

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar



EDİTÖR **DOÇ. DR. ENGİN ÖZDEMİR**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-69-9

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA
ULUSLARARASI
DERLEME, ARAŞTIRMA
VE ÇALIŞMALAR

Editör **Doç. Dr. Engin Özdemir**

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

KÜTAHYA İLİ MERKEZ İLÇESİ PİRLER, BALIKLI VE SARAY MAHALLELERİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ahmet ORHAN, Evren SEYREK—1

Bölüm 2

TEMEL ÇEŞİTLERİ VE OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Yasin DUYSAK, Onur YAVAN—23

Bölüm 3

GEOSENTETİK İLE KUŞATILMIŞ KOLON SİSTEMLERİNİN BALİNA ALGORİTMASIYLA OPTİMUM TASARIMI

Mehmet Fatih YAZICI, Soner UZUNDURUKAN—41

Bölüm 4

ÇİFT AĞ KONTROL ALANI YÖNTEMİ: TEORİ, FORMÜLASYON VE YAPISAL MEKANİK UYGULAMALARI

Gökhan GÜÇLÜ—65

Bölüm 5

TÜRKİYE'DE HİDROELEKTRİK ENERJİNİN YERİ VE ÖNEMİ

Hüseyin Yıldırım DALKILIÇ—95

Bölüm 6

DERİN TEMEL SİSTEMLERİ: KAZIK TEMELLER VE HESAPLAMA İLKELERİ

Damla KÜÇÜKAY KAYAALP, Hüseyin Suha AKSOY —109

Bölüm 7

FARKLI UÇUCU KÜL İKAMELİ BETONARME KOLONLARIN KLOR KAYNAKLI KOROZYONA BAĞLI SERVİS ÖMÜRLERİNİN LIFE 365 MODELİ İLE FARKLI BÖLGELERDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Seda AKDUMAN —131

Bölüm 8

EĞRİ EKSENLİ ÇUBUKLAR VE KULLANIM ALANLARI

Mustafa Haluk SARAÇOĞLU —147

Bölüm 9

ZEMİN BÜYÜTMESİNDE BOYUT ETKİSİNİN TBDY 2018'E GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF DIMENSIONAL EFFECTS ON SITE AMPLIFICATION ACCORDING TO TBDY 2018

Utku TUNA, Ersin GÜLER, Kamil Bekir AFACAN —161

Bölüm 10

27 EKİM 2025 BALIKESİR SINDIRGI (MW = 6.1) DEPREMİ YER HAREKETİ KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Evren SEYREK —181

Bölüm 11

ESNEK VE RİJİT KARAYOLU ÜSTYAPILARININ TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

Yaşar VİTOŞOĞLU, Tayfun ŞENGÜL —195

Bölüm 12

DELİKLİ PLAKLARIN KAPSAMLI DEĞERLENDİRİLMESİ: TARİHÇE, UYGULAMA ALANLARI, GEOMETRİ VE GÜNCEL ARAŞTIRMA EĞİLİMLERİ

Uğur ALBAYRAK, Mustafa Haluk SARAÇOĞLU —235

Bölüm 13

YAPISAL TASARIM HATALI BETONARME BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ İNCELENMESİ: OSMANİYE ÖRNEĞİ

Muhammed Emin IŞIK, Nuri ERDEM —251

Bölüm 14

KARAYOLU YÜZEYLERİNDE AKIŞA GEÇEN YAĞMUR SULARININ KİRLETİCİLERİNİN AZALTIMINA GENEL BAKIŞ

İhsan GÜZEL, Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU —271

Bölüm 15

YAPI SEKTÖRÜNDE YENİLİKÇİ VE FONKSİYONEL MALZEMELER

Aylin AKYILDIZ—295

Bölüm 16

AFŞİN-ELBİSTAN TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜL VE YAN ÜRÜNLERİN İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

MUHAMMET ÇINAR, ZAFER ÖZGEN—309

//

Bölüm 1

KÜTAHYA İLİ MERKEZ İLÇESİ PİRLER, BALIKLI VE SARAY MAHALLELERİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ahmet ORHAN¹, Evren SEYREK²

1 Dr.Öğr.Üyesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye, e-mail: ahmet.orhan@nevsehir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-8119-2216.

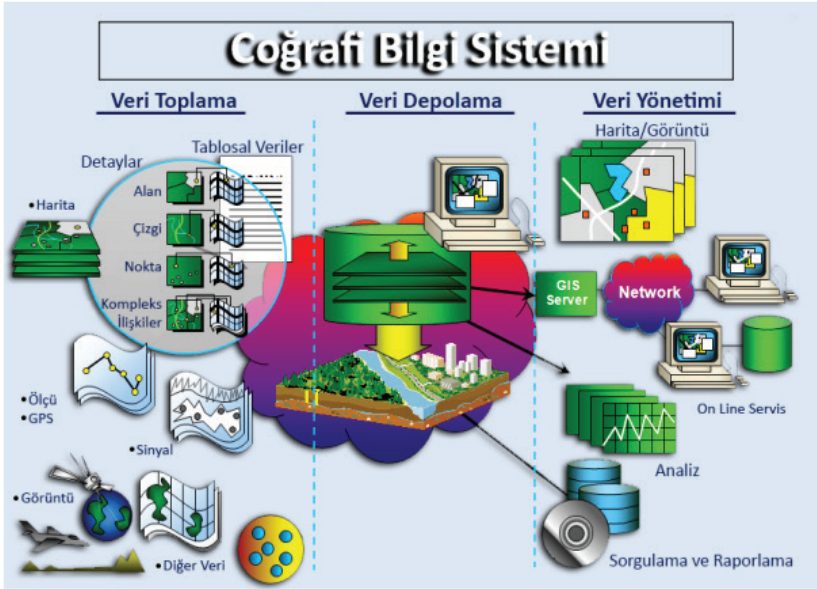
2 Doç.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, e-mail: evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4373-6723.

1.GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği dalı geçmişten günümüze oldukça gelişme göstermiştir. Özellikle de istenmeyen can ve mal kayıplarına neden olan büyük depremlerin etkisinin farklılaşmasına neden olan yerel zemin koşullarının etkisinin anlaşılmasından sonra bu mühendislik dalının önemi giderek artmıştır. Buna paralel olarak bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin kullanımı da gelişmiş ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla önemli bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat, jeoloji ve jeofizik gibi yer bilimleri alanında geniş kullanım alanına sahip olan CBS coğrafi konumu olan nesne ve olaylara ait tüm verilerin toplanmasının ve depolanmasının yanı sıra güncelleştirilmesini, sorgulanmasını, sentezlenmesini ve yeni seçenekler üretilmesini çok kısa sürede yapabilecek nitelikte bir teknolojik sistemler bütünüdür. Coğrafi Bilgi Sistemi programları birçok alanda ve kurumda kullanılabilir. Bunların başında; belediyeler, mühendislik uygulamaları, ormancılık, tarım, çevre, hidroloji ve su kıtlığı, ulaşım ve navigasyon sistemlerinde, planlama, arkeoloji, askeri uygulamalarda vb alanlarda kullanılabilir.

Özellikle kentlerin yerleşim alanları için imar planları oluşturulurken ayrıntılı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların temelini ilgili alanın geoteknik özellikleri belirler. Yapılacak olan tüm bu çalışmaların kapsamı, temel birimlerine ait geo-mühendislik özelliklerinin belirlendiği ayrıntılı çalışmaları oluşturur. Bu çalışmalarda, ilgili alanın temel zeminine ait dayanım ve deformasyon özellikleri belirlenir ve elde edilen bilgiler bölgenin jeolojisiyle yorumlanarak planlar oluşturulmaktadır.

Coğrafi Bilgi Sistemlerini kısa adıyla CBS'yi, yeryüzüne ait bilgileri belirli bir amaca yönelik olarak toplama, bilgisayar ortamında depolama, güncelleştirme, kontrol etme, analiz etme ve görüntüleme gibi işlemlere olanak sağlayan bir bilgisayar sistemi olarak tanımlamak mümkündür. Yeryüzüne ait bilgiler genellikle coğrafi koordinatları referans aldıklarından CBS, harita sistemi olarak da algılanmaktadır. Başka bir deyişle, Konumsal Bilgi Sistemleri içerisinde yer alan bilgiler, yalnızca konumsal olarak ifade edilen bilgileri içermeyip, bu konumsal bilgileri veya sembollerini açıklayan öznitelik bilgiler de CBS olarak tanımlanır (İnan vd. 2017). CBS'nin çalışma şeması Şekil 1.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 1.1. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin çalışma şeması (İnan, vd. 2017)

Veri tabanı yönetim sistemlerinin bilgi paylaşımındaki önemi, harita destekli uygulamalarla daha fazla ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle temel altlığı çeşitli ölçeklerde harita olan CBS, harita destekli uygulamalardan mümkün olan en iyi şekilde yararlanmayı ve analiz etmeyi sağlamaktadır. Harita üzerindeki bilgiler grafiksel olarak ifade edilebildiğinden konuma dayalı grafik ve grafik olmayan nitelikleri açıklayan bilgilerin bir bütün içinde aynı sistemde toplanıp analiz edilmesi gereği CBS'nin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bilgilerin tek bir sistem içerisinde toplanıp, depolanması, modellenerek analiz edilmesi, eldeki bilgilere hızlı ve güvenli bir ulaşımı sağlayacağından sistemin etkinliği ve güvenilirliği daha fazla olacaktır (İnan, vd. 2017).

Özellikle bir alanın geoteknik değerlendirmelerinin yapılmasının, kapsamlı bir yüzey/yeraltı modeli oluşturmak için optimum sayıda veri noktası gerektirdiğini ve CBS'nin geoteknik araştırmalar için büyük miktarda verinin analiz edilmesi/haritalanması için kullanılabileceği ifade edilmiştir (Mhaske ve Choudhury, 2011; Singh vd. 2018).

Yeraltı koşulları, geoteknik yapı ve tesislerin analiz ve tasarımında önemli bir rol oynar. Zemin profilinin niteliği ve çeşitliliği, özellikleriyle birlikte, temellerin, dolguların ve yeraltı tesislerinin tasarımı ve inşası için jeoteknik tasarım parametrelerinin belirlenmesinde büyük önem taşır. Günümüzde, sürdürülebilir kalkınma ve sürekli çevre koruma konu-

sundaki genel beklenti, yeraltı koşullarının daha kapsamlı ve nicel değerlendirilmelerine olan talebi de artırmaktadır (Turner, 2006).

Kapsamlı jeoloji bilgisi kentsel alan, şehir planlaması, doğal tehlike ve risk değerlendirmesi için rasyonel bir temel sağlar. Kentsel planlama ve tehlike çalışmalarındaki ilk ve en önemli adım, kentsel alanların coğrafi yeraltı bilgilerini belirlemektir (Azarafza ve Ghazifard 2016). Ayrıca, yerel saha koşulları hakkındaki bilgi, yerel zemin koşullarının zemin araştırma programının planlanmasına ve yürütülmesine yardımcı olur. Yeraltıyla ilgili bilgiler, geleneksel sondaj yöntemleri veya modern fizik yöntemleri veya her ikisinin bir kombinasyonu kullanılarak toplanabilir. Ancak, düzenlenmemiş yeraltı bilgilerinin kullanımındaki temel zorluklar, verilere genellikle kolayca erişilememesi, bol miktarda bulunması, heterojen olması ve içsel belirsizliklerdir. Uygulamada, geoteknik mühendisleri, geleneksel saha karakterizasyonundaki kısıtlamalar nedeniyle bir bölgenin sınırlı mühendislik verilerinden elde edilen tasarım parametrelerini kullanarak yapıları ve tesisleri tasarlamaya çalışırlar. Bu nedenle, belirli bir sahanın altındaki toprağın stratigrafisini ve ilgili özelliklerini belirlemek için bu verilerin toplanması, doğrulanması ve birleşik bir mekansal veritabanında depolanması gerekir (Priya ve Dodagoudar, 2018).

Geoteknik mühendisliği ile ilgili CBS tabanlı çalışmalar son 15 yıldır dikkati çekmektedir (Rackwitz, 2000; Hack, vd. 2006; Marache, vd. 2009, Orhan ve Tosun, 2010).

Bu çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı olarak çalışan MapInfo 8.0 programı kullanılmış ve Kütahya ili, Merkez ilçesindeki Pırlar, Balıklı, Saray Mahallelerinin bazı geoteknik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, bölgeye ait toplam derinliği 470 m olan 47 adet sondaj verisi ve 242 adet SPT deneyi dikkate alınmıştır. Çalışma sonunda zemin sınıfının ve SPT-N değerlerinin değişimini gösteren sekiz adet zon haritası oluşturulmuştur. Ayrıca alanda 2 farkı doğrultuda kesit hattı belirlenip çizilmiş ve oluşturulan haritalar ile kesitler karşılaştırılarak ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Coğrafi Özellikler

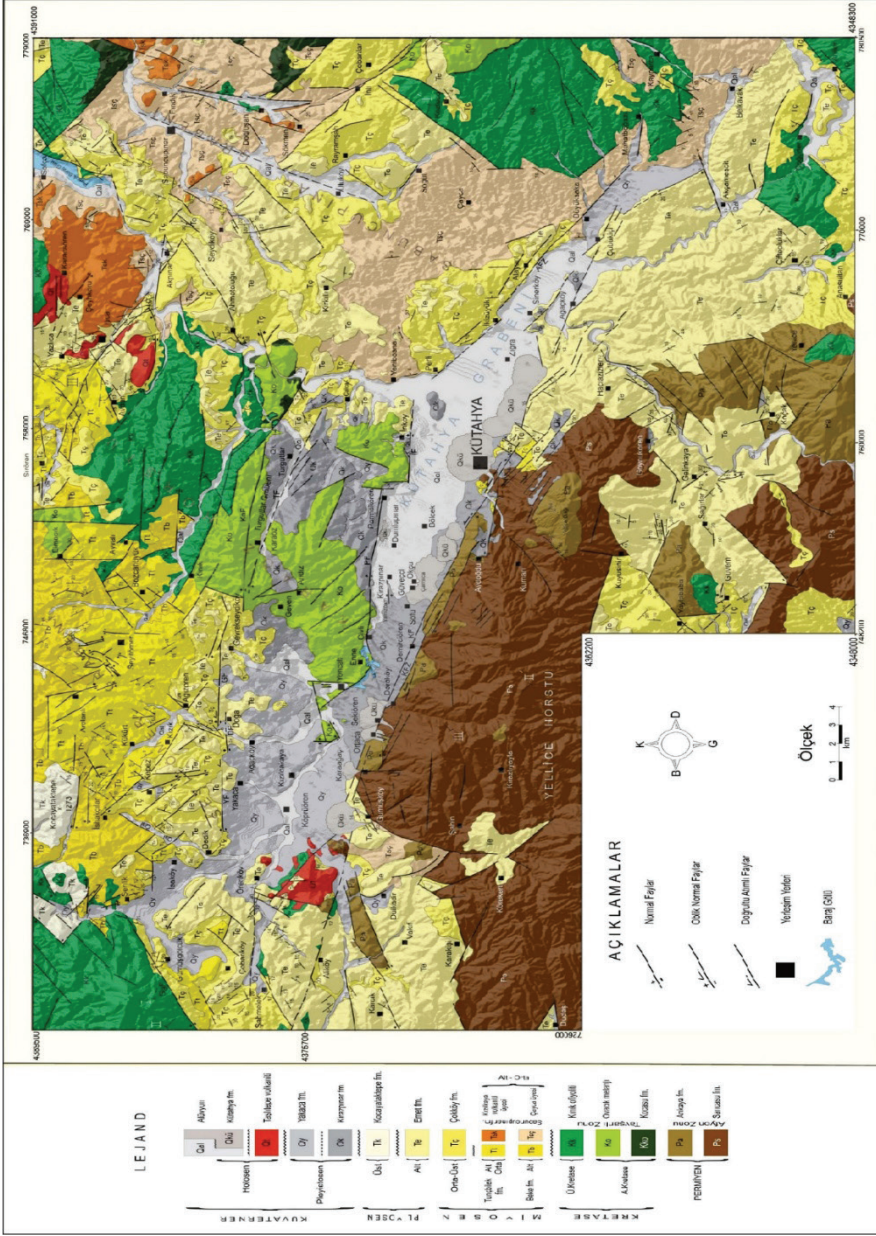
Kütahya İli 38° 70' ve 39° 80' kuzey enlemleri ile 29° 00' ve 30° 30' doğu boylamları arasında kalmaktadır. İl merkezinin denizden yüksekliği yaklaşık 969 m.'dir. Kütahya ve çevresi, İç Anadolu Bölgesinden ve Güney Marmara havzalarından Ege Bölgesine, ortalama yüksekliği 1200 m. olan yaylalarıyla bir geçiş bölgesini oluşturur. Kütahya ilinin yerleşimi kuzeybatı-güneydoğu doğrultusu boyunca olup Kütahya ovasına pa-

rallellik gösterir. Kütahya merkezinin hemen güneyinde bulunan Yellice Dağı ve Gümüş Dağı da kuzeybatı-güney doğu doğrultusunda uzanır. Çalışma alanının kuzeybatı kesiminde, Kütahya, Köprüören ve Tavşanlı ovalarını güneyden sınırlayan Yeşildağ en önemli yükseltiyi oluşturur. Kütahya'nın doğusunda ise Türkmen dağı yer almaktadır.

Yıllık yağış miktarı ortalama 600-1100 mm olan Kütahya bitki örtüsü bakımından İç Anadolu, Ege ve Marmara bölgelerinin özelliğini taşır. Bölgenin hâkim bitki topluluğu kara ikliminin bitkilerin olmasına rağmen, vâdi içlerinde, Karadeniz'in nemli tesirlerine açık kesimlerinde, bilhassa dağlık bölgelerinin kuzey meyillerinde deniz bitki topluluğu, Ege ve Marmara yoluyla Akdeniz tesirinin görüldüğü kesimlerde Akdeniz bitki örtüsü yer almaktadır.

2.2. Jeolojik Yapı ve Stratigrafi

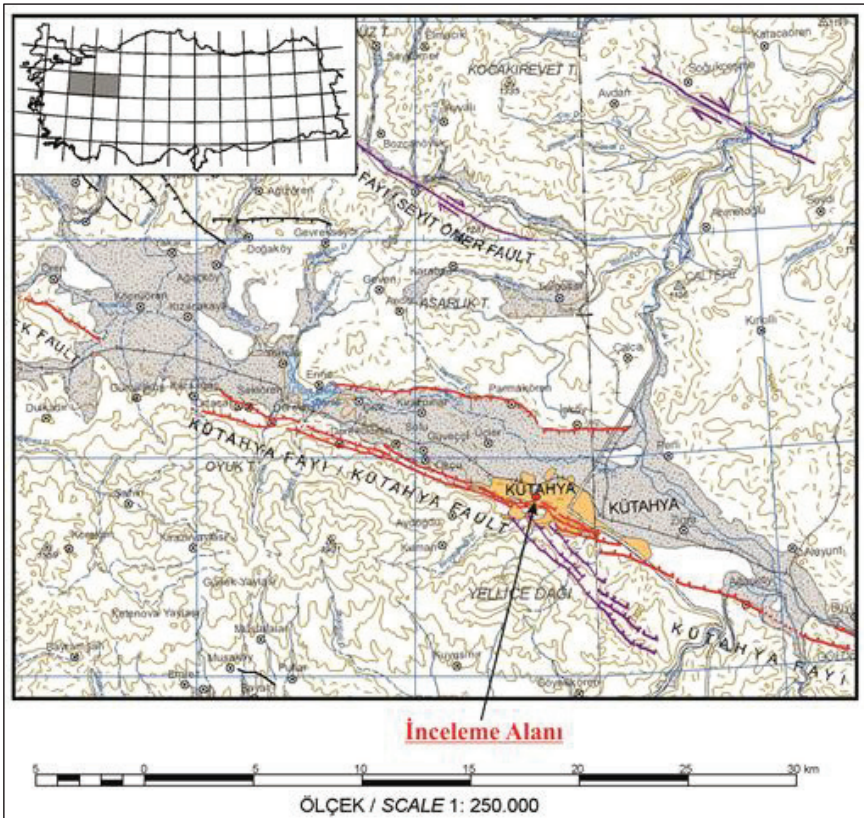
Bölgede daha önce birçok araştırmacı bölgesel ölçekte farklı amaçlara yönelik jeolojik haritalamalar ve çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda çoğunlukla Kuvaterner öncesi birimler üzerinde durulmuştur. Pliyosen-Kuvaterner aralığında Kütahya havzası içerisinde ve kenarında oluşmuş birimler önceki çalışmalarda Neotektonik dönem birimleri olarak adlandırılmıştır (Koçyiğit ve Bozkurt, 1997). Kütahya ve çevresinde şist ve mermerden oluşan metamorfik birimler ve bunların üzerine tektonik dokanakla yerleşmiş ofiyolitik kayalar temel birimleri oluşturmaktadır. Pliyosen yaşlı kayalar genellikle karasal kırıntılılardan oluşmaktadır. Bu birimler çalışma alanında özellikle Kütahya şehir merkezi batısında havzanın güneyini sınırlayan yükselti yamaçlarında gözlenmekte ve havza merkezine kadar geniş bir yayılım göstermektedir. Kütahya Havzası'nın oluşum sırası ve sonrasında gelişen daha genç flüviyal çökeller ise havza dolgusu olarak bulunmaktadır (Gürer vd. 2005). Kuvaterner yaşlı bu çökeller inceleme alanının en yaygın birimlerindedir. Bu birimlerin önemli yüzlekleri Kütahya şehir merkezi kuzeyinde Porsuk Çayı düzlüklerinde geniş alanlar kaplamaktadır. Kuvaterner yaşlı alüvyon yelpazeleri ise, havza güneyinde özellikle fayların sınırladığı alanlarda yaygın olarak gözlenen birimlerdir. Bölge ve çevresinin genel jeolojisi Şekil 2.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.1. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Özburan, 2009)

2.3. Tektonik Unsurlar

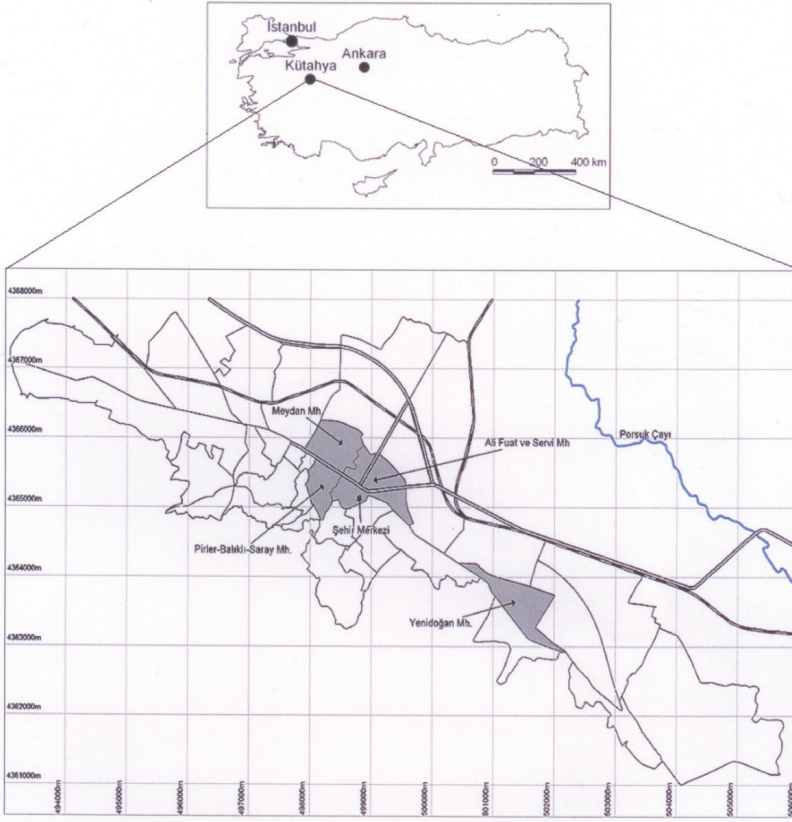
İnceleme alanının mesafe açısından en önemli fayı olan Kütahya Fayı yaklaşık 30km uzunlukta K50-60B genel gidişli, eğim atımlı normal fay zonu karakterindedir (Şekil 2.2). Fay dört parçadan oluşmaktadır. Kütahya Fayının en batıdaki parçası (1.Parçası) Triyas yaşlı metamorfikler ile Neojen yaşlı volkanoklastik birimler arasında dokanak oluşturmaktadır. Kütahya Fayının 2 nolu parçası genel olarak Neojen yaşlı birimler içerisinde; kısmen de Neojen yaşlı birimler ile Kuvaterner yaşlı birimlerin dokanağı boyunca uzanmaktadır. Kütahya Fayının 3. ve 4 parçaları ise Neojen yaşlı birimler içerisinde yer almaktadır. Fayın sıçramalı 4 ayrı fay parçasından oluşması zon genişliğinin yaklaşık 1.5 km ye erişmesine neden olmuştur. Fay parçalarının uzunlukları ise yaklaşık 6km ile 10km arasında değişmektedir. Kütahya Fayı genel olarak Neojen yaşlı birimler içerisinde uzanmaktadır. Kısmen de Neojen yaşlı birimler ile Kuvaterner yaşlı birimler arasında dokanak oluşturması nedeniyle neotektonik açıdan “Kütahya Fayı” Potansiyel Diri Fay olarak düşünülmektedir.



Şekil 2.2. Çalışma alanını etkileyen fay segmentleri (MTA, 2013)

3. CBS TABANLI MODELLEMELER

Çalışma alanı olarak dikkate alınan Pirlar, Balıklı ve Saray Mahallelerinin farklı lokasyonları için Sönmez Mühendislik tarafından hazırlanmış olan Zemin Etüt raporları dikkate alınmış ve gerçekleştirilen Standart Penetrasyon Deneyine (SPT) sırasında alınmış olan örselenmiş zemin numuneleri değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Dikkate alınan mahallelerin konumu Şekil 3.1’de değerlendirmeye alınan deneysel çalışma özeti ise Tablo 3.1’de paylaşılmıştır.

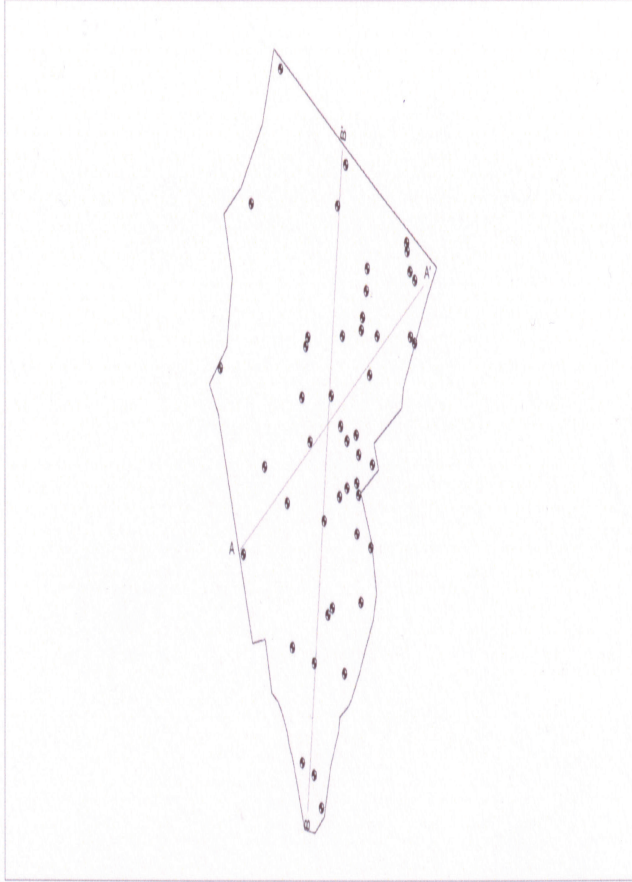


Şekil 3.1. Çalışma alanı yer buldur haritası

Tablo 3.1. *Deneyisel çalışma özeti*

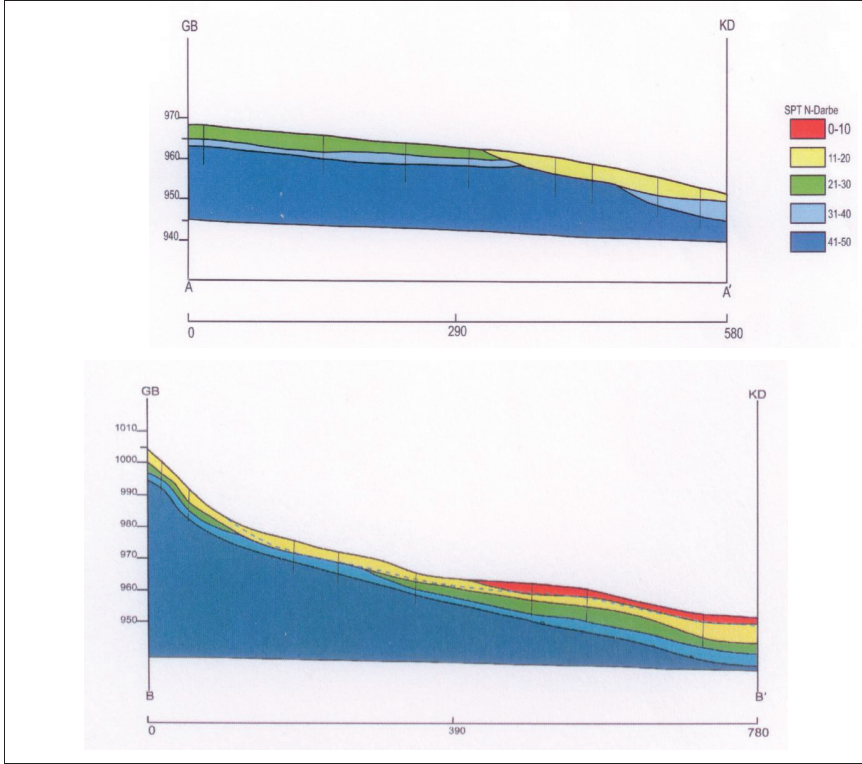
Çalışma	Birim	Sayı
Sondaj sayısı	adet	47
Sondaj derinliği	m	470
SPT deneyi	adet	242

Tablo 3.1’de detayları verilen sondaj kuyularının lokasyonları ve çizilen kesit hatları ise Şekil 3.2’de sunulmaktadır. Kesit hatları çizilirken genel bir değerlendirmeye olanak sağlayacak şekilde seçildiği özellikle belirtilmelidir.

**Şekil 3.2.** *Sondaj lokasyonları ve kesit hatları*

Şekil 3.3 de verilen ve kesit boyunca SPT değerlerinin değişimin gösteren görsel incelendiğinde yüze yakın sığ kesimlerde oldukça düşük darbe sayıları gözlenmiştir (B-B' kesiti). Yüzeyden itibaren 3-4 m derinde SPT-N sayısının 20-30 arasında değiştiği söylenebilir. Yüzeyden itibaren 4-5 m derinde ise SPT-N sayılarının $N > 40$ olduğu anlaşılmaktadır.

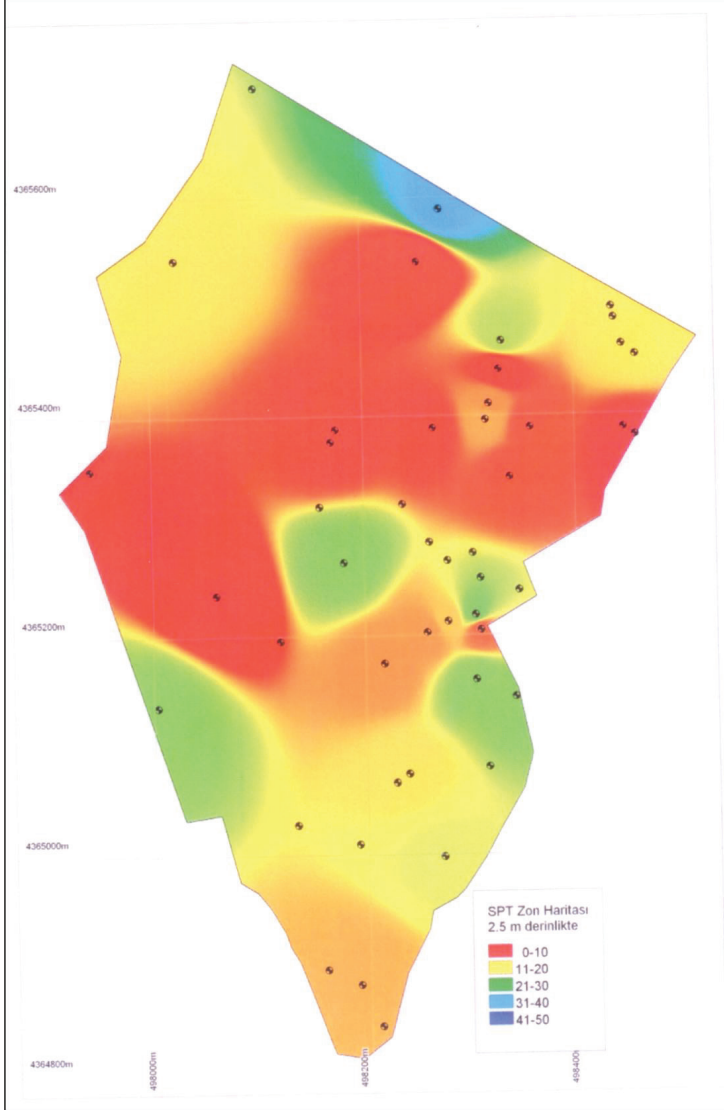
Şekil 3.4 ile Şekil 3.7 arasında verilen SPT-N zon haritalarına göre, 2.5 m seviyesi için oldukça düşük SPT-N sayıları dikkati çekmektedir ($N < 10$). Derinliğin artmasıyla birlikte genel olarak SPT-N sayısı artmaktadır. Yüzeyden 4-5 m aşağıda kumlu ve çakıllı seviyelerin etkisi ile birlikte darbe sayıları artmakta, daha da derin seviyelerde ise SPT-N değerinin $N > 40$ seviyelerine erişen lokasyonların olduğu anlaşılmaktadır. Yüzeyden 9.5 m derinlikte ise incelenen alanın %60'ından daha fazla bir alanda $N > 40$ değeri gözlenmektedir.



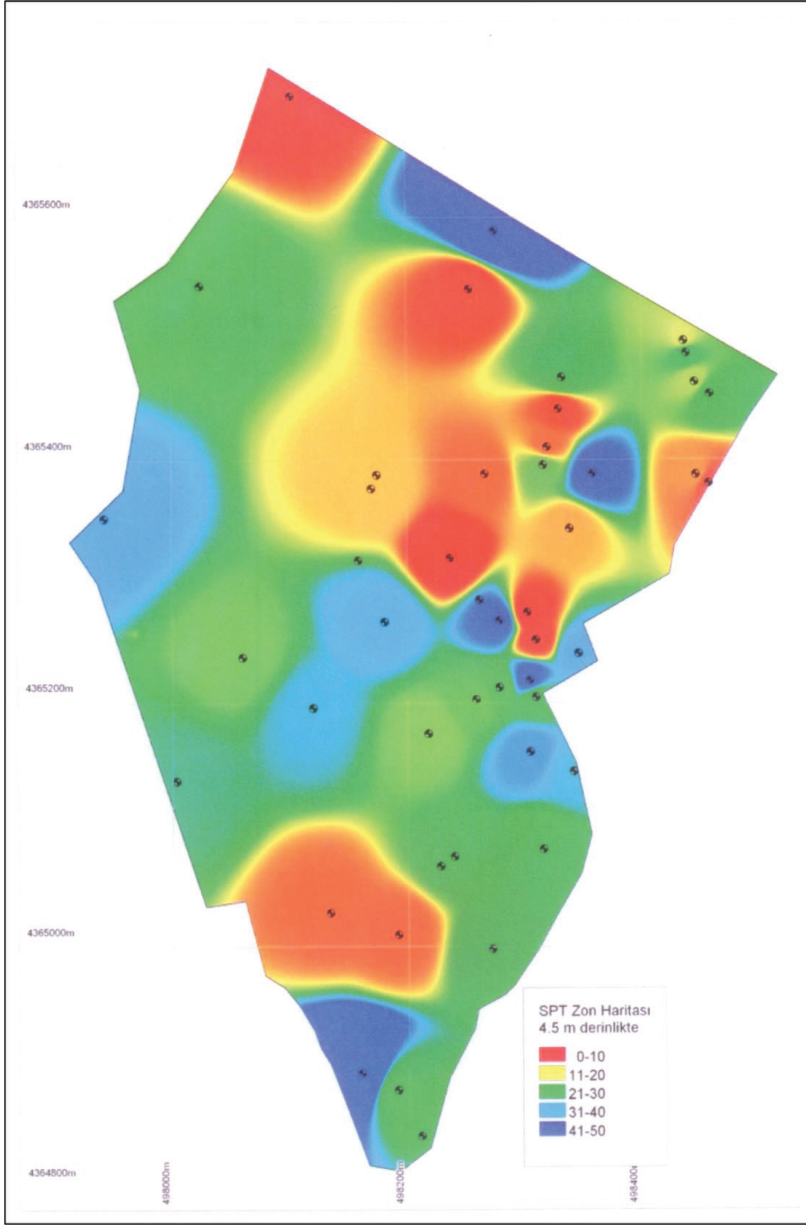
Şekil 3.3. İnceleme alanında SPT-N değerlerinin değişimi (üst panel A-A', alt panel B-B' kesiti)

İnceleme alanında bir diğer değerlendirme ise zemin sınıfı için yapılmıştır. SPT deneyi sırasında alınan örnekler üzerinde tanımlama deneyleri yapılmış ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflama sistemine göre örnekler

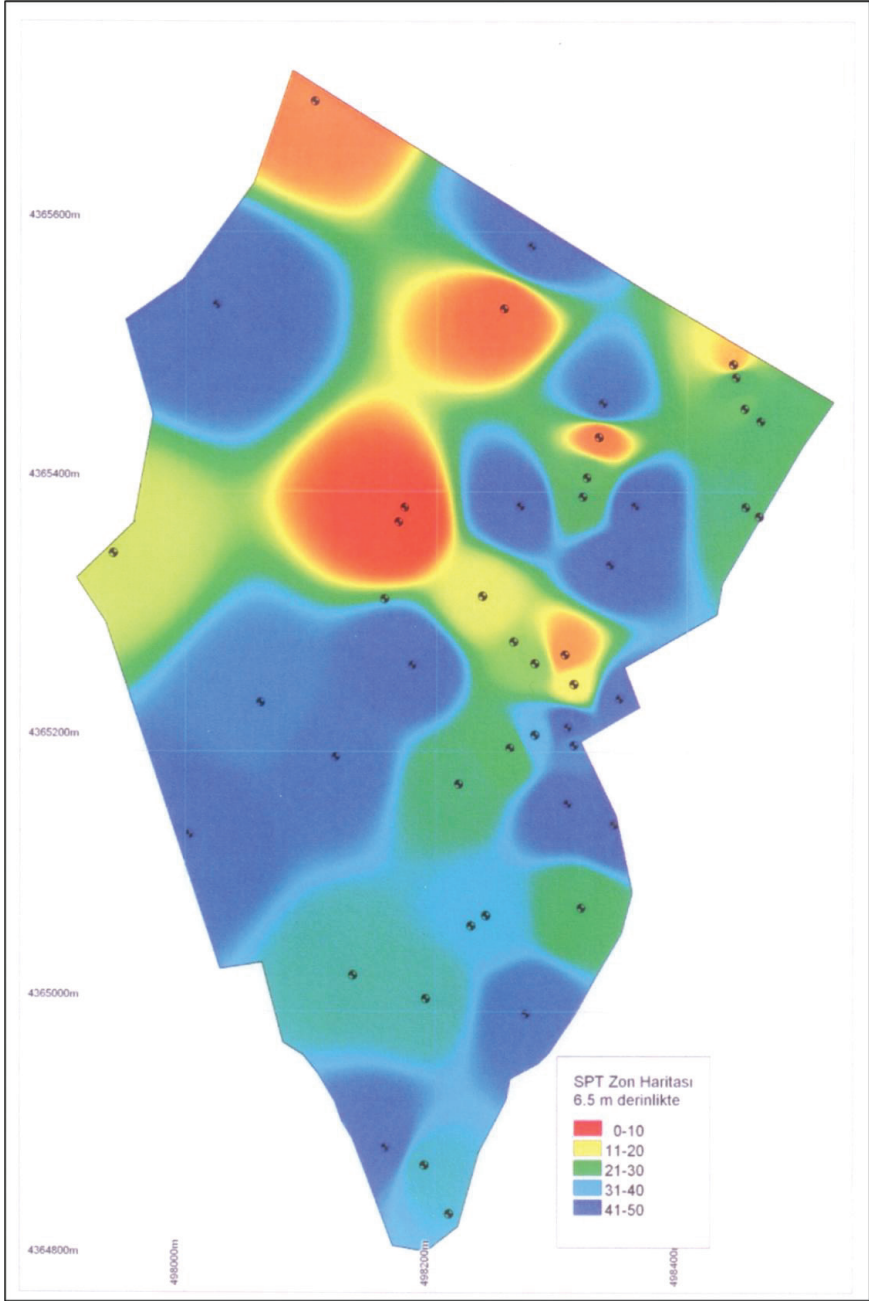
sınıflandırılmıştır. Şekil 3.8’de inceleme alanını büyük oranda temsil edecek iki kesit alınmış ve bunların üzerinde zemin sınıflarının değişimi incelenmiştir. İnceleme alanının yüzeye yakın kesimlerinde yer yer düşük plastisiteli kil-silt zeminler dikkati çekerken, Yüzeyden 4-5 m derine inildiğinde killi-siltli seviyelerin yerini kumlu-çakıllı seviyeler almaktadır. 6-7 m derinlikten itibaren ise kaya birimleri ve inceleme alanının güney batısında alüvyal fan görülmüştür.



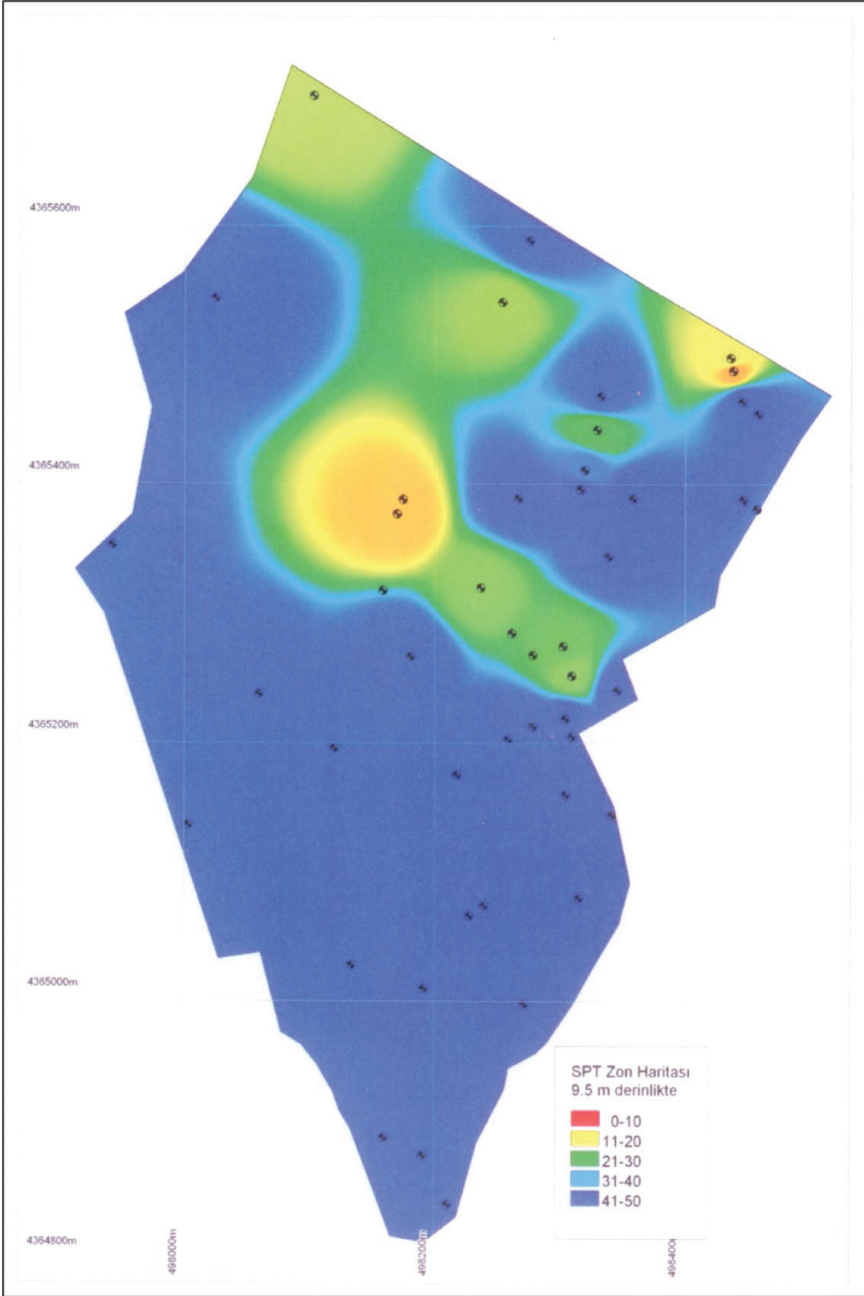
Şekil 3.4. 2.5 m derinlik için SPT-N zon haritası



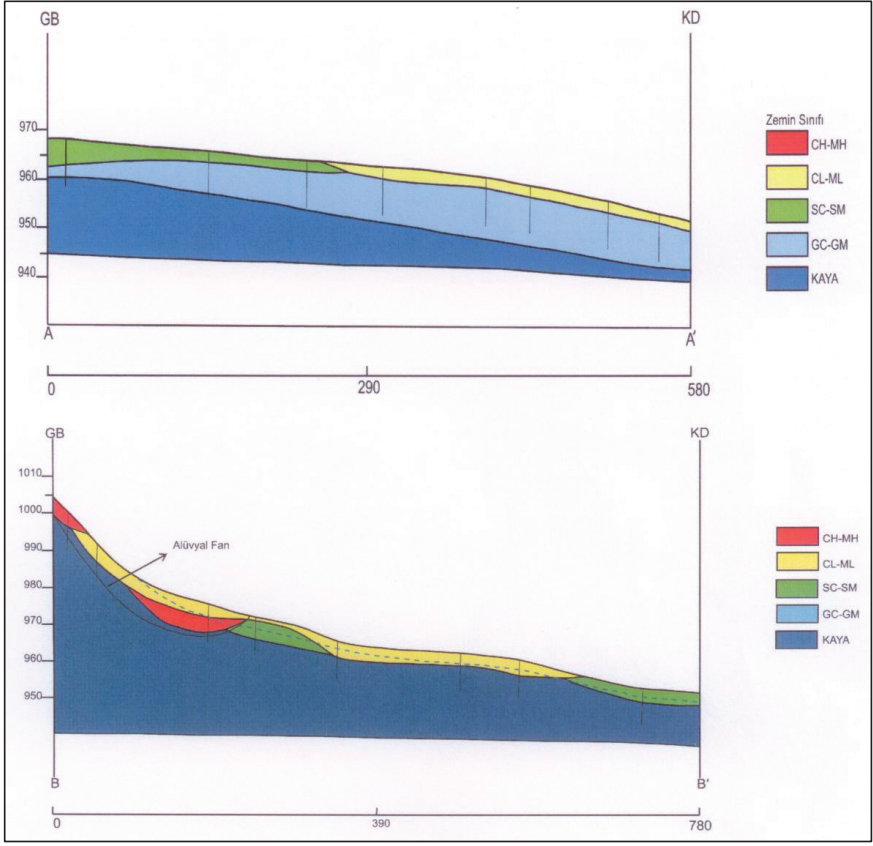
Şekil 3.5. 4.5 m derinlik için SPT-N zon haritası



Şekil 3.6. 6.5 m derinlik için SPT-N zon haritası

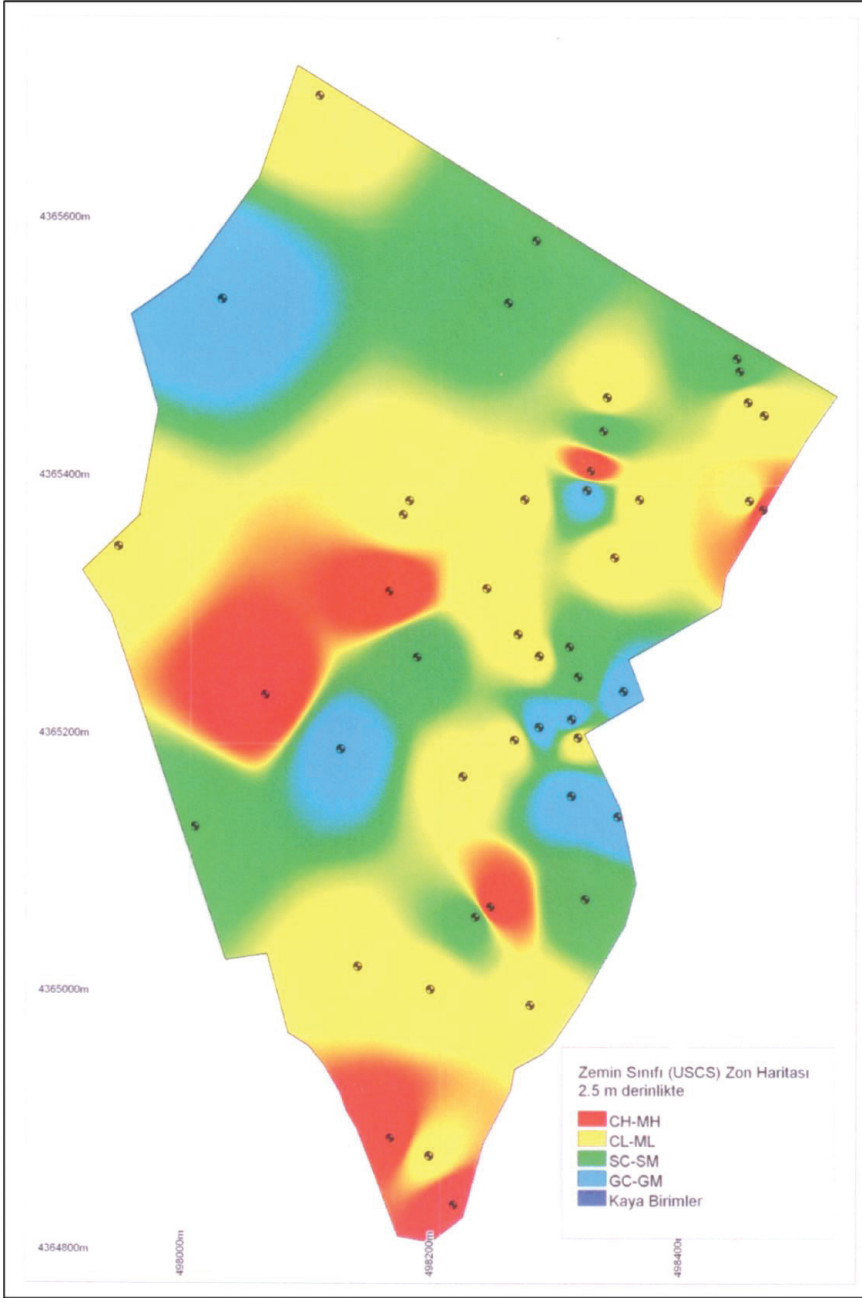


Şekil 3.7. 9.5 m derinlik için SPT-N zon haritası

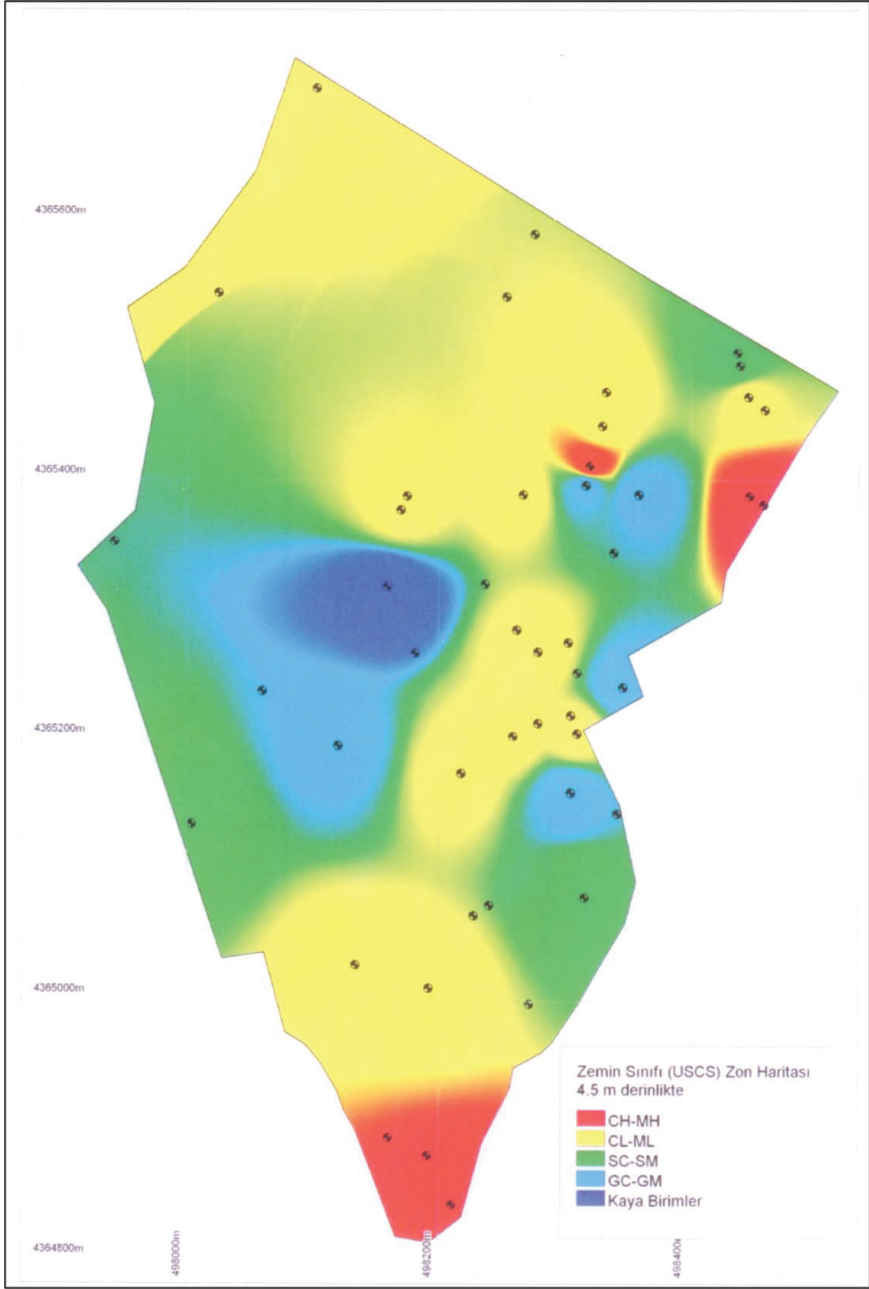


Şekil 3.8. İnceleme alanında zemin sınıfının değişimi

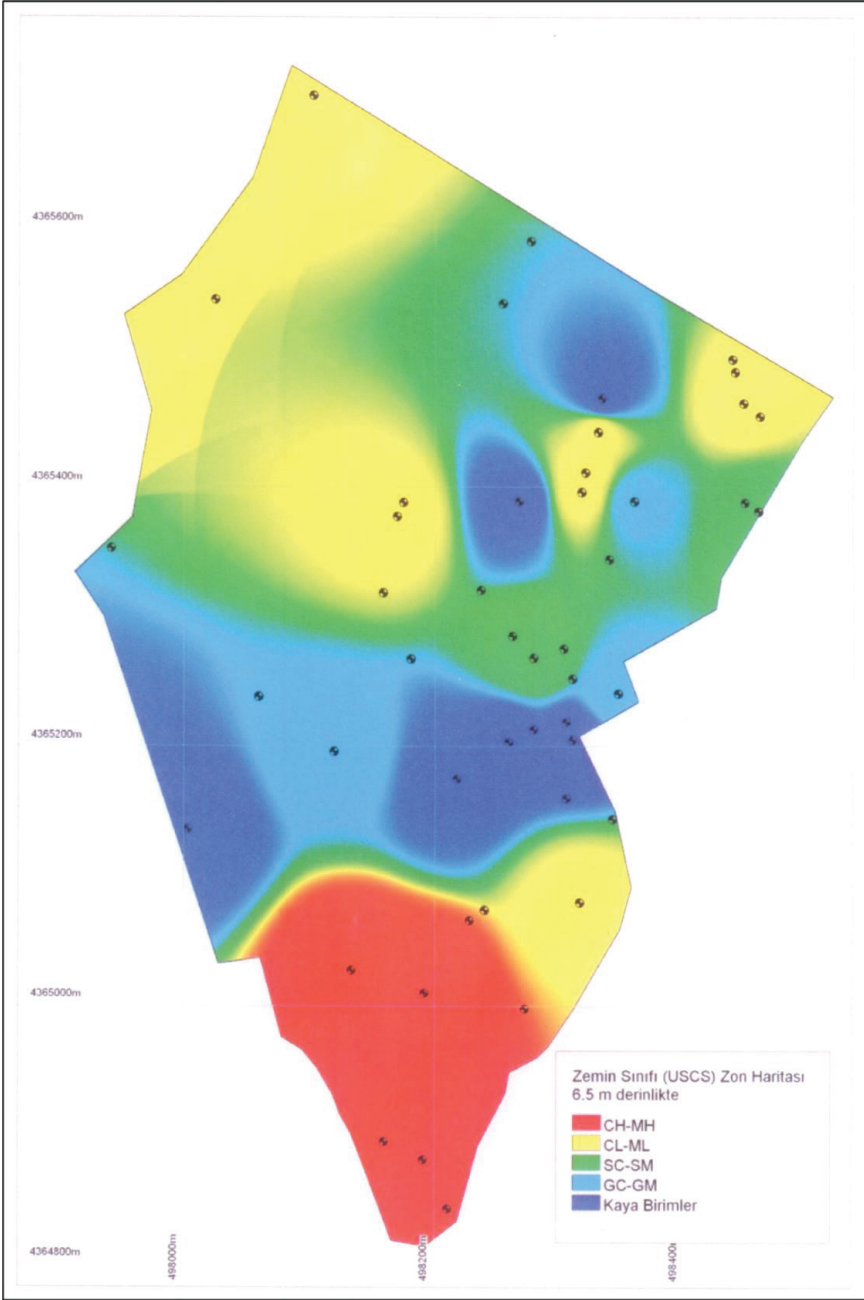
Şekil 3.9 ile Şekil 3.12 arasında verilen zemin sınıfı zon haritalarına göre, derinlik artışı ile birlikte zemin sınıfının da inceden iriye kaydığı görülmektedir. Özellikle 6.5 m seviyesinden sonra çakıllı birimler dikkati çekmekle birlikte sadece çalışma alanının en güneyinde ince taneli birimlerin hakimiyeti dikkati çekmektedir.



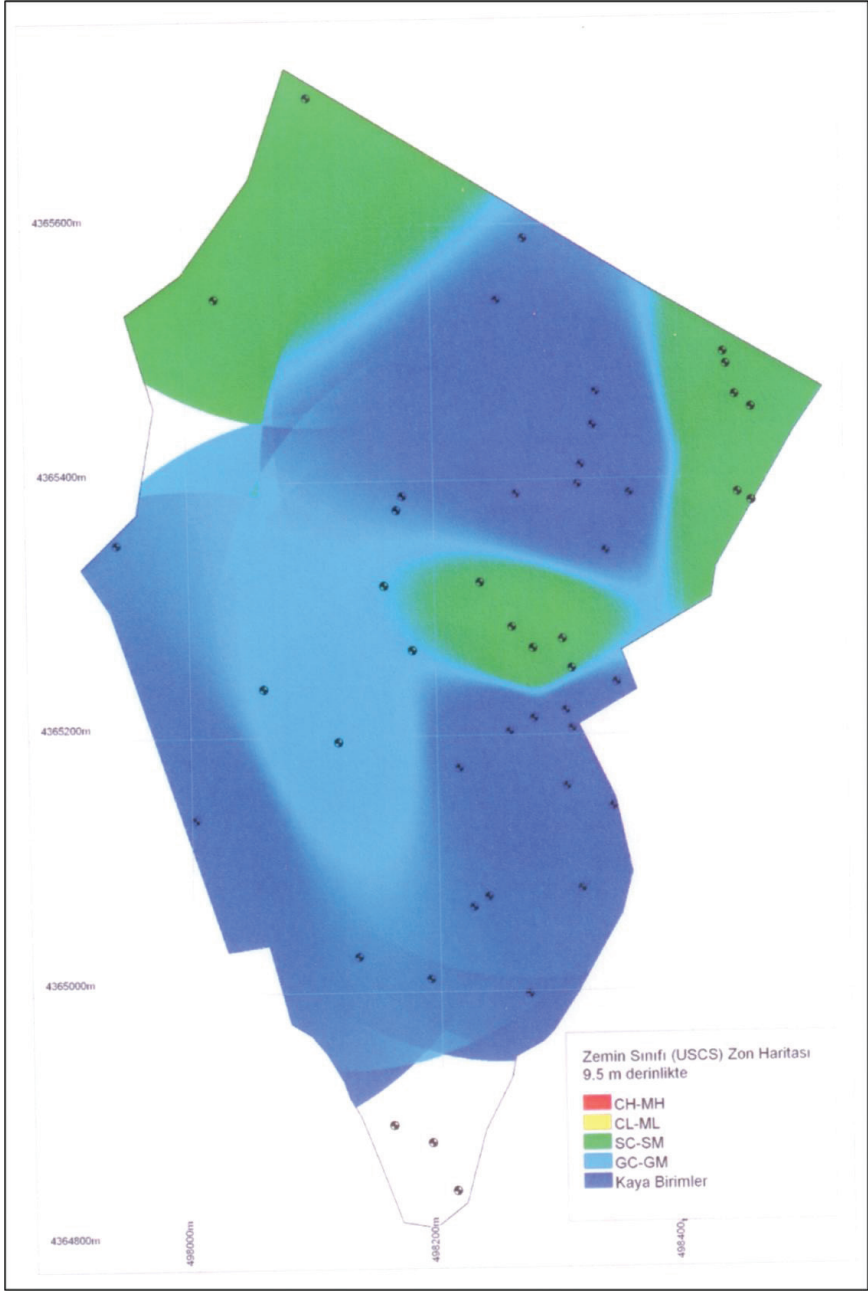
Şekil 3.9. 2.5 m derinlik için zemin sınıfı zon haritası



Şekil 3.10. 4.5 m derinlik için zemin sınıfı zon haritası



Şekil 3.11. 6.5 m derinlik için zemin sınıfı zon haritası



Şekil 3.12. 9.5 m derinlik için zemin sınıfı zon haritası

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Kütahya ili merkez ilçesine bağlı Pirlar, Balıklı, Saray Mahallelerinin temel zemini geo-mühendislik özellikleri, arazi ve laboratuvar deneyleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, Coğrafi Bilgi Sistemi'ne aktarılmış ve sistemin inceleme alanı için uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Böylece ön bilgi amaçlı ilerde kullanmak üzere çalışma alanının zon haritaları ve kesit hatları üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir

- İnceleme alanı yer yer değişik özellikler göstermesine rağmen, genel olarak zeminin aynı tür malzemeden oluştuğu gözlenmiştir.
- Sığ kesimlerde ince taneli zemine rastlanırken daha derin kesimlerde ise iri taneli zemin yer almaktadır.
- Elde edilen veriler doğrultusunda temel zemin sınıfları açısından farklı zemin türlerinin değişimi ve birbirleriyle olan ilişkisi incelenmiştir.
- İnceleme alanında sığ kesimlerde düşük SPT-N sayısı gözlenmiştir. Derinliğin artmasıyla birlikte SPT-N sayıları genel olarak artmıştır.
- Sığ kesimlerde genel olarak kil-silt mevcuttur. Daha derinlerde ise killi, siltli, kumlu ve çakıllı seviyeler gözlenmiştir. Bazı kısımlarda 6.5 m'den sonra yer yer ana kayaya girildiği görülmüştür ve alanın güney batısında alüvyal fan görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- Azarafza, Mi, Ghazifard, A., 2016, Urban Geology of Tabriz City: Environmental and Geological Constraints, *Advances in Environmental Research*, Volume 5, Issue 2, 95-108.
- Gürer, Ö.F., Özburan, M., Sangu, E., Doğan, B., 2005, Kütahya Dolayının Neotetonik İncelenmesi, BAPB-Proje No: 2005/14.
- Hack, R., Orlic, B., Ozmutlu, S., Zhu, S., Rengers, N. 2006. Three and More Dimensional Modelling in Geoenvironment, *Bull. Eng. Geol. and the Env.*, 65 (2):143- 153.
- İnan, B., Sucu, F., Toy, K., Kezer, Z., 2017, MapInfo Pro 64Bit Eğitim Kitabı, Ankara, 487 s.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., 1997, Kütahya-Tavşanlı Çöküntü Alanının Neotektonik Özellikleri, TUBİTAK Araştırma Projesi, No: YDABÇAG-126, 78s.
- Mahaske, S.Y., Choudhury, D. 2011, Geospatial Contour Mapping of Shear Wave Velocity for Mumbai City. *Natural Hazards*, 59, 317-327.
- Marache, A., Dubost, J., Breyse, D., Denis, A., Dominique, S., 2009, Understanding Subsurface Geological and Geotechnical Complexity at Various Scales in Urban Soils using a 3D Model, *Georisk*, Vol. 3, No. 4, 192-205.
- MTA, 2013, Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Orhan, A., Tosun, H., 2010, Visualization of Geotechnical Data by Means of Geographic Information System: A Case study in Eskisehir city (NW Turkey). *Environ Earth Sci*, 61, 455-465.
- Özburan, M., 2009, Neotectonic Investigation of Kütahya and Its Surrounding, Kocaeli University, 227 p.
- Priya, D., Dodagoudar, G.R., 2018, An Integrated Geotechnical Database and GIS for 3D Subsurface Modelling: Application to Chennai City, India., *Applied Geomatics*, 10, 47-64.
- Rackwitz, R., 2000, Reviewing Probabilistic Soils Modelling, *Computers and Geotechnics*, 26, 199- 223.
- Singh, L.K., Jha, M.K., Chowdary, V.M., 2018, Assessing the Accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis Approaches for Mapping Groundwater Potential, *Ecological Indicators*, Volume 91, 24-37.
- Turner, A.K., 2006, Challenges and Trends for Geological Modelling and Visualisation, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 109-127.

//

Bölüm 2

TEMEL ÇEŞİTLERİ VE OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Yasin DUYSAK¹, Onur YAVAN²

1 Arş. Gör. Dr., Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye, ORCID: 0000-0002-1764-7455.

2 Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9615-253X.

1.GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde betonarme temel sistemleri, herhangi bir inşaat mühendisliği projesinde en kritik ve genellikle en zorlu tasarım sürecini temsil eder (Pecker, 2007; Harabinová vd., 2018; Kashap, 2019). Bu sistemler üst yapıdan gelecek yükleri üzerinde durduğu zemine güvenli şekilde aktarma görevini üstlenir (Abovskii vd., 2012). Yüksek katlı yapılardan geniş köprülere, endüstriyel tesislere ve kritik altyapılara kadar her türlü mühendislik yapısının temel tasarımı yapı stabilitesi için önemlidir (Abija, 2023; Seward, 1994). Dolayısıyla inşaat yapılarından kaynaklanan zemine aktarılacak olan yükler, inşa edildikleri bölgelerde bulunan zemin tabakalarına güvenli ve etkili bir şekilde aktarılması için bu sistemlerin doğru tasarlanması çok önemlidir (Abovskii vd., 2012; Al-Arafat vd., 2024). Yapılardan zemin tabakalarına aktarılan bu yük aktarım süreci, yalnızca bir dağıtım değil, inşa edilmiş çevrenin uzun vadeli stabilitesini, hizmet verilebilirliğini ve genel yapısal bütünlüğünü belirleyen ve bilimsel olarak da yönetilmesi gereken bir süreçtir (Abdurashidovna, 2024; Panulinová vd., 2018). Temel sistemlerindeki problemler, genellikle yapıdan gelecek yüklerden dolayı oluşan gerilmelerin doğru hesaplanmamasından dolayı oluşan yetersiz temel kesitleri veya bu gerilmelerden zemin tabakalarında oluşan oturmalar olarak ortaya çıkmaktadır (Al-Arafat vd., 2024; Salomovich & Shavkatovna, 2024). Bu durumlar yapılarda kısmi veya tam yapısal hasara yol açmakta ve ekonomik uygulanabilirliği, işlevsel kullanılabilirliği ve en önemlisi yapıları kullanan kişileri tehlikeye atmaktadır (Harabinová vd., 2018; Panulinová vd., 2018; Hanna vd., 2025).

Bu nedenle, temel mühendisliği, yapısal mekanik ve geoteknik bilimin kesişim noktasında yer alır ve sisteme uygulanan etkileşimin yanı sıra destek sağlayan zeminlerin karmaşık, doğrusal olmayan mekanik davranışlarının da derinlemesine anlaşılmasını gerektirir (Baefler vd., 2020). Temel tasarımında dikkat edilmesi gereken temel iki kriter vardır. Bunlardan birincisi, yapının bulunduğu zeminin taşıma kapasitesinin aşılmamasını sağlayan temel sisteminin tasarımı ve böylelikle nihai stabilitenin sağlanması (q_u); ikinci olarak, yapıya ve yapı elemanlarının tasarımına zarar gelmesini önlemek için tüm oturmaların (S) hesaplanarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmasına dikkat etmek gerekir (Ong vd., 2023; Rotta Loria, 2018). Bu iki kriterin dikkatli hesaplanabilmesi de zemin etüt raporlarının hazırlanması gereken sürecin titizlikle yürütülmesi sonucunda olacaktır.

Birçok araştırmacı temeller hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Özellikle Türkiye, önemli bir deprem kuşağı üzerinde yer almakta olup, ilk

deprem yönetmeliği 1940 yılında yürürlüğe girmiştir ve o tarihten bu yana söz konusu yönetmelik dokuz kez revize edilmiştir (Keskin & Bozdoğan, 2018).

Yapıları oluşturan çerçeve sistemlerin temel ve zemin etkileşimi altında serbest titreşim davranışları üzerine yapılan çalışmalar, hem temel tasarımının hem de zemin koşullarının yapı dinamikleri üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır (Kara vd., 2020, Kara vd., 2021). Ayrıca, deprem mühendisliğinde temel zemin periyodu ve ortalama kesme dalgası hızı gibi parametrelerin belirlenmesi, deprem tehlikesi analizleri ve tasarım süreçleri için kritik bir öneme sahiptir (Bozdoğan & Keskin, 2024b).

Günümüzde yapı sistemlerinin deprem ve diğer yatay yükler altındaki davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi, güvenli tasarım için kritik öneme sahiptir. Özellikle temel dönmeleri, kiriş-döşeme ve perde duvar sistemlerinin moment dağılımlarını ve dinamik özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir (Bozdoğan vd., 2024; Bozdoğan & Keskin, 2024a) Bu bağlamda, temel dönmesinin yapı üzerindeki etkilerini dikkate alan pratik yöntemlerin geliştirilmesi, hem analiz hem de tasarım süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

2. TEMEL ÇEŞİTLERİ

Bir yapının yükünü zemine aktaran önemli yapısal elemanlar olan temeller, genel olarak sığ temeller ve derin temeller olarak iki ana kategoriye ayrılır (Das, 2011; O'Brien, 2012a; Magade & Ingle, 2021). Sığ temeller, şerit temeller ve sürekli temeller olarak adlandırılır ve genellikle yeterli taşıma gücüne sahip olan zemin tabakası yüzeyine yakın bölgelerde kullanılır (Das, 2011). Hafif ila orta dereceli yükler için yüzeye yakın stabil zemin koşulları için en yaygın seçimdir. Buna karşılık, derin temeller, gerekli taşıyıcı tabaka sığ temellerle ekonomik olarak ulaşılamayacak kadar derinde olduğunda, ağır yüklerin desteklenmesi gerektiğinde veya yüzeye yakın zemin koşullarının kötü olduğu durumlarda gerekli hale gelir (Nicholson, 2014; Yezatova vd., 2025). Bu kategori, yükleri yüzeyleri boyunca sürtünme ve/veya uçlarında taşıma yoluyla zemin seviyesinin çok altındaki uygun bir tabakaya aktaran kazıklar (forekazıklar), kesonlar ve delinmiş şaftları içerir.

2.1 Sığ Temeller

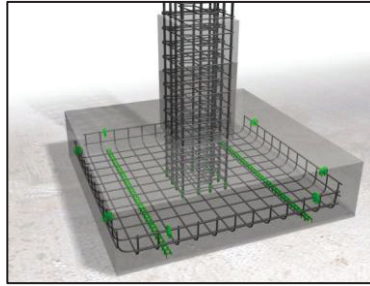
Sığ temeller, zemin seviyesine nispeten yakın konumda bulunan ve yükü doğrudan hemen altındaki destekleyici toprak katmanlarına aktaran temellerdir. Yüzeye yakın zemin yeterli kayma mukavemeti parametrelerine

sahip (c ve ϕ°) ve sıkıştırılabilirlik özelliklerine sahip olduğunda, bu temel sistemleri tercih edilir ve en uygun maliyetli çözümdür (Das, 2011).

Temellerin gömme derinliği (don derinliği) (D_f) temel genişliğinin (B) 3 ila 4 katından az veya ona eşitse genellikle sığ temel olarak kabul edilir (Andersland & Ladanyi, 1994; French, 1999). Yük aktarımları genellikle yük, ağırlıklı olarak temel tabanındaki taşıma alanına uygulanan doğrudan düşey gerilme yoluyla olur. Tasarımdaki en önemli zorluk, nihai taşıma kapasitesinin aşılmamasını ve toplam oturmanın yapısal sınırlar içinde kalmasını sağlamaktır. Bu temeller, zemin yüzeyine yakın sert, sıkıştırılmaz zemin tabakalarında (sıkı kum, katı kil veya kaya) bulunduğu kullanılır (Das, 2011; Yavan, 2015).

2.1.1. Tekil Temeller

Tekil temeller, tek tek kolonları desteklemek ve yüklerini temel yüzeyinde bulunan zemine güvenli bir şekilde aktarmak için kullanılan sığ temeldir (Das, 2008, Das, 2011). Genellikle kolonların birbirinden yeterince uzak olduğu ve zemin koşullarının nispeten homojen olduğu düşük ve orta yükseklikteki binalarda kullanılırlar (Salam & El-kady, 2017). Mimari veya yapısal ihtiyaçlara bağlı olarak, tekil temeller kare, dikdörtgen veya dairesel olabilir ve boyutları yeterli taşıma alanı sağlayacak şekilde seçilir. Şekil 1’de tekil temel örneği gösterilmiştir.



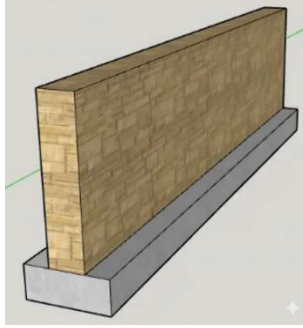
Şekil 1. Tekil Temel Örneği (Staff, 2017)

Tekil temel tasarımı, kolon yükünden dolayı oluşan izin verilen zemin taşıma gerilmesi (q_{all}) bölünmesiyle hesaplanan gerekli inşaa alanının belirlenmesiyle başlar (French, 1999; Das, 2011). Temel şekli ve boyutu seçildikten sonra, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri dahil olmak üzere zemin basıncından kaynaklanan iç kuvvetler değerlendirilir. Kritik kontroller arasında kolon çevresindeki zımbalama kuvveti ve temel boyutları boyunca geniş kiriş (tek yönlü) kesme kuvveti bulunur (French, 1999; Das, 2011). Bu değerlendirmeler, temelin uygulanan kuvvetlere güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için yeterli kalınlığa ve donanımına sahip olmasını sağlar.

Donatı detaylandırması tasarım sürecini tamamlar. Donatılar x ve y eksenlerinde düzenlenir ve genellikle eğilme momentine karşılık alt donatılar kullanılır. Kolonların temelle bağlantı noktalarında oluşan yoğun gerilmeler içinde ilave donatılar kullanılır. Tekil temeller doğru tasarlanıp detaylandırıldığında yapıların çoğunda basit, ekonomik ve güvenilir bir temel çözümü olarak kullanılır.

2.1.2. Şerit veya Sürekli Temeller

Şerit temeller, alternatif olarak sürekli temeller veya duvar temelleri olarak da adlandırılır ve en temel ve yaygın olarak kullanılan sığ temellerden biridir (Das, 2011). Genişliklerine göre önemli ölçüde uzamış geometrileriyle tanımlanan bu temeller, yük taşıyıcı duvarlar, duvar bölmeleri veya birbirine yakın sütun sıraları gibi doğrusal yükleri taşımak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Şekil 2'de dayanma yapısı için oluşturulan bir şerit temel sistemi ve planı gösterilmiştir.



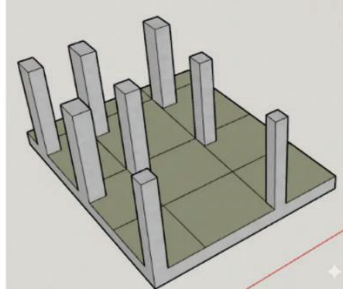
Şekil 2. Şerit Temel Örneği (*Types Of Foundation Used For Different Structure | Shallow And Deep, 2019*)

Şerit temeller, temel olarak, zemin yüzeyinin nispeten sığ bir derinliğinde, yeterli ve sıkıştırılamaz taşıyıcı tabakaların bulunduğu koşullarda seçilir ve bu da onları ekonomik olarak uygun ve yapısal olarak verimli bir seçim haline getirir (Yavan, 2015). Birincil işlevi, duvar veya kolon hattından gelen yoğun doğrusal gerilimi yeterince geniş bir zemin alanına dağıtarak, yapıdan dolayı oluşan gerilmeyi zeminin izin verilen taşıma kapasitesinden daha düşük bir değere indirmektir. Bu tip temeller, konut inşaatlarında, alçak ve orta yükseklikteki ticari binalarda ve desteklenen elemanın uzunluğu boyunca stabiliteyi korumak ve farklı oturmayı azaltmak için düzgün ve sürekli bir destek elemanının gerekli olduğu istinat duvarı sistemlerinde yaygın olarak kullanılır (Das, 2011).

Görünüşteki basitliklerine rağmen, şerit veya sürekli temellerin analitik ve tasarım prosedürleri, akademik araştırmaların konusu olmaya devam etmektedir. Araştırmacılar, özellikle eğimli veya eksantrik yükleri dikkate alarak, çeşitli yükleme koşulları altında nihai taşıma kapasitesini doğru bir şekilde tahmin etmeye odaklanmaktadır (Krabbenhoft vd., 2014; Mahendar, 2015; Halder & Chakraborty, 2020). Ayrıca, temelin rijitliği ve zeminin gerilme kaynaklı deformasyon özelliklerini hesaba katan karmaşık zemin-yapı etkileşim modelleri içeren, hassas oturma tahmini büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yapısal tasarımda güvenilirliği ve performansı artırmak için, ideal ve gerçek sınır koşulları altında şerit temellerin mekanik davranışının anlaşılması ve sonrasında tasarlanması gerekmektedir.

2.1.3. Radye Temeller

Radye temeller, yapının tüm tabanını destekleyen tek bir sürekli beton levha ile karakterize edilen kapsamlı bir sığ temel türüdür (French, 1999; Zeedan, 2007; Das, 2008; O'Brien, 2012b). Bu sistem, yükü mümkün olan en geniş alana etkili bir şekilde dağıtan ve yapıdan zemine aktarılan gerilmenin önemli ölçüde azaltan sağlam ve rijit bir temel çeşididir. Şekil 3'de radye temel örneği gösterilmektedir.



Şekil 3. Radye Temel (*Types Of Foundation Used For Different Structure | Shallow And Deep, 2019*)

Radye temelin seçimi, genellikle belirli koşullar altında zorunlu olan kritik bir tasarım kararıdır. Yapı için tasarımı yapılan tekil temellerin toplam taban alanının yüzde 50 ila 75'inden fazlasını kaplayarak aşırı yer işgal ettiği durumlarda radye temel tasarımı hem ekonomik hem de daha kısa sürede inşa edilecektir (Han & Zheng, 2012; Sharma vd., 2014). Bir diğer durum yapı kolonlarının birbirine çok yakın olması nedeniyle bu temellerin üst üste binmesi durumunda da radye temel seçimi doğru olacaktır. Son olarak zeminin nihai taşıma kapasitesinin düşük olduğu durumlarda yapıdan zemine

gelecek gerilmeleri azaltmak için radye temel seçimi yapılabilmektedir. Bu koşullar, yüklerin zemine güvenli bir şekilde dağıtılması için temel tasarımının yeniden değerlendirilmesini gerektirir.

Ayrıca, radye temeller, gevşek kumlar veya yumuşak killer gibi ani veya konsolidasyon oturmasının meydana gelebileceği zeminlerle ilişkili riskleri azaltmak için çok değerlidir (Das, 2011). Çünkü bu temel sistemi, farklı oturmaları yapı boyunca eşit olarak dağıtır.

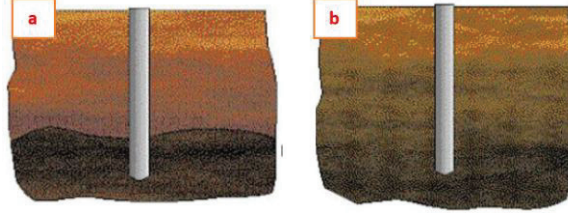
Radye temellerin yapısal analizi ve tasarımı, diğer sığ temellerin tipik basit tek yönlü hareketinin ötesine geçerek karmaşık üç boyutlu yapı-zemin etkileşimi modellemesinin de dikkate alınmasıyla yapılır (Balakumar vd., 2018). Bu sistemlerin araştırma zorlukları, elastik veya elastoplastik bir zemin üzerinde duran radye temelin davranışını doğru bir şekilde tahmin etmeye odaklanmaktadır (Rasheed vd., 2020). Yöntemler, basitleştirilmiş rijit ve geleneksel esnek yaklaşımlardan, elastisite teorisine dayanan daha gelişmiş süreklilik modellerine (Winkler modeli veya sonlu elemanlar analizi) kadar çeşitlilik gösterir (Dey & Chatterjee, 2023; Jeong vd., 2024). Bu modellerin doğruluğunu, özellikle uzun vadeli konsolidasyon oturmasını ve alt tabaka zeminlerin doğrusal olmayan etkilerini tahmin etmek devam eden geoteknik araştırmaların önemli bir alanı olmaya devam etmektedir.

2.2. Derin Temeller

Derin temeller, genellikle sığ temellerin kullanımının problem teşkil ettiği durumlarda, yapıdan gelen yüklerin güvenli taşınabilmesi için daha derin zemin tabakalarına aktarılmasına yarayan farklı ve oldukça özel bir temel sistemi kategorisini temsil eder. Derin temel çözümünün seçilmesindeki ana neden, yüzeye yakın zeminlerin yetersiz kayma mukavemeti parametreleri, yüksek sıkıştırılabilirlikten dolayı oluşan oturma miktarları veya şişme potansiyeline sahip zeminlerin varlığı nedeniyle amaçlanan yapısal yükleri güvenli bir şekilde taşıyamamasıdır (Das, 2011). Derin temeller, bu nedenle, yükleri bu yetersiz üst tabakalardan çok daha güçlü, daha derin zemin veya kaya tabakalarına aktarma görevi görür. Şekil 4'te derin bir temel tasarımı gösterilmektedir.

Derin temel sisteminin etkinliği, tek başına veya birlikte hareket edebilen iki ana yük taşıma mekanizmasına bağlıdır. Birinci mekanizma, yükün yoğun kum, sert kil veya ana kaya gibi güçlü bir alt tabakaya doğrudan aktarıldığı uç taşıma direncidir (Q_p). İkinci mekanizma, temel elemanının çevresi ile çevreleyen zemin kütlesi arasındaki arayüz boyunca gelişen yüzey sürtünmesi veya yanal dirençtir (Q_s). Derin temelin nihai yük kapasitesi (Q_u) bu iki

bileşenin toplamı olarak tanımlanır. Her bir mekanizma tarafından taşınan yükün oranı, alt tabakalarda bulunan zemin profiline ve temelin üretim yöntemine büyük ölçüde bağlıdır (Das, 2008).



Şekil 4. a) Uç taşıma direncine sahip derin temel sistemi, b)Yüzey sürtünme direncine sahip derin temel sistemi (Mivan Shuttering Details, Tallest Building under construction, 2012)

Çakma kazıklar, sondaj kazıkları (delinmiş şaftlar) ve kesonlar yapı yüklerini daha derinlerde bulunan zemin tabakalarına ilettiği için derin temel olarak adlandırılırlar (Preece vd., 2023). Ancak bu derin temel türleri arasında seçim yaparken yapıdan zemine aktarılacak yük büyüklüğü, zemin profili, uygulanabilirlik ve ekonomisi dikkate alınması gereken kriterlerdir (Eslami vd., 2025). Darbe veya titreşimle kurulan çakma kazıklar zeminleri yerinden oynatarak kumlarda yoğunluğu, killerde yüksek gözenek suyu basıncını artırır, bu da genellikle taşıma kapasitelerini artırır (Svinkin, 2006; Dharmatti & Rakaraddi, 2014). Buna karşılık, sondaj kazıkları bir şaft kazılarak ve betonla doldurularak inşa edilir, bu da genellikle çevredeki toprağa daha az zarar verir ve daha büyük çaplara ve artan uç taşıma kapasitesi için çapların oluşmasına olanak tanır (Katzenbach R. & Schmitt A., 2005). Sondaj şaftları veya kesonlar, sert kaya katmanlarına nüfuz etme ve genellikle daha küçük çakma kazık gruplarının kapasitesini aşan olağanüstü yüksek basınç ve yanal yükleri taşıma özelliklerinden dolayı tercih edilir (Rausche vd., 1992; Roy, 2024)

Derin temellerin tasarımındaki temel zorluk, yükler altında sistemin kapasitesini ve oturmasını doğru bir şekilde tahmin etmektir (Poulos, 2012). Nihai yüzey sürtünmesini belirlemek, gerilmeler, inşaa sisteminin neden olduğu zemin bozulmaları ve uzun vadeli konsolidasyon etkileri gibi faktörlerden etkilendiği için oldukça zordur (Rituraj & Giridhar Rajesh, 2022). Ampirik yöntemler (SPT veya CPT gibi penetrasyon testi verilerine dayalı), statik analiz yöntemleri (efektif gerilme ve toplam gerilme ilkelerine dayalı) ve dinamik formüller kullanılır (Miao vd., 2011). Güvenilirliği sağlamak için

genellikle arazide yük testlerine göre kalibrasyon yapılır. Ayrıca, derin temeller nadiren tek tek kurulus; genellikle gruplar halinde yerleştirilir ve bu durumda, üst üste binen gerilme soğan halkaları ve potansiyel blok problemleri nedeniyle grup kapasitesinin verimliliği dikkatlice değerlendirilmelidir (Shooshpasha vd., 2013; Priyan, 2021).

3.BETONARME TEMELLERDE OPTİMİZASYON VE TEMEL İLKELERİ

Betonarme temel yapıların tasarımında inşaat mühendisinin 2 temel amacı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yapısal sisteme etki eden dış yükler altında gerekli yapısal güvenliğin sağlanmasıdır. Bir diğeri ise yapısal güvenlik sağlanırken yapılan yapının en ekonomik çözümü ile tasarlanmasıdır (Temür & Bekdaş, 2018). Betonarme yapı ve yapısal elemanlarda güvenli şekilde veya minimum ağırlıkta tasarlanan bir yapı her zaman en ekonomik sonucu vermeyebilir (Öztürk, 2018). Bunun için tüm olasılıkları deneyerek optimum sonucu bulmak zahmetli ve maliyetlidir. Zamandan ve maliyetten tasarruf etmek için mühendislik problemlerinde optimum sonucu bulabilmek için metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Metasezgisel algoritmaların maliyeti, CO₂ emisyonu ve yapısal kısıtlamaları aynı anda ele alabilmesi nedeniyle temel tasarımında kullanılması son yıllarda yoğun ilgi görmüştür (Camp & Assadollahi, 2015).

Optimizasyon tasarım süreci tasarım değişkenleri, kısıtlamalar ve amaç fonksiyonu olmak üzere toplam 3 temel ana bileşenden oluşmaktadır (Wang & Kulhawy, 2008).

Betonarme temellerde tasarım değişkenleri geometrik değişkenler ve yapısal değişkenler olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Geometrik değişkenler genellikle temel uzunluğu, temel genişliği, temel yüksekliği, temelin gömülme derinliği ve kolonun temele göre dış merkezliği olarak alınabilmektedir. Yapısal değişkenler ise beton basınç dayanımı, donatı sınıfı, donatı akma dayanımı, donatı çapı ve donatı âdeti olarak sıralanabilir.

Tasarım kısıtlamaları ise yapılacak çalışmaya göre değişiklik göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan tasarım kısıtlamaları temel taşıma kapasitesi, temel oturma miktarı, tekil temeller için maksimum dış merkezlik, yönetmeliklerin kısıtladığı yapısal sınır şartlar, kesme kapasitesi ve eğilme kapasitesi olarak sıralanabilir.

Amaç fonksiyonu ise mühendislik problemine göre değişmektedir. Genellikle kazı işleri, donatı çeliği, beton maliyeti ve kalıp ücretlerini kaplayan

yapı eleman maliyetini minimize etmek ve son yıllarda artan çevresel endişelerin etkisiyle düşük CO₂ emisyonu amaç fonksiyonu olarak adlandırılabilir. Genel bir amaç fonksiyonu yazmak istersek aşağıdaki denklemdeki gibi gösterebiliriz.

$$f(x)=V_bM_b+W_dM_d+A_kM_k \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde $f(x)$ amaç fonksiyonumuzu yani yapımıza ait ya da yapısal elemanımıza ait minimum maliyeti, V_b beton hacmini, M_b betonun m³ maliyetini, W_d kullanılan donatının ton cinsinden miktarını, M_d donatının ton maliyetini, A_k kalıbın m² miktarını ve M_k kalıbın metrekaresi maliyetini vermektedir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yapı maliyeti ve CO₂ emisyonu belirli ağırlık katsayılarıyla birleştirilerek tek bir amaç fonksiyonu elde edilmektedir (Camp & Assadollahi, 2015).

4.MÜHENDİSLİKTE KULLANILAN BAŞLICA METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

Betonarme elemanların ve yapıların tasarımı kesit boyutlarının seçimi, iç kuvvetlerin hesabı, donatı alanlarının belirlenmesi, minimum ve maksimum donatı oranlarının kontrolü, donatı çapı ve aralığının seçimi gibi birçok bağımlı adımdan ve kontrolden oluşmaktadır. Bu bağlamda yapılan her seçimin kendinden önceki ve sonraki adımlar üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmektedir. Örneğin, bir konsol istinat duvarının kesit ve boyut seçimlerinin devrilme, kayma ve zemin gerilmesi güvenliklerini, iç kuvvet büyüklüklerini, donatı alanlarını ve donatı aralıklarını doğrudan etkilemektedir (Temür & Bekdaş, 2018). Betonarme yapı tasarım aşamasındaki bu doğrusal olmayan ilişkiyi matematiksel bir denklem ile ifade etmek genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle inşaat mühendisliği problemlerinde metasezgisel yöntemler gibi alternatif yöntemlerin kullanılmasına gerek duyulmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, doğrusal olmayan ve ayrık (discrete) optimizasyon problemlerini çözmek için uygundur (Tunca, 2024). Temeller veya istinat duvarları gibi yapı elemanlarının optimum tasarımı sadece yapısal gereklilikler değil aynı zamanda zemin taşıma kapasitesi ve aşırı oturma gibi geoteknik limit durumlarını da aynı anda karşılamak zorundadır (Camp & Assadollahi, 2015).

İnşaat Mühendisliği problemlerinin karmaşık doğası özellikle temeller ve istinat duvarları gibi geoteknik elemanların tasarımında çeşitli metasezgisel algoritmaların yaygın olarak benimsenmesini sağlamıştır (Kashani vd., 2022).

4.1. Genetik Algoritma (GA)

Evrimsel süreçten ilham alan algoritma Charles Darwin'in evrim teorisindeki doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon süreçlerini kullanmaktadır. GA ile yapılan ilk yapısal optimizasyon çalışması Goldberg & Samtani (1986) tarafından gerçekleştirilmiştir. Waheed vd., (2022) literatürde bulunan tekil temelleri kullanarak GA kullanarak maliyeti optimize etmişler ve %44'e varan maliyet tasarrufu sağlamışlardır.

4.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Kuş ve balık sürülerinin besin arama tekniklerinden ilham alınarak geliştirilmiş bir algoritmadır (Kennedy & Eberhart, 1995). Hızlandırılmış PSO (APSO) gibi varyantları ile PSO'nun verimliliği ve esnekliği artmaktadır. Kashani vd., (2022) betonarme birleşik temellerin maliyet optimizasyonunu PSO algoritmasını kullanarak yapmışlar ve diğer algoritmalar ile karşılaştırdıklarında PSO algoritmasının en iyi çözümleri ürettiği sonucuna ulaşmışlardır.

4.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO)

Sınıf içerisindeki öğrencilerin eğitim sürecinden ilham alınarak geliştirilmiş algoritmadır (Rao, 2016). İki aşamalı olan algoritmanın ilk aşaması öğretici tarafından öğrencilere bilgi aktarılmasını ve ikinci aşaması ise öğrencilerin arasındaki etkileşimle doğru bilgiye ulaşmasını temsil etmektedir. Öztürk (2018) eğilme etkisi altındaki temel temellerin optimizasyonunu TLBO algoritmasında dahil 3 farklı algoritma ile gerçekleştirmişler ve TLBO algoritmasının global optimum sonuca ulaşmada daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

4.4. Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)

Tek aşamalı olan bu algoritma kurtların sosyal hiyerarşisi ve avlanma stratejilerini taklit etmektedir (Mirjalili vd., 2014). GWO'nun basitliği, esnekliği ve farklı problemlere uygulanabilirliği sayesinde birçok inşaat mühendisliği probleminde optimizasyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Tunca (2024) zemin eğiminin betonarme tekil temellerin optimum maliyet tasarımı üzerindeki etkisini GWO algoritmasını kullanarak incelemişlerdir.

4.5. Jaya Algoritması (JA)

Tek aşamalı olan ve en iyi sonuca yaklaşma en kötü sonuçtan uzaklaşma prensibi ile çalışan metasezgisel bir algoritmadır (Rao, 2016). Basit oluşu ve

bir çok probleme entegre edilebilmesinden dolayı optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Türkoğlu vd., (2023) betonarme tekil temellerin maliyet optimizasyonunu Jaya Algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişler ve algoritmanın tekil temellerin optimizasyon çalışmalarında tutarlı ve başarılı sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

4.6. Çiçek Tozlaşma Algoritması (ÇTA)

Çiçekli bitkilerin tozlaşma sürecinden ilham alınarak geliştirilen 2 aşamalı metasezgisel bir algoritmadır (Yang, 2012). Küresel tozlaşma ve yerel tozlaşma süreçlerini temsil eden iki aşamadan meydana gelmektedir. (Nigdeli vd., 2018) betonarme tekil temellerin optimum tasarımını birçok metasezgisel algoritma ile yapmış ve karşılaştırmışlardır. Çiçek Tozlaşma Algoritmasının da diğer algoritmalar karşısında rekabetçi sonuçlar sunduğunu göstermişlerdir.

Ayrıca Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKA), Ateş Böceği Algoritması (ABA), Harmoni Arama Algoritması (HA), Guguk Kuşu Arama Algoritması (GKA) ve Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) gibi birçok doğadan ilham alınarak geliştirilen metasezgisel optimizasyon algoritması inşaat mühendisliği alanında kullanılmaktadır.

5.SONUÇLAR

Betonarme temel tasarımı, kesit boyutları ve donatı oranları gibi tasarım değişkenleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler nedeniyle metasezgisel algoritmaların kullanımını zorunlu kılmaktadır. İnşaat mühendisliği problemlerinde optimizasyon algoritması seçiminde yalnızca minimum maliyete ulaşmanın yanı sıra algoritmanın yakınsama hızı, hesaplama maliyeti ve sonuçların tutarlılığı gibi kriterler de göz önünde bulundurulmalıdır. Uygun algoritmanın seçimi global optimuma ulaşma olasılığını ve çözüm güvenilirliğini artırmaktadır. Metasezgisel algoritmalar ile optimizasyon tasarımı geleneksel deneme yanılma süreçlerinin yerini alarak daha yenilikçi, hızlı ve sürdürülebilir bir sürece dönüştürmektedir. Literatürde yer alan çeşitli bilimsel araştırmalar ve makalelerde optimizasyon algoritmalarının geleneksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla malzeme kullanımını azaltmada, maliyetleri düşürmede ve yapısal performansı iyileştirmede önemli katkıların sağladığını göstermektedir. Betonarme temel tasarımında optimizasyon algoritmaları güvenlik, sürdürülebilirlik ve maliyet arasındaki dengeyi sağlayan en iyi araç olduğu görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdurashidovna, E. S. (2024). Constructive Solutions of Foundations and Foundations of Buildings: Solusi Konstruktif untuk Pondasi dan Fondasi Bangunan. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 25(1), 10-21070.
- Abija, F. A. (2023). Ground variation, geotechnical uncertainties and reliability of foundation design for sustainable building infrastructures with case histories. *Journal of Material Sciences and Engineering Technology. JMSET-02*.
- Abovskii, N., Inzhutov, I., Khoroshavin, E., Deordiev, S., & Palagushkin, V. (2012). Importance of foundations in earthquake-resistant construction. Seismically protective foundation (In order of discussion). *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 49(5).
- Al-Arafat, M., Enamul Kabir, M., Dasgupta, A., & Nahid, O. F. (2024a). Designing Earthquake-Resistant Foundations: A Geotechnical Perspective On Seismic Load Distribution And Soil-Structure Interaction. *Avijit and Nahid, Omar Faruq*.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (1994). Foundations In Frozen Soils. İçinde O. B. Andersland & B. Ladanyi, *An Introduction to Frozen Ground Engineering* (ss. 182-224). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2290-1_7
- Baessler, M., Cuellar, P., Lüddecke, F., & Victor, A. (2020). Stability and Large Deformations of Slender Structures Supported by Soil Materials. İçinde T. Triantafyllidis (Ed.), *Recent Developments of Soil Mechanics and Geotechnics in Theory and Practice* (C. 91, ss. 355-369). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28516-6_19
- Balakumar, V., Huang, M., Oh, E., & Balasubramaniam, A. S. (2018). A critical and comparative study on 2D and 3D analyses of raft and piled raft foundations. *Geotechnical Engineering*, 49(1), 150-164.
- Bozdogan, K. B., & Keskin, E. (2024a). A method for determination of moment contribution ratio under foundation rotation in shear wall-frame systems. *Buildings*, 14(2), 467.
- Bozdogan, K. B., & Keskin, E. (2024b). A Method for Determining the Fundamental Site Period and the Average Shear Wave Velocity. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 18(05), 2450023. <https://doi.org/10.1142/S1793431124500234>
- Bozdogan, K. B., Keskin, E., & Ozturk, D. (2024). A Practical Method for Determining Dynamic Characteristics of Buildings Under the Effect of Foundation Rotations.

- International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 24(04), 2450035.
<https://doi.org/10.1142/S0219455424500354>
- Camp, C. V., & Assadollahi, A. (2015). CO₂ and cost optimization of reinforced concrete footings subjected to uniaxial uplift. *Journal of Building Engineering*, 3, 171-183.
- Das, B. M. (2008). *Advanced soil mechanics* (3. ed). Taylor&Francis.
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed). Cengage Learning.
- Dey, B., & Chatterjee, A. (2023). A Parametric Study on Raft Foundation in Loose Sand Considering Soil Structure Interaction. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(8), 1806-1813.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.55475>
- Dharmatti, V., & Rakaraddi, G. (2014). An experimental study on vertically loaded driven and cast-in-situ piles. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (JMCE)*, 11(2), 43-48.
- Eslami, A., Ebrahimipour, A., Imani, M., Imam, R., & Mo, P. (2025). Form and load transfer aspects of foundation systems: Case-based implementation and adaptation for buildings. *Deep Underground Science and Engineering*, dug2.12146. <https://doi.org/10.1002/dug2.12146>
- French, S. E. (1999). *Design of Shallow Foundations* (ASCE Press). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784403716>
- Goldberg, D. E., & Samtani, M. P. (1986). *Engineering optimization via genetic algorithm, in will*. <https://www.sid.ir/paper/542017/en>
- Halder, K., & Chakraborty, D. (2020). Effect of inclined and eccentric loading on the bearing capacity of strip footing placed on the reinforced slope. *Soils and Foundations*, 60(4), 791-799.
- Han, A. H., & Zheng, H. J. (2012). Elasto-plastic design of piled raft foundation. *Advanced Materials Research*, 446, 588-591.
- Hanna, A. M., Ayadat, T., & Abdelrahman, M. (2025). *Assessment of Some Design Procedures of Foundation Engineering*.
- Harabinová, S., Panulinová, E., & Kotrasová, K. (2018). Analysis of foundation failure due to changes soil parameters. *AIP Conference Proceedings*, 1978(1), 150016.
- Jeong, S., Park, J., & Chang, D. (2024). An approximate numerical analysis of rafts and piled-rafts foundation. *Computers and Geotechnics*, 168, 106108.
- Kara, D., Bozdogan, K. B., & Keskin, E. (2021). A simplified method for free vibration analysis of wall-frames considering soil structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 77(1), 37-46.

- Kara, D., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2020). Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1347-1355.
- Kashani, A. R., Camp, C. V., Akhiani, M., & Ebrahimi, S. (2022). Optimum design of combined footings using swarm intelligence-based algorithms. *Advances in Engineering Software*, 169, 103140.
- Kashap, A. (2019). Bearing Capacity of Foundation-Review Paper. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 7(10), 62-66.
- Katzenbach R. & Schmitt A. (2005). Bored and screwed piles. İçinde *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-2129>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 4, 1942-1948. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/488968/>
- Keskin, E., & Bozdoğan, K. B. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli ili Özelinde Değerlendirilmesi. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 4(1), 74-90.
- Krabbenhoft, S., Damkilde, L., & Krabbenhoft, K. (2014). Bearing Capacity of Strip Footings in Cohesionless Soil Subject to Eccentric and Inclined Loads. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 04014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000332](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000332)
- Magade, S. B., & Ingle, R. K. (2021). Analysis methods for pile foundation: A critical review of the literature and recommended suggestions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1), 14.
- Mahendar, R. (2015). *Ultimate Bearing Capacity of Strip Footing On Granular Soil Under Eccentrically Inclined Load-A Numerical Approach* [PhD Thesis]. <http://ethesis.nitrkl.ac.in/7182/>
- Miao, Y., Liu, S., Wang, H., & Wang, S. (2011). Predicting the vertical bearing capacity of single piles based on SCPTU test. *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2306-2309.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Mivan Shuttering Details, Tallest Building under construction. (2012). *Construction Sequence of MEP works in Buildings*.
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth-Heinemann.

- Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Yang, X.-S. (2018). Metaheuristic Optimization of Reinforced Concrete Footings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(11), 4555-4563. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-2010-6>
- O'Brien, A. S. (2012a). Chapter 52 foundation types and conceptual design principles. İçinde *ICE manual of geotechnical engineering* (ss. 733-764). Thomas Telford Ltd. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/moge.57098.0733>
- O'Brien, A. S. (2012b). Chapter 52 foundation types and conceptual design principles. İçinde *ICE manual of geotechnical engineering* (ss. 733-764). Thomas Telford Ltd. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/moge.57098.0733>
- Ong, D. E., Cheng, W.-C., & Zhou, H. (2023). *Soil-Structure Interaction*. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://www.mdpi.com/books/reprint/6914>
- Öztürk, H. T. (2018). Bir doğrultuda birleşik eğilme etkisindeki tekil temellerin çeşitli sezgisel algoritmalarla TS500'e göre minimum maliyetle optimum tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1030-1036.
- Panulinová, E., Harabinová, S., & Kormaníková, E. (2018). Extreme loads of subsoil and its impact on the optimization of structures. *AIP Conference Proceedings*, 1978(1), 150015. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/1978/1/150015/979415>
- Pecker, A. (2007). Earthquake Foundation Design. İçinde A. Pecker (Ed.), *Advanced Earthquake Engineering Analysis* (C. 494, ss. 43-61). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-74214-3_4
- Poulos, H. G. (2012). Pile Testing and Settlement Prediction. *Full-Scale Testing and Foundation Design*, 630-649. <https://doi.org/10.1061/9780784412084.0044>
- Preece, D., Heathcote, A., & Binns, J. (2023). Types of bearing piles. İçinde M. Brown, J. Burland, T. Chapman, K. Higgins, H. Skinner, & D. Toll (Ed.), *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Volume II: Geotechnical design, construction and verification* (s. 0). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1680/icemge.66830.1305>
- Priyan, K. (2021). A Review on Assessment of Settlement in Pile Foundation. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*.
- Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.

- Rasheed, A. H., Qasim, O. A., & Al-Quraishy, Q. A. (2020). Behavior of pile rafts with raft size, number of piles and different pile length. *AIP conference proceedings*, 2213(1), 020196.
- Rausche, F., Likins, G., & Kung, S. R. (1992). Pile integrity testing and analysis. *Application of Stress-wave Theory to Piles*. Routledge.
- Rituraj, S. S., & Giridhar Rajesh, B. (2022). Negative Skin Friction on Piles: State of the Art. İçinde A. K. Choudhary, S. Mondal, S. Metya, & G. L. S. Babu (Ed.), *Advances in Geo-Science and Geo-Structures* (C. 154, ss. 323-335). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1993-9_34
- Rotta Loria, A. F. (2018). Performance-based Design of Energy Pile Foundations. *DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute*, 12(2), 94-107. <https://doi.org/10.1080/19375247.2018.1562600>
- Roy, M. (2024). Pile Foundation. İçinde M. Roy, *Geotechnical and Foundation Engineering Practice in Industrial Projects* (ss. 105-140). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7906-6_7
- Salam, S. A., & El-kady, M. S. (2017). Foundations for low cost buildings. *Journal of Computational Design and Engineering*, 4(2), 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2016.09.002>
- Salomovich, T. E., & Shavkatovna, M. Z. (2024). Designing Foundations on Natural Soil for Specified (Uniform) Settlement: Merancang Pondasi di Atas Tanah Alami untuk Pemukiman Tertentu (Seragam). *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 25(4), 10-21070.
- Seward, D. (1994). Foundations and retaining walls. İçinde D. Seward, *Understanding Structures* (ss. 240-258). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-12083-3_12
- Sharma, S. M., Vanza, M. G., & Mehta, D. D. (2014). Comparison of raft foundation and beam & slab raft foundation for high rise building. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(1), 571-575.
- Shooshpasha, I., Hasanzadeh, A., & Taghavi, A. (2013). Prediction of the axial bearing capacity of piles by SPT-based and numerical design methods. *Geomate Journal*, 4(8), 560-564.
- Staff, E. (2017, Şubat 8). Types of Footing—Building Construction Foundation. *Construction Tuts*. <https://constructiontuts.com/types-of-footing/>
- Svinkin, M. R. (2006). Mitigation of Soil Movements from Pile Driving. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11(2), 80-85. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2006\)11:2\(80\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2006)11:2(80))

- Temür, R., & Bekdaş, G. (2018). Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1043-1050.
- Tunca, O. (2024). Effect of the soil slope on the cost-efficient optimum discrete design of reinforced concrete isolated footings. *Structures*, 59, 105769.
- Türkoğlu, H. K., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2023). Optimum Design of Reinforced Concrete Footings Using Jaya Algorithm. İçinde P. Vasant, M. Shamsul Arefin, V. Panchenko, J. J. Thomas, E. Munapo, G.-W. Weber, & R. Rodriguez-Aguilar (Ed.), *Intelligent Computing and Optimization* (C. 852, ss. 86-96). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50330-6_9
- Types Of Foundation Used For Different Structure | Shallow And Deep*. (2019, Temmuz 6). <https://www.civilconcept.com/types-of-foundation/>
- Waheed, J., Azam, R., Riaz, M. R., Shakeel, M., Mohamed, A., & Ali, E. (2022). Metaheuristic-based practical tool for optimal design of reinforced concrete isolated footings: Development and application for parametric investigation. *Buildings*, 12(4), 471.
- Wang, Y., & Kulhawy, F. H. (2008). Economic Design Optimization of Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), 1097-1105. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:8\(1097\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1097))
- Yang, X.-S. (2012). Flower Pollination Algorithm for Global Optimization. İçinde J. Durand-Lose & N. Jonoska (Ed.), *Unconventional Computation and Natural Computation* (C. 7445, ss. 240-249). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27
- Yavan, O. (2015). *Suya Doygün Kil Zeminlere İnşa Edilen İstinat Duvarlarının Dinamik Yükler Altında Davranışı*.
- Yerzatova, M. Y., Mukhambetkaliev, K. K., Jumabayev, A., & Tlegenov, A. (2025). Enhancing the Load-Bearing Capacity and Stability of Weak Soils: An Evaluation of Soil Improvement Techniques. İçinde S. V. Klyuev, N. I. Vatin, K. R. Nabiullina, & V. M. Yumagulova (Ed.), *II International Scientific Conference "Recent Advances in Architecture and Construction" 2024* (ss. 1-8). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82938-3_1
- Zeedan, H. M. S. (2007). *Optimum design of mat foundation* [PhD Thesis, KFUPM].

//

Bölüm 3

GEOSENTETİK İLE KUŞATILMIŞ KOLON SİSTEMLERİNİN BALINA ALGORİTMASIYLA OPTİMUM TASARIMI

Mehmet Fatih YAZICI¹, Soner UZUNDURUKAN²

1 Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, mehmetyazici@sdu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3557-7817

2 Doç. Dr. Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, soneruzundurukan@sdu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4080-6642

1. Giriş

Bir mühendislik yapısının inşa edileceği sahada, zeminlerin mühendislik özelliklerinin (gerilme deformasyon karakteristikleri, permeabilite vb.) projenin uygulanabilmesi açısından yeterli koşulları sağlamaması durumunda, zemini projenin geoteknik ihtiyaçlarına uygun hale getirmek amacıyla yapılan işlemlere zemin iyileştirmesi adı verilmektedir. Zemin iyileştirmesi ile stabilite problemlerini engellemek amacıyla kayma mukavemetinin artırılması, zeminin proje yükleri altında meydana gelebilecek muhtemel deformasyonların azaltılması veya oturmaların hızlandırılması, yeraltı suyu akışının kontrol altına alınması (drenaj veya sızdırmazlık sağlanması), dinamik yükler altında zeminde meydana gelebilecek rijitlik kaybının önlenmesi veya sınırlandırılması gibi projenin ekonomik ömrü boyunca güvenliğini ve servis verilebilirliğini korumaya yönelik hedefler gözetilmektedir. Bu hedefleri gerçekleştirmek için; genel olarak stabilizasyon, güçlendirme, kompaksiyon, enjeksiyon, ısıtma işlemler, drenaj ve ön yüklem başlıkları altında sınıflandırılabilen; zemin türüne, proje gereksinimlerine ve saha koşullarına bağlı olarak uygulanabilecek çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Kirsch, 2012; Han, 2015).

Granüler kolonlar, geoteknik mühendisliğinde özellikle yumuşak killerin, siltlerin ve gevşek kumlu zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan, etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntem, zayıf zemin içerisine, sıkıştırılmış granüler malzemenin düşey doğrultuda belirli karelemlerle yerleştirilmesiyle oluşturulan yarı rijit elemanlara dayanmaktadır. Granüler kolonlar ve zayıf çevre zemini arasındaki rijitlik farkı ile yerleşim karakteristiklerine bağlı olarak, üst yapıdan gelen yükler zemin ve kolonlar arasında paylaşılır. Bu şekilde oluşturulan kompozit yapı (zayıf zemin-granüler kolon) sayesinde, kayma dayanımı artarken deformasyonların azaltılması sağlanır (Almeida vd., 2018). Ayrıca granüler kolonlar, yüksek geçirgenlikleri sayesinde drenaj görevi yaparak, gerektiğinde ek boşluk suyu basınçlarının hızlı şekilde sönmülmesi sağlarlar. Bu sayede doygun killi zeminlerde konsolidasyon sürecinin kısaltılmasında, doygun gevşek kumlarda ise sıvılaşma riskinin azaltılmasında katkı sağlarlar (Huang vd., 2016; Malarvizhi, 2007).

Granüler kolonların etkinliği maruz kalabilecekleri yenilme türü ile ilişkilidir. En sık karşılaşılan yenilme türleri, genel kayma yenilmesi, zımbalama

yenilmesi ve yanal şişme (genişleme/bulging) olarak sıralanabilir. Genel kayma yenilmesi, kısa veya rijit bir tabana oturan kolonlarda zemin ve kolonun birlikte kayması şeklinde oluşur. Zımbalama yenilmesi yeterli rijitliğe sahip olmayan bir tabana oturan kolonların zemine batması durumudur. Yanal şişme ise çevre zeminin yeterli dirence sahip olmaması halinde yüklenen kolonun aşırı genişlemesi ve yük taşıma kabiliyetini kaybetmesidir. Yanal şişme yumuşak killerde sıklıkla gözlenen ve tasarımı kontrol eden göçme türüdür (Idrus vd., 2023).

Granüler kolonlar, düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirlik özellikleri taşıyan yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilse de drenajsız kayma mukavemeti 15 kPa'dan düşük olan çok yumuşak zeminlerde yanal desteğin yetersizliği yanal şişme riskini artırmaktadır. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, granüler kolonların yüksek mukavemetli bir geosentetik malzeme ile sarıldığı Geosentetik ile Kuşatılmış Kolon (GEC) tekniği geliştirilmiştir (Raithel, 1999; Raithel ve Kempfert 1999). Bu yöntem sayesinde, uygulanan düşey yük sonucunda granüler dolgunun yanal olarak genişleme talebi geosentetik malzemede çevresel gerilmelerin oluşmasına neden olmakta ve bu gerilmeler dolguya ilave sınırlama basıncı uygulayarak malzemenin rijitliğini ve kayma mukavemetini artırmaktadır. Ayrıca geosentetik malzemenin filtre işlevi sayesinde drenaj performansının zamanla azalması engellenmiş olmaktadır. Moren vd., (2026), Hosseinpour vd., (2019), Gioffre vd., (2016), Malarvizhi, (2007) ve Almeida vd., (2013) tarafından yürütülen çalışmalar GEC'lerin performansını laboratuvar veya saha deneyleri ve/veya nümerik-analitik analizlerle araştırmışlardır.

GEC sisteminin tasarımı, teknik gereksinimler ile ekonomik uygunluk arasında denge kurulmasını gerektiren bir optimizasyon problemidir. Optimum tasarım ile gerekli tüm güvenlik ve performans koşullarını sağlayan en düşük maliyetli çözüme ulaşılması hedeflenmektedir.

Mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan optimizasyon yaklaşımları deterministik, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar olarak sınıflandırılabilir. Deterministik algoritmalar, matematiksel olarak katı şekilde tanımlanmış çözüm prosedürleri sunmakla birlikte; karmaşık, doğrusal olmayan ve çok değişkenli problemlerde çoğu zaman arama uzayının sınırlı bir bölümünü tarayabilmekte ve yerel optimuma takılma eğiliminde olabilmektedir. Sezgisel algoritmalar daha esnek çözüm stratejileri sunmakla

birlikte, küresel optimumu güvenilir biçimde yakalama konusunda yeterli olmayabilmektedir. Buna karşın meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, geniş arama uzaylarını etkili biçimde tarayabilmeleri, yerel minimumlara takılmadan global optimuma yakın çözümler üretebilmeleri, çok amaçlı tasarım problemlerini eşzamanlı olarak değerlendirebilmeleri ve karmaşık mühendislik problemlerine kolayca entegre edilebilmeleri nedeniyle son yıllarda hızla artan bir ilgi görmektedir. Literatürde, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma (GA), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Balina Optimizasyonu (WOA), Diferansiyel Evrim (DE) gibi meta-sezgisel yöntemlerin taş kolon çözümlerine başarıyla uygulanabildiğini gösteren çok sayıda çalışma sunulmuştur (Lafifi vd., 2024; Fattahi vd., 2024; Nguyen, 2023). Mevcut literatürde GEC'lerin maliyet bazlı optimizasyonu yeterli düzeyde araştırılmamıştır. GEC tasarımlarında kolon çapı, kolon uzunluğu ve kolonlar arası yatay mesafe, uygulamanın maliyetini ve performansını etkileyen üç ana parametredir. Bu çalışmada Balina Optimizasyon Algoritması kullanılarak geosentetik ile kuşatılmış kolon sistemlerinin maliyet bazlı optimum tasarımı incelenmiştir. Bu amaçla farklı dolgu yükleri altında, oturmaları izin verilen seviyede tutmak için gerekli minimum GEC iyileştirme maliyeti araştırılmıştır. Amaç fonksiyonunda iyileştirmede kullanılan granüler dolgu ve geosentetik maliyetinin minimize edilmesi hedeflenmiştir.

2. Problem Tanımı ve Yöntemler

2.1. GEC Tasarım Kriterleri ve Kullanılan Model

Bir granüler kolonda, çevre zeminin yanal desteği, kolondaki yanal basınca eşit olmalıdır. Bu durum özellikle yumuşak zemin içerisindeki granüler kolonun yanal deformasyona uğramadan taşıyabileceği yükü önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. GEC kolonlarda ise, geosentetik kılıfın radyal destek etkisi nedeniyle, çevre zeminin yanal desteği önemsiz hale gelmektedir. Düşey yük paylaşımı sayesinde yükün önemli bir kısmı kolon kesitinde karşılanırken, yumuşak zemine aktarılan gerilme ve buna bağlı olarak zeminin düşey deformasyonları azalmaktadır. GEC kolonları ile üst yapı yükünün önemli kısmının derindeki taşıyıcı tabakaya aktarılması sağlanırken aynı zamanda bu kolonlar sahada düşey dren vazifesi görmektedir.

Sahada GEC'ler üçgen, kare veya altıgen dizilime sahip olacak şekilde yerleştirilebilir. Bu sistemlerin tasarımında genellikle birim hücre yaklaşımı kullanılmaktadır (Raithel, 1999; Raithel ve Kempfert, 1999; EBGEO, 2011). Bu yöntemde geosentetik kaplamadaki çekme kuvveti, zemin ve GEC kolondaki ayrı ayrı oturma değerleri, geosentetik kaplamadaki özgül radyal deformasyon, GEC kolonun ve zeminin üstüne gelen düşey gerilme değerleri iteratif olarak hesaplanabilmektedir. Yöntemin hesaplama sürecinde kullandığı hipotezler aşağıda verilmiştir (EBGEO, 2011):

1-) Kolonlar sağlam bir tabakaya oturmakta ve bu tabakada meydana gelebilecek çökmeler ihmal edilmektedir.

2-) Kolon ve çevresindeki yumuşak zeminin oturmaları eşittir.

3-) Kolonlarda aktif durum mobilize olmakta ve bu nedenle kolonlarda yatay toprak basınçlarının hesabında aktif toprak basıncı katsayısı (K_{ac}) kullanılır.

4-) Kolonlar, yer değiştirme (replacement) ve deplasman (displacement) yöntemleri kullanılarak iki farklı şekilde imal edilebilmektedir. Eğer uygulamada yer değiştirme yöntemi kullanılacaksa zemine sükûnet halindeki toprak basıncı, deplasman yöntemi kullanılacaksa toprak basıncı katsayısı sükûnet haline göre artırılır. Her iki katsayı da dolgu inşasından önceki durumu temsil etmektedir.

5-) Geosentetik kaplama doğrusal-elastik bir davranışa sahiptir.

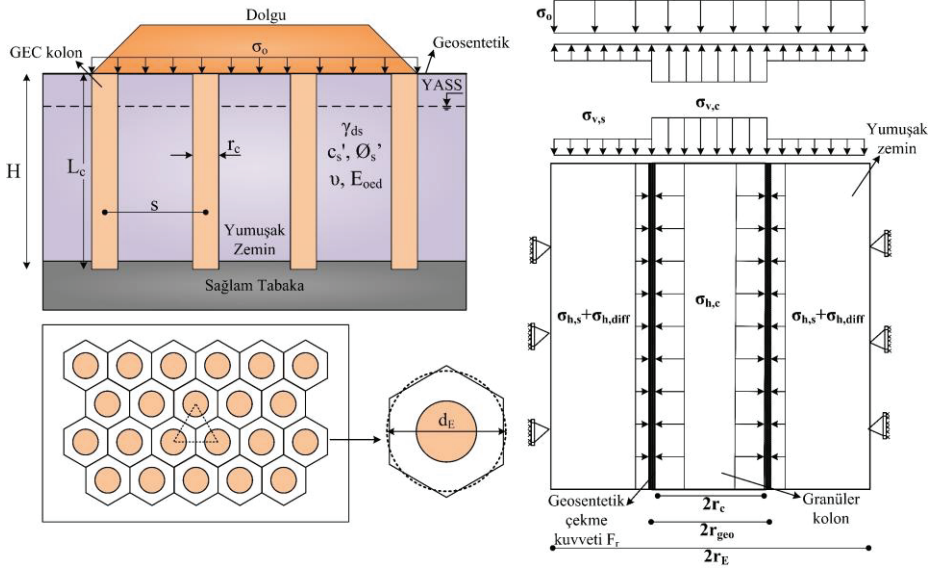
6-) Hesaplamalarda yumuşak zeminin uzun vadeli drenajlı davranışını (efektif parametreler) dikkate alınır. Oturmalar ve geosentetik kaplamaya etki eden çekme kuvveti için en yüksek değerler bu koşul için meydana gelir.

Bu yaklaşıma göre, dizilimin şekline bağlı olarak gerçekte üçgen, kare veya altıgen olan granüler kolon etki alanı, eşdeğer dairesel alan olarak kabul edilmektedir. Eşdeğer dairelerin çapları (d_E), komşu kolonlar arası mesafeyle (s) ilişkili olarak belirlenmektedir (Eşitlik 1).

$$d_E = s c_g \quad (1)$$

Burada c_g dizilim şekline bağlı katsayı olup; üçgen dizilimde (altıgen etki alanı) 1.05, kare dizilimde 1.13 ve altıgen dizilimde (üçgen etki alanı) 1.29 değerine sahiptir.

Şekil 1’de üçgen dizilimde (altıgen etki alanı) bir geosentetik ile kuşatılmış kolon yerleşimi görülmektedir. Bu çalışmada üçgen dizilime sahip GEC modeli incelenmiş olup EBGEO (2011) tarafından önerilen hesaplama kriterleri dikkate alınmıştır.



Şekil 1. GEC yerleşimi ve etki eden gerilmeler

Üçgen dizilime sahip GEC’lerde, A_c alanına sahip tek kolonun etki alanı, gerçekte altıgen geometriye sahip eşdeğer dairesel alan (A_E) olarak tanımlanabilir.

$$A_E = \frac{\pi d_E^2}{4} \quad (2)$$

$$A_c = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (3)$$

Alan değişim oranı (α_E) ise granüler kolonun alanının eşdeğer birim hücre alanına oranı olarak tanımlanır.

$$\alpha_E = \frac{A_c}{A_E} \quad (4)$$

Yük dağılım faktörü (E),

$$E = \alpha_E \frac{\Delta\sigma_{v,c}}{\Delta\sigma_o} \quad (5)$$

Birim hücre üzerine σ_o düşey yüklemesi etki ettiğinde, zemin ve GEC kolonda meydana gelen oturmaların eşit olacağı kabul edilirse, zemin ve kolon rijitlikleriyle ilişkili olarak bu yüklemeyi karşılayacaklardır. Bu durumda birim hücredeki kuvvet dengesi için Eşitlik 5 yazılabilir.

$$\Delta\sigma_{v,s} = \frac{\Delta\sigma_o (1-E)}{1-\alpha_E} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{v,c} = \frac{\Delta\sigma_o - \Delta\sigma_{v,s} (1-\alpha_E)}{\alpha_E} \quad (7)$$

Burada $\Delta\sigma_{v,c}$ ve $\Delta\sigma_{v,s}$ yükleme sonrasında birim hücredeki, sırasıyla, granüler kolona ve zemine etki eden ilave düşey gerilmelerdir.

Üzerine düşey yük etki eden granüler dolgu malzemesi yanal olarak genişlemeye çalışırken kolonun çevresini saran geosentetik malzeme ve yanal zemin gerilmeleri bu genişlemeye direnç göstermektedir. Granüler kolondaki ve çevre zemindeki yanal gerilmeler (sırasıyla, $\Delta\sigma_{h,c}$ ve $\Delta\sigma_{h,s}$) aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$\Delta\sigma_{h,c} = K_{a,c} (\Delta\sigma_{v,c} + \sigma_{vo,c}) \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{h,s} = \Delta\sigma_{v,s} K_{o,s} + \sigma_{vo,s} K_{o,s}^* \quad (9)$$

Burada $\sigma_{vo,c}$ ve $\sigma_{vo,s}$ sırasıyla kolon ve zeminde yükleme öncesi düşey gerilmelerdir. $K_{a,c}$, kolon malzemesinin aktif toprak basıncı katsayısı; $K_{o,s}$,

zeminin sükunetteki toprak basıncı katsayısıdır. $K_{o,s}^*$, kolonun imalatında kullanılan yöntemle göre değişmektedir; yer değiştirme yöntemi kullanılan kolonlarda zeminin sükunetteki toprak basıncı katsayısına, deplasman yöntemlerinin kullanılması halinde 1'e eşit alınmaktadır.

Kolonun etrafını saran geosentetik malzemede ise yanal genişlemeye karşı direnç sonucunda çembersel çekme kuvveti (F_r) meydana gelir.

$$F_r = J \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (10)$$

Burada, J geosentetik materyalin aksenal rijitliğidir, r_{geo} geosentetik kılıfın çapını ve Δr_{geo} yanal genişleme sonucu çaptaki artışını ifade etmektedir. Çembersel çekme kuvveti, geosentetik kılıfın çapına bölünerek radyal gerilmelere dönüştürülebilmektedir.

Yük uygulanan kolonun ve geosentetik malzemenin yanal genişlemeleri için aşağıdaki uygunluk koşulu yazılabilir.

$$r_c + \Delta r_c = r_{geo} + \Delta r_{geo} \quad (11)$$

Kolon içindeki ve çevresindeki bu gerilmeler, kolonun genişlemesine ve çevresindeki zeminde pasif toprak basınçlarının mobilizasyonuna neden olan bir gerilme farkı ($\Delta \sigma_{h,diff}$) oluşturur.

$$\Delta \sigma_{h,diff} = K_{a,c} \left(\frac{\Delta \sigma_o - \Delta \sigma_{v,s} (1 - \alpha_E)}{\alpha_E} + \sigma_{vo,c} \right) - \Delta \sigma_{v,s} K_{o,s} - \sigma_{vo,s} K_{o,s}^* + J \frac{(r_{geo} - r_c)}{r_{geo}^2} - J \frac{\Delta r_c}{r_{geo}^2} \quad (12)$$

Kolonun radyal deformasyonu (Δr_c),

$$\Delta r_c = \frac{K_{a,c} \left(\frac{\Delta \sigma_o - \Delta \sigma_{v,s} (1 - \alpha_E)}{\alpha_E} + \sigma_{vo,c} \right) - \Delta \sigma_{v,s} K_{o,s} - \sigma_{vo,s} K_{o,s}^* + J \frac{(r_{geo} - r_c)}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{\left(\frac{1}{\alpha_E} - 1 \right) r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \quad (13)$$

Zemindeki oturma (s_s) aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir.

$$s_s = \left(\frac{\Delta\sigma_{v,s}}{E_{\text{oed},s}} - \frac{2\nu_s}{E^* (1-\nu_s)} \Delta\sigma_{h,\text{diff}} \right) h \quad (14)$$

$$E^* = \left(\frac{1}{1-\nu_s} + \frac{1}{(1+\nu_s)\alpha_E} \right) \frac{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{1-\nu_s} E_{\text{oed},s} \quad (15)$$

Burada $E_{\text{oed},s}$ zeminin referans gerilme (p_{ref}) için ödometrik elastisite modülünü, ν_s yumuşak zeminin poisson oranını, h ise sıkışan tabaka kalınlığını temsil etmektedir.

Kolon malzemesinin sabit hacimde kaldığı varsayılarak ve kolonun oturduğu tabakadaki oturma ihmal edilerek kolonun oturması (s_c) aşağıdaki geometrik ilişkiyle belirlenebilir.

$$s_c = \left(1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \right) h \quad (16)$$

Hesaplarda Şekil 1’de gösterilen model (üçgen dizilim) dikkate alınarak beş farklı dolgu yükü (20, 40, 60, 80 ve 100 kPa) altında, üç farklı yumuşak zemin (zemin I, zemin II ve zemin III) içerisinde, dört farklı örgülü polyester geotekstil malzemesi (geotekstil I, geotekstil II, geotekstil III ve geotekstil IV) ile kuşatılmış 5 m uzunluğundaki taş kolonun (iyileştirilen yumuşak zemin tabakası kalınlığı) oturma miktarı incelenmiştir. Ayrıca taş kolon dolgu malzemesi için üç farklı granüler materyal (dolgu I, dolgu II ve dolgu III) seçilmiştir. Taş kolonu çevreleyen yumuşak zeminlere ait özellikler Tablo 1’de, granüler dolguya ve geotekstil malzemelere ait özellikler ve birim fiyatlar ise sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3’te sunulmuştur. Dolgu ve geotekstile ait özellikler piyasadan ortalama değerler olarak temin edilmiştir. Tablo 1’deki ödometrik elastisite modülü değerleri 100 kPa referans gerilmeye (p_{ref}) karşılık zemin rijitliklerini temsil etmektedir. Taş kolonu çevreleyen yumuşak zemine ait $E_{\text{oed,ref}}$ değerinin taş kolon boyunca değişimi, zemine ait kayma mukavemeti parametreleri ve gerilme koşulları dikkate alınarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed},s} \left(\frac{p^* + c' \cot \phi'}{p_{\text{ref}}} \right)^m \quad (17)$$

$$p^* = \frac{p_2 - p_1}{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} \quad (18)$$

$$p_1 = \sigma_{\text{vo},s} \quad (19)$$

$$p_2 = \Delta \sigma_{\text{v},s} + \sigma_{\text{vo},s} \quad (20)$$

Eşitlik 17'deki m değeri, rijitliğin gerilmeye bağlı değişimini üstel olarak temsil eden bir katsayıdır ve yumuşak killerin modellenmesinde 1 olarak alınabilir (Surarak vd., 2012).

Tablo 1. Taş kolonu çevreleyen zemin özellikleri

Özellik	Zemin I	Zemin II	Zemin III
γ_{ds} (kN/m ³)	16	17	18
γ_s' (kN/m ³)	6	7	8
c_s' (kPa)	0	0	0
ϕ_s' (°)	15	20	25
$E_{\text{oed},s}$ (kPa)	750	2000	3000
ν_s (-)	0.4	0.4	0.4

Tablo 1 içerisindeki γ_{ds} , γ_s' , c_s' , ϕ_s' , $E_{\text{oed},s}$ ve ν_s değerleri, taş kolonu çevreleyen yumuşak zeminin sırasıyla doymun birim hacim ağırlığını, batık birim hacim ağırlığını, kohezyonunu, içsel sürtünme açısını, ödometrik elastisite modülünü ve poisson oranını temsil etmektedir.

Tablo 2. Taş kolon dolgu malzemesi özellikleri ve birim fiyatları

Özellik	Dolgu I	Dolgu II	Dolgu III
γ_{dc} (kN/m ³)	19	20	21
c_c' (kPa)	0	0	0
ϕ_c' (°)	34	38	42

DM (\$/m ³)	6	10	14
-------------------------	---	----	----

Tablo 2 içerisindeki γ_{dc} , c'_c , ϕ'_c ve DM değerleri, taş kolon dolgu malzemesinin sırasıyla doygun birim hacim ağırlığını, kohezyonunu, içsel sürtünme açısını ve birim maliyetini temsil etmektedir.

Tablo 3. Geotekstillerin özellikleri ve birim fiyatları

Özellik	Geotekstil I	Geotekstil II	Geotekstil III	Geotekstil IV
T (kN/m)	150	250	350	450
ϵ (%)	10	10	10	10
J _{geo} (kN/m)	1500	2500	3500	4500
GM (\$/m ²)	2	3.5	5	6.5
RF _{CR}		1.6		
β	0.55 (50 yıl tasarım ömrü ve %6 birim deformasyon için)			
RF _D		1.1		
RF _{ID}		1.1		
F _s		1.5		

Tablo 3 içerisindeki T, ϵ , J_{geo} ve GM değerleri geotekstilin sırasıyla kısa dönem çekme mukavemetini, kopma uzamasını, rijitliğini ve birim maliyetini temsil etmektedir.

Taşıma, kurulum ve sıkıştırma sırasındaki hasar görme potansiyelleri, hava koşulları, kimyasallar ve mikroorganizmalar gibi çevresel sebeplerden kaynaklanabilecek olumsuz etkiler dikkate alınarak geotekstil malzemenin uzun dönem mukavemeti için azalım katsayıları kullanılmaktadır (EBGEO, 2010; FHWA, 2001). Bu doğrultuda EBGEO (2010) ve FHWA (2001) tarafından önerilen sınırlar dikkate alınarak bu katsayılar (RF_{CR}, RF_b, RF_{ID} ve β) üretici firmalardan yaklaşık olarak temin edilmiştir. Ayrıca yapının geometrisindeki, dolgu ve donatı özelliklerindeki ve dışarıdan uygulanan yüklerdeki belirsizlikleri hesaba katmak için yukarıda bahsi geçen azalım katsayılarına ilave olarak bir genel güvenlik faktörü (F_s) kullanılmaktadır. Geotekstil malzemenin uzun dönem performansı hem dayanım kaybı hem de zamanla artan şekil değiştirmeye bağlı olarak değiştiği için bu iki etkinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Bu iki koşul için geotekstilin uzun dönem izin verilebilir çekme mukavemeti (F_{all}) aşağıda ayrı ayrı verilmiştir:

Krip kopması koşulu için,

$$F_{all,f} = \frac{T}{RF_{CR} * RF_{ID} * RF_D * F_S} \quad (21)$$

Krip birim deformasyonu koşulu için,

$$F_{all,s} = \frac{T * \beta}{RF_{ID} * RF_D * F_S} \quad (22)$$

Burada β , GEC kolonun tasarım ömrü ve geotekstil izin verilen birim deformasyonuna bağlı olarak üretici firmaların deneysel olarak belirledikleri izokron grafiklerinden elde edilmektedir. RF_{ID} , RF_D ve RF_{CR} değerleri sırasıyla krip yenilmesi, durabilite ve kurulum hasarı için azalım katsayılarını temsil etmektedir. T ise geotekstil kısa dönem çekme dayanımını temsil etmektedir. GDK kolonunda geotekstil materyale gelen çekme kuvvetinin, uzun dönem tasarım için $F_{all,f}$ ve $F_{all,s}$ değerlerinden küçük olanını aşmaması gerekmektedir.

Hesaplarda EBGEO (2011) tarafından önerilen ve yukarıda detayı verilen prosedür izlenmiş olup farklı dolgu yükleri altında farklı izin verilen taş kolon oturma sınırlarına karşılık maliyet bazlı optimizasyon amaçlanmıştır. Bunun için Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından geliştirilen Balina Optimizasyon Algoritması kullanılmıştır. Analizlerde kolon çapının geotekstil çapına eşit olduğu varsayılmıştır.

2.2. Balina Optimizasyon Algoritması (WOA)

WOA, Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından kambur balinaların özgün avlanma davranışlarının matematiksel olarak modellenmesi ile geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Kambur balinalar, avlarını kuşatmak ve yakalamak amacıyla kabarcık halkası yöntemi olarak bilinen ve azalan yarıçaplı spiral bir hareket içeren özel bir strateji kullanırlar. WOA, bu biyolojik davranışı çözüm uzayında optimum noktanın bulunmasına uyarlayarak avın kuşatılması, kabarcık halkası saldırısı, araştırma ve beslenme davranışı olmak üzere üç temel mekanizma üzerinden çalışmaktadır (Abualigah, 2024):

(i) Avın kuşatılması

Balinaların avı çevreleyerek yaklaşma davranışı, çözüm uzayında optimum noktaya doğru yönelimi temsil etmektedir. Bu yaklaşım, aşağıdaki iki denklem ile modellenmektedir:

Ajan ile en iyi çözüm arasındaki uzaklık:

$$\vec{D} = \left| \vec{C}\vec{X}_{(t)}^* - \vec{X}_{(t)} \right| \quad (23)$$

Konum güncellemesi:

$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_{(t)}^* - \vec{A}\vec{D} \quad (24)$$

Burada $\vec{X}_{(t+1)}$ mevcut konumu, $\vec{X}_{(t)}^*$ en iyi çözümü, \vec{A} ve \vec{C} ise konum güncelleme katsayılarını temsil etmektedir. Bu katsayılar aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\vec{A} = 2\vec{\alpha}\vec{r} - \vec{\alpha} \quad (25)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (26)$$

Burada $\vec{\alpha}$ algoritmanın arama davranışını yöneten bir katsayı olup iterasyon süreci boyunca 2'den 0'a lineer olarak azalmaktadır. \vec{r} ise [0,1] aralığında değişen ve her bir iterasyonda rastgele yeniden üretilen sayı vektörüdür.

(ii) *Kabarcık halkası saldırısı*

Kambur balinaların avı yakalayabilmek için uyguladıkları spiral hareket, WOA'da ikinci güncelleme mekanizmasını oluşturmaktadır. Bu mekanizma, azalan yarıçap derecesine sahip logaritmik bir spiral formu ile modellenmiştir:

$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{D}'e^{bl} \cos(2\pi l) + \vec{X}_{(t)}^* \quad (26)$$

Burada l, [-1,1] aralığında değişen rastgele bir değer, b spiralin şeklini belirleyen sabittir, \vec{D}' ise i. arama ajanı ve hedef av arasındaki mesafedir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\vec{D}' = \left| \vec{X}_{(t)}^* - \vec{X}_{(t)} \right| \quad (27)$$

(iii) *Araştırma ve beslenme davranışı*

Algoritmanın yerel minimumlara sıkışmasını önlemek amacıyla belirli durumlarda ajanlar, en iyi çözümü değil popülasyondan rastgele seçilen başka bir ajanın konumunu takip etmektedir.

$$\vec{D} = |\vec{C}\vec{X}_{\text{rand}} - \vec{X}| \quad (28)$$

\vec{X}_{rand} , rastgele seçilmiş bir arama ajanını ifade eder.

$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A}\vec{D} \quad (29)$$

Bu mekanizma, çözüm uzayının daha geniş bir bölümünün taranmasını sağlayarak algoritmanın keşif kapasitesini artırmaktadır.

Algoritma çalıştırıldığında başlangıçta çözüm uzayı içerisinde rastgele konumlandırılmış bir arama ajanı (balina) popülasyonu oluşturulur. Her iterasyonda popülasyondaki en iyi çözümü temsil eden ajan konumu X^* olarak belirlenir ve diğer tüm ajanların konumları bu referansa göre güncellenir. Her iterasyonda her ajan için $|A| < 1$ olduğunda av kuşatma denklemi (Eşitlik 24) veya kabarcık halkası saldırısı denklemi (Eşitlik 26) olasılıksal olarak uygulanır ve en iyi çözüme yaklaşarak iyileştirme (exploitation) davranışı sergilenir. $|A| > 1$ olduğunda ise yeni bölgeleri araştırmak üzere Eşitlik 29 ile keşif (exploration) davranışı uyarılır. Daha iyi bir çözümün elde edilmesi halinde X^* konum vektörü güncellenir. α parametresi iterasyon adımına bağlı olarak azaltılarak tüm aşamalar tekrarlanır. Seçilen maksimum iterasyon adımına ulaşıldığında en iyi çözüm çıktı olarak kabul edilir.

Bu çalışmada optimizasyon hesaplarında taş kolonlar arası yatay mesafe (s) ile kolon yarı çapı (r_c) değişken olarak kullanılmıştır. Tablo 2-3'te verilen farklı geotekstil ve dolgu malzemelerine ait özellikler ve birim fiyatlar kullanılarak WOA yardımıyla farklı dolgu yükleri ve izin verilebilir oturma sınırları için en düşük maliyette GEC tasarımı amaçlanmıştır. Analizlerde kolon yarı çapları 0.30-0.60 m arasında, kolonlar arası mesafe ise 1.00-3.50 m arasında değişecek şekilde incelenmiştir. Literatürde ve uygulamada eşdeğer alan oranı (α_E), genellikle 0.1 ila 0.4 arasında olacak şekilde seçilmektedir (Ambily ve Gandhi, 2007; Almeida vd., 2014; Chen vd., 2022; Gu vd., 2023; Wang vd., 2023). Bu sebeple seçilen kolon çap ve aralık değerleri ile hesaplanan α_E değerleri bu

aralıkta olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Amaç fonksiyonu (m^2 başına düşen maliyet, M) Eşitlik 30 ile hesaplanmış olup WOA ile amaç fonksiyonunun minimize edilmesi hedeflenmiştir. Problemin karmaşıklığı ve kendi iteratif doğası nedeniyle optimizasyon algoritmasında 500 arama ajanı ile 500 iterasyon kullanılmıştır. Hesaplarda nakliye maliyetleri dikkate alınmamıştır.

$$M = \frac{\frac{\pi r_c^2}{4} L_c (DM) + 2\pi r_c L_c (GM)}{\frac{\pi d_E^2}{4}} \quad (30)$$

Eşitlik 30 içerisindeki L_c , GEC'nin uzunluğunu temsil etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

GEC yöntemi ile iyileştirilen, farklı yüklemeler altındaki üç farklı yumuşak zeminde farklı özelliklere ve birim fiyatlara sahip dolgu ve geotekstil malzemeleri dikkate alınarak yapılan WOA optimizasyonu sonuçları Tablo 4-6'da sunulmuştur. Proje gereksinimlerine göre izin verilen oturma sınırları farklılık gösterebileceğinden optimizasyon prosedürü farklı izin verilen oturma sınırları (S_{all}) için gerçekleştirilmiştir. Bu tabloda en düşük maliyetlere karşılık gelen kolon yarıçapları ve kolonlar arası mesafe, dolgu ve geotekstil malzemelerinin özellikleri ve toplam oturma miktarı ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 4. Zemin I için optimizasyon sonuçları

σ_0 (kPa)	S_{all} (mm)	r_c (m)	s (m)	α_E (-)	Θ_c ($^\circ$)	J_{geo} (kN/m)	Oturma (mm)	Maliyet (\$/m ²)
20	25	0.426	2.479	0.107	42	1500	24.996	12.530
20	50	0.600	3.002	0.145	34	1500	49.967	9.179
20	75	0.599	3.364	0.115	34	1500	74.997	7.292
20	100	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	125	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	150	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	175	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	200	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	225	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
20	250	0.581	3.499	0.100	34	1500	89.684	6.445
40	25	0.600	1.886	0.367	34	1500	25.000	23.227
40	50	0.470	2.759	0.105	42	3500	49.991	18.543
40	75	0.303	1.756	0.108	42	1500	74.990	14.655
40	100	0.378	2.276	0.100	42	1500	99.961	12.300
40	125	0.302	1.722	0.111	34	1500	124.977	10.715
40	150	0.330	1.987	0.100	34	1500	149.904	9.067
40	175	0.408	2.457	0.100	34	1500	174.858	7.905
40	200	0.429	2.581	0.100	34	1500	181.005	7.668
40	225	0.429	2.581	0.100	34	1500	181.005	7.668
40	250	0.429	2.581	0.100	34	1500	181.005	7.668
60	25	0.542	1.825	0.320	42	1500	24.996	34.208
60	50	0.531	2.053	0.242	42	1500	49.997	26.091
60	75	0.302	1.706	0.113	42	2500	74.993	21.087
60	100	0.350	2.108	0.100	42	2500	99.970	17.003
60	125	0.417	2.511	0.100	42	2500	124.934	15.403
60	150	0.313	1.885	0.100	42	1500	149.914	13.394
60	175	0.302	1.611	0.127	34	1500	175.000	12.242
60	200	0.300	1.717	0.111	34	1500	199.961	10.707
60	225	0.300	1.748	0.107	34	1500	206.972	10.330
60	250	0.300	1.748	0.107	34	1500	206.972	10.330
80	25	0.368	1.188	0.347	42	1500	24.151	43.198
80	50	0.552	1.841	0.326	42	1500	49.993	34.598
80	75	0.301	1.651	0.121	42	3500	74.991	28.473
80	100	0.324	1.950	0.100	42	3500	99.986	22.468
80	125	0.300	1.803	0.100	42	2500	124.934	18.750
80	150	0.371	2.234	0.100	42	2500	149.938	16.444
80	175	0.411	2.472	0.100	42	2500	174.991	15.534
80	200	0.374	2.252	0.100	38	2500	199.957	14.368
80	225	0.346	2.079	0.100	34	2500	224.991	13.157
80	250	0.348	2.093	0.100	34	2500	226.405	13.074
100	25	0.535	1.612	0.400	42	2500	24.997	54.118
100	50	0.491	1.505	0.386	42	1500	49.965	42.761

100	75	0.300	1.662	0.118	42	4500	74.992	33.887
100	100	0.313	1.876	0.101	42	4500	99.987	27.987
100	125	0.311	1.869	0.100	42	3500	124.980	23.183
100	150	0.382	2.297	0.100	42	3500	149.890	20.122
100	175	0.458	2.758	0.100	42	3500	174.896	17.926
100	200	0.303	1.819	0.100	38	2500	199.999	16.626
100	225	0.397	2.388	0.100	42	2500	219.126	15.831
100	250	0.330	1.986	0.100	38	2500	229.529	15.633

Tablo 5. Zemin II için optimizasyon sonuçları

σ_0 (kPa)	S_{all} (mm)	r_c (m)	s (m)	α_E (-)	ϕ_c ($^\circ$)	J_{geo} (kN/m)	Oturma (mm)	Maliyet (\$/m ²)
20	25	0.507	3.019	0.102	42	1500	24.995	11.199
20	50	0.599	3.348	0.116	34	1500	49.993	7.353
20	75	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	100	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	125	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	150	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	175	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	200	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	225	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
20	250	0.581	3.499	0.100	34	1500	58.595	6.445
40	25	0.497	2.053	0.213	42	1500	24.993	23.440
40	50	0.527	2.582	0.151	42	1500	49.982	16.291
40	75	0.600	2.613	0.191	34	1500	74.989	12.115
40	100	0.600	2.991	0.146	34	1500	99.991	9.235
40	125	0.496	2.98	0.101	34	1500	124.998	7.068
40	150	0.494	2.975	0.100	34	1500	125.214	7.051
40	175	0.494	2.975	0.100	34	1500	125.214	7.051
40	200	0.494	2.975	0.100	34	1500	125.214	7.051
40	225	0.494	2.975	0.100	34	1500	125.214	7.051
40	250	0.494	2.975	0.100	34	1500	125.214	7.051
60	25	0.452	1.548	0.309	42	1500	24.997	35.340
60	50	0.538	2.12	0.233	42	1500	49.988	25.003
60	75	0.600	2.096	0.297	34	1500	74.980	18.829
60	100	0.300	1.737	0.108	42	1500	99.969	14.791
60	125	0.599	2.626	0.189	34	1500	124.995	11.966
60	150	0.333	1.93	0.108	34	1500	149.992	9.727
60	175	0.307	1.849	0.100	34	1500	152.428	9.517
60	200	0.307	1.849	0.100	34	1500	152.428	9.517
60	225	0.307	1.849	0.100	34	1500	152.428	9.517
60	250	0.307	1.849	0.100	34	1500	152.428	9.517
80	25	0.425	1.279	0.400	42	1500	24.998	46.806

80	50	0.584	1.967	0.320	42	1500	49.996	33.340
80	75	0.303	1.315	0.192	42	1500	74.992	26.133
80	100	0.384	2.282	0.102	42	3500	99.933	20.532
80	125	0.519	3.126	0.100	42	3500	124.991	16.635
80	150	0.510	3.068	0.100	42	2500	149.990	13.878
80	175	0.372	2.237	0.100	34	2500	170.954	12.429
80	200	0.372	2.237	0.100	34	2500	170.954	12.429
80	225	0.372	2.237	0.100	34	2500	170.954	12.429
80	250	0.372	2.237	0.100	34	2500	170.954	12.429
100	25	0.468	1.41	0.400	42	2500	24.997	57.871
100	50	0.596	1.797	0.398	42	1500	49.999	41.271
100	75	0.600	1.81	0.398	38	1500	74.973	33.179
100	100	0.599	1.817	0.394	34	1500	99.987	24.963
100	125	0.302	1.714	0.113	42	2500	124.993	20.938
100	150	0.340	2.047	0.100	42	2500	149.979	17.310
100	175	0.339	2.036	0.100	38	2500	174.999	15.384
100	200	0.301	1.783	0.103	34	2500	183.849	15.095
100	225	0.301	1.783	0.103	34	2500	183.849	15.095
100	250	0.301	1.783	0.103	34	2500	183.849	15.095

Tablo 6. Zemin III için optimizasyon sonuçları

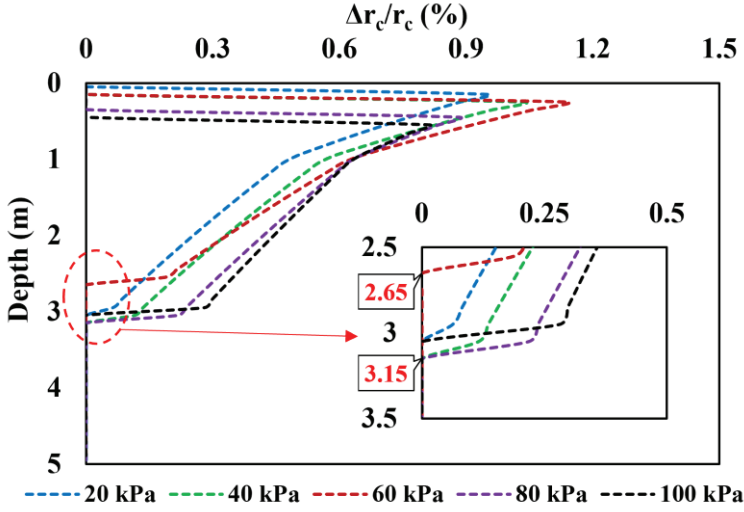
σ_0 (kPa)	S_{all} (mm)	r_c (m)	s (m)	α_E (-)	θ_c ($^\circ$)	J_{geo} (kN/m)	Oturma (mm)	Maliyet (\$/m ²)
20	25	0.600	2.858	0.160	34	1500	24.995	10.127
20	50	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	75	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	100	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	125	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	150	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	175	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	200	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	225	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
20	250	0.581	3.499	0.100	34	1500	45.146	6.445
40	25	0.543	2.287	0.204	42	1500	24.997	21.817
40	50	0.500	2.634	0.130	42	1500	49.994	14.357
40	75	0.600	2.954	0.150	34	1500	74.992	9.480
40	100	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	125	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	150	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	175	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	200	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	225	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445
40	250	0.581	3.499	0.100	34	1500	98.234	6.445

60	25	0.592	2.002	0.317	42	1500	24.996	32.925
60	50	0.600	1.961	0.340	34	1500	49.990	21.511
60	75	0.600	2.304	0.246	34	1500	74.959	15.583
60	100	0.600	2.700	0.179	34	1500	99.998	11.333
60	125	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
60	150	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
60	175	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
60	200	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
60	225	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
60	250	0.366	2.201	0.100	34	1500	124.553	8.476
80	25	0.508	1.530	0.400	42	1500	24.994	43.745
80	50	0.600	2.108	0.293	42	1500	49.961	30.330
80	75	0.600	1.981	0.332	34	1500	74.969	21.053
80	100	0.300	1.623	0.124	42	1500	99.985	16.941
80	125	0.471	2.160	0.173	34	1500	124.978	12.501
80	150	0.301	1.671	0.117	34	1500	137.119	11.329
80	175	0.301	1.671	0.117	34	1500	137.119	11.329
80	200	0.301	1.671	0.117	34	1500	137.119	11.329
80	225	0.301	1.671	0.117	34	1500	137.119	11.329
80	250	0.421	2.532	0.100	34	2500	141.075	11.331
100	25	0.600	1.808	0.399	42	3500	24.995	61.192
100	50	0.600	1.893	0.364	42	1500	49.972	37.611
100	75	0.559	1.684	0.400	34	1500	74.979	26.297
100	100	0.600	2.023	0.319	34	1500	99.994	20.188
100	125	0.524	2.049	0.237	34	1500	124.957	16.175
100	150	0.382	2.120	0.117	34	2500	149.954	14.304
100	175	0.385	2.319	0.100	38	2500	148.550	14.091
100	200	0.322	1.934	0.100	34	2500	153.710	13.923
100	225	0.322	1.934	0.100	34	2500	153.710	13.923
100	250	0.322	1.934	0.100	34	2500	153.710	13.923

Optimizasyon algoritmasının genel eğilimi kolonlar arasındaki mesafeyi arttırarak kolon sayısını ve maliyeti düşürmektir. GEC tasarım kriterleri kullanılarak WOA yardımıyla hesaplanan iyileştirilmiş zemin oturmalarının izin verilen oturmaları aşmadığı görülmektedir. Ancak izin verilen oturma değerleri yüksek seçildiğinde toplam oturmaların izin verilenlerin çok daha altında kalacak şekilde optimizasyon sürecinin sonlandığı görülmektedir. Bunun nedeni; kolon çapı, kolonlar arası mesafe ve geotekstil malzemenin rijitliği gibi parametrelerin uygulamada genellikle kullanılan sınırlar dikkate alınacak şekilde kısıtlı (kesikli değişken) olarak optimizasyona dahil edilmesidir. Örneğin eşdeğer alan oranı için alt sınır olarak kullanılan 0.1 değeri daha küçük bir değer seçilseydi toplam oturmalar izin verilenlere daha yakın çıkacaktı. Tablo 4-6'dan görüldüğü üzere GEC'yi çevreleyen yumuşak

zeminin ödometrik elastisite modülü ile maliyet arasında genellikle lineer bir ilişki vardır. İzin verilebilir oturma sınırı proje gereksinimlerine bağlı olarak düşürüldükçe maliyetin logaritmik olarak arttığı görülmektedir.

25 mm izin verilen oturma sınırı için farklı dolgu yüklerine karşılık hesaplanan optimum GEC'lerin $\Delta r_c/r_c$ değerlerinin taş kolon boyunca değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. $\Delta r_c/r_c$ değerlerinin derinliğe göre değişimi

Şekil 2 incelendiğinde deformasyonların, genellikle taş kolon üst kotundan 2.65-3.15 m derinliğe kadar baskın olduğu görülmektedir. Bu derinlik kolon çapının ortalama yaklaşık 3.15 katına eşittir. Bahsi geçen bu sonuç Moreno vd., (2026) tarafından yürütülen çalışmanın sonuçlarına ($2.71r_c$) yakındır. Yanal şişme şeklinde (bulging) kendini gösteren bu deformasyonların oluştuğu bölgelerde geotekstilin çekme direnci mobilize olmaktadır. GEC'lerin bulging kaynaklı oturmaları için izin verilen oturma sınırının büyütülmesi halinde ise taş kolon boyunca radyal deformasyonlar meydana gelmekte ve dolayısıyla geotekstil malzemenin tamamı kuvvet almaktadır.

4. Sonuçlar

Son yıllarda inşaat mühendisliği tasarım problemlerinin optimum çözümlerinde meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının yaygın olarak kullanıldığı ve başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada Balina Optimizasyon Algoritması'nın geosentetik ile kuşatılmış taş kolonların optimum tasarımında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç için değişen dolgu yükleri altındaki üç farklı yumuşak zeminde, farklı özelliklere ve birim fiyatlara sahip dolgu ve geotekstil malzemeleri kullanılarak imal edilecek minimum maliyetli GEC tasarımı hedeflenmiştir. Hesaplarda farklı proje gereksinimlerine karşılık gelebilecek izin verilebilir oturma sınırları dikkate alınmıştır. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Balina Optimizasyon Algoritması ile yumuşak zeminlerde GEC iyileştirmesinin maliyeti başarılı bir şekilde optimize edilebilmektedir.

GEC tasarımının gerçekleştirileceği yumuşak zeminin ödeometrik elastisite modülü ile GEC iyileştirme maliyeti arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

İzin verilen oturmaların 25 mm ile sınırlandırıldığı yumuşak zemine inşa edilen GEC kolonda yanal deformasyonların baskın olduğu derinlik, kolon üst kotundan $3.15r_c$ kadar olan bölge içerisinde kalmaktadır. Ancak izin verilen oturma sınırı yükseldikçe kolon boyunca radyal deformasyonlar oluşmakta ve geotekstil sargının çekme direnci taş kolon boyunca mobilize olmaktadır. Bu durum, maliyetin logaritmik olarak azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle uygulamada ekonomik ve güvenli GEC tasarımlarının gerçekleştirilebilmesi için proje amacına uygun izin verilen oturma sınırının hassas bir şekilde belirlenmesi önemlidir.

Kaynaklar

- Abualigah, L. (Ed.). (2024). *Metaheuristic Optimization Algorithms: optimizers, analysis, and applications*. Elsevier.
- Almeida, M. S. S., Hosseinpour, I., & Riccio, M. (2013). Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: numerical and analytical studies. *Geosynthetics international*, 20(4), 252-262.
- Almeida, M., Riccio, M., Hosseinpour, I., & Alexiew, D. (2018). *Geosynthetic encased columns for soft soil improvement*. CRC Press.
- Almeida, M.S.S., Hosseinpour, I., Riccio, M., Alexiew, D., 2014. Behavior of geotextileencased granular columns supporting test embankment on soft deposit. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141 (3), 04014109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.000125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000125)
- Ambily, A.P., Gandhi, S.R., 2007. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133 (4), 405–415. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(405))
- Chen, J.F., Zhang, X., Yoo, C., Gu, Z.A., 2022. Effect of basal reinforcement on performance of floating geosynthetic encased stone column-supported embankment. *Geotext. Geomembranes*, 50 (4), 566–580. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.01.006>
- EBGEO, G. (2011). *Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements*. German Geotechnical Society, Berlin.
- Fattahi, H., Ghaedi, H., Malekmahmoodi, F., & Armaghani, D. J. (2024, June). Accurate estimation of bearing capacity of stone columns reinforced: An investigation of different optimization algorithms. *Structures*, 64, 106519, Elsevier.
- FHWA, (2001). *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes: design and construction guidelines (FHWA-NHI-00-043)*. United States.
- Gioffrè, D., Castelli, F., Fiumara, C., & Moraci, N. (2016). Numerical analyses of soft soil reinforced with GEC. *Procedia Engineering*, 158, 140-145.
- Gu, Z.A., Niu, F.J., Chen, J.F., Yoo, C., 2023. Centrifuge investigation on behavior of geosynthetic-encased stone column supported embankment under freeze-

thaw cycles. *Geotext. Geomembranes*, 52 (1), 2–11.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.08.004>

- Han, J. (2015). Principles and practice of ground improvement. *John Wiley & Sons*.
- Hosseinpour, I., Soriano, C., & Almeida, M. S. (2019). A comparative study for the performance of encased granular columns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 379-388.
- Huang, C., Sui, Z., Wang, L., & Liu, K. (2016). Mitigation of soil liquefaction using stone columns: an experimental investigation. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34(3), 244-251.
- Idrus, J., Shien, N. K., Nujid, M. M., & Abdullah, N. H. H. (2023, May). A review of stone columns performance in soft soils. In *World Sustainable Construction Conference Series*, 2688 (1), p. 040003. AIP Publishing LLC.
- Kirsch, K., & Bell, A. (Eds.). (2012). Ground improvement. *CRC Press*.
- Lafifi, B., Hamrouni, A., Khoualdia, T., Gheris, A., & Rouaiguia, A. (2024). Prediction and optimization of the bearing capacity of strip footing resting on soft soil improved with stone columns using RSM, ANN, and multi-objective GA. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5), 146.
- Malarvizhi, S. N. (2007). Comparative study on the behavior of encased stone column and conventional stone column. *Soils and foundations*, 47(5), 873-885.
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- Moreno, J. A. S., Araújo, G. L. S., Palmeira, E. M., & Alkhorshid, N. R. (2026). Influence of column spacing on geosynthetic-encased columns behavior in very soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 54(1), 50-66.
- Nguyen, L. (2023). Optimal design of rigid inclusions and stone columns using multiobjective optimization. *International Journal of Geomechanics*, 23(2), 04022272.
- Raithel, M. (1999): Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, University of Kassel.

- Raithel, M., & Kempfert, H. G. (1999). Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. *Bautechnik*, 76(11), 983-991.
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., & Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*, 52(4), 682-697.
- Wang, K., Liu, M., Cao, J., Niu, J., Zhuang, Y., (2023). Bearing characteristics of composite foundation reinforced by geosynthetic-encased stone column: field tests and numerical analyses. *Sustainability* 15 (7). <https://doi.org/10.3390/su15075965>.

//

Bölüm 4

ÇİFT AĞ KONTROL ALANI YÖNTEMİ: TEORİ, FORMÜLASYON VE YAPISAL MEKANİK UYGULAMALARI

Gökhan GÜÇLÜ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, gokhan.guclu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2931-9501

1. Giriş

Mühendislik ve uygulamalı bilimlerde fiziksel süreçlerin analizi ve tasarımı, tarihsel süreçte üç ana eksen üzerinde şekillenmiştir: 1) süreci yöneten fiziksel yasaların matematiksel modelleri, 2) model parametrelerinin deneysel karakterizasyonu ve 3) bu modellerin çözümü için geliştirilen sayısal yöntemler. Analitik çözümlerin geometrik ve fiziksel karmaşıklıklar nedeniyle yetersiz kaldığı durumlarda, sayısal yöntemler mühendislik problemlerinin çözümünde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir (Reddy, 2019a; Zienkiewicz vd., 2013).

Bu kitap bölümü, J. N. Reddy tarafından literatüre kazandırılan ve hesaplamalı mekanikte nispeten yeni bir yaklaşım olan Çift Ağ Kontrol Alanı Yöntemi'ni (ÇAKAY) (Dual Mesh Control Domain Method - DMCDM) ele almaktadır (Reddy, 2019b; Reddy, 2024). Yöntem, sonlu elemanlar ve sonlu hacim yöntemlerinin teorik üstünlüklerini sentezleyerek, bu tekniklerin doğasında var olan kısıtları aşmayı hedefleyen hibrit ve özgün bir formülasyon ortaya koymaktadır.

1.1 Hesaplamalı Mekanikteki Geleneksel Sayısal Yöntemlere Genel Bakış

ÇAKAY'nin gerekliliğini ve getirdiği yeniliği anlamak için, hesaplamalı mekanikte yaygın kabul görmüş üç geleneksel yöntemi—Sonlu Farklar (SFY), Sonlu Hacim (SHY) ve Sonlu Elemanlar (SEY)—kısaca değerlendirmek yerinde olacaktır. Tüm bu yöntemlerin ortak amacı, sürekli ortamı yöneten diferansiyel denklem sistemini ($Au = f$), ayrıklaştırılmış bir cebirsel denklem takımına ($KU = F$) dönüştürmektir. Bu dönüşüm süreci, her yöntemde farklı bir matematiksel yaklaşıma dayanır.

En eski yöntemlerden biri olan SFY, türevlerin Taylor serisi açılımları yardımıyla fark bölümleri (difference quotients) cinsinden yaklaşık olarak ifade edilmesi prensibine dayanır (LeVeque, 2002). Yöntem, türevleri bir ızgara (grid) üzerindeki düğüm noktalarının değerleri cinsinden ifade eden bir hesaplama şablonu (stencil) kullanır. SFY'nin uygulanması ve programlanması göreceli olarak kolaydır; ancak yöntem, karmaşık geometrilerde, düzensiz ızgara yapılarında ve türev içeren sınır koşullarının ele alınmasında yetersiz kalabilmektedir. Dahası, SFY'de korunum yasalarının (kütle, momentum,

enerji) global ölçekte (integral anlamda) sağlanması doğrudan garanti edilmez; benzer şekilde, ikilik (duality) kavramı da bu yöntemde doğal bir biçimde yer almaz.

Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinde yaygın olarak tercih edilen SHY, fiziksel alanı kontrol hacimlerine ayırklaştırır ve yönetici denklemleri bu hacimler üzerinde integral formda ifade eder (Ferziger ve Peric, 2002; Patankar, 1980). SHY'nin en belirgin üstünlüğü, fiziksel korunum yasalarını her bir kontrol hacmi ölçğinde yerel olarak (locally) tam anlamıyla sağlamasıdır. Ancak SHY'nin matematiksel altyapısında yapısal bir eksiklik bulunmaktadır: Türevlerin hesaplanmasında kullanılan yaklaşımlar, genellikle duruma özgü (ad-hoc) varsayımlara ve interpolasyon şemalarına dayanır (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Bu durum, yöntemi sistematik bir interpolasyon teorisinden yoksun bırakmakta ve yüksek mertebeden türev içeren problemlerde tutarsızlıklara neden olabilmektedir. SHY'de sistematik bir "eleman" ve "interpolasyon fonksiyonu" kavramının eksikliği, yöntemin özellikle yüksek mertebeden yaklaşımlara genelleştirilmesini zorlaştırır.

Katı cisimler ve yapı mekaniğinde en yaygın kullanılan yöntem olan SEY, varyasyonel ilkelere ve ağırlıklı kalanlar (weighted residuals) yöntemine dayanır (Bathe, 2014; Hughes, 2000; Reddy, 2019a). Yöntem, problemin tanım bölgesini sonlu elemanlara ayırklaştırır ve bilinmeyen değişkenleri, bu elemanlar üzerinde tanımlı şekil fonksiyonları cinsinden ifade eder. SEY'nin en belirgin üstünlüğü, karmaşık geometrileri ve sınır koşullarını modellemedeki esnekliği ve Sobolev uzayları gibi sağlam bir matematiksel zemine sahip olmasıdır (Oden ve Reddy, 1983; Surana ve Reddy, 2016). Ancak klasik SEY formülasyonlarında, ikincil değişkenler (gerilmeler, akılar) eleman sınırlarında süreksizlik gösterir. Ayrıca, korunum yasaları eleman bazında (yerel olarak) değil, global sistem seviyesinde ve integral anlamda (ağırlıklı ortalama ile) sağlanır.

1.2 ÇAKAY'nin Temel Prensipleri ve Geliştirilme Amacı

ÇAKAY'nin geliştirilmesindeki temel motivasyon, SHY'de türev yaklaşımlarında karşılaşılan matematiksel keyfiliğin, SEY'in güçlü interpolasyon teorisi kullanılarak giderilmesidir. J. N. Reddy bu formülasyon ile, SEY'nin sistematik değişken temsilini, SHY'nin yerel korunum (local

conservation) özelliğiyle başarılı bir şekilde birleştirmiştir (Reddy, 2019b). Yöntem, formülasyonun merkezine ikilik ilkesini yerleştirerek, birincil ve ikincil değişkenleri eşdeğer bir matematiksel titizlikle ele almayı hedefler (Reddy, 2024). Geleneksel SHY uygulamalarında kontrol hacmi arayüzlerindeki türevler, komşu düğüm noktaları arasındaki sonlu farklarla yaklaşık olarak ifade edilirken; ÇAKAY'de bu türevler, SEY'den adapte edilen sistematik şekil fonksiyonları kullanılarak analitik kesinlikte hesaplanır. ÇAKAY'nin geliştirilmesindeki temel amaçlar şunlardır:

1. Matematiksel belirlilik: SHY'de türev hesaplamalarında başvuru duruma özgü fark şablonları yerine; alan değişkenlerinin, sistematik sonlu eleman interpolasyon fonksiyonları ile analitik ve sürekli bir biçimde temsil edilmesi.
2. Fiziksel yasaların yerel korunumu: Yönetici denklemlerin, SEY'deki ağırlıklı kalan (zayıf form) prensibiyle değil; SHY karakteristiği olan ve kontrol alanları üzerinde tanımlı doğrudan integral form ile sağlanması. Bu formülasyon, fiziksel büyüklüklerin (kuvvet, ısı akısı vb.) dengesinin global bir ortalama olarak değil, yerel ölçekte kesin olarak korunmasını temin eder (Reddy, 2024).
3. İkincil değişkenlerin sürekliliği ve tek değerliliği: İkincil değişkenlerin (gerilme, ısı akısı vb.), kontrol alanı sınırlarında tek değerli (unique) ve sürekli bir fonksiyon olarak tanımlanması. Bu yapı, klasik SEY'de eleman arayüzlerinde oluşan süreksizlikleri gidermek için zorunlu olan işlem sonrası (post-processing) süreçlerini ortadan kaldırır; ikincil değişkenler çözümün doğal ve doğrudan bir çıktısı olarak elde edilir.

1.3 Yöntemin Üç Temel Özelliği ve Genel Prosedürü

ÇAKAY, hesaplamalı mekanikteki diğer yöntemlerden, üzerine inşa edildiği üç temel özellik ile ayrılır. Bu özellikler, yöntemin isimlendirilmesine de (çift ağ, kontrol alanı) kaynaklık etmiştir.

i) İkilik kavramı: Fiziksel problemler genellikle bir etki-tepki veya neden-sonuç ilişkisi ile tanımlanır (örneğin; hız-kuvvet, sıcaklık-ısı akısı, yer değiştirme-gerilme) (Courant, 1943; Reddy, 2017). ÇAKAY, bu ikilik çiftlerini

(duality pairs) formülasyonun merkezine yerleştirir. Yöntem, birincil değişkenlerin yanı sıra, ikincil değişkenlerin de korunumunu ve sürekliliğini dikkate alır. Sınır koşullarının uygulanmasında, bu ikilik çiftlerinden sadece birinin (ya birincil ya da ikincil değişkenin) sınırdaki tanımlı olması ilkesini kullanır.

ii) Birincil ağ üzerinde interpolasyon: ÇAKAY'de problemin tanım bölgesi, öncelikle birincil ağ adı verilen, birbiriyle örtüşmeyen sonlu elemanlara ayrıştırılır. Bu ağ, klasik SEY'deki eleman ağına karşılık gelir. Birincil değişkenler (u), ağın düğüm noktalarında tanımlanır ve eleman bölgesinde, interpolasyon fonksiyonları (ψ_i) kullanılarak yaklaşık olarak formüle edilir (Reddy, 2019b):

$$u(x) \approx u_h(x) = \sum_j u_j \psi_j(x) \quad (1)$$

Bu yaklaşım, SHY'nin aksine, değişkenin eleman içindeki değişimini matematiksel olarak kesin bir dille ifade eder.

iii) İkincil ağ üzerinde integral formülasyonu: Yöntemin en ayırt edici özelliği; korunum yasalarının, birincil ağ üzerine inşa edilen ikincil ağ yapısı üzerindeki kontrol alanlarında (control domains) sağlanmasıdır. Bu ağdaki her bir kontrol alanı, birincil ağa ait bir düğüm noktasını geometrik merkezine alacak ve onu çevreleyecek biçimde kurgulanır (Reddy, 2024).

Yöntemin genel hesaplama prosedürü şu adımları izler:

1. Ayrıklaştırma: Problemin fiziksel tanım bölgesinin, birbiriyle örtüşmeyen sonlu elemanlara (birincil ağ) ayrıklaştırılması.
2. İkincil ağ inşası: Birincil ağı oluşturan elemanların geometrik merkezleri veya kenar orta noktaları referans alınarak, her bir düğüm noktasını çevreleyen kontrol alanlarının (ikincil ağ) geometrik olarak oluşturulması.
3. Değişken yaklaşımı: Alan değişkenlerinin (bilinmeyenlerin), birincil ağ üzerinde tanımlı standart SEY şekil fonksiyonları kullanılarak interpolasyonu.

4. İntegral formülasyon: Yönetici diferansiyel denklemin, oluşturulan her bir kontrol alanı üzerinde doğrudan integre edilmesi:

$$\int_{\Omega_c} (\mathcal{L}(u) - f) d\Omega = 0 \quad (2)$$

Burada Ω_c kontrol alanını, \mathcal{L} diferansiyel operatörü temsil eder.

5. Dönüşüm: İntegral içerisindeki yüksek mertebe türevler, Green-Gauss (veya diverjans) teoremi uygulanarak kontrol alanını çevreleyen sınır (Γ_c) üzerindeki integrallere indirgenir. Bu işlem, ikincil değişkenlerin kontrol alanı sınırlarında doğal olarak ortaya çıkmasını sağlar.

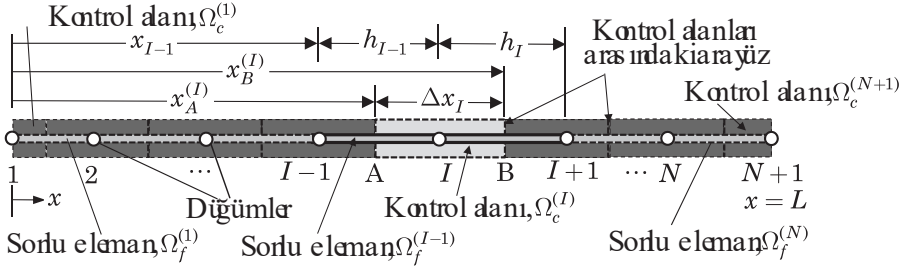
Bu prosedür sonucunda, herhangi bir global matris birleştirilmesine gerek kalmadan, cebirsel denklem sistemi elde edilir. Elde edilen denklem sistemi, bir düğüm noktasını komşu düğüm noktalarına bağlayan bir hesaplama şablonu formundadır, ancak bu şablonun katsayıları, fark yaklaşımları yerine SEY şekil fonksiyonlarından elde edilen kesin integrallerle hesaplanmıştır (Reddy, 2024).

2. ÇAKAY'nin Teorik Temelleri ve Matematiksel Yapısı

Bu kısım, ÇAKAY formülasyonunun üzerine inşa edildiği özgün geometrik ve cebirsel çerçeveyi detaylandırmaktadır. Yöntem; uzaysal ayrıklaştırma ile yönetici denklemlerin sağlandığı alanları geometrik olarak birbirinden ayrıştırarak, klasik yöntemlerin (SEY ve SHY) yapısal kısıtlamalarını aşmayı hedefler (Reddy, 2019b). Bu yaklaşım; fiziksel korunum yasalarının yerel ölçekte (kontrol alanında) sağlanması ilkesini, değişkenlerin yüksek mertebeden sürekli interpolasyonlarla temsili yeteneğiyle başarılı bir şekilde sentezler.

2.1 Birincil ve İkincil Ağ Yapıları

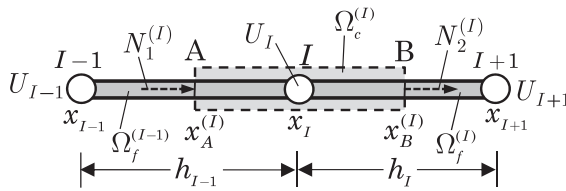
Yöntemin yapısal özgünlüğü, problemin tanım bölgesi (Ω) üzerinde süperpoze edilmiş, fakat işlevsel olarak birbirinden bağımsız görevler üstlenen ikili bir ağ sistemine dayanmasında yatmaktadır (bkz. Şekil 1). Bu ikili yapı, sayısal çözümün hassasiyetini artırmakla kalmaz, aynı zamanda fiziksel korunum yasalarının yerel ölçekte sağlanması için gerekli geometrik zemini de oluşturur (Reddy, 2024).



Şekil 1. Bir boyutlu bir tanım bölgesinin ayrıklaştırılmasında kullanılan sonlu elemanlardan oluşan birincil ağ ve kontrol alanlarından oluşan ikincil ağ yapısı (Reddy, 2024).

Birincil ağ (Ω_h): Birincil ağ, SEY'deki eleman ağı ile eşdeğerdir (Reddy, 2019a). Söz konusu ağ, problemin tanım bölgesini birbirine örtüşmeyen sonlu elemanlara (örneğin bir boyutlu problemlerde (1B) doğru parçaları, iki boyutlu problemlerde (2B) üçgenler veya dörtgenler) ayrıklaştırır. Birincil ağın temel görevi; bilinmeyen alan değişkenlerinin (yer değiştirme, sıcaklık vb.) interpolasyonuna geometrik zemin oluşturmaktır. Bu ağ üzerindeki düğüm noktaları, bilinmeyenlerin tanımlandığı geometrik konumlardır. Birincil elemanlar, değişkenlerin uzaysal değişimini karakterize eden şekil fonksiyonları için matematiksel desteği sağlar.

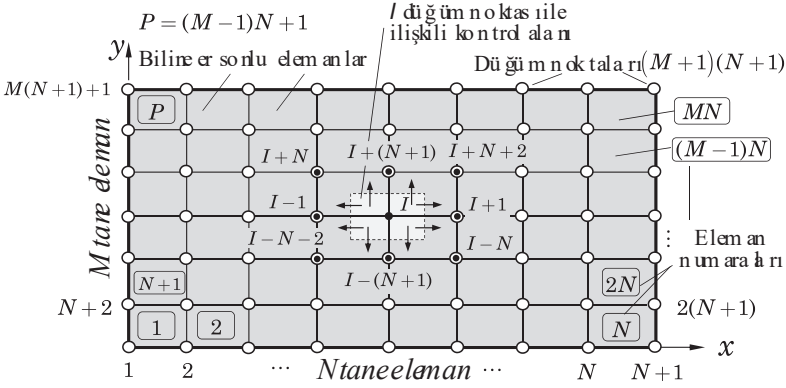
İkincil ağ (Ω_c): İkincil ağ, birincil ağ üzerine inşa edilen ve yönetici denklemlerin integral anlamda sağlandığı kontrol alanlarından oluşur. Bu ağ yapısı, SHY'deki kontrol hacimlerine benzer ancak oluşturulma mantığı farklıdır. ÇAKAY'de ikincil ağ, düğüm noktası merkezli bir yapıdadır; yani her bir birincil ağdaki düğüm noktası, bir kontrol alanının geometrik merkezi olacak şekilde çevrelenir (bkz. Şekil 2) (Reddy, 2019b).



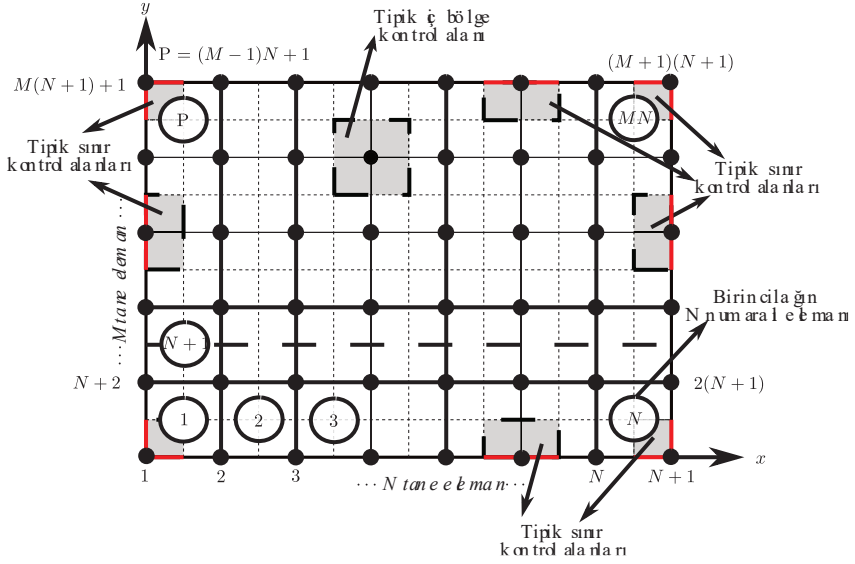
Şekil 2. Bir boyutlu model için tipik bir $\Omega_c^{(I)}$ kontrol alanı: A ve B noktaları, I düğümü ile ilişkili kontrol alanının sırasıyla sol ($x_A^{(I)}$) ve sağ ($x_B^{(I)}$) uç sınır koordinatlarını temsil eder; A noktası $\Omega_f^{(I-1)}$ sonlu elemanı içinde, B noktası ise $\Omega_f^{(I)}$ sonlu elemanı içinde yer almaktadır (Reddy, 2024).

İkincil ağın inşası şu geometrik kurallara göre yapılır:

- 1B problemler: Birincil ağ elemanlarının orta noktaları birleştirilerek, her düğüm etrafında $(x_{i-1/2}, x_{i+1/2})$ aralığında bir kontrol alanı oluşturulur.
- 2B problemler: Birincil ağ elemanlarının (üçgen veya dörtgen) ağırlık merkezleri (centroids) ile kenar orta noktaları birleştirilerek çokgensel kontrol alanları oluşturulur (bkz. Şekil 3). Örneğin, dikdörtgen bir birincil eleman ağında, ikincil ağ da düğüm noktası merkezli dikdörtgenlerden oluşur (bkz. Şekil 4) (Reddy, 2024).



Şekil 3. Dikdörtgen elemanlardan oluşan bir ağ için iki boyutlu kontrol alanı (Reddy, 2019b).



Şekil 4. Sürekli çizgiler birincil ağı, kesikli çizgiler ikincil ağı temsil etmektedir. Koyu daireler birincil ağın düğüm noktalarıdır. Tipik kontrol alanları taralı olarak gösterilmiştir. Hesaplama alanı sınıрыyla çakışan kontrol alanı sınırları kırmızıyla vurgulanmıştır (Nampally vd., 2021).

Bu geometrik yapı sayesinde, her bir kontrol alanı (Ω_c^I), birden fazla birincil elemanın (o düğüme bağlı olan elemanların) belirli parçalarını içerir. Bu örtüşme, çözümün sürekliliğini ve bilgi transferini doğal bir şekilde sağlar.

2.2 Değişken Yaklaşımı, İkilik Prensibi ve SEY ile İlişkisi

ÇAKAY, değişkenlerin temsili konusunda SEY'in sistematik yaklaşımını benimserken, problemin fiziksel tanımında ikilik ilkesini merkeze alır.

Sistematik değişken yaklaşımı: SHY'de değişkenlerin eleman içindeki değişimi genellikle tanımlanmaz veya basit sabit/lineer varsayımlarla tanımlanırken, ÇAKAY'de birincil değişkenler, birincil ağ üzerinde tanımlı Lagrange polinomları (ψ_j) kullanılarak ifade edilir:

$$u(x) \approx u_h(x) = \sum_{j=1}^N u_j \psi_j(x) \quad (3)$$

Burada N , elemandaki düğüm noktası sayısıdır. Bu yaklaşım, türevlerin $(\partial u / \partial x)$ analitik olarak hesaplanabilmesine olanak tanır ve SHY'deki türev hesaplamalarındaki keyfiligi ortadan kaldırır (Reddy, 2019a).

İkilik prensibi: Reddy'nin formülasyonunda, her fiziksel problem bir "neden-sonuç" ilişkisi içinde birbirini tamamlayan ikilik çiftleri üzerinden tanımlanır (Reddy, 2017). Bu çiftler genellikle şöyledir:

- Yapısal mekanik: (yer değiştirme u , kuvvet F)
- Isı transferi: (sıcaklık T , ısı akısı Q)
- Akışkanlar mekaniği: (Hız v , yüzey kuvveti (traction) t)

Bu prensip, sınır koşullarının uygulanmasında önemli bir rol oynar. Bir sınır noktasında, ikilik çiftinin elemanlarından sadece biri (ya birincil değişken ya da ikincil değişken) belirtilebilir (Dirichlet veya Neumann sınır koşulu). ÇAKAY, bu fiziksel gerçeği matematiksel formülasyona doğrudan yansıtarak, ikincil değişkenlerin çözümün doğal bir parçası olarak elde edilmesini sağlar. SEY'de ikincil değişkenler genellikle türev alma işlemiyle elde edilirken ve eleman sınırlarında süreksizken, ÇAKAY'de bu değişkenler kontrol alanı sınırlarında korunum yasalarının bir sonucu olarak doğrudan hesaplanır (Reddy, 2019b).

2.3 Kontrol Alanı Üzerinden Yönetici Denklemlerin İntegral Formülasyonu

Yöntemin matematiksel kalbi, diferansiyel denklemin ikincil ağ üzerinde yani kontrol alanında integre edilmesidir. Bu süreç, ağırlıklı kalanlar yönteminden farklıdır; burada ağırlık fonksiyonu birim olarak kabul edilir ve denklem doğrudan integre edilir (Reddy, 2024).

Genel bir ikinci mertebe diferansiyel denklem (örneğin Poisson denklemi) ele alınsın:

$$-\nabla \cdot (k \nabla u) = f \quad \text{veya} \quad -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) = f \quad (4)$$

ÇAKAY prosedürü şu adımları izler:

1. İntegrasyon: Denklem, I numaralı düğümü çevreleyen kontrol alanı Ω_c^I üzerinde integre edilir:

$$\int_{\Omega_c^I} \left[-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) - f \right] d\Omega = 0 \quad (5)$$

2. Green-Gauss (diverjans) teoremi: Yüksek mertebeden türev içeren terim, Green-Gauss teoremi kullanılarak alan integralinden sınır integraline dönüştürülür. Bu adım, türev derecesini düşürür ve problemin zayıf formunu (weak form) değil, korunum formunu (conservative form) ortaya çıkarır:

$$-\oint_{\Gamma_c^I} \left(k_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} n_i \right) d\Gamma - \int_{\Omega_c^I} f d\Omega = 0 \quad (6)$$

Burada Γ_c^I , kontrol alanının sınırını ve n_i bu sınıra dik dış normal birim vektörü temsil eder.

3. İkincil değişkenlerin ortaya çıkışı: Sınır integrali içindeki terim, fiziksel olarak yüzeyden geçen akıyı veya etkiyen yüzey kuvvetini temsil eder. Bu terim, ikincil değişken (t_n veya q_n) olarak tanımlanır:

$$t_n = k_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j} n_i \quad (7)$$

Böylece denklem şu hale gelir:

$$-\oint_{\Gamma_c^I} t_n d\Gamma = \int_{\Omega_c^I} f d\Omega = 0 \quad (8)$$

Bu ifade, I numaralı kontrol alanı için fiziksel bir denge yasasını (kuvvet dengesi, ısı dengesi vb.) ifade eder: Sınırlardan giren net akı, içerideki kaynak terimine eşittir.

4. Ayrıklaştırma: Sınır integrali ($\oint_{\Gamma_c^I}$), kontrol alanını oluşturan kenar parçaları üzerinden toplamlar şeklinde hesaplanır. Bu kenarlar üzerindeki t_n değerleri hesaplanırken, birincil ağdaki SEY şekil fonksiyonlarının türevleri ($\partial\psi_j/\partial x$) kullanılır (Reddy, 2019b).

Bu formülasyonun en önemli avantajı, Γ_c^I sınırlarının (kontrol alanı sınırları) her zaman birincil elemanların içinden geçmesidir. Birincil eleman içinde tanımlı şekil fonksiyonları sürekli ve türevlenebilir olduğundan, kontrol alanı sınırlarında hesaplanan ikincil değişkenler (t_n) tek değerli ve sürekli. Oysa klasik SEY'de, eleman arayüzlerinde gerilmeler/akılar süreksizdir. ÇAKAY bu sayede, korunum yasalarını sağlarken aynı zamanda yüksek hassasiyetli türev değerleri üretir.

2.4 Tek Boyutlu Yapısal Problemler İçin Formülasyon Detayları: Kiriş Eğilmesi

ÇAKAY'nin yapısal mekanikteki gücü, özellikle SEY'de C^1 -sürekliliği gerektiren dördüncü mertebeden diferansiyel denklemleri, karışık model (mixed model) yaklaşımı ile C^0 -sürekliliği gerektiren ikinci mertebeden denklem sistemlerine dönüştürerek çözebilmesinde yatmaktadır. Bu yaklaşım, hem Euler-Bernoulli hem de Timoshenko kiriş teorileri için tutarlı ve sağlam bir sayısal çerçeve sunar (Reddy, 2020b).

2.4.1 Kiriş Teorilerine Genel Bakış: Euler-Bernoulli ve Timoshenko Kirişleri

Kirişlerin eğilme davranışı literatürde başlıca iki teori ile modellenir. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi (EBT), düzlem kesitlerin deformasyondan sonra da düzlem ve kiriş eksenine dik kaldığını varsayar. Bu varsayım, kayma deformasyonlarını ihmal eder ve şu dördüncü mertebeden diferansiyel denkleme yol açar:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D_{xx} \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q(x) \quad (9)$$

Burada w düşey yer değiştirme, D_{xx} eğilme rijitliği ve $q(x)$ yayılı yüküdür. SEY'de bu denklemin çözümü için Hermite kübik interpolasyon fonksiyonları gereklidir (Reddy, 2019a).

Öte yandan, Timoshenko Kiriş Teorisi (TKT), düzlem kesitlerin düzlem kaldığını ancak kiriş eksenine dik olma zorunluluğunu ortadan kaldırarak kayma deformasyonunu (γ_{xz}) hesaba katar. Bu, sistemi w (çökme) ve ϕ_x (dönme) cinsinden iki adet eşlenik ikinci derece diferansiyel denkleme

dönüştürür. ÇAKAY, her iki teoriyi de ele alabilir; ancak EBT'nin dördüncü mertebeden yapısı, yöntemin ikilik ve karışık model yeteneklerini sergilemek için mükemmel bir örnektir (Reddy, 2020b).

2.4.2 Karışık Modelin Seçimi ve Yönetici Denklemlerin Formülasyonu

EBT'nin dördüncü mertebeden denklemini ÇAKAY ile çözmek için, problem ikili ikinci mertebeden (dual second-order) bir sisteme dönüştürülür. Bu dönüşümde, fiziksel bir anlamı olan eğilme momenti (M_{xx}), w ile birlikte birincil değişken (nodal bilinmeyen) olarak kabul edilir. Böylece, hem w hem de M_{xx} için sadece C^0 -sürekli (örneğin lineer) Lagrange interpolasyon fonksiyonları kullanmak yeterli olur (Reddy, 2020b). Yönetici denklemler aşağıdaki gibi sırasıyla denge denklemi ve bünye denklemi olarak ayrıştırılır:

$$\frac{d^2 M_{xx}}{dx^2} - \frac{d}{dx} \left(N_{xx} \frac{dw}{dx} \right) + q = 0 \quad (10)$$

$$M_{xx} = -D_{xx} \frac{d^2 w}{dx^2} \Rightarrow -\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{1}{D_{xx}} M_{xx} = 0 \quad (11)$$

Bu formülasyonla, problem iki bilinmeyenli (w, M_{xx}) ve ikinci mertebeden türevler içeren bir sisteme indirgenmiş olur. Eksenel deformasyonun (u) da dahil edildiği genel bir durumda, birincil değişken vektörü $U = \{u, w, M_{xx}\}^T$ halini alır (Reddy ve Nampally, 2020).

2.4.3 Kontrol Alanı Üzerinden İntegral İfade ve İkincil Değişkenlerin Rolü

ÇAKAY'nin prosedürü uyarınca, yukarıdaki denklemler her bir düğüm noktası (I) etrafında tanımlanan kontrol alanı $\Omega_c^I = (x_a, x_b)$ üzerinde integre edilir.

Moment-eğrilik ilişkisinin integrasyonu:

$$\int_{x_a}^{x_b} \left(-\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{M_{xx}}{D_{xx}} \right) dx = 0 \quad (12)$$

İkinci mertebe türev terimi kısmi integrasyonla sınır terimlerine dönüştürülür:

$$-\left[\frac{dw}{dx} \right]_{x_a}^{x_b} - \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_{xx}}{D_{xx}} dx = 0 \quad (13)$$

$$\theta(x_b) - \theta(x_a) - \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_{xx}}{D_{xx}} dx = 0 \quad (14)$$

Burada ortaya çıkan ikincil değişken, fiziksel olarak dönme ($\theta = -dw/dx$) değeridir. Bu denklem, kontrol alanının uçlarındaki dönme farkının, içerideki eğrilik (moment/rijitlik) alanına eşit olduğunu ifade eder.

Denge denkleminin integrasyonu (eğilme probleminde aksel kuvvet ihmal edildi):

$$\int_{x_a}^{x_b} \left(\frac{d^2 M_{xx}}{dx^2} + q \right) dx = 0 \quad (15)$$

$$\left[\frac{dM_{xx}}{dx} \right]_{x_a}^{x_b} + \int_{x_a}^{x_b} q dx = 0 \quad (16)$$

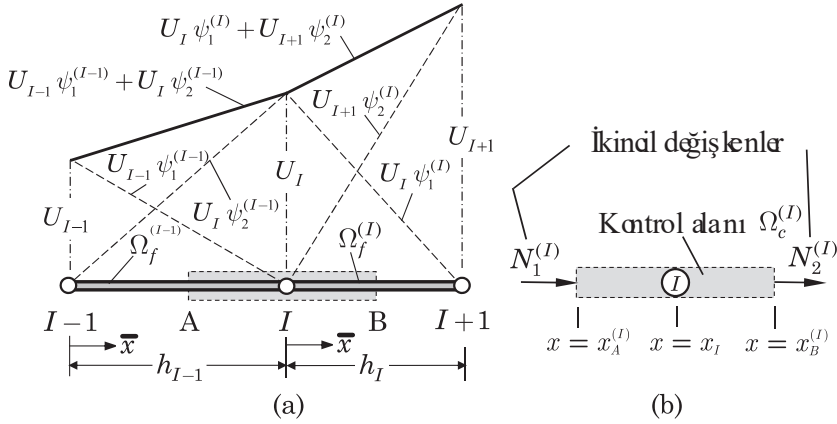
$$V(x_b) - V(x_a) + Q_c = 0 \quad (17)$$

Burada ortaya çıkan ikincil değişken ise kesme kuvvetidir ($V = dM_{xx}/dx$). Bu ifade, kontrol alanındaki net kesme kuvveti değişiminin uygulanan dış yüke eşit olması gerektiğini (düşey kuvvet dengesi) gösterir.

Bu aşamada ÇAKAY'nin en çarpıcı özelliği görülür: İkincil değişkenler (dönme ve kesme kuvveti), kontrol alanının sınırlarında (yani sonlu elemanların ortasında veya içinde) tanımlıdır. Bu noktalarda birincil değişkenler (w, M_{xx}) analitik olarak türevlenebilir olduğundan, θ ve V değerleri, SEY interpolasyon fonksiyonlarının türevleri kullanılarak doğrudan ve sürekli bir şekilde hesaplanabilir (Reddy, 2020b).

2.4.4 Ayrıklaştırılmış Cebirsel Denklemlerin Elde Edilmesi ve Üçlü İlişki

Son adımda, birincil değişkenler u, w ve M_{xx} , birincil ağ üzerinde lineer Lagrange fonksiyonları (ψ_i) ile ifade edilir (bkz. Şekil 5):



Şekil 5. a) $u(x)$ 'e birbirine komşu iki sonlu eleman üzerinden lineer yaklaşım; b) Tipik bir kontrol alanı arayüzeylerinde tanımlanan ikincil değişkenlerin gösterimi (Reddy, 2024).

$$w(x) = \sum w_j \psi_j(x), \quad M_{xx}(x) = \sum M_j \psi_j(x) \quad (18)$$

Bu ifadeler integral denklemlerde yerine konulduğunda, I düğümü için komşu düğümlerle ($I - 1, I, I + 1$) ilişkili cebirsel denklemler elde edilir. Elde edilen sistem, her düğümde 3 serbestlik derecesi (u_I, w_I, M_I) bulunan blok üç köşegenli (tridiagonal) bir matris yapısına sahiptir:

$$\mathbf{K}_{I,I-1} \mathbf{U}_{I-1} + \mathbf{K}_{I,I} \mathbf{U}_I + \mathbf{K}_{I,I+1} \mathbf{U}_{I+1} = \mathbf{F}_I \quad (19)$$

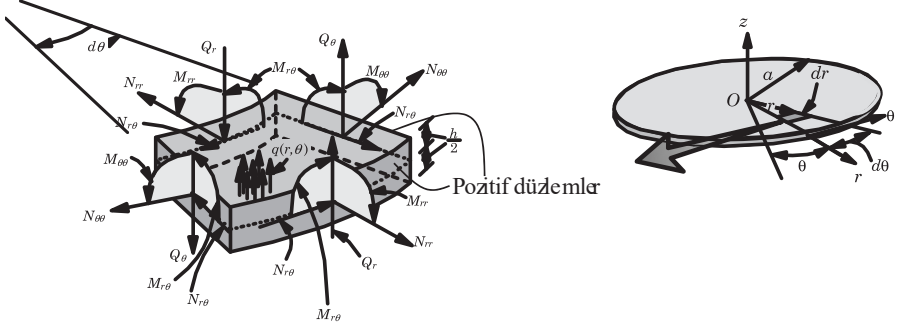
Bu hesap şablonu, SHY'nin yerel korunum özelliğini korurken, matris katsayıları SEY'nin rijitlik matrislerine benzer şekilde malzeme ve geometri parametrelerinin integralleriyle hesaplanır.

2.5 İki Boyutlu Yapısal Problemler İçin Formülasyon Prensipleri: Eksenel Simetrik Plak Eğilmesi

ÇAKAY'nin iki boyutlu problemlere uygulaması, tek boyutlu kiriş teorisinin mantıksal bir uzantısıdır ancak geometrik karmaşıklık ve koordinat sistemi (polar koordinatlar) nedeniyle ek zorluklar içerir. Eksenel simetrik dairesel plaklar, bu geçişi açıklamak için kullanılacak olan modeldir (Reddy, 2006).

2.5.1 Plak Teorilerine Genel Bakış: Klasik ve Birinci Mertebe Kayma Deformasyonu Plak Teorileri

Eksenel simetrik dairesel plaklarda (bkz. Şekil 6), Klasik Plak Teorisi (KPT), Kirchhoff hipotezine dayanır ve radyal koordinat r 'ye bağlı dördüncü mertebeden bir diferansiyel denklem verir (Timoshenko ve Woinowsky-Krieger, 1959):



Şekil 6. Dairesel plaklar için kullanılan geometri ve koordinat sistemi (Reddy, 2024).

$$\nabla^4 w = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{q}{D} \quad (20)$$

Bu denklemde $1/r$ terimleri, özellikle plak merkezinde ($r = 0$) tekillik (singularity) potansiyeli taşır. Birinci Mertebe Kayma Deformasyonu Teorisi (BKPT) ise, w ve radyal dönme ϕ_r olmak üzere iki bağımsız değişken kullanır (Reddy, 2003). ÇAKAY, KPT için yine karışık model yaklaşımını benimserken, BKPT için deplasman bazlı yaklaşımı kullanabilir (Reddy, 2024).

2.5.2 Eksenel Simetrik Plak Problemi Üzerinden Karışık Modelin Seçimi

KPT'nin ÇAKAY ile çözümü için, kiriş problemine benzer şekilde, yüksek mertebe türevler azaltılarak radyal eğilme momenti (M_{rr}) birincil değişken olarak seçilir. Böylece bilinmeyenler kümesi $\{w, M_{rr}\}$ olur. Yönetici denklem, sırasıyla aşağıda verilen plak elemanının düşey kuvvet denge denklemine ve moment-eğrilik bağıntısına dönüştürülür:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rV_r) + q = 0 \quad (21)$$

$$M_{rr} = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (22)$$

(21) denkleminde V_r , momentlerin türeviyle ilişkilidir:

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rM_{rr}) - \frac{M_{\theta\theta}}{r} \quad (23)$$

Bu sistemde $M_{\theta\theta}$ (teğetsel moment), birincil değişken M_{rr} ve w cinsinden ifade edilerek denklem setinde kapalı hale getirilir.

2.5.3 İki Boyutlu Kontrol Alanı Üzerinde İntegral İfadesinin Dönüşümü

Eksenel simetrik problemde, ikincil ağ, r_I düğümünü çevreleyen halkalar (annulus) şeklindedir: $\Omega_c^I = (r_a, r_b) \times (0, 2\pi)$. İntegrasyon işlemi, kutupsal koordinatlarda diferansiyel alan elemanı $r dr d\theta$ üzerinden yapılır. Örneğin, denge denkleminin integrasyonu:

$$\int_0^{2\pi} \int_{r_a}^{r_b} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rV_r) + q \right] r dr d\theta = 0 \quad (24)$$

$$2\pi \int_{r_a}^{r_b} \frac{d}{dr} (rV_r) dr + \int_{\Omega_c} q dA = 0 \quad (25)$$

$$2\pi [r_b V_r(r_b) - r_a V_r(r_a)] + Q_c = 0 \quad (26)$$

Bu sonuç, I numaralı halkanın dış (r_b) ve iç (r_a) yüzeylerinden etkiyen toplam kesme kuvvetlerinin dengesini ifade eder. Burada ikincil değişken, birim uzunluğa düşen kuvvet değil, toplam kesme kuvveti (rV_r) olarak doğal biçimde ortaya çıkar (Reddy, 2024).

Benzer şekilde moment denkleminin integrasyonu, sınırda dönme ($\phi = -dw/dr$) değişkenlerini ikincil değişken olarak ortaya çıkarır.

2.5.4 Çok Değişkenli Düğüm Merkezli Hesap Şablonunun Elde Edilmesi ve Sınır Koşulları

Ayrıklaştırma sonucunda, w ve M_{rr} için radyal doğrultuda düğüm merkezli bir şablon elde edilir. Bu şablonun en kritik kısmı, plaka merkezi ($r = 0$) ve dış kenar ($r = R$) sınır koşullarının uygulanmasıdır.

- Plak merkezi: ÇAKAY'de $r = 0$ 'daki düğüm için tam bir disk kullanılır. Simetri koşulu nedeniyle burada dönme (ϕ) ve kesme kuvveti (V_r) sıfırdır. Bu fiziksel koşullar, ikilik prensibi gereği integral denklemlerin sınır terimlerinde ($r_a = 0$) doğrudan sıfır olarak işlenir.

- Dış kenar: Sınır hattında yer alan yarım kontrol alanının dış yüzeyi üzerinde; problemin mesnetlenme türüne (ankastre, basit mesnet veya serbest) bağlı olarak, ilgili birincil (w, M_{rr}) veya ikincil (ϕ, V_r) değişkenlerin sınır değerleri tayin edilir. ÇAKAY, özellikle doğal sınır koşullarını (örneğin serbest kenarda $V_r = 0$) ek bir işlem gerektirmeden, denklem sisteminin sağ taraf vektörüne katkı olarak dahil eder (Reddy, 2024).

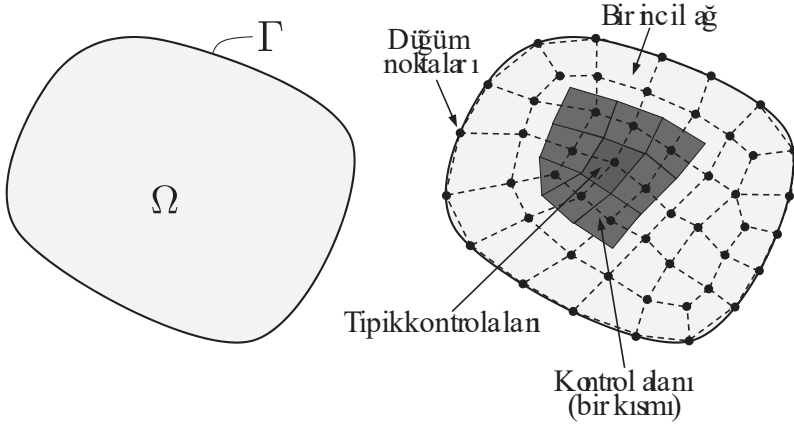
3. ÇAKAY'nin Ayırt Edici Özellikleri ve Sayısal Yöntemlerle Kritik Karşılaştırması

Bu kısım, ÇAKAY'nin SEY ve SHY karşısındaki teorik ve uygulama farklarını, yöntemin sağladığı avantajlar bağlamında eleştirel bir incelemeye tabi tutmaktadır. ÇAKAY, her ne kadar bu iki yöntemin hibrit bir sentezi gibi görünse de, getirdiği yapısal yenilikler (doğrudan matris oluşturulması, sürekli ikincil değişkenler) onu kendi başına özgün bir kategoriye yerleştirmektedir (Reddy, 2019b).

3.1 SEY ile Özgün Farkları: Birleştirme Prosedürü ve İkincil Değişkenlerin Sürekliliği

SEY, eleman bazlı bir yaklaşım sergiler. Yöntem, fiziksel sistemi ayırık elemanlara böler, her bir eleman için yerel rijitlik matrislerini (\mathbf{k}_e) hesaplar ve ardından bu matrisleri, düğüm bağlantı haritasını (connectivity map) kullanarak global bir sistem matrisinde (\mathbf{K}) birleştirir. Bu birleştirme işlemi, SEY algoritmalarının en karakteristik ama aynı zamanda bellek yönetimi açısından en fazla kaynak tüketen adımlarından biridir (Bathe, 2014; Zienkiewicz vd., 2013).

ÇAKAY ise, kontrol alanı merkezli bir yaklaşımı benimser (bkz. Şekil 7). Formülasyon, her bir kontrol alanı için türetilen korunum denkleminin, global matrisin ilgili satırını doğrudan teşkil etmesi prensibine dayanır (Reddy, 2024).



Şekil 7. Dörtgen sonlu eleman ağları (birncil ağlar) ile düğüm merkezli dörtgen kontrol alanlarından (ikincil ağlar) oluşan iki boyutlu bir bölgenin gösterimi (Reddy, 2019b).

- SEY’de: $\mathbf{K}_{\text{global}} = \sum_e \mathbf{k}_{\text{eleman}}$
- ÇAKAY’de: Her I düğümü için denklem doğrudan yazılır:
 $\mathcal{A}(u_I, u_{\text{komşu}}) = f_I$

Bu prosedürel fark, ÇAKAY’nin kodlama yapısını SFY hesaplama şablonlarına benzer hale getirirken, matris katsayılarının hesaplanmasında SEY’nin hassas integrasyonunu kullanmasını sağlar. Eleman döngüsü yerine kontrol alanı döngüsü kullanılması, veri yapısının yönetimini, özellikle paralel hesaplama mimarilerinde daha esnek hale getirebilir.

İkincil değişkenlerin sürekliliği: SEY ile ÇAKAY arasındaki en belirgin fiziksel fark, ikincil değişkenlerin (gerilmeler σ , ısı akıları q , momentler M) eleman arayüzlerindeki davranışdır.

Deplasman tabanlı standart SEY formülasyonlarında, birincil değişken (u) eleman sınırlarında sürekli (C^0) iken, türevlerine bağlı olan ikincil değişkenler genellikle süreksizdir. İki komşu elemanın paylaştığı bir arayüzde, soldaki elemandan hesaplanan gerilme değeri (σ^-) ile sağdaki elemandan hesaplanan değer (σ^+) genellikle birbirine eşit değildir. Bu durum, gerilme düzleştirme (stress smoothing) veya işlem sonrası tekniklerine ihtiyaç duyurur (Reddy, 2019a).

ÇAKAY, integral formülasyonu gereği, kontrol alanı sınırlarındaki akı veya kuvvet dengesini (t_n) temel alır. Bu sınırlar, her zaman birincil elemanların içinden geçer. Birincil eleman içinde tanımlı şekil fonksiyonları C^∞ (polinom oldukları için) türevlenebilir olduğundan, bu arayüzlerde hesaplanan ikincil değişkenler tek değerli ve süreklidir. Yani, ÇAKAY doğası gereği, işlem sonrası analiz gerektirmeden yüksek doğrulukta gerilme ve akı alanları üretir. Bu özellik, özellikle gerilme yığılmalarının veya çatlak ilerlemesinin kritik olduğu problemlerde ÇAKAY'yi üstün kılar.

3.2 SHY ile Özgün Farkları: Sistemik İnterpolasyon ve İkilik Prensipleri

SHY, korunum yasalarına olan yapısal uyumu nedeniyle akışkanlar mekaniğinde standart olsa da, katı mekaniği ve yapısal analizde SEY kadar yaygınlaşmamasının temel nedeni, türev yaklaşımlarındaki sistemik olmayan (interpolasyon terisinden yoksun olması) yapısıdır.

Sistemik polinomik interpolasyon: SHY'de, bir kontrol hacminin yüzeyindeki akıyı ($q = -k \partial T / \partial n$) hesaplamak için, hücre merkezindeki değerler kullanılarak bir sonlu fark yaklaşımı (örneğin; $(T_E - T_P) / \delta x$) yapılır. Bu yaklaşım lineer değişim varsayımına dayanır ancak yüksek mertebeden elemanlar veya düzensiz ağlar söz konusu olduğunda genelleştirilmesi zordur (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

ÇAKAY, bu keyfiliği SEY'den aldığı şekil fonksiyonları ile tamamen ortadan kaldırır. Değişkenin uzaysal değişimi, matematiksel olarak titiz bir şekilde tanımlanmış Lagrange (veya Hermite) polinomları ile temsil edilir. Bir yüzeydeki türev hesaplanırken tahmini bir fark formülü değil, bu polinomun o noktadaki analitik türevi kullanılır (Reddy, 2019b). Bu sayede ÇAKAY, SHY'nin korunumcu yapısını korurken, SEY'in yüksek mertebeden (kuadratik, kübik) eleman kullanabilme esnekliğine sahip olur.

Rastgele yaklaşımların eliminasyonu: SHY literatüründe, difüzyon terimleri için farklı, konveksiyon terimleri için farklı (Upwind, QUICK vb.) ayrıklaştırma şemaları kullanılır. Bu şemalar genellikle problemin fiziğine göre duruma özgü seçilir. ÇAKAY'de ise, birincil ağ üzerindeki interpolasyon bir kez seçildiğinde (örneğin kuadratik eleman), tüm terimlerin (türev, kaynak, zaman adımı) ayrıklaştırılması bu interpolasyon üzerinden sistemik ve

tutarlı bir şekilde türetilir. Bu, yöntemin matematiksel tutarlılığını artırır (Reddy, 2024).

3.3 Yüksek Hassasiyetli Sonuçların Sağlanması ve Denge Prensipleri

Mühendislik analizlerinde temel amaç, sadece birincil değişkenleri (deplasman/sıcaklık) değil, tasarımı belirleyen ikincil değişkenleri (gerilme/akı) de doğru hesaplamaktır.

Küresel ve yerel denge: SEY, yönetici denklemlerin zayıf formunu çözer. Bu, denklemin hata fonksiyonunun belirli bir ağırlık fonksiyonu ile ortogonal olmasını sağlar. Ancak bu, korunum yasalarının (örneğin toplam kütle veya enerji) eleman bazında (yerel olarak) tam olarak sağlandığı anlamına gelmez; denge sadece ortalama anlamda sağlanır (Oden ve Reddy, 1983).

ÇAKAY ise, SHY gibi, yönetici denklemleri doğrudan integre eder.

$$\int_{\Omega_c} (\text{Denge Denklemi}) d\Omega = 0 \quad (27)$$

Bu işlem, her bir kontrol alanı için fiziksel dengenin (kuvvetlerin toplamı sıfır, giren-çıkan ısı eşit) sağlanmasını garanti eder. Bu yerel korunum özelliği, özellikle kaba ağlarda (coarse mesh) bile fiziksel olarak anlamlı sonuçlar alınmasını sağlar (Reddy, 2019b).

Doğal sınır koşullarının sistematik avantajı: SEY’de Neumann sınır koşulları (uygulanan kuvvet, akı), zayıf formdaki sınır integralleri aracılığıyla sisteme dahil edilir. ÇAKAY’de ise bu süreç çok daha doğrudan ve fizikseldir. Sınırdaki bulunan bir yarım kontrol alanı için yazılan denge denkleminde, sınır yüzeyinden gelen terim ($\oint t_n d\Gamma$), doğrudan uygulanan dış yüke ($t_{\text{uygulanan}}$) eşitlenir. Örneğin bir kirişin serbest ucunda kesme kuvvetinin sıfır olması veya bir plağın kenarında momentin uygulanması, ÇAKAY denklem setinde ek bir işlem veya ceza (penalty) fonksiyonu gerektirmeden, ilgili kontrol alanı denkleminin sınır akısı (boundary flux) terimi olarak doğal bir şekilde yerini alır. Bu, sınır koşullarının uygulanmasındaki matematiksel karmaşayı azaltır ve fiziksel yorumu güçlendirir (Reddy, 2020b).

Özetle; ÇAKAY, SEY’in interpolasyon gücü ile SHY’nin fiziksel korunum ilkelerini birleştirerek, her iki yöntemin de zayıf noktalarını (SEY’in süreksiz

akıları, SHY'nin düşük mertebe yaklaşımları) gideren, yapısal mekanik için optimize edilmiş bir sayısal çerçeve sunmaktadır.

4. Uygulama Alanları ve İleri Analizler

ÇAKAY, teorik temelleri itibarıyla sadece doğrusal ve düzenli geometrilere sahip problemlerle sınırlı kalmayan, mühendislik pratiğindeki karmaşık, doğrusal olmayan ve çok disiplinli problemlere de uygulanabilen esnek bir çerçeve sunmaktadır. Bu kısım, yöntemin doğrusal olmayan sistemlere genelleştirilmesini, ileri yapısal mekanik uygulamalarındaki performansını ve keyfi ağ yapılarına adaptasyonunu detaylandırmaktadır.

4.1 Doğrusal Olmayan Problemlere Genelleştirme ve Çözüm Yöntemleri

Mühendislik problemlerinin büyük bir kısmı, doğası gereği doğrusal değildir. Bu doğrusal olmama durumu, geometrik (büyük yer değiştirmeler), malzeme (plastisite, viskoelastisite) veya sınır koşulları kaynaklı olabilir (temas problemleri) (Reddy, 2015). ÇAKAY'nin integral formülasyonu, doğrusal olmayan terimleri doğrudan denge denklemlerinin içinde barındırması nedeniyle, bu tür problemlerin modellenmesi için son derece elverişlidir (Reddy, 2020a). Doğrusal olmayan bir problemde, ayrıklaştırılmış cebirsel denklem sistemi şu genel formda ifade edilir:

$$\mathbf{K}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (28)$$

Burada katsayılar matrisi \mathbf{K} , bilinmeyen çözüm vektörü \mathbf{U} 'ya bağlıdır. Bu sistemin doğrudan çözümü mümkün olmadığından, ÇAKAY literatürdeki iki temel iteratif yaklaşımı benimsemiştir:

1. Picard iterasyon yöntemi: Bu yöntemde, doğrusal olmayan katsayı matrisi, bir önceki iterasyon adımından (r) elde edilen çözüm kullanılarak hesaplanır ve sistem doğrusallaştırılır:

$$\mathbf{K}(\mathbf{U}^{(r)}) \cdot \mathbf{U}^{(r+1)} = \mathbf{F}$$

Picard iterasyonu, geniş bir yakınsama aralığına sahiptir ve başlangıç tahminine daha az duyarlıdır. ÇAKAY'de özellikle Navier-Stokes denklemleri veya değişken katsayılı ısı transferi problemleri çözülürken, uygulanmasının basitliği nedeniyle tercih edilir (Reddy ve Gartling, 2010; Reddy, 2020a).

2. Newton-Raphson iterasyon yöntemi: Daha hızlı yakınsama (karesel yakınsama hızı) gerektiren problemler için Newton yöntemi kullanılır. Bu yaklaşım, kalan (residual) vektörünün ($\mathbf{R} = \mathbf{K}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{U} - \mathbf{F}$) Taylor serisine açılmasını ve teğet rijitlik matrisinin (\mathbf{T}) hesaplanmasını gerektirir:

$$\mathbf{T}^{(r)} \cdot \Delta \mathbf{U} = -\mathbf{R}^{(r)}, \quad \mathbf{U}^{(r+1)} = \mathbf{U}^{(r)} + \Delta \mathbf{U} \quad (29)$$

ÇAKAY'de teğet matrisin bileşenleri, kontrol alanı üzerinden hesaplanan analitik türevlerle (Jakobiyen) elde edilir. Yöntemin çift yapısı, karmaşık doğrusal olmayan terimlerin (örneğin von Kármán gerilmeleri) türevlerinin alınmasında sistematik bir kolaylık sağlar (Reddy, 2015).

4.2 Yapısal Mekanik Uygulamalarından Örnekler

ÇAKAY'nin yapısal mekanikteki başarısı, özellikle eğilme-uzama eşlenikliğinin olduğu veya malzeme özelliklerinin konumla değiştiği durumlarda belirginleşir.

von Kármán Geometrik Doğrusalsızlığı: İnce giriş ve plaklarda, yer değiştirmelerin (w) plak kalınlığı mertebesine ulaşması durumunda, orta düzlemde oluşan uzama (membrane stretching) ihmal edilemez. Bu durum, eğilme momenti ile aksenal kuvvetler arasında doğrusal olmayan bir eşlenikliğe neden olur. ÇAKAY'nin karışık modeli (u, w, M_{xx}), bu eşlenikliği eleman düzeyinde indirgenmiş integrasyon gibi hilelere başvurmadan, doğrudan integral denklemler aracılığıyla çözer. Aksenal kuvvetin (N_{xx}) moment denge denklemindeki katkısı, kontrol alanı integralinde doğal bir kaynak terimi gibi işlem görür (Reddy, 2020b).

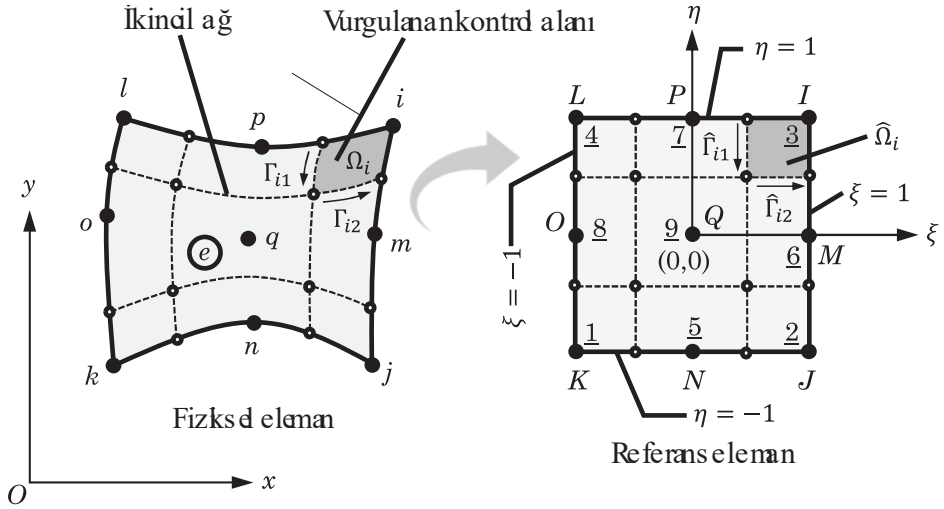
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM): Malzeme özelliklerinin (elastisite modülü E , Poisson oranı ν) kalınlık boyunca veya düzlem içinde sürekli olarak değiştiği FDM yapılarında, klasik yöntemlerde ortalama özellik kullanma zorunluluğu doğabilir. ÇAKAY'de ise, her bir birincil ağ elemanı içindeki malzeme değişimi, integrasyon noktalarında (Gauss noktaları) tam değeriyle hesaplamaya dahil edilir (Reddy ve Nampally, 2020). Bu, termal ve mekanik yükler altındaki FDM plakların gerilme analizinde, süreksizlik yaratmadan yüksek hassasiyetli sonuçlar üretilmesini sağlar.

4.3 Keyfi Ağlar Üzerinde Genelleştirme

Yöntem ilk olarak yapılandırılmış (structured) dikdörtgen/kare ağlar üzerinde geliştirilmiş olsa da, karmaşık mühendislik geometrilerini modellemek için keyfi ağ yeteneğine kavuşturulmuştur. Bu genelleştirme, izoparametrik formülasyon kavramı ile sağlanır (Heblekar vd., 2024).

İzoparametrik dönüşüm ve ikincil ağ inşası: Fiziksel uzaydaki deforme olmuş bir dörtgen eleman, bir referans eleman koordinat sistemine (ξ, η) haritalanır (bkz. Şekil 8).

$$x = \sum_j x_j \hat{\psi}_j(\xi, \eta), \quad y = \sum_j y_j \hat{\psi}_j(\xi, \eta) \quad (30)$$



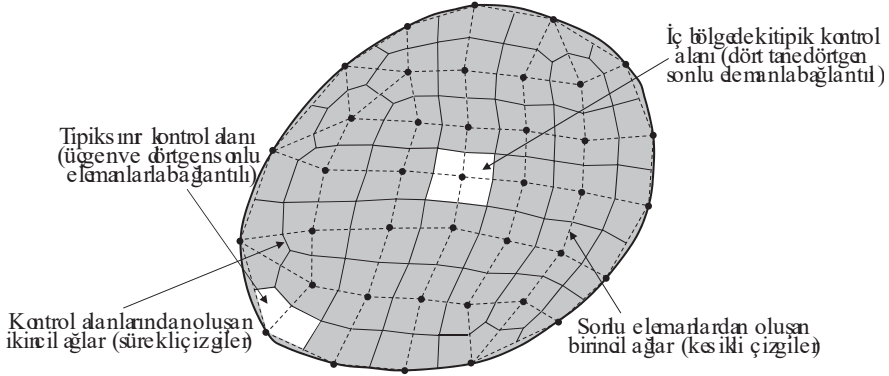
Şekil 8. Fiziksel elemanın referans elemana dönüştürülmesi (Heblekar vd., 2024).

ÇAKAY'de bu dönüşüm sadece geometri ve birincil değişkenler için değil, ikincil ağın inşası için de kullanılır.

1. Fiziksel uzaydaki eğrisel kenarlar, referans elemanda düz doğrulara karşılık gelir.
2. Kontrol alanının sınırları, referans eleman üzerinde tanımlanır (örneğin $\xi = 0$ hattı).

3. İntegraller referans eleman üzerinde alınır ve fiziksel uzaya geçişte Jacobi determinantı (J) kullanılır: $dx dy = |J| d\xi d\eta$.

Bu yaklaşım sayesinde, ÇAKAY; dairesel delikli levhalar, kavisli kirişler veya karmaşık makine parçaları gibi düzensiz geometriye sahip 2B elastisite problemlerinde (bkz Şekil 9), SEY'in geometrik esnekliğini korurken, korunumcu (conservative) gerilme alanları üretmeye devam eder (Heblekar vd., 2024).



Şekil 9. Kesikli çizgilerle gösterilen üçgen ve dörtgen elemanlardan oluşan keyfi birincil ağ ile sürekli çizgilerle gösterilen ikincil ağ. İkincil ağ, birincil ağın yapısına bağlı olarak farklı kenar sayılarına sahip çokgenlerden meydana gelir (Reddy, 2024).

4.4 Gelecek Gelişim Alanları

ÇAKAY, halen aktif bir araştırma alanı olup, potansiyel gelişim yönleri şunlardır:

1. Dinamik problemler: Yöntemin, zamana bağlı problemlere (titreşim, dalga yayılımı) uyarlanması (Jiao vd., 2024). Bu, uzaysal ayrıklaştırma için ÇAKAY, zamansal ayrıklaştırma için ise Newmark- β veya genelleştirilmiş α -yöntemi gibi zaman adımlama şemalarının hibrit kullanımını gerektirir. Çift ağ yapısının, kütle matrisinin formülasyonunda diyagonalizasyon (lumping) avantajı sağlayıp sağlamadığı araştırılmaktadır.

2. Kararlılık (burkulma) analizi: Geometrik rijitlik matrisinin ÇAKAY formatında türetilmesi ve özdeğer problemlerinin çözümü (Reddy, 2024).
3. Çoklu-alan (multi-field) problemleri: Akışkan-yapı etkileşimi veya termo-piezoelektrik sistemler gibi farklı fiziksel alanların birleştiği problemlerde, ÇAKAY'nin akı sürekliliği avantajı, arayüz koşullarının sağlanmasında büyük kolaylık sunabilir.
4. Matematiksel Analiz: Yöntemin yakınsama, kararlılık ve hata tahminleri üzerine titiz matematiksel ispatlarının tamamlanması, yöntemin akademik kabulünü daha da artıracaktır.

Kaynaklar

- Bathe, K. J. (2014). *Finite element procedures* (2. bs.).
- Courant, R. (1943). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 49, 1–23. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1943-07818-4>
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (3. bs.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
- Heblekar, T. Y., Reddy, J. N., & Srinivasa, A. R. (2024). Analysis of nonlinear problems using the Dual Mesh Control Domain Method with arbitrary meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 427, 117044. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117044>
- Hughes, T. J. R. (2000). *The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis*. Dover Publications.
- Jiao, Z., Heblekar, T., Wang, G., Xu, R., & Reddy, J. N. (2024). Static, free vibration, and buckling analysis of functionally graded plates using the dual mesh control domain method. *Computers & Structures*, 305, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107575>
- LeVeque, R. J. (2002). *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511791253>
- Nampally, P., Ruocco, E., & Reddy, J. N. (2021). Bending analysis of functionally graded rectangular plates using the dual mesh control domain method. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 22(5), 425–437. <https://doi.org/10.1080/15502287.2021.1890279>
- Oden, J. T., & Reddy, J. N. (1983). *Variational methods in theoretical mechanics* (2. bs.). Springer-Verlag.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
- Reddy, J. N. (2003). *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis* (2. bs.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12409>
- Reddy, J. N. (2006). *Theory and analysis of elastic plates and shells* (2. bs.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849384165>

- Reddy, J. N. (2015). *An introduction to nonlinear finite element analysis: With applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics* (2. bs.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198525295.001.0001>
- Reddy, J. N. (2017). *Energy principles and variational methods in applied mechanics* (3. bs.). John Wiley & Sons.
- Reddy, J. N. (2019a). *An introduction to the finite element method* (4. bs.). McGraw-Hill Education.
- Reddy, J. N. (2019b). A dual mesh finite domain method for the numerical solution of differential equations. *International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 20(3), 212–228. <https://doi.org/10.1080/15502287.2019.1610987>
- Reddy, J. N. (2024). *Computational methods in engineering: Finite difference, finite volume, finite element, and dual mesh control domain methods*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003382812>
- Reddy, J. N., & Gartling, D. K. (2010). *The finite element method in heat transfer and fluid dynamics* (3. bs.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439882573>
- Reddy, J. N., & Nampally, P. (2020). A dual mesh finite domain method for the analysis of functionally graded beams. *Composite Structures*, 251, 112648. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112648>
- Reddy, J. N., Kim, N., & Martinez, M. (2020a). A dual mesh control domain method for the solution of nonlinear Poisson's equation and the Navier–Stokes equations for incompressible fluids. *Physics of Fluids*, 32(9), 17–38. <https://doi.org/10.1063/5.0026274>
- Reddy, J. N., Nampally, P., & Srinivasa, A. R. (2020b). Nonlinear analysis of functionally graded beams using the dual mesh finite domain method and the finite element method. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 127, 103575. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103575>
- Surana, K. S., & Reddy, J. N. (2016). *The finite element method for boundary value problems: Mathematics and computations*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315365718>
- Timoshenko, S. P., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells* (2. bs.). McGraw-Hill.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2. bs.). Pearson Education.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7. bs.). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>

//

Bölüm 5

TÜRKİYE'DE HİDROELEKTRİK ENERJİNİN YERİ VE ÖNEMİ

Hüseyin Yıldırım DALKILIÇ¹

¹ Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzincan, Türkiye

e-mail:hydalkilic@erzincan.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-4405-9341>

TÜRKİYE'DE HİDROELEKTRİK ENERJİNİN YERİ VE ÖNEMİ

1. Giriş

Enerji, günümüzde ekonomik büyümenin, toplumsal refahın ve teknolojik gelişmenin en temel unsurlarından biridir. Artan nüfus, sanayileşme ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerji talebini her geçen yıl daha da artırmaktadır. Dünya genelinde bu talebin büyük bir kısmı hâlen fosil yakıtlardan karşılanmakla birlikte, söz konusu kaynakların sınırlı olması, ithalat bağımlılığı ve çevresel sorunlar, ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda stratejik bir öncelik haline gelmiştir (Öziş vd., 2004; 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hidroelektrik enerji, tarihsel olarak en köklü ve yaygın kullanılan yöntemlerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Su kaynaklarının potansiyel enerjisinden faydalanılarak elektrik üretimi sağlayan hidroelektrik santraller (HES), hem düşük karbon salınımı hem de depolama kabiliyeti sayesinde enerji arz güvenliği açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Ayrıca, talep dalgalanmalarını karşılayabilme esnekliği, hidroelektriği diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından ayıran önemli bir özelliktir (Kaya vd., 2018).

Türkiye, jeomorfolojik yapısı, iklim özellikleri ve akarsu ağının yoğunluğu nedeniyle hidroelektrik enerji üretim potansiyeli açısından zengin bir ülkedir. Özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yer alan büyük akarsu havzaları, ülkenin enerji arzında hidroelektriğin payını artırmıştır (Çolak vd., 2008). Cumhuriyetin ilk yıllarından itibaren başlayan baraj ve hidroelektrik santral yatırımları, günümüzde Türkiye'nin kurulu elektrik gücünün önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte hidroelektrik, yalnızca enerji üretimi açısından değil; sulama, taşkın kontrolü ve içme suyu temini gibi çok amaçlı kullanımlarıyla da ülke kalkınmasına katkı sağlamaktadır (Baran vd., 2006; Okkan ve Dalkılıç, 2011).

Bu bölümde, Türkiye'nin hidroelektrik potansiyeli, tarihsel gelişimi, enerji arzındaki rolü ve geleceğe yönelik stratejik önemi ele alınacaktır. Amaç, hidroelektrik enerjinin Türkiye'nin enerji politikalarındaki yerini, avantajlarını ve karşı karşıya olduğu zorlukları bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktır.

2. Hidroelektrik Enerjinin Temelleri

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanan bir yenilenebilir enerji

kaynağıdır. Bu süreçte, suyun yüksekte düşmesi veya akışının yönlendirilmesiyle türbinler döndürülmekte, türbinlere bağlı jeneratörler aracılığıyla elektrik üretimi sağlanmaktadır. Dolayısıyla hidroelektrik, su döngüsünün doğal sürekliliği sayesinde tükenmeyen bir enerji kaynağı niteliği taşımaktadır (Atılgan, 2000).

2.1. Hidroelektrik Santral Türleri

Hidroelektrik santraller, kullanılan suyun miktarı, depolama kapasitesi ve işletme şekillerine göre farklı türlere ayrılmaktadır. Barajlı Hidroelektrik Santraller (Depolamalı HES) büyük rezervuarlar oluşturularak suyun depolanmasına dayanır. Talep artışına göre üretimi artırıp azaltabilme imkânı sunduklarından enerji arz güvenliğinde kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda sulama, içme suyu ve taşkın kontrolü gibi çok amaçlı kullanımlara da hizmet ederler. Nehir Tipi (Run-of-River) Santraller akarsuyun doğal debisiyle çalışan ya hiç barajı olmayan ya da küçük su depolama yapılarıyla desteklenen santrallerdir. Çevresel etkileri görece daha azdır, ancak enerji üretimi akarsuyun debisine doğrudan bağlıdır. Çevirmeli (Regülatörlü) Santraller küçük ve orta ölçekli akarsular üzerinde inşa edilen regülatörler yardımıyla suyun belirli bir kot farkı yaratılarak kanallara veya cebri borulara yönlendirilmesiyle çalışan santrallerdir. Tam anlamıyla barajlı sistemler gibi büyük rezervuarlar içermezler. Özellikle Türkiye’de özel sektör yatırımlarıyla 2000’li yıllardan sonra yaygınlaşmıştır. Enerji üretiminde esnek ve yerel çözümler sunar, ancak akım rejimine bağımlılıkları yüksektir. Pompaj Depolamalı Santraller ise elektrik talebinin düşük olduğu saatlerde suyun üst rezervuara pompalanarak depolanması, yüksek talep zamanlarında ise bu suyun türbinlerden geçirilmesi esasına dayanır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle rüzgâr ve güneş) entegrasyonunda enerji depolama açısından kritik bir çözümdür (Kaya, 2011; Özdemir vd., 20202). Santral türlerinin özellikleri Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Hidroelektrik santral türleri ve özellikleri.

Santral Türü	Depolama Özelliği	Avantajları	Dezavantajları
Barajlı (Depo- lamalı) HES	Büyük rezervuar içerir	Enerji arz güvenliği sağlar, yük takibi mümkündür, çok amaçlı kullanım (sulama, taşkın kontrolü, içme suyu)	Yüksek maliyet, ekosistem ve yerleşim üzerindeki etkiler, sedimantasyon sorunları
Nehir Tipi	Rezervuar yoktur veya çok küçüktür	Çevresel etkileri görece düşük, inşaat maliyetleri daha az	Üretim debiye bağlı, esnek değil, kurak dönemlerde verim düşer
Çevirmeli (Regülatörlü)	Küçük ölçekli regülatör ve kanal/ boru sistemi	Orta ölçekli akarsular için uygundur, yatırım maliyeti daha düşük, hızlı devreye alınabilir	Debi değişkenliğine bağımlı, ekosistem etkileri olabilir
Pompaj Depo- lamalı	Çift rezervuar sistemi (alt ve üst)	Enerji depolama imkânı, pik talepte dengeleme, yenilenebilir entegrasyonuna uygun	Yüksek yatırım maliyeti, karmaşık işletme

2.2. Hidroelektrik Enerjinin Avantajları ve Dezavantajları

Hidroelektrik enerji, pek çok yönüyle diğer enerji kaynaklarına kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle yenilenebilir ve temiz bir kaynak olması nedeniyle fosil yakıtların neden olduğu yüksek sera gazı salınımına kıyasla çevreye çok daha az zarar vermektedir. Ayrıca hidroelektrik santraller, talep dalgalanmalarına hızlı bir şekilde cevap verebilme esnekliğine sahiptir. Bu özellik, özellikle enerji arz güvenliğinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Hidroelektrik tesislerin uzun ömürlü olması da bir diğer önemli avantajdır; birçok baraj 50 yılın üzerinde faaliyet gösterebilmekte ve ülke ekonomisine katkı sunmaya devam etmektedir. Bunun yanı sıra hidroelektrik yatırımlar, buldukları bölgelerde kalkınmayı teşvik etmekte, istihdam yaratmakta ve enerji üretiminin ötesinde sulama, taşkın kontrolü ve içme suyu temini gibi çok amaçlı faydalar sağlamaktadır (Sertkaya vd., 2016).

Bununla birlikte hidroelektrik enerjinin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Büyük ölçekli baraj ve santral projeleri, ekosistem üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir. Balık göç yollarının kesilmesi, doğal habitatların kaybolması ve biyolojik çeşitlilikte azalma bu etkiler arasında sayılabilir. Ayrıca rezervuar alanlarının oluşturulması, bazı yerleşim yerlerinin su altında kalmasına ve nüfusun yer değiştirmesine yol açabilmektedir. Rezervuarlarda zamanla biriken sediman, depolama kapa-

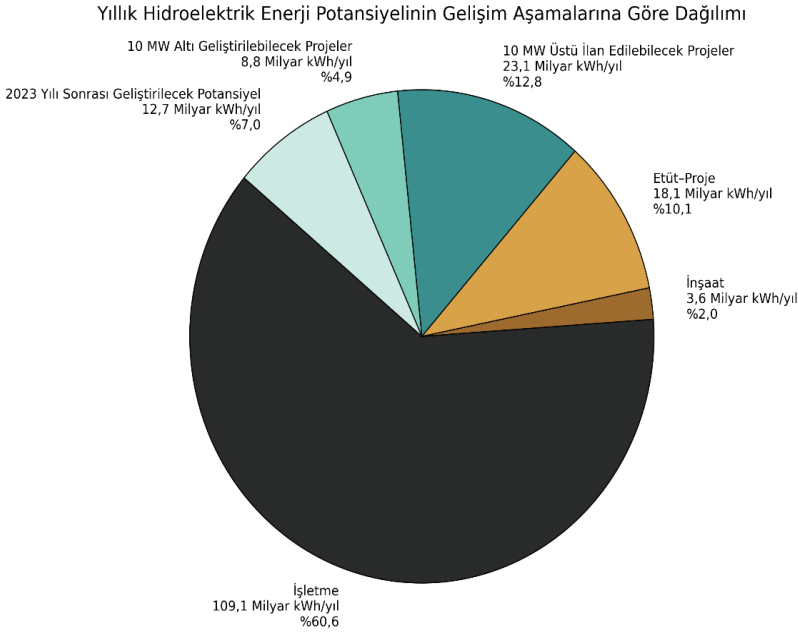
sitesini azaltarak uzun vadede enerji üretim verimliliğini düşürebilir. Öte yandan hidroelektrik enerji üretimi, kuraklık ve iklim değişikliğine bağlı olarak su rejiminde meydana gelen değişikliklerden doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle hidroelektrik, güçlü avantajlarının yanı sıra dikkate alınması gereken sınırlılıklara da sahipti (Singh and Signal, 2017; Killingveit, 2014).

3. Türkiye'nin Hidroelektrik Potansiyeli

Türkiye, sahip olduğu hidrolojik ve topografik özellikleriyle hidroelektrik enerji üretimi açısından oldukça zengin bir potansiyele sahiptir. Ülke genelinde dağlık alanların yaygın olması, yüksek eğimli akarsu yatakları ve akarsu rejimlerindeki çeşitlilik, hidroelektrik enerji üretimi için elverişli koşullar sunmaktadır. Özellikle Doğu Anadolu ve Karadeniz bölgeleri, yüksek debili ve eğimli akarsularıyla hidroelektrik projeler için öne çıkmaktadır.

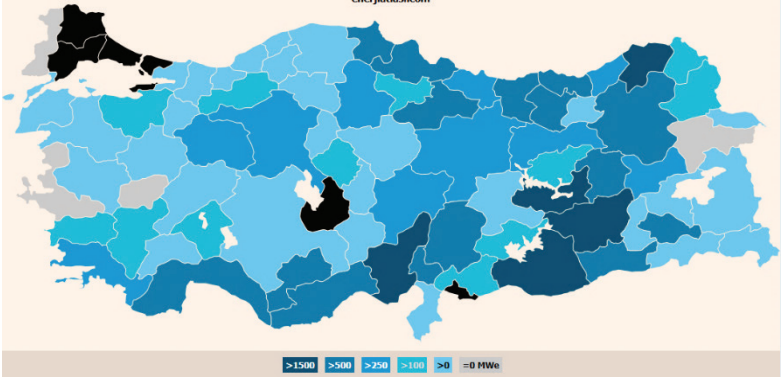
Türkiye'nin toplam teknik hidroelektrik potansiyeli yaklaşık 433 milyar kWh/yıl, ekonomik potansiyeli ise yaklaşık 216 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde kullanılabilir potansiyelin %45-50'si değerlendirilmiş durumdadır. Bu oran, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırmak ve dışa bağımlılığı azaltmak açısından halen önemli bir gelişme alanı olduğunu göstermektedir (Dursun ve Gokcol, 2011; Okkan ve Dalkılıç, 2011; Öziş vd., 2004).

DSİ'nin 2023 yılı raporlarına göre, Türkiye'de işletmede olan hidroelektrik santrallerinin kurulu gücü yaklaşık 32.000 MW'a ulaşmış ve toplam elektrik üretiminin %20-25'lik kısmı hidroelektrik kaynaklardan sağlanmıştır. Bu durum, Türkiye'nin elektrik üretiminde hidroelektriğin hâlâ en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu kanıtlamaktadır. Hidroelektrik enerjimizin gelişim durumu Şekil 1'de sunulmaktadır.



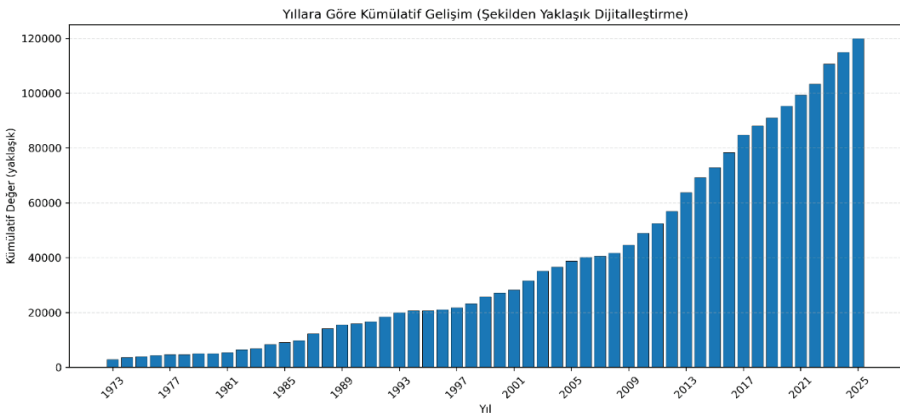
Şekil 1. Hidroelektrik enerji potansiyelimizin gelişim durumu (DSİ, 2023).

Büyük nehir havzaları, hidroelektrik üretimde kritik bir rol üstlenmektedir. Fırat ve Dicle nehirleri, Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında yer alan Atatürk, Keban, Karakaya ve Ilısu gibi büyük barajlarla Türkiye'nin en yüksek üretim kapasitesine sahip havzalarıdır. Kızılırmak ve Yeşilirmak havzaları, Orta Karadeniz'de hem enerji üretimi hem de sulama açısından stratejik önem taşımaktadır. Çoruh Nehri, yüksek eğimli vadisi sayesinde Doğu Karadeniz'de önemli bir hidroelektrik üretim merkezi haline gelmiştir. Ayrıca Sakarya ve Gediz nehirleri de Batı Anadolu'daki hidroelektrik potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Türkiye'deki hidroelektrik santrallerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. HES'lerin bölgesel dağılımı (Enerji Atlası, 2025)

Türkiye'de hidroelektrik enerji kurulu gücü, Cumhuriyetin ilk yıllarından itibaren sürekli artış göstermiştir. 1950'li yıllarda işletmede olan HES sayısı ve kurulu güç oldukça sınırlı iken, 1980'li yıllara gelindiğinde büyük baraj projeleri, özellikle GAP kapsamında yapılan yatırımlar sayesinde kurulu güç ciddi şekilde artmıştır. 2000'li yıllardan itibaren ise özel sektörün de katılımıyla küçük ve orta ölçekli HES yatırımları hız kazanmış, Türkiye'nin hidroelektrik kurulu gücü 2023 yılı itibariyle yaklaşık 32.000 MW seviyesine ulaşmıştır. 2025 yılı itibariyle ülkemizin kurulu gücü 120422 MW seviyesine ulaşmıştır. Doğalgazın payı % 20.4, taşkömürü, linyit ve ithal kömürün payı %17.9, akarsu + barajlı santraller %26.8, Güneş %19.7 ve rüzgâr %11.4 orana sahiptir. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle değişimi Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi 1973-2025 (TEİAŞ, 2025)

Türkiye'nin hidroelektrik potansiyelinin büyük bir kısmı değerlendirilmiş olsa da hâlâ önemli miktarda kullanılmamış potansiyel bulunmaktadır. Özellikle Doğu Anadolu ve Doğu Karadeniz'de, teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir projeler geliştirme imkânı mevcuttur. Bununla birlikte, çevresel hassasiyetler, su kullanımında rekabet (içme suyu, tarım, ekosistem) ve iklim değişikliğinin akım rejimleri üzerindeki etkisi dikkate alınarak sürdürülebilir bir hidroelektrik planlamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla hidroelektrik, yalnızca enerji üretimi değil; aynı zamanda su yönetimi, bölgesel kalkınma ve çevresel denge açısından da Türkiye'nin gelecekteki enerji stratejisinde kritik rol oynamaya devam edecektir.

4. Türkiye'de Hidroelektriğin Enerji Politikalarındaki Yeri ve Önemi

Enerji, ekonomik büyümenin ve toplumsal refahın en önemli girdilerinden biridir. Türkiye, artan nüfusu ve sanayileşme süreciyle birlikte enerji talebi sürekli artan bir ülkedir. Bu bağlamda, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi hem enerji arz güvenliği hem de dışa bağımlılığın azaltılması açısından stratejik bir önceliktir. Hidroelektrik enerji, bu çerçevede Türkiye'nin enerji politikalarının temel taşlarından biri olmuştur.

Hidroelektrik, Türkiye'nin elektrik üretiminde ilk devreye giren büyük ölçekli yenilenebilir kaynak olup, uzun yıllar boyunca toplam üretim içinde en yüksek paya sahip olmuştur. Günümüzde güneş ve rüzgâr enerjisinin hızla artmasına rağmen, hidroelektrik santraller toplam kurulu gücün yaklaşık %26-27'sini, toplam elektrik üretiminin ise %20-25'ini karşılamaya devam etmektedir. Bu durum, hidroelektriğin hâlen Türkiye'nin enerji sepetinde en güçlü yenilenebilir kaynak olduğunu göstermektedir (Bayazıt, 2021; Şahin vd., 2016).

Enerji politikaları açısından hidroelektriğin önemi birkaç temel noktada öne çıkmaktadır:

- a. Arz güvenliği ve dışa bağımlılığın azaltılması: Türkiye enerji ithalatında özellikle doğalgaza yüksek oranda bağımlıdır. Hidroelektrik santraller, yerli kaynak kullanımı sayesinde dışa bağımlılığı azaltarak enerji arz güvenliğine katkı sağlar.
- b. Esneklik ve şebeke dengeleme: Hidroelektrik santraller, özellikle barajlı olanlar, talep dalgalanmalarına hızlı tepki verebilme özelliğiyle sistemin dengelenmesinde kritik rol oynar. Rüzgâr ve güneş gibi değişken yenilenebilirlerin entegrasyonunda hidroelektrik adeta "dengeleyici" kaynak işlevi görür.

- c. Çok yönlü faydalar: Hidroelektrik santraller yalnızca enerji üretmez; aynı zamanda sulama, içme suyu temini, taşkın kontrolü ve bölgesel kalkınmaya da katkıda bulunur.
- d. İklim politikalarıyla uyum: Paris Anlaşması ve Türkiye'nin karbon nötr hedefleri çerçevesinde düşük karbonlu enerji kaynaklarına yönelim artarken, hidroelektrik bu sürecin en önemli bileşenlerinden biridir.

Bununla birlikte, hidroelektrik projeleri enerji politikalarında her zaman tartışmasız bir alan olmamıştır. Özellikle çevresel etkiler, ekosistemler üzerindeki baskılar ve sosyal boyut (yerleşim yerlerinin taşınması, kültürel mirasın etkilenmesi) kamuoyunda önemli tartışma alanları yaratmıştır. Bu nedenle günümüzde enerji politikalarında hidroelektrik, yalnızca “miktar artırımı” üzerinden değil; aynı zamanda sürdürülebilirlik, çevresel hassasiyet ve katılımcı planlama ilkeleri çerçevesinde ele alınmaktadır (Öziş vd., 2008).

Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon hedefleri bağlamında hidroelektriğin yeri, rüzgâr ve güneşle birlikte “baz yük dışı yenilenebilirlerin desteklenmesi” şeklinde tanımlanabilir. Bu açıdan hidroelektrik hem geçmişte hem de gelecekte Türkiye enerji politikalarının omurgasını oluşturmaya devam edecektir.

5. Hidroelektriğin Çevresel ve Sosyal Etkileri

Hidroelektrik enerji, yenilenebilir ve düşük karbonlu bir kaynak olarak enerji arz güvenliğine önemli katkılar sağlasa da çevresel ve sosyal boyutları açısından çok yönlü etkiler doğurmaktadır. Bu etkiler hem olumlu hem de olumsuz yönleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

5.1. Çevresel Etkiler

Ekosistem Üzerindeki Etkiler: Baraj yapımı, akarsuların doğal akış rejiminde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu durum balık göç yollarının kesilmesine, doğal habitatların parçalanmasına ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Özellikle alabalık ve sazan gibi göç eden türler bundan doğrudan etkilenmektedir.

Sedimentasyon Sorunları: Baraj göllerinde zamanla biriken sedimentler, hem depolama kapasitesini azaltmakta hem de nehir aşağısındaki ekosistemlerde besin döngülerini değiştirmektedir.

Su Kalitesi: Rezervuarlarda suyun beklemesi, sıcaklık ve oksijen rejimlerinde değişikliklere yol açabilir. Bu durum, göl ve akarsu ekosistemlerinin kimyasal ve biyolojik dengesini etkiler.

İklim Üzerindeki Etkiler: Hidroelektrik, karbon salınımı düşük bir kaynak olsa da, geniş yüzeyli baraj göllerinde organik madde çözünmesi sonucu metan gazı salınımı gerçekleşebilir. Özellikle tropikal bölgelerde bu etki daha belirgin olmakla birlikte, Türkiye’de sınırlı ölçüde gözlemlenmektedir (Mahmut., 2022; Şahin vd., 2016; Xia vd., 2025).

5.2. Sosyal Etkiler

Hidroelektrik santrallerin sosyal etkileri aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

- a. Yerleşim Alanlarının Taşınması: Büyük ölçekli hidroelektrik projeleri, geniş alanların su altında kalmasına neden olmakta; bu da yerleşim yerlerinin taşınmasına ve binlerce insanın yeniden iskân edilmesine yol açabilmektedir. Örneğin Ilısu Barajı kapsamında Hasankeyf’in tarihi dokusu ve çevresindeki köyler etkilenmiştir.
- b. Kültürel ve Tarihi Miras: Baraj gölleri, arkeolojik alanların ve kültürel mirasın su altında kalmasına neden olabilmektedir.
- c. Bölgesel Kalkınma: Hidroelektrik yatırımları, istihdam yaratmakta, altyapı gelişimini hızlandırmakta ve bölgesel kalkınmaya katkı sunmaktadır. Özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde hidroelektrik projeleri bu açıdan önemli bir rol üstlenmiştir.
- d. Su Kullanımında Rekabet: Hidroelektrik santraller, tarımsal sulama, içme suyu ve ekosistem ihtiyaçlarıyla aynı kaynağı kullanır. Bu nedenle suyun paylaşımı konusunda zaman zaman sosyal gerilimler yaşanabilmektedir.

5.3. Sürdürülebilirlik Perspektifi

Günümüzde hidroelektrik yatırımlarının çevresel ve sosyal etkilerini en aza indirmek amacıyla, ÇED (Çevresel Etki Değerlendirmesi) süreçleri, balık geçitleri, minimum ekolojik akım uygulamaları ve paydaş katılımı gibi yaklaşımlar uygulanmaktadır. Böylece hidroelektrik enerjinin yalnızca ekonomik değil, ekolojik ve sosyal açıdan da daha dengeli bir şekilde yönetilmesi hedeflenmektedir (Xia vd., 2025).

6. Sonuç ve Değerlendirme

Türkiye, sahip olduğu coğrafi ve hidrolojik özellikler sayesinde hidroelektrik enerji üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda enerji arz güvenliğini artırmak, dışa bağımlılığı azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi

giderek artmıştır. Bu çerçevede hidroelektrik enerji, hem yerli ve temiz bir kaynak olması hem de şebeke esnekliği sağlaması nedeniyle Türkiye'nin enerji politikalarının merkezinde yer almaktadır.

Çalışmada ortaya konulduğu üzere, Türkiye'nin teknik ve ekonomik hidroelektrik potansiyeli büyük ölçüde değerlendirilmiş, özellikle 2000'li yıllardan sonra hızlanan yatırımlar sayesinde hidroelektrik kurulu gücü toplam elektrik üretim kapasitesi içinde önemli bir paya ulaşmıştır. Bununla birlikte, bölgesel dağılıma bakıldığında potansiyelin daha çok Doğu Anadolu ve Karadeniz bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilir ve verimli yönetimini enerji politikaları açısından kritik hâle getirmektedir.

Hidroelektrik santraller, yenilenebilir enerji kaynakları arasında baz yük desteği sağlayabilen nadir seçeneklerden biridir. Bu yönüyle güneş ve rüzgâr gibi kesintili kaynaklarla birlikte sistem güvenliğinin korunmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, hidroelektrik yatırımlarında çevresel ve sosyal etkiler, ekosistem dengesi ve iklim değişikliğine bağlı akım rejimlerindeki belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Gelecekte, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri, hidroelektrik enerji üretim kapasitesinin planlanmasında önemli bir parametre olacaktır.

Sonuç olarak, hidroelektrik enerji Türkiye'nin enerji arz güvenliği, ekonomik kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından vazgeçilmez bir konumdadır. Bununla birlikte, önümüzdeki dönemde hidroelektriğin yalnızca enerji üretim aracı değil, aynı zamanda su kaynaklarının çok amaçlı yönetiminde (sulama, taşkın kontrolü, içme suyu temini vb.) stratejik bir unsur olarak ele alınması gerekmektedir. Dolayısıyla, enerji politikalarında hidroelektrik yatırımların desteklenmeye devam edilmesi, ancak aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması ve iklim uyumlu yönetim stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde Türkiye'nin toplam kurulu gücünün yaklaşık %47'si yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Bu oran önemli bir başarı olmakla birlikte, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından yeterli değildir. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel ve ekonomik maliyetler göz önüne alındığında, Türkiye'nin enerji politikalarında yenilenebilir enerji yatırımlarına daha güçlü bir şekilde yönelmesi gerekmektedir. Hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi kaynakların toplam içindeki payının artırılması, hem dışa bağımlılığın azaltılmasına hem de karbon emisyonlarının düşürülmesine doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, hidroelektrik enerji yatırımları yalnızca mevcut potansiyelin değerlendirilmesiyle sınırlı kalmamalı, aynı

zamanda yenilenebilir enerji karışımı içinde dengeleyici ve destekleyici rolüyle daha da ön plana çıkarılmalıdır.

Kaynaklar

- Atılğan, İ. (2000). Türkiye'nin enerji potansiyeline bakış. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 31-47.
- Bayazıt, Y. (2021). The effect of hydroelectric power plants on the carbon emission: An example of Gokcekaya dam, Turkey. *Renewable Energy*, 170, 181-187.
- Çolak, İ., Bayındır, R., & Demirtaş, M. (2008). Türkiye'nin enerji geleceği. *Tübvav Bilim Dergisi*, 1(2), 36-44.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2023, 31 Temmuz). *Hidroelektrik enerji potansiyelimizin gelişim durumu*. <https://www.dsi.gov.tr>
- Dursun, B., & Gokcol, C. (2011). The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 36(4), 1227-1235.
- Enerji Atlası. (2025). *Türkiye'de hidroelektrik santrallerin (HES) bölgesel dağılımı*.
- Kaya, K., Şenel, M. C., & Koç, E. (2018). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(3), 219-234.
- Kaya, T. (2011). Türkiye'de su gücü ve küçük hidroelektrik santraller. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 1(1), 207-238.
- Killingtveit, Å. (2014). Hydroelectric power. In *Future energy* (pp. 453-470). Elsevier.
- Mahmut, T. (2022). Hydropower plant and its environmental effects. *Eurasian Journal of Chemical, Medicinal and Petroleum Research*, 1(4), 130-137.
- Okkan, U., & Dalkilic, H. Y. (2011). Reservoir inflow modeling with artificial neural networks: the case of Kemer Dam in Turkey.
- Ozis U, Turkman F, Baran T, Ozdemir Y, Dalkilic Y (2006) Su hukuku. In: Ozis U, Turkman F, Baran T (eds) Su kaynaklarının geliştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi*, Izmir, pp 3.1-3.36
- Özdemir, M. S., Dalcalı, A., & Ocak, C. (2020). Akarsu tipi hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin-generatörler. *Mühendislik bilimleri ve araştırmaları dergisi*, 2(2), 69-75.
- Öziş, Ü., Baran, T., & Dalkılıç, Y. (2008). Hidroelektrik enerjiyi geliştirme hızları. *Su ve Enerji Konferansı Bildiriler Kitabı*, 1-14.
- Öziş, Ü., Özdemir, Y., Dalkılıç, Y., Türkman, F., & Baran, T. (2004). Development of the Euphrates-Tigris basin. In *İzmir, European Water Resources Association & Dokuz Eylül University-SUMER, EWRA Symposium on Water resources management: risks and challenges for the 21st century, Proceedings*, (NB Harmancıoğlu, et. al.) (pp. 85-95).
- Sertkaya, A. A., Saraç, M., & Omar, M. A. (2016). The Importance Of Pumped Storage Hydro-Electric Power Plants For Turkey. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 1(3), 369-382.
- Singh, V. K., & Singal, S. K. (2017). Operation of hydro power plants-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 610-619.

- Şahin, M., Güven, Y., Oğuz, Y., & Şahin, E. (2016). Importance of Hydroelectric Power Plants In Terms of Environmental Policy. *El-Cezeri*, 3(3).
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2025). *Türkiye elektrik üretim-iletim istatistikleri*. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü. <https://www.teias.gov.tr>
- Xia, C., Balsalobre-Lorente, D., & Syed, Q. R. (2025). Electricity generation from renewable and non-renewable energy sources in China: The role of environmental policy stringency, FDI, and economic growth. *Energy*, 318, 134695.

//

Bölüm 6

DERİN TEMEL SİSTEMLERİ: KAZIK TEMELLER VE HESAPLAMA İLKELERİ

Damla KÜÇÜKAY KAYAALP¹, Hüseyin Suha AKSOY²

1 Araş. Gör. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye. ORCID: (0000-0003-2021-1318)

2 Doç. Dr. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID: (0000-0003-0564-457X)

1.GİRİŞ

Mühendisler, yapım süreçlerinin daha ekonomik ve uygulanmasının görece daha kolay olması nedeniyle, uygun zemin ve yük koşullarında yüzeysel temelleri tercih etmektedir. Ancak yüzeysel temellerin en iyi seçimler olmadığı durumlar ile karşılaşırız. Derin temel, bir yapının yüklerini yüzeye yakın zemin tabakaları yerine, daha derinlerde bulunan sağlam ve taşıma gücü yüksek zemin veya kaya tabakalarına aktaran temel türüdür. Bu tür temellerde yük, yüzeysel (sığ) temellere göre çok daha derin bir seviyeye iletilir. Genellikle temel derinliği, temel genişliğinin (B) birkaç katı kadar olur ve çoğu durumda $D_f \geq 3B$ kriteri derin temel olarak kabul edilir (Coduto, 1999). Derin temel uygulamasına aşağıdaki durumlarda ihtiyaç duyulur:

- Üst zeminlerin çok zayıf veya yapısal yüklerin çok büyük olduğu ve böylece yüzeysel temellerin çok geniş olacağı durumlarda,
- Temelin bir keson kazıkta olduğu gibi suyun içinden geçme zorunluluğu olması durumunda,
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olması,
- Üst yapı yükünden kaynaklı olarak büyük taşıma gücü kapasitesi gerekliliğinde,
- Yanal yük kapasitesinin büyük olması gerektiğinde, deprem, rüzgar, dalga kuvvetleri ve eğik yükler gibi durumlarda faydalanılır.
- Zamanla temel çok yakın bir kazı olması ve bu kazının yüzeysel temelleri zayıflatması durumu geçerli olduğunda derin temeller tercih edilmelidir. Yukarıda bahsedilen durumlar olması halinde radye temeller de tercih edilir fakat en yaygın alternatif genellikle derin temellerdir.

1.1. Tarihsel

Kazıklı temeller, yüzyıllardır yüklerin zemine güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayan temel sistemleri olarak kullanılmaktadır. Yerleşimlerin iletişim, savunma ve stratejik nedenlerle nehir ve göl kenarlarında yoğunlaşması, taşıma gücü düşük zeminlerde ek bir güçlendirme ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, zeminin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla ahşap kazıklar elle zemine çakılmış veya zeminde açılan oyuklar kum ve taşlarla doldurularak primitif (ilkel) kazık benzeri sistemler oluşturulmuştur (Iskander, 2002).

Kazık teknolojisindeki önemli gelişmelerden biri, 1740 yılında Christoffer Polhem tarafından günümüzdeki kazık çakma makinelerinin öncülü sayılabilecek bir kazık çakma mekanizmasının icat edilmesidir. Bunu takiben, 1800'lü yıllarda çelik kazıkların ve 1900'lü yıllarda beton kazıkların kullanılmaya başlanmasıyla kazıklı temel sistemleri önemli bir evrim geçirmiştir. Sanayi Devrimi ile birlikte buhar ve dizel makinelerinin geliştirilmesi, kazık çakma ekipmanlarının kapasitesini artırmış ve daha derin, daha zorlayıcı zemin koşullarında kazık uygulamalarını mümkün kılmıştır. Günümüzde ise artan yapılaşma ve konut ihtiyacı, mühendisleri zayıf zemin özelliklerine sahip bölgelerin de kullanımına yöneltmiştir. Bu durum, kazıklı temel sistemlerinin hem çeşitlendirilmesini hem de performanslarının iyileştirilmesini zorunlu kılmış; böylece modern kazık teknolojileri ve tasarım yöntemleri hızla gelişmiştir.

2. Kazıkların mühendislik açısından işlevsel önemi

Kazıklı temeller, diğer temel türlerinde olduğu gibi, yapı yüklerinin güvenli bir biçimde daha sağlam zemin tabakalarına iletilmesini sağlamak ve düşey, yanal ya da zemin kabarması kaynaklı yük bileşenlerine karşı direnç oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Sığ derinliklerde yer alan zemin tabakası yeterli taşıma kapasitesine sahip değilse, yapı yüklerinin aktarılması için kazık temel sistemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Arazi deneyleri sonucunda zeminin dayanımı az veya öngörülen oturma miktarının kabul edilebilir değerlerin üzerinde olduğu belirlenirse, kazıklı temel uygulaması zorunlu bir tasarım seçeneği hâline gelmektedir.

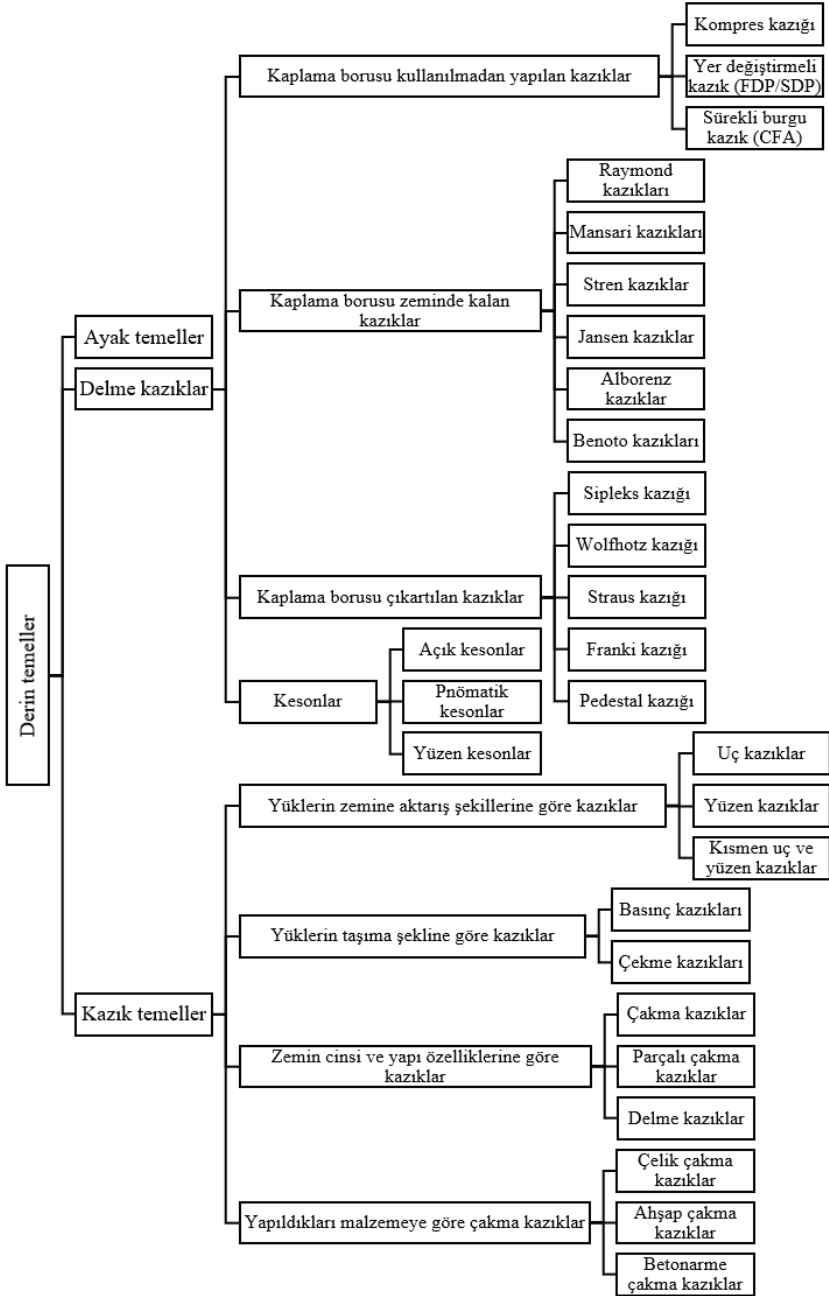
Yapının maruz kalacağı toplam tasarım yüklerinin yüksek olduğu mühendislik yapılarında, sığ zemin tabakalarının gerekli taşıma kapasitesini sağlayamaması nedeniyle kazık kullanımı kaçınılmaz olmaktadır (Kaladi et al., 2023; Zheng et al., 2020). Bunun yanı sıra, zemin yeterli taşıma gücüne sahip olsa bile yapıya etkiyen yatay kuvvetlere karşı direnç geliştirmek amacıyla kazık elemanlarından yararlanılabilmektedir. Su ortamında yer alan köprü ayakları ve iskele platformları gibi yapılarda da kazık temeller uygun ve güvenilir bir çözüm oluşturmaktadır (Chen et al., 2023).

Genel olarak kazıklı temellerin tercih edilmesini gerektiren başlıca durumlar şu şekilde özetlenebilir:

- Yapının altındaki zeminin oldukça yumuşak veya gevşek olması,
- Yeterli taşıma gücüne sahip zemin tabakasının yüzeysel temeller için ekonomik olmayacak kadar derinde bulunması,

- Zemin profilinin farklı bölgelerde değişken özellikler göstermesi,
- Zemin yüzeyinin çok eğimli olması,
- Su ile temas ettiğinde kabarma veya ani çökme potansiyeli bulunan zemin türleri,
- Yapıya yatay veya eğimli yüklerin etki etmesi,
- Yapı yüklerinin zemine üniform biçimde aktarılamaması,
- Farklı oturmalara duyarlı statik sistemlere sahip yapıların bulunması,
- Liman yapıları ve köprü ayakları gibi su ortamındaki uygