaki duvarlarda ve kubbenin etrafında kullanılan zengin mavi renkleriyle camiye adını vermiştir. Camideki taş işçiliğinde kullanılan mavi tonlarında taşlar ve çiniler, özellikle kubbe çevresinde, duvarlarda ve mihrapta yer alır. Bu taşlar, caminin görsel zarafetini artıran bir öğe olarak kullanılmıştır.

Granit, dayanıklılığı ve estetik görünümü ile Sultanahmet Camii'nde kullanılan başka bir önemli taş türüdür. Granit taşı, caminin zemin döşemelerinde ve bazı kolonlarında kullanılmıştır. Granit, özellikle yüksek dayanıklılığı nedeniyle, caminin iç mekânındaki yoğun kullanıma uygun hale gelmesini sağlamıştır. Ayrıca granitin düzgün işlenmesi, caminin estetik yönünü güçlendiren bir unsurdur. Sultanahmet Camii'nin iç mekânında, özellikle zemin döşemelerinde ve bazı sütunlarda sarımsı ve bej renkli mermerler de kullanılmıştır. Bu taşlar, caminin iç mekânındaki sıcaklığı artıran bir atmosfer yaratırken, diğer taş türleriyle uyum içinde çalışmaktadır. Sarımsı ve bej mermerler, ayrıca mihrap ve minber gibi kutsal alanlarda da yer alarak, bu alanların görsel etkisini artırmıştır. Sultanahmet Camii'nin yapısal elemanlarında, özellikle duvarlarda ve bazı dekoratif unsurlarda traverten taşı da kullanılmıştır. Traverten taşı, doğal olarak oluşan bir kayaç türüdür ve ışığı yansıtan özellikleri ile caminin iç mekânındaki ışık oyunlarına katkı sağlar. Ayrıca traverten taşı, düzgün işlenebilmesi ve dayanıklılığı ile de yapının sağlamlığını artırmıştır (İpekçi & Aydın, 2017; Freely, 2011; Kantar, 2014).

### 3.3 Topkapı Sarayı

Topkapı Sarayı, Osmanlı İmparatorluğu'nun en önemli ve en büyük saraylarından biridir ve İstanbul'da, Sultanahmet semtinde yer almaktadır.

İnşa süreci 1460'larda Sultan II. Mehmet (Fatih Sultan Mehmet) tarafından başlatılmış, zamanla Osmanlı padişahlarının oturduğu bir yönetim merkezi haline gelmiştir. Sarayın inşasında kullanılan taşlar hem yapısal hem de estetik açıdan büyük bir öneme sahiptir. Topkapı Sarayı, zaman içinde birçok eklemeler ve restorasyonlar geçirmiş olsa da kullanılan taşlar büyük ölçüde geleneksel Osmanlı taş işçiliğini yansıtmaktadır (Boleken, 2023).

Topkapı Sarayı'nın iç mekanlarında beyaz mermer yoğun olarak kullanılmıştır. Özellikle sarayın çeşitli padişah odalarında, hükümet işlerinin yürütüldüğü bölümlerde ve özellikle harem dairelerinde mermer zeminler, sütunlar ve duvarlar yer almaktadır. Beyaz mermer hem estetik hem de dayanıklılık açısından sarayın zarif bir şekilde tasarlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Sarayda kullanılan mermerler, aynı zamanda dekoratif unsurlar olarak da kullanılmıştır. Örneğin, padişahların oturduğu odalarda kullanılan mermerler, özel işçilikle işlenmiş ve geometrik desenler eklenerek görsel açıdan zenginleştirilmiştir. Traverten taşı, sarayın dış yapısında ve bazı iç mekanlarda kullanılan başka bir taş türüdür. Topkapı Sarayı'ndaki duvarlarda ve avlularda traverten taşları sıklıkla görülür. Travertenin doğal dokusu ve ışığı yansıtan özellikleri, sarayın görsel zenginliğini artırmış, aynı zamanda yapının dayanıklılığını sağlamıştır. Traverten taşının genellikle dış cephelerde ve dış mekanlarda kullanılması, sarayın dışındaki yapıları estetik açıdan dengelemektedir.

Topkapı Sarayı'nda kalker taşı, özellikle yapısal elemanlarda kullanılmıştır. Kalker taşı, inşaat malzemesi olarak kolayca işlenebilir ve dayanıklı bir malzemedir, bu yüzden büyük yapılar için tercih edilmiştir. Sarayın duvarlarında ve bazı temel taşıyıcı elemanlarında kalker taşı kullanılmıştır. Kalker taşının sarayın yapısal sağlamlığını sağlamakta önemli bir rolü vardır. Granit taşı, dayanıklı ve sert yapısıyla Topkapı Sarayı'nda özellikle zemin döşemelerinde ve dış avlularda kullanılmıştır. Granit, uzun süreli dayanıklılığı sayesinde, özellikle yoğun kullanılan alanlarda tercih edilmiştir. Granit taşının kullanımı, sarayın daha sağlam ve uzun ömürlü olmasını sağlamıştır. Ayrıca granit taşının estetik özelliği, sarayın zeminlerinde zarif bir doku yaratmaktadır.

Topkapı Sarayı'nda mavi taşların yanı sıra, çeşitli renklerdeki çiniler de yaygın olarak kullanılmıştır. Özellikle sarayın iç mekanlarında ve dekorasyonlarında, çini ve mavi taşlar estetik bir rol oynamıştır. Mavi taşlar, sarayın belirli bölümlerinde yer alan duvarlarda, kapı ve pencere kenarlarında dekoratif unsurlar olarak kullanılmıştır. Mavi taşlar, caminin içindeki çini işçiliğiyle birlikte sarayın görsel çekiciliğini artırmıştır. Bu taşlar, özellikle Harem Dairesi ve Divan-ı Hümayun gibi özel odalarda sıklıkla görülür. Sarayda farklı tonlardaki mermerler de kullanılmıştır. Pembe ve kırmızı mermerler, özellikle sarayın iç mekanlarında, odalar arasında geçiş sağlayan koridorlarda ve bazı özel odalarda yer almaktadır. Bu mermerler, sarayın iç mekanına sıcak bir hava katarken, aynı zamanda iç mekânın zarif bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olmuştur.

Marmara adasından çıkarılan beyaz taşlar, Topkapı Sarayı'nın yapımında kullanılan bir başka malzemedir. Marmara taşı hem dayanıklı hem de işlenmesi kolay bir malzemedir. Bu taşlar özellikle sarayın dış cephesinde, iç mekanındaki bazı bölümlerde ve bahçe alanlarında kullanılmıştır. Topkapı Sarayı'nın temel yapılarında, özellikle zeminde ve dış mekanlarda çakıl taşları ve moloz taşları kullanılmıştır. Bu taşlar, yapısal olarak güçlü ve dayanıklı taşlar olmalarının yanı sıra, inşaat sürecinde temel sağlamlığına katkı sağlamışlardır. Çakıl taşları, zeminin güçlendirilmesinde ve suyun taşması durumunda drenaj sisteminin sağlanmasında rol oynamıştır (Göncü, 2015; Boleken, 2023).

### 3.4 Dolmabahçe Sarayı

Dolmabahçe Sarayı, Osmanlı İmparatorluğu'nun son dönemlerinde inşa edilmiş ve Türk tarihinin önemli yapılarından biridir. 13 yıl süren inşaat süreci (1843-1856) boyunca, saray hem Osmanlı'nın geleneksel mimari unsurlarını hem de Batı tarzı tasarımları birleştirerek büyük bir estetik ve işlevsel uyum oluşturmuştur. Dolmabahçe Sarayı'nda kullanılan taşlar hem yapının sağlamlığını sağlamak hem de sarayın ihtişamını artırmak amacıyla özenle seçilmiştir (Göncü, 2015)

Dolmabahçe Sarayı'nda en çok kullanılan taşlardan biri beyaz mermerdir. Mermer, özellikle sarayın iç mekanlarında ve bazı dış cephe bölümlerinde yoğun olarak kullanılmıştır. Beyaz mermer hem görsel olarak



etkileyici hem de işlenmesi kolay bir malzemedir. Sarayın içindeki mermer sütunlar, merdivenler ve zemin döşemeleri, saraya zarif bir hava katarken, aynı zamanda görsel ihtişamı artırmıştır. Mermer, özellikle sarayın önemli bölümleri olan Saltanat Köşkü ve Harem dairelerinde kullanılmıştır. Dolmabahçe Sarayı'nın dış cephesinde traverten taşı kullanılmıştır. Traverten, doğal dokusu ve ışığı yansıtan özellikleriyle sarayın dış yapısına estetik bir değer katmıştır. Bu taş, sarayın duvarlarında, özellikle dış avlularda ve bazı teraslarda yer almaktadır. Travertenin dayanıklılığı, sarayın uzun ömürlü olmasına katkı sağlarken, doğal dokusu sarayın zarif dış cephesine uyum sağlamıştır.

Kalker taşı, Dolmabahçe Sarayı'nın inşasında önemli bir yer tutan bir diğer malzemedir. Özellikle yapının taşıyıcı duvarlarında ve bazı yapısal elemanlarında kullanılmıştır. Kalker taşı, dayanıklı ve işlenmesi kolay bir malzeme olup, büyük ölçekli yapılarda sıklıkla tercih edilmiştir. Sarayın temellerinde ve dış yapısında kullanılarak, yapının sağlamlığına katkı sağlamıştır. Granit, özellikle sarayın zemin döşemelerinde ve dış mekanlarda kullanılmıştır. Granit taşının sert ve dayanıklı yapısı, Dolmabahçe Sarayı gibi büyük yapılar için oldukça uygundur. Sarayın iç mekânında, özellikle zemin döşemeleri ve merdiven basamaklarında granit taşının kullanıldığı yerler vardır. Granit, estetik açısından da oldukça zarif olup, Dolmabahçe Sarayı'nda hem işlevsel hem de görsel bir unsur olarak karşımıza çıkar.

Dolmabahçe Sarayı'nda estetik açıdan en dikkat çeken malzemelerden biri de mavi taşlar ve çinilerdir. Özellikle sarayın iç mekanlarında, duvarlarda ve tavanlarda kullanılan mavi taşlar hem estetik bir vurgu oluşturmuş hem de cami ve diğer Osmanlı yapılarındaki geleneksel çini işçiliği ile benzer bir dekoratif etki yaratmıştır. Çiniler, sarayın çeşitli bölümlerinde hem dekorasyon hem de görsel derinlik sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Dolmabahçe Sarayı'nın yapımında Marmara Adası'ndan getirilen beyaz taşlar da kullanılmıştır. Marmara taşı, dayanıklılığı ve estetik özellikleri ile tercih edilmiştir. Özellikle sarayın dış duvarlarında ve bazı iç mekanlarda yer alan bu taş hem yapısal sağlamlık hem de görsel çekicilik açısından önemli bir malzeme olmuştur.

Sarayın iç mekanlarında, özellikle bazı önemli odalarda, pembe ve kırmızı mermerler kullanılmıştır. Bu renk tonlarındaki mermerler, iç mekânın sıcaklığını artırırken, aynı zamanda zengin bir estetik oluşturur. Sarayın önemli alanlarından biri olan Valide Sultan Dairesi'nde, kırmızı mermerler ve zarif işçilikle oluşturulan desenler dikkat çekmektedir. Dolmabahçe Sarayı'nın bazı duvarlarında ve temellerinde, moloz taşı ve çakıl taşları gibi daha basit malzemeler de kullanılmıştır. Bu taşlar, inşaatın erken aşamalarında ve temelin sağlamlaştırılması için tercih edilmiştir. Moloz taşları, sarayın dayanıklı yapısının temellerini oluşturmak için kullanılmış, böylece yapı uzun ömürlü olmuştur. Dolmabahçe Sarayı'nda yerli taşlar dışında, dönemin Batı mimarisine olan etkisi nedeniyle, yabancı taşların da kullanıldığı bilinir. Örneğin, İtalya'dan getirilen bazı mermer türleri ve taşlar, sarayın estetik zenginliğine katkıda bulunmuştur. Sarayın inşasında kullanılan taşlar, Batı tarzı mimarinin etkisiyle özenle seçilmiş ve farklı kültürlerin izlerini taşımaktadır (Baldu, 2015).

### 3.5 Diyarbakır Surları (Diyarbakır)

Diyarbakır Surları 'nda en yaygın kullanılan taş türü bazalt taşlarıdır. Bu taşlar, Diyarbakır bölgesinin volkanik yapısından kaynaklanan bir doğal taş türüdür ve surların inşasında da en önemli malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bazalt taşı, dayanıklılığı, sertliği ve suya karşı dirençli olması ile bilinmektedir. Bu nedenle surların uzun ömürlü ve sağlam olmasını sağlar. Ayrıca bazalt taşı, koyu renkli ve estetik bir görünüme sahip olduğu için surların dış cephesine de karakteristik bir görünüm kazandırmıştır. Bazalt taşının kullanımı, surların zorlu iklim koşullarına ve sürekli savaflara karşı dirençli hale gelmesini sağlamıştır. Diyarbakır'daki bazalt yatakları, bu taşın teminini kolaylaştırmış ve surların yapımında bu yerel malzeme yoğun şekilde kullanılmıştır.

Bazalt taşları dışında, özellikle surların iç yapısında ve bazı bölümlerde moloz taşları da kullanılmıştır. Moloz taşları, daha küçük boyutlarda ve kolayca temin edilebilen taşlardır. Diyarbakır Surları 'nda, büyük bazalt taşlarının arasındaki boşlukları doldurmak ve yapının stabilitesini artırmak amacıyla moloz taşlarından yararlanılmıştır. Ayrıca moloz taşları, surların yapısal sağlamlığını artıran ve taşıma gücünü artıran bir

rol üstlenmiştir. Kalker taşı, Diyarbakır Surları'nın bazı bölümlerinde kullanılan diğer bir taş türüdür. Kalker taşı, işlenmesi daha kolay ve yapısal olarak dayanıklı bir malzemedir. Sur duvarlarının belirli bölümlerinde, özellikle daha ince işçilik gerektiren alanlarda ve bazı yapısal eklemelerde kalker taşları kullanılmıştır. Kalker taşının sarımsı tonları, surların genel renk paletini dengelemekte ve yapının zarif görünmesine katkı sağlamaktadır.

Diyarbakır Surları 'nda, sadece yapısal dayanıklılık sağlamakla kalmayıp estetik amaçlar doğrultusunda taş duvarlar ve çeşitli mozaik taşlar da kullanılmıştır. Özellikle surların bazı alanlarında, Bizans döneminden kalma taş işçilikleri ve mozaikler görülebilir. Bu taşlar, surların görsel zenginliğini artırmış ve dönemin mimari anlayışını yansıtmıştır. Bazalt taşlarının yanı sıra, bazı bölgelerde kırmızımsı tonlardaki taşlar da kullanılmıştır. Bu taşlar, özellikle sur duvarlarında kullanılan dekoratif taşlar olarak öne çıkmaktadır. Estetik açıdan da dikkat çeken bu kırmızımsı taşlar, surların farklı renk tonlarıyla görsel çeşitlilik yaratmış ve yapının dış yüzeyine farklı bir derinlik kazandırmıştır (Dağtekin, 2018; Kahveci & Kadayıfçı, 2013).

### **3.6 Köprüler ve Su Kemeleri**

Osmanlı dönemi köprüleri ve su kemerleri, taşın mühendislik açısından nasıl kullanıldığını ve yapıların sürdürülebilirliğini nasıl sağladığını gösteren harika örneklerdir. Osmanlı'nın taş kemerleri, özellikle su kemerlerinde büyük önem taşır. Bu kemerler, şehirlerde suyun taşınması için kullanılmış ve taşın dayanıklılığı sayesinde suyun uzun mesafelere taşınmasını sağlamıştır. Bu yapılar, sadece pratikte değil, aynı zamanda estetikte de büyük bir başarı sergiler. Su kemerlerinin taşları, mühendislik ve sanatın mükemmel bir birleşimi olarak karşımıza çıkmaktadır (Acar, 2019).

Osmanlı İmparatorluğu ve öncesindeki dönemde, köprüler ve su kemerleri inşa edilirken kullanılan taşlar hem yapının dayanıklılığını sağlamak hem de estetik bir değer yaratmak amacıyla özenle seçilmiştir. Bu yapılar, Osmanlı'nın büyük mühendislik başarılarının örnekleri olup, genellikle yerel taşlar kullanılarak inşa edilmiştir. Köprüler ve su kemerlerinde kullanılan taş türleri, genellikle yapıların büyük yük taşıma

kapasitesini desteklemek için dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerden seçilmiştir.

Bazalt, özellikle köprüler ve su kemerlerinde yaygın olarak kullanılan bir taş türüdür. Bu taş, dayanıklılığı, suya ve hava koşullarına karşı dirençli olmasıyla bilinir. Osmanlı köprülerinde, özellikle güneydoğu Anadolu ve çevresindeki bölgelerde bulunan bazalt taşları tercih edilmiştir. Diyarbakır gibi yerlerde, yerel bazalt yatakları kullanılarak köprü ayakları ve kemerler inşa edilmiştir. Bu taş, yapının sağlamlığını artırırken, estetik olarak da koyu renkli yüzeyiyle dikkat çekmektedir. Kalker taşı, Osmanlı dönemindeki birçok köprü ve su kemerinin inşasında kullanılan bir diğer yaygın taş türüdür. Kalker taşı, daha yumuşak ve işlenmesi kolay bir malzeme olması nedeniyle, özellikle kemer yapıları ve köprülerin duvarlarında tercih edilmiştir. Ayrıca kalker taşının işlenebilirliği, yapılar üzerinde zarif işçilik yapılmasına imkân tanımıştır.

Traverten, suyun etkisiyle doğal olarak oluşan bir taş türüdür ve su kemerlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Osmanlı su kemerlerinde, suyun uzun süre temas ettiği alanlarda traverten taşları tercih edilmiştir. Bu taş, suya karşı dirençli olduğu gibi, aynı zamanda estetik bir görünüme sahiptir. Özellikle Anadolu'nun çeşitli bölgelerinde, özellikle Roma döneminden miras kalan su kemerlerinde traverten taşları kullanılmıştır. Mermer hem estetik hem de yapısal özellikleri nedeniyle Osmanlı dönemindeki bazı köprülerde ve su kemerlerinde kullanılmıştır. Özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde, mermer taşlar hem dekoratif hem de dayanıklı bir malzeme olarak tercih edilmiştir. Süleymaniye Camii ve Topkapı Sarayı gibi önemli yapılarla paralel olarak, mermer taşlar köprülerin ve kemerlerin bazı bölümlerinde süsleme ve işçilik amacıyla kullanılmıştır.

Andezit taşı, özellikle bazı köprülerin ve su kemerlerinin yapımında kullanılmıştır. Bu taş türü, yerel olarak Anadolu'da bulunur ve sert yapısıyla bilinir. Andezit taşı, dayanıklılığı ve ısıya karşı dirençli olmasından dolayı su kemerlerinde ve köprü yapılarında uzun süreli kullanım için uygundur. Bu taş, özellikle köprülerin ayaklarında ve ana yapı elemanlarında kullanılmıştır (Kavalçalan, 2015).

### 3.7 Selimiye Camii (Edirne)

Selimiye Camii, Mimar Sinan tarafından 1568-1575 yılları arasında inşa edilmiştir ve doğal taşların yapı malzemesi olarak kullanımı açısından önemli bir örnektir. Yapının büyük kubbesi, mermerin ustaca işlendiği ve taşın taşıma kapasitesinin ne kadar verimli kullanıldığının kanıtıdır. Camiye ait minaresi, Selimiye'nin taş işçiliği açısından diğer camilerden farklı olarak daha ince detaylarla bezeli olup, yüksekliğiyle İstanbul'un silüetini de etkileyen bir yapı olmuştur. Mermer ve diğer taş türleri, özellikle caminin iç mekanındaki mihrap, minber ve avludaki taş döşemelerde dikkatle seçilmiş ve işlenmiştir. Selimiye Camii'nin taş kullanımı, sadece yapıyı ayakta tutmakla kalmamış, aynı zamanda caminin estetik ve dini anlamını pekiştirmiştir. Bu yapı, taş işçiliği ve mühendisliğin birleştiği bir başyapıttır.

Mermer Selimiye Camii'nin inşasında kullanılan en belirgin taşlardan biri mermerdir. Mermer, özellikle caminin iç kısmındaki zemin, minber, mihrap ve duvar süslemelerinde yoğun şekilde kullanılmıştır. Mermer hem estetik hem de dayanıklılık açısından ideal bir malzeme olup, caminin iç mekânında parlak yüzeyiyle dikkat çekmektedir. Özellikle mihrap ve minberde kullanılan mermerler, ince işçilik ve zarif detaylarla süslenmiştir.

Kalker taşı, Selimiye Camii'nin yapısal elemanlarında, özellikle duvarlarda ve bazı bölümlerinde kullanılan bir diğer önemli taş türüdür. Kalker taşları, mermerden daha ekonomik ve işlenmesi kolay bir malzeme olup, caminin dış cephesinde kullanılmıştır. Kalker taşının açık renk tonları, caminin zarif dış görünümünü desteklemiş ve yapıya hafif bir estetik değer katmıştır. Bazalt taşları, Selimiye Camii'nin yapısal dayanıklılığını sağlamak için kullanılan önemli taşlardan biridir. Bu taş türü, özellikle caminin temeli ve ayakları gibi yük taşıyan kısımlarında kullanılmıştır. Bazalt, sert ve dayanıklı yapısıyla caminin uzun ömürlü olmasını sağlamış, aynı zamanda suya ve hava koşullarına karşı dirençli olmuştur.

Traverten taşları, caminin bazı dekoratif ve yapısal kısımlarında kullanılmıştır. Özellikle duvar süslemeleri, pencerelerin etrafındaki işçilik ve bazı küçük detaylarda traverten kullanılmıştır. Bu taş türü, doğal olarak oluşan gözenekli yapısı ve estetik görünümleriyle dikkat çekmektedir. Granit, Selimiye Camii'nin inşasında kullanılan bir diğer dayanıklı taş türüdür. Granit,

özellikle yapının dayanıklılığını artırmak amacıyla bazı ana yapısal elemanlarda kullanılmıştır. Granit taşları, caminin büyük yapısal bölümlerinde sağlamlık sağlarken, uzun süreli kullanım için de uygun olmuştur. Moloz taşları, Selimiye Camii'nin bazı iç yapılarında ve temel kısımlarında kullanılmıştır. Bu taş türü, daha küçük ve düzensiz taşlardan oluşmakta ve genellikle iç yapının zemin katları gibi destekleyici alanlarda kullanılmıştır. Moloz taşları, sağlamlık sağlarken, maliyet açısından da daha ekonomik bir seçenek olmuştur (Eker, 2016).

#### 4. SONUÇ

Osmanlı mimarisi, kullanılan taşların çeşitliliği ve işçilikteki ustalıklı dikkat çekmektedir. Mermer, bazalt, kalker, traverten, granit ve moloz taşları gibi farklı türdeki doğal taşlar hem estetik hem de yapısal olarak önemli roller üstlenmiştir. Her taşın kendi doğasına uygun kullanım alanları belirlenmiş, böylece Osmanlı yapıları hem dayanıklı hem de zarif bir şekilde inşa edilmiştir. Mermerin zarif dokusu, bazaltın sağlam yapısı, kalkerin işlenebilirliği ve travertenin estetik görüllüğü, mimarinin görsel zenginliğini artırmış ve yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamıştır. Bu taşların yerel kaynaklardan temin edilmesi hem ekonomik bir yaklaşım sunmuş hem de yapılarla çevre arasındaki uyumu güçlendirmiştir. Osmanlı taş işçiliği, sadece yapısal sağlamlık sağlamakla kalmamış, aynı zamanda dönemin estetik anlayışını yansıtan detaylarla yapıların iç ve dış mekânlarını süslemiştir. Sonuç olarak, Osmanlı mimarisindeki taş kullanımı hem mühendislik harikası hem de sanatsal bir ifade biçimi olarak tarihe damgasını vurmuştur.

## KAYNAKLAR

- Acar, T. (2019). Eskigediz’de (Kütahya) Su Mimarisi:“Köprüler, Çamaşırhaneler, Su Kemerleri Ve Su Deposu”. Folklor Akademi Dergisi, 2(1), 1-32.
- Ahunbay, Z. (1988). Mimar Sinan yapılarında kullanılan yapım teknikleri ve malzeme. Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi yayınları.
- Algan, N. (2009). Anadolu Selçuklu dönemi mimarisi taş yüzey süslemelerinin incelenmesi ve seramik yorumları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, Türkiye.
- Angı, O. S. (2015). Ayasofya’nın yapımında kullanılan doğal taşlar ve günümüzdeki korunmuşluk durumları. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (14), 43-57.
- Baş, Y. (2017). İstanbul Yapılarında Karamürsel Od Taşının Kullanımına Dair Bazı Tespitler. Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (Busbed), 7(14), 45-56.
- Boleken, Z. (2023). Bağdat Köşkü’nde Yeniden Kullanılan Antik Renkli Mermerler ve Diğer Taşlar. Milli Saraylar Sanat Tarih Mimarlık Dergisi, (24), 66-87.
- Buldu, D. (2018). Dolmabahçe Sarayı ile Beylerbeyi Sarayı kalemışı süslemelerinin dönem, renk, desen ve form özellikleri açısından karşılaştırmalı incelenmesi (Master's thesis, Mimar Sinan Fine Arts University (Turkey)).
- Çakır, O., Karkaş, Z. S., Özgünler, S. A., Güler, E., Kar, B. Ç., Dereli, M., Okuyucu, Ş. E. (2023). Mimaride Doğal Taş. Livre De Lyon.
- Çakıroğlu, E. O., Büyüksarı, Ü. (2024). Mermer ve Taş İşçiliğiyle Uygulanmış Mimari Motiflerin Ahşapta Uygulanabilirliği. Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 20(1), 18-44.
- Çetin, M. (2015). Süleymaniye Camii’nin gösterge bilimi açısından incelenmesi (Master's thesis, İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Dağtekin, E. E. (2018). Coğrafi İşaret Olarak Diyarbakır Bazalt Taşı Ve Tescili. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 17(66), 851-860.

- Demir, Ş., Pıçak, M., Yıldırım, M. (2022). Diyarbakır Mermer Sektörünün Mevcut Durumu Ve Sorunları Üzerine Alan Araştırması. *Turkish Business Journal*, 3(6), 29-49.
- Demirci, S., Özsoy, S. Y. (2024). Tasarım Uygulamalarında Doğal taş Kullanımı ve Önemi. *Turkish Journal Of Fashion Design And Management*, 6(1), 45-64.
- Demirkol, B. (2021). Şanlıurfa–Mardin kireçtaşı ve Diyarbakır bazalt taşı özelliklerinin araştırılması, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- Diñçeli, İ. (1989). Selimiye Camii iç ve dış mimari süslemeleri , Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
- Düz, Ö. (2019). Konya Karatay Medresesi süslemelerinin desen ve tasarım özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Eker, H. (2016). İstanbul'un Fethi'nin Osmanlı Cami Mimarisi Üzerindeki Etkileri. *Journal Of International Social Research*, 9(43).
- Erbaş, İ., (2018), Taş ve Taş Yapı Kültüründe Değişim ve Dönüşüm, ATA Planlama ve Tasarım Dergisi 2.1 (2018): 29-37.
- Ersen, A., Olgun, N., Akbulut, S. S., Yıldırım, B. Ş. (2011). Süleymaniye camii 2007-2010 yılları restorasyonu ve restorasyon kararları.
- Freely, John. A history of Ottoman architecture. Wit Press, 2011.
- Göncü, T. C. (2015). Dolmabahçe Sarayı'nın İnşa Süreci, Mekân ve Teşkilat, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi. İstanbul.
- Göncü, T. C. (2015). Dolmabahçe Sarayı'nın inşa sürecine ilişkin yeni tespitler.
- İpekçi, C. A., & Aydın, E. Ö. (2017), Yerel Yapı Malzemesi Kaynakları: Kocaeli, Tmd Uluslararası Hakemli Tasarım Ve Mimarlık Dergisi, 98-128.
- Kahveci, A. E., Kadayıfçı, A. (2013). Diyarbakır yöresi bazalt taşının yapısal özelliklerinin incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(3), 56-69.
- Kantar, B. M. "The blue interpretation of art: The Blue Mosque." *Turkish Neurosurgery* 24.4 (2014).



- Kar, B. Ç., Dereli, M., Yıldız, E., 2024, Anıtsal Taş Yapılarda Meydana Gelen Bozulmalar: Afyonkarahisar Gedik Ahmet Paşa (İmaret) Cami Örneği. *PLANARCH-Design and Planning Research*, 8(1), 113-126.
- Kavalçalan, E. (2015). Kıbrıs' taki Osmanlı dönemi su yapıları (Çeşme ve hamamlar).
- Khooshroo, S., Javadi, N., Yardımlı, S., Hattap, S., 2017, İstanbul Süleymaniye Camii Taş Yüzeylerinde Tespit Edilen Bozunmalar Deteriorations Detected in İstanbul Süleymaniye Mosque Stone Surfaces.
- Korkmaz, A. V. (2019). Endüstriyel Hammaddelerin İnsan Sağlığına Olumsuz Etkileri ve Çözüm Önerileri. *Verimlilik Dergisi*, (4), 135-156.
- Okuma Atlası Sanat: Erken Osmanlı Mimarisi: Camiler
- Olgun, N. (2011). Süleymaniye Camii 2007-2010 Yılları Restorasyonuna Dair.
- Söyler, N., 2019, Güneydoğu Anadolu'da Roma kaleleri ve savunma sistemi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 2019.
- Tanyeli, G., 2021, 17.Uluslararası Mimarlık Sergisi, Venedik Bienali, Türkiye Pavyonu.
- Taşlıgil, N., Şahin, G., (2016). Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Türkiye Doğal Taşlarının İktisadi Coğrafya Odağında Analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (33), 607-640.
- Tel, H. Ö. (2021), Sürdürülebilir Malzeme olan Urfa Taşının Tarihsel Süreçte ve Peyzaj Mimarlığında Kullanımları: Şanlıurfa Örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23(3), 742-753.
- URL1 <https://istanbultarihi.ist/313-istanbul-yapi-teknolojisi> (Erişim Tarihi:12-11-2024)
- URL2 <https://tasevinsaati.com/tas-duvarlar> (Erişim Tarihi:06-11-2024)
- URL3 <https://vizeantik.com.tr/mimar-sinan-kufeki-tasi.html> (Erişim Tarihi:15-11-2024)
- URL4 <https://www.aa.com.tr/tr/kultur/edirnede-cikarilan-kufeki-tasi-anit- eserlerin-restorasyonunda-kullaniliyor/2790386>. (Erişim Tarihi: 24-11-2024)
- URL5 <https://www.naturadergi.com/anasayfa/tasin-anadoludaki-mimari-yolculugu/> (Erişim Tarihi:05-10-2024)

Vardar, K. (2014). Yavuz Sultan Selim Camii Taş Süslemeleri (The Stone Ornaments Of Yavuz Sultan Selim Mosque). Art-Sanat Dergisi, (2), 101-127.



## BÖLÜM 8

### 6 ŞUBAT 2023 DEPREMİNDE SAHADA GÖRÜLEN ZEMİN YAPI HASARLARINA GENEL BAKIŞ

Prof. Dr. Ali ATEŞ<sup>1</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14544124>

---

<sup>1</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Gölköy Bolu, E-Mail: [aliates@ibu.edu.tr](mailto:aliates@ibu.edu.tr) - ORCID:0000-0001-6297-8571

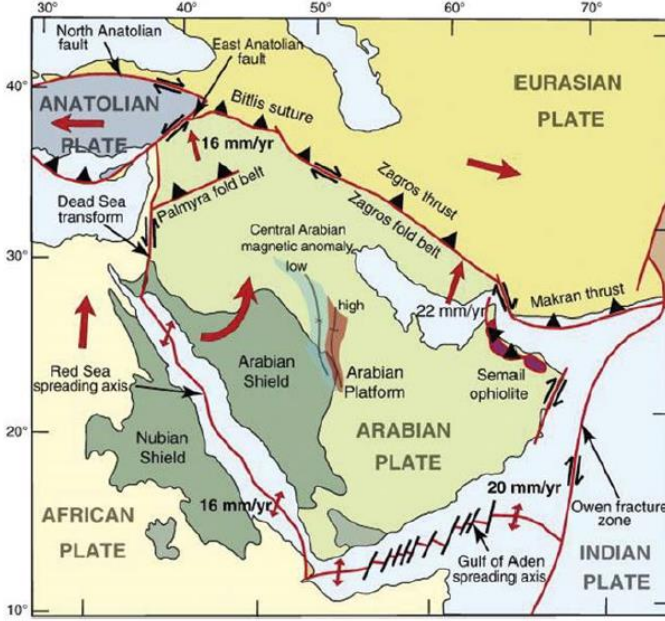


## GİRİŞ

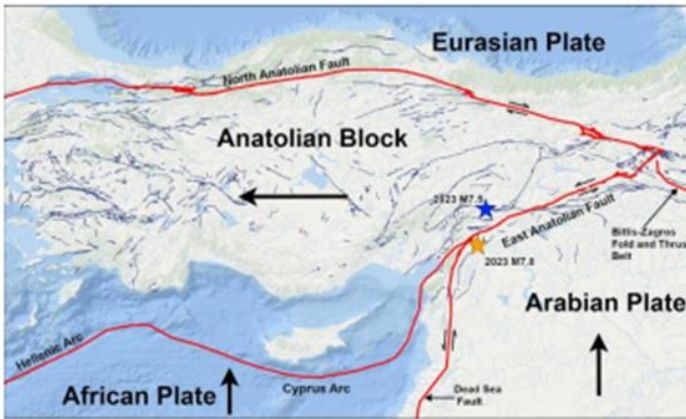
Türkiye bir deprem ülkesidir. Türkiye bölgesel olarak Alp Himalaya deprem kuşağı üzerindedir. Bundan dolayı da aktif tektonik rejimi üzerinde yer almakta olup, kuşak hareketliliği doğrudan doğruya ülkemizi etkilemektedir. Ayrıca ülkemizde etkin olan Kuzey Anadolu Fay sistemi özellikle ülkemizin kuzeyinden bir baştan diğer başa yaklaşık 1200 km uzunluğu sahiptir. Bunun yanında ülkemiz tektonik olarak Arap plakasının kuzeye doğru yönelmesi ile bir sıkışma rejimi altındadır (Şekil 1). Güneyden Arap Plakası kuzeye doğru hareketi ile, yine ölü deniz fayı ve Afrika plakası Akdeniz’de dalma batma zonu oluşturarak Anadolu plakası ve Avrasya plakalarının etkisinde batıya doğru harekete maruz kalmaktadır (Şekil 1, Şekil2). Ülkemizin kuzeyinde doğudan batıya devam eden bir çöküntü alanı mevcuttur. Bu kuşak Kelkit vadisi, Erzincan Erzurum Pasinler’i içine alarak Aras çukurluğu ile Türkiye’den çıkmaktadır (MTA,199; Şengör vd.,1981). Bu bölgede aletsel ve tarihsel kayıtlara bakıldığında ciddi sayıda ve büyüklüklerde depremler meydana gelmiştir. Bu bağlamda Malatya Güney doğu Anadolu fay hattı üzerinde ve aktif bölge içindedir. Depremselliği yüksektir. Hem tarihi kayıtlarda hem de aletsel kayıtlara bakıldığında Malatya ve çevresinde çok sayılı yıkıcı depremlere rastlanılmaktadır.

06.02.2023 günü, Türkiye saati ile 04:17’de ve 13:24’de merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. 7.7 büyüklüğündeki deprem yerin 8.6 km derinliğinde meydana gelirken 7.6 büyüklüğündeki deprem yerin 7 km derinliğinde meydana gelmiştir. Mw 7.7 büyüklüğündeki Pazarcık depremi, sol yanal doğrultu atımlı Ölü Deniz Fay Zonunun kuzey ucundaki Narlı Segmentine rastlarken, Mw 7.6 büyüklüğündeki Elbistan depremi ise Doğu Anadolu Fayından ayrılan bir kol olan Çardak Fayına rastlamaktadır. Bu depremler Malatya’yı da vurmuştur. Kentte yıkılan bina sayısı 3 bin 899. 23 bin 968 ağır hasarlı, 2 bin 247 orta hasarlı bina tespit edilmiştir. Acil yıkılacak bina sayısı ise 372 olduğu kayıtlara geçmiştir. Yine ikinci 28 Şubat 2023 tarihinde Malatya’nın Yeşilyurt ilçesinde meydana gelen 5,6 büyüklüğündeki depremde can

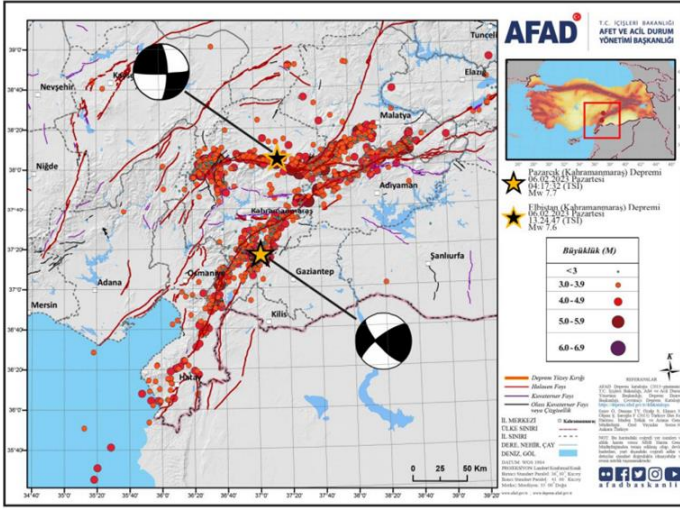
kaybı sayısı ikiye çıkmıştır. 29 binanın yıkıldığı depremde 140 kişi de yaralanmıştır (Şekil 3).



**Şekil 1** - Depremin üzerinde olduğu Doğu Anadolu Fayı (East Anatolian Fault) Arap Plakası (Arabian Plate) ile Anadolu Plakası (Anatolian Plate) arasındadır. Arap Plakası yılda 16mm atım ile Saat istikametinin ters yönünde dönmektedir ve Kızıl Deniz (Red Sea) de Kuzey ucunda kapanırken güney ucunda açılmaktadır (Şengör vd.,1981).



**Şekil 2.** Anadolu Plakasının Batıya Kayması (Şengör vd.,1981)

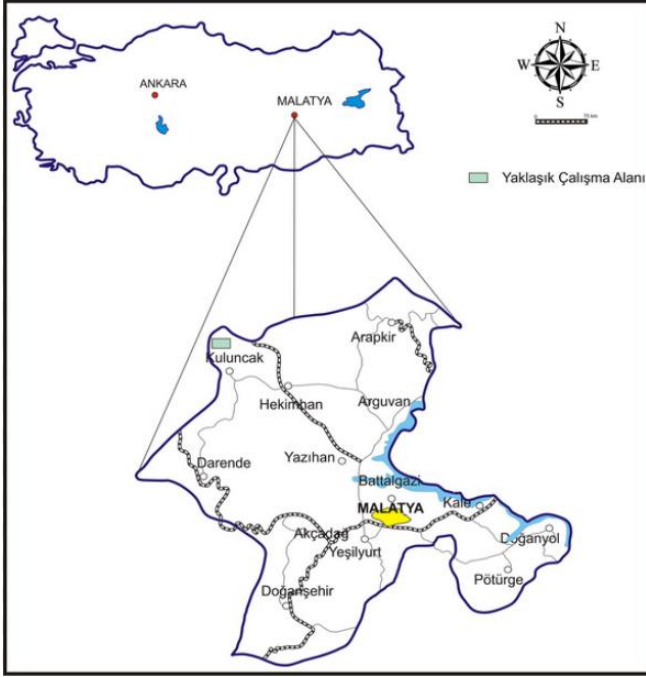


Şekil 3. 06.02.2023 Pazararcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 ve Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 depremleri ve artçı şok aktivitesi (AFAD,2023)

## 1.MALATYA İLİNİN YER BULDURU HARİTASI

Malatya, Doğu Anadolu bölgesinin yukarı Fırat havzasında yer almaktadır. Elazığ ve Malatya Fırat nehrine sınır iki komşu ildir. Elazığ, Malatya'nın doğusunda olup bu iki şehir sosyoekonomik ve yaşamsal açıdan birbirinin ayrılmaz parçalarıdır. Çalışma alanı, Malatya ilinin Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleridir (Şekil 4). 6 Şubat depremi sonrası bölgedeki natamam yapılarla ilgili tespitler yapılmış ve çalışma alanı olarak kent merkezindeki ilçeler seçilmiştir. Çalışma alanının morfolojisi yapı ve litolojinin birlikte etkisinin sonucunda gelişmiştir. Yüksek dağlar ve tepeler genellikle volkanik birimler ve kireçtaşlarından oluşmaktadır. Alçak alanlar ise kırıntılı çökellerin yüzeylendiği kesimlerdir. Bölgedeki yükseklikler 900 m. ile 2017 m. arasında değişmektedir (<https://mta.gov.tr>).





Şekil 4.Malatya ili yer bulduru haritası (<https://mta.gov.tr>)

## 2.MALATYA İLİNİN DEPREMSELLİĞİ

Malatya, Bingöl Karlıova'dan başlayarak Bingöl ovası, Palu, Sivrice, Hazar Gölü havzası, Doğanyol, Pötürge, Sincik, Çelikhana, Sürgü, Erkenek, Pazarcık üzerinden Antakya'ya varan Doğu Anadolu Fay hattı son yüzyılda oldukça aktifleşmiştir. Bu fay hattından farklı olarak Malatya Elbistan fayı da günümüzde harekete geçmiştir. Ovacık, Erzincan, Arguvan, Arapgir,

Hekimhan fayının da yakın zamanda stres yüklendiği bilim insanlarınınca söylenmektedir. Bölge tarih boyunca deprem ve artçıları depremler tarafından on binlerce kez sallanmış ve sarsıntılara maruz kalmıştır (Şekil 5,Şekil 6).

Atalarımızın Anadolu'da yaşamaya başladığı dönemlerden bu yana Malatya çevresi 1513'de bilim insanlarının 7.4 olarak tahmin ettiği yıkıcı bir depremle sallanmıştır. Yine 1544'de Malatya Elbistan fayı üzerinde oluşan zelzelede bir önceki depreme göre daha az

yıkıma uğradığı bilinmektedir. Bilim çevreleri bu depremin büyüklüğünü 6,7 şiddetini ise 10 olarak tahmin etmektedir. 1754, 1779 yıllarında bu bölgede meydana gelen deprem, Malatya'yı şiddetli bir şekilde sallamıştır. 29 Mayıs 1789 bir büyük deprem Palu'da meydana gelmiş, ancak Elazığ ve Malatya'yı da çok etkilemiştir. Bu depremin büyüklüğünde 7.0 olarak tahmin edilmektedir. 1856 Şubatında Elazığ ve çevresi ile aynı zamanda Malatya'yı etkileyen bir deprem daha yaşanmıştır. Yine 3 Mayıs 1874 yılında Elazığ Hazar gölü çevresinde başka bir depremin daha olduğu kayıtlara girmiştir. Çevreye önemli hasarlar vermiştir. Depremin büyüklüğünün (Mw) 6.7 olarak kaydedildiği şiddetinin ise bilim insanları tarafından 7 olduğu tahmin edilmektedir. Bu depremin üzerinden bir yıl geçmeden 27 Mart 1875'de bölge tekrar şiddetli bir depremle yeniden sarsılmıştır. Hazar gölünün güneyindeki coğrafyada yıkıcı olan bu depremin büyüklüğünün (Mw) 6.9 şiddetinin ise 8 olduğu tahmin edilmektedir. Son iki depremin artçıları bir yıl kadar bölgede hissedilmiştir.

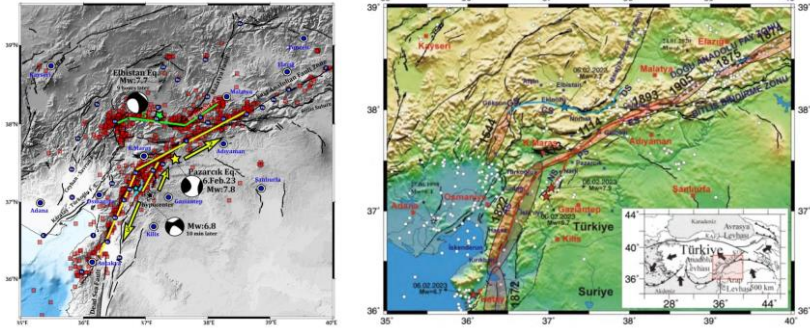
Malatya ve civarı 2 Mart 1893 günü sabahın erken saatlerinde büyük bir deprem ile uyanmıştır. Depremin büyüklüğü (Mw) 7.1 şiddeti ise 10 olarak tahmin edilmektedir. Bu zelzele Malatya, Besni, Hınımansur (Adıyaman), Akçadağ, Kâhta ve Hekimhan'ın da içinde olduğu coğrafyada büyük yıkıma sebep olmuştur. On bin civarında binanın yıkıldığı, 885 kişinin hayatını kaybettiği kayıtlara geçmiştir. Bu sarsıntı ile o günün şartlarında on binden fazla büyükbaş ve küçükbaş hayvanın telef olduğu belirtilmiştir. O dönem mart ayında bölgenin kış şartlarını yaşaması insanları zora sokmuştur. Aynı yıl yörede kolera salgını görülür. İnsanlar, ölüm ve sıkıntılı şartlarda hayatlarını devam ettirmeye çalışırlar. Bu depremin artçıları da bir yıl kadar sürer.

Osmanlı Devleti yönetimi depremden sonra aldığı özel tedbirlerle ve kurduğu komisyonlarla yöre halkının ihtiyaçlarını karşılamış, depremedelerin yaralarını sarmaya çalışmıştır. 4 Aralık 1905'de Malatya ve çevresinde yıkıcı yeni bir deprem meydana gelir. Bu zelzele, Pütürge ile Çelikhan arasında büyük hasara neden olur. Malatya ve Elazığ çevresinde depremin yıkıcılığı çok kuvvetli hissedilir. Bilim insanları, bu depremin büyüklüğünü 6.8, şiddetini ise 9 olarak kayda geçirmişlerdir. 5 Mayıs ve 6 Haziran 1986 Doğanşehir

Sürgü’de yaşanan sarsıntılar Elazığ ve Malatya’yı birlikte etkilemiştir (https://mta.gov.tr).



Şekil 5. Türkiye için hazırlanmış bir “Sismik Boşluk” Haritası (Demirtaş vd., 1996).



(a)

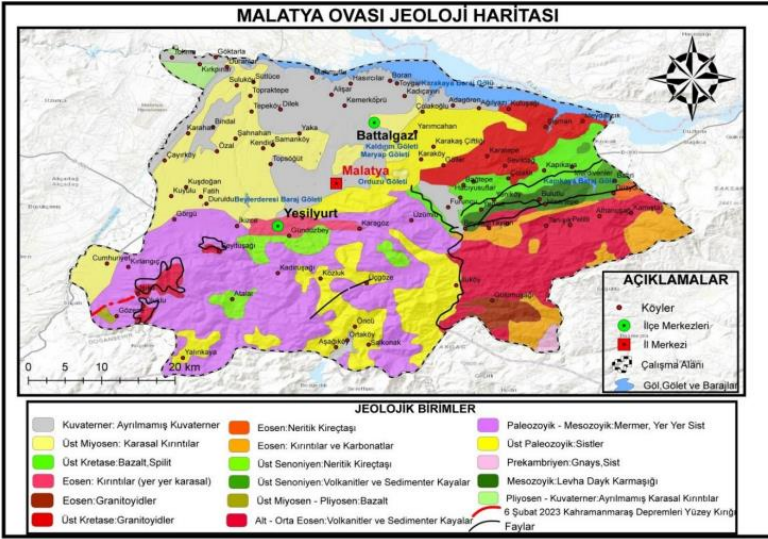
(b)

Şekil 6. Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca depremsellik ve Türkiye'nin başlıca tektonik unsurlarını gösteren harita (AFAD,2023)

### 3.MALATYA İLİNİN ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Malatya il yerleşkesinin oturduğu zeminler incelendiğinde Alp-Orojenez dağ oluşumu esnasında meydana geldiği anlaşılmaktadır. III. zamanın sonu ile IV. Döneminin başlangıcında meydana gelen tektonik hareketlere bağlı olarak il yerleşim bölgesinde kıvrılma ve kırılma plaka hareketleri sonucunda bazı yerler yükselirken ve sıra dağlar oluşurken bazı yerler, bazı alanlar çökmüş ve sonucunda derin düzlükler, ovalar oluşmuştur. Yıllardır süren bu alterasyon ve tektonik davranışlar sonucunda yüksek alanlardaki zeminler akarsuların etkisi ve sedimentler taşınımı ile taşınmış alçak ve derin çukurları doldurmuş, alüvyon alanları meydana getirmiştir. Bundan dolayı Malatya yerleşim alanında III. Zaman diliminden miras kalan yaşlı kalker ve kongremeralar ve volkanik küller oldukça yaygın olarak bulunmaktadır (Ardos, 1995).

Malatya ovası ve etrafındaki dağlara yaş ve litoloji açısından bakıldığında bir mozaik görünümünü andırmaktadır. Bu jeolojik yapılaşma tektonizma etkisi sonucu gelişmiştir. Malatya ovası alüvyonel ve çöküntü sahasına sahiptir. Ve 900 ila 950 m arasında yüksekliğe sahiptir (Ardos, 1995). Malatya ovası zemin özellikleri genel olarak Fırat vadisi etrafında bulunan kuvaterner altere olmamış Kıtasal kırıntılar ile Şahnahan ve Tohma vadileri Etrafında yoğunlukla görülen üst miyosen kıtasal kırıntılarınıdır. Ova kuzeyine doğru çıkıldıkça yeşil ve beyazımsı marnlarla kaplıdır. Malatya ovasının kuzey doğu kesiminde ise andezit lavları ile tabaklanma halinde beyazımsı ve yeşil marnlar hakimdir. Çöküntü alanı olan güney kesimi III. Zaman döneminden miras kalma eoasen kalkerleri ile kaplıdır. Fırat Vadisi ile Malatya ovası arasındaki alan ise IV. Zamandan kalan yoğun alüvyonlarla kaplıdır. Ovanın üzerinde genel olarak kuvaterner ve üst miyosen kıtasal kırıntıları yer almaktadır. Malatya ovasının yerleşim merkezinde bulunan bu tabakaların altında III. zamana ait yaşlı gabbro ve granodiyoritler yer almaktadır (Şekil 7).



Şekil 7.MTA verilerinden yararlanılarak hazırlanmıştır (Tapan, 2023)

## 4.SAHADA GÖZLENEN HASARLARIN NEDENİ

Depremlerde zemin bina etkileşimi ile oluşan titreşimin genliğinin büyümesi olayına yapının rezonansa girmesi olarak tanımlanmaktadır [<http://depem.gov.tr>]. Zemin titreşim frekansı ile yapı öz frekansının aynı doğrultuda etkiyen kuvvete paralel olarak aynı yönde gelişmesi ile titreşimin genliği de artar. Bunun sonucunda yapının salınımı artar ve ivmesi büyür. Deprem esnasında bir yapı rezonansa girerse yapının titreşim genliği büyümesi oranında hasar derecesi de artar.Sahada oluşan hasarlar genel olarak, zemin yapı rezonansı uyumu, taşıma gücü kaybı, sıvılaşma, toptan göçme şeklinde sıklıkla gözlenmiştir.

### 4.1. Zemin Yapı Rezonans Uyumu

Zemin baskın periyodu ile yapının periyodu eşit olduğu kat düzeyinde aynı yönde genliği de artacağı için büyük ivmeler oluşturacaktır. Bu ivmeler yapıya büyük yanıl ötelenmeler oluşturarak ve sarsarak yapıyı hasara uğratacaktır. Zeminin baskın periyodu ile yapının periyodu aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi olması durumunda zemin yapı rezonansı gerçekleşir (Eş.1).

$$T_z = T_y \quad (1)$$

$T_z$ : zemin baskın periyodu,  $T_y$  : yapının periyodu.

#### 4.1. 1. Titreşim Periyodu

Fiziksel olarak her türlü malzemenin bir salınım periyodu vardır. Bu anlamda hem yapıların hemde üzerine inşa edilen zeminlerin bir salınım periyodu vardır. Dolayısı ile zeminlerin ve yapıların baskın periyotları belirlenebilir. Zeminlerin periyodu zeminlerin sıklığına gevşekliğine veya rijitliğine bağlı olarak değişebilir. İnşaat mühendisliği açısından önlem olarak alınması gereken tedbir, yapıların ve üzerine inşa edilen zeminlerin periyotlarının uzaklaştırılması ve çakıştırılmamasıdır. Aksi takdirde zeminin periyodu ile yapının periyodu çakışırsa aynı yönde salınımına girer ve genlik artar büyük ivmeler oluşur. Bu büyük ivmelere bağlı olarak büyük deprem yükleri etkisinde da yapısal hasarlar meydana gelir. Sonuç da yapılar yıkılabilir.

#### 4.1.2. Zemin Hakim Titreşim Periyodu ( $T_0$ )

Kaynaktan üretilen deprem dalgaları genelde tek bir harmonik hareketten oluşmaz. Çoğunlukla hasar meydana getiren dalga grubu 0.1 Hz ile 10 Hz arasında bileşenlere sahiptir. Depremlerin ürettiği dalgalarının frekans içerikleri kaynaktaki kırılmanın yansımalarını ve özelliklerini belirler. Buna bağlı olarak yayıldıkları ortamın özellikleri bunu şekillendirir. Gevşek zemin tabakaları, bu farklı genlik ve frekanslardan oluşan deprem dalgalarının tümüne aynı tepkiyi göstermez. Bu durumda büyütme frekansına bağlıdır, bazı frekanslar daha çok, bazı frekanslar ise daha az büyütülür. Elastik bir ortamın rijit dairevi bir kısmının torsional salınımında torsiyona uğrayan sütunun doğal frekansı (Eş.2);

$$fn = \frac{V_s}{4H} \quad (2)$$

Keçeli (1990) doğal periyot ( $T_0$ ) için aşağıdaki eşitliği önermiştir (Eş.3).

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (3)$$

Bu bağıntı taban kayası üzerinde tek bir tabaka durumu için geçerli olmaktadır. Ancak zemin farklı tabaklardan oluşuyorsa her tabakanın  $V_s$  değeri için ayrı bir  $T_0$  değeri bulunmalı ve 30 metreye kadar olan derinlik için bunlar toplanmalıdır. Zeminlerin hızlarını hesaplamak için çoğunlukla S-dalga hızı 30 metreye kadar göz önüne alınmaktadır. Zira sismik kırılma yönteminde sığ derinliklere (20m-30m) ait hız bilgileri detaylı bir şekilde iyi bir ayrıntı ile elde edilmekte ve zemin sınıflandırılmaktadır. Zemin sınıflamasında kullanılan VS 30 parametresi ilk 30 metredeki tabakalar dikkate alınarak hesaplanır: Farklı zeminler için Zeevaert (1967) aşağıdaki eşitliği önermiştir (Eş.4).

$$T_0 = \sum_{t=1}^n \frac{4H}{V_s} \quad (4)$$

#### 4.1.3. Bina Titreşim Periyodu (T)

Yapıların en önemli dinamik özelliği doğal titreşim periyodudur. Yapı periyodu yapının ağırlığı ve yapının taşıyıcı sisteminin yatay yüklere karşı rijitliğine bağlıdır. Yapıların titreşim periyodu yapının kat adedine ve taşıyıcı sistemine göre değişmektedir. Yapıların doğal titreşim periyotları analitik yöntemlerle hesaplanabilir ancak bu oldukça zor ve zaman alıcı bir işlem olduğundan dolayı bir çok ülkenin deprem yönetmeliklerinde titreşim periyotları ampirik olarak elde edilmektedir. Türkiye için bina titreşim periyodu bağıntısı Bayülke (1978) tarafından geliştirilerek  $T = 0.05 N$  (N: bina katsayısıdır) formülü elde edilmiştir.

Bir çok ülkenin deprem yönetmeliklerinde titreşim periyotları  $T = 0.1-0.07 N$  formüllerle verilmektedir. Türkiye’de genelde betonarme binalar için kullanılan formül aşağıdaki gibidir (Eş.5).

$$T = 0.1 N \quad (5)$$

**Tablo 1.** Bina titreşim periyodu bağıntıları (Bayülke,1978)

<b>Bayülke (1978)</b>	<b><math>T=0.005*N</math></b>
<b>UBC (1985)</b>	<b><math>T=0.1*N</math></b>
<b>NEHR (1994)</b>	<b><math>T=0.1*N</math></b>
<b>USCC (The United State Seismic Code)</b>	<b><math>T= T=0.09N\sqrt{D/H_f}</math></b>

#### 4.1.4. Zemin Büyütmesi

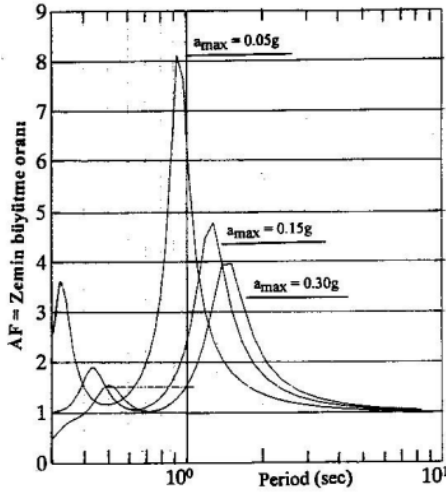
Borcherdt ve arkadaşları (1991) tarafından önerilen Eş.6 kullanılarak yatay spectral amplifikasyon faktörü AHSA aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Şekil 8).

$$AHSA = \frac{600}{V_s} \quad (6)$$

Burada;

AHSA: ortalama yatay spektral büyütme

$V_s$ : 30 m derinlik içerisindeki ortalama kayma dalgası hızı ( m/sn )



**Şekil.8.** Periyot zemin Büyütme ilişkisi (Borcherdt ve arkadaşları, 1991)



## 4.2. Deprem Esnasında Zemin Taşıma Gücü Kaybına Bağlı Hasarlar

Deprem anında zeminlerde taşıma gücü yenilmesi olmaktadır. Depremler deprem esnasında zeminlerde yatay deprem dalgaları zeminlerin içsel sürtünme açısını azaltma yönünde değişikliğe sebep olmaktadır. Gould ve Edinger (1993) dinamik içsel sürtünme açısının değişikliğinin aşağıdaki eşitlikle ile bulunabileceğini önermiştir [Eş.7].

$$\phi' = \phi - \frac{20-N}{15} \text{arc } tg K_d \quad (7)$$

Bunun devamında temel hasarına neden olacak taşıma gücü yetersizliklerini tahmin edebilmek için Terzaghi (1943) taşıma gücü eşitliğinden taşıma gücü değişimi bulunabilmektedir [Eş.8].

$$q_u = K_1 N_c C_{NC} + \gamma D_f N_q + K_2 \gamma_2 N_\gamma \quad (8)$$

K1 ve K2 şekil kat sayıları yine aşağıdaki eşitlik ile bulunabilmektedir [Eş.9,Eş.10].

$$K_1 = 1 + 0.2 \times \frac{B}{L} \quad (9)$$

$$K_2 = 0.5 - 0.1 \times \frac{B}{L} \quad (10)$$

## 4.3. Taban Deprem Yüklenmesine Bağlı Gelişen Hasarlar

Yapıların tabanlarına yatay olarak yapıyı zorlayacak olan deprem yükü gelmektedir. Yapıların tabanlarına gelen yatay kesme kuvvetleri zemin ile yapıların birleşim noktaları olan zemin katlarda etkisini ortaya koymaktadır. Zemin katlarda zeminden yapıya geçiş noktalarında ani gerilme değişimi oluşacağından yatay kesme kuvvetleri kolonları zorlayacaktır. Basitleştirilmiş eş değer deprem hesabına göre, binaya etkiyecek olan toplam eşdeğer taban kesme kuvveti aşağıdaki eşitlikteki (Eşitlik 7) ile belirlenmektedir.

$$V_t = \frac{S_{DS} W}{R_a} \quad (11)$$

$V_t$ : Taban kesme kuvveti,  $S_{DS}$ : Tasarım kısa periyodu,  $W$ : Yapı ağırlığı,  $R_a$ : Deprem yükü azaltma katsayısı.

## 5.SAHADA DEPREME BAĞLI GELİŞEN BİNA HASARLARINA YÖNELİK YAPILAN GÖZLEMLER

Zemin dinamik ve sismik davranışına bağlı yapı zemin rezonansı, zemin büyütmesi, taban kesme kuvveti yenilmesi, zemin taşıma gücü yetersizliği, narin kolon etkisi ve zemin katların girişlerinin yüksek kat olmasına bağlı gelişen ve sahada kayıt altına alınan hasar çeşitleri aşağıda verilmiştir (Şekil 9-Şekil 13).

### 5.1. Sert Zeminlerde Yapı Rezonans Uyuşumu Açısından Yapı Davranışı



(a)

(b)

**Şekil 9** (a). Sert zeminde yüksek periyotlu (Hasarsız yapı)  
(b)Sert zeminde zarar görmüş düşük katlı bina (Hasarlı yapı)

## 5.2. Yumuşak Zeminde Yapı Rezonans Uyuşumu Açısından Yapı Davranışı



(a)



(b)

Şekil 10.(a). Yumuşak zeminde hasarlı bina Şekil 8. (b).Yumuşak zeminde hasarsız bina

## 5.3. Zeminlerde Taşıma Gücü kaybı



Şekil 11. Depremlerde zemin dinamik taşıma gücü kaybına bağlı hasar gelişmesi

#### 5.4.Zemin Büyütmesine Bağlı Gelişen Yapı Hasarları



Şekil 12. Zemin büyütmesine bağlı gelişen yapı hasarları

#### 5.5. Deprem Yüklemesine Bağlı Gelişen Taban Kesme Kuvveti Etkisinde Yapı Hasarları



Şekil 13. Deprem yüklemesine etkisinde taban kesme kuvvetine bağlı gelişen hasarlar

## 6. TOPTAN GÖÇME ŞEKLİNDE HASAR ALMIŞ YAPILAR

Kırsal bölgede bulunan ve mevzuattaki deprem yönetmeliğine göre inşa edilmeyen yapılar ile kesit boyutlarını sağlamayan yapılar bazı yerlerde totan göçmeye maruz kalmıştır. Depreme dayanıklı yapı tasarım ilkelerini göz ardı eden ve asgari tasarım ölçütlerini sağlamayan özellikle zayıf kolon kuvvetli kiriş yaklaşımı ve taşıma gücü ilkelerini dikkate almayan çözüm sistemleri sonucunda toptan göçmeler meydana gelmiştir (Şekil 14-Şekil 16).

Betonarme yapılarda bulunan alan dışı yük oluşturan yapısal olmayan elamanlar ve dolgu duvarları düzlem dışı davranış göstermektedir (Şekil 14-Şekil 16). Ayrıca çatılar ve çatılara monte edilmiş su tanklar, ısıtma aparatları devrilerek hasarlara sebep olmuştur.



**Şekil 14.** Kırsal kesimde az katlı yapılarda gözlemlenen toptan göçme ve ilçe merkezinde sıklıkla rastlanan ağır hasarlı binalar (Yenidoğan, 2024)



**Şekil 15.** Dolgu duvarların düzlem dışı davranışına bağlı yapısal olmayan hasarlar (Yenidoğan, 2024)



Şekil 16.(a), (b). Hatay Kırıkthanda yumuşak kat hasarı ve toptan göçmeye maruz kalan binalar (Yenidoğan, 2024)

## 7. B.A NİNALARDA İNCE VE UZUN İZ DÜŞÜMÜNE BAĞLI HASARLAR

Betonarme binalarda yapısal dayanımı belirleyen aslında depreme dayanıklı yapı tasarım ilkeleridir. Geometrik iz düşümlerine bağlı oluşan deprem yönüne bağlı oluşan yapısal hasarlardır. Mimari tasarım aşamasında yapının dinamik sismik titreşim özellikleri yapının geometrik iz düşüme boyutlarına bağlıdır. Hatay’da binalar ince ve uzun olarak tasarlanmıştır. Caddeye paralel uzun kenarlı içe doğru ise kısa kenarlı geometrik şeklindedir. Binalar genel olarak çok katlıdır. Bina girişlerinde rijitliği az olan asma katlar bulunmaktadır. Geometrik düzensizlik olarak bilinen denilen L tipinde veya dikdörtgen şeklindeki yapılarda ince uzun iz düşümüne bağlı oluşan hasarlar oldukça fazladır (Şekil 17), (Korkmaz,2023).



Şekil 17. Planda ince ve uzun izdüşüme sahip yıkılan ve hasar gören binalar (Korkmaz,2023)

## 8. DEPREM SONRASI YAPILAN GEOTEKNİK DEĞERLENDİRMELER

Zemin sıvılaşması daha çok Adıyaman Gölbaşı, İskendurun'da kaydedilmiştir. Bazı lokasyonlarda kum kaynaması şeklinde ortaya çıkmıştır. Gölbaşında zeminlerin yumuşak olması nedeni ile yapı temellerinde rijit dönmeler şeklinde yapısal hasarlar ortaya çıktığı görülmüştür. Kaya apartmanı adındaki binada rijit dönmeler etkisi ile bir binanın diğer bina üzerine devrilererek geoteknik deprem mühendisliği açısından önemli bir sembol oluşturmuştur (Şekil 14). Bölgede bulunan binaların bir çoğunda zeminden kaynaklanan oturma ve dönmeler sonucunda hasarlar meydana gelmiştir. Yine bu bölgede zemin yapı rezonansına bağlı yapı hasarları ve zemin büyütmesine bağlı yapısal hasarlar gözlenmiştir (Şekil 18) (Korkmaz,2023).



**Şekil 18** - Adıyaman ilinde yerel zemin koşullarına bağlı ortaya çıkan hasar ve oturmalar(Anadolu Ajansı) (Korkmaz,2023)

### SONUÇ

Malatya ilinde hasar tespit çalışmalarında çok farklı yapısal hasarlara rastlanılmıştır. Bu hasarlar; projeye bağlı hasarlar, saplama kırılganlar , uygulama hataları, beton döküm esansında segregasyon hataları olmak üzere belli başlı olan hatalardır. Ayrıca zemin dağılımı göz önüne alındığında zemin yapı uyumuna bağlı gelişen rezonans

çakışması görülmüştür. Halbuki yumuşak zeminlerde zemin periyodu uzun olmaktadır.

Rezonasdan kaçınmak için az katlı yapı yapmak gerekirse tam tersi yüksek yapılar yapılmıştır. Bostan başı denilen yerde yumuşak zemin hakimken az katlı yapı yapılması gerekirken çok katlı yapı yapılmıştır ve rezonans uyuşumuna bağlı yapı hasarı oluşmuştur.

Yine sert zeminlerde zemin periyodu kısa olur bunu dengelemek için çok katlı yapı yapılması gerekirken az katlı yapı yapılmıştır. Ancak az katlı yapı ile sert zemin öz frekanslar uyuşuma girerek yapılar hasar görmüştür. Yüksek kata bağlı olarak zemin katlarda depremden kaynaklı şiddetli taban kesme kuvvetleri oluşarak perde ve kolonları zorlayarak hasar vermiştir. Ayrıca zemin büyütmesine bağlı gelişen yapı hasarları da oluşmuştur.

Kuvvetli yer hareketi merkezlerinden alınan özellikle Kaharaman Maraş depreminde elde edilen sismik zemin davranışı sonucu çift yönlü yüzeysel yırtılmalar gözlenmiştir. Türkiye AFAD deprem haritalarından elde edilen tasarım yelpazesi (spektrum) ve AFAD'ın merkezlerinden alınan kayıtlar incelendiğinde ve sismik hareketlilik karşılaştırıldığında AFAD web. sayfasından alınan yatay deprem ivmesinin nerdeyse (2/3) oranında artış gösterdiği kayıt edilmiştir.

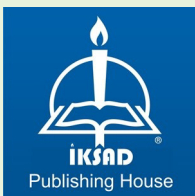


## KAYNAKÇA

- AFAD. (2023). 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 depremlerine ilişkin ön değerlendirme raporu. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.
- Ardos, M. (1995). Türkiye ovalarının jeomorfolojisi (2. Baskı, Cilt 1). Çantay Kitabevi. s. 155-156.
- Bayülke, N.1978. Tuğla yığma yapıların depremlerdeki davranışları. Deprem araştırma enstitüsü bülteni, 22, 26-42.
- Borcherdt, R.D., Wentworth,C.M., Janssen,A., Fumal,T. & Gibbs,J. (1991) “Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region”, Proc. 4th Inter. Conf. On Seismic Zonation, (3) pp :545-552.
- MTA. Genel müdürlüğü ve Ankara Üniversitesi (A.U).1999, 17 Ağustos 1999 Depremi sonrası Düzce (Bolu) İlçesi Alternatif Yerleşim alanlarının Jeolojik İncelenmesi. TUBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu Raporu 59s.
- Keçeli, A. 1990. Sismik Yöntemlerle Müsaade Edilebilir Dinamik Zemin Taşıma Kapasitesi ve Oturmasının Saptanması, 4 (2), 83-92.
- Krinitzsky, E. L., Gould, J. P., and Edinger, P. H. 1993. “Fundamentals Of Earthquake Resistant Construction”. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Korkmaz, H.H.202.3 Kahramanmaraş Depreminde Tasarım atalarının Deprem Hasarına Etkisi, DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-57-3.ch18.
- Şengör A.M.C., Yılmaz Y. (1981). “Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach”, Tectonophysics, 75: 181-241.
- Ramazan Demirtaş ve Rüçhan Yılmaz (1996) ” Türkiye'nin Sismotektoniği” Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Sismoloji Bölümü, Ankara.

- Tapan, İ.(2023). Kahramanmaraş Merkezli Depremlerin (6 Şubat 2023) Malatya Ovası'ndaki Yerleşmelere Etkisi, Journal of Turkish Studies · January 2024.eISSN:1308-2140.
- Terzaghi, K. (1943).“Theoretical Soil Mechanics” Wiley, New York.
- Zeevaert, L. 1967. Free vibration torsion tests to determine the shear modulus of elasticity of soils. Proc. 3rd panam. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Caracas, 1, 111-138.
- Yenidoğan, 6 Şubat .2024. Depremleri ve Saha Gözlemlerine Dayalı Bina Hasarları Hakkında Ön Değerlendirme, C. Turkish Journal of Civil Engineering, 2024 75-113, Yazı 782, Araştırma Makalesi
- İnternet Kaynağı  
<https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/kesfedilen-maden-sahalari>  
<https://depem.afad.gov.t>





**ISBN: 978-625-378-047-0**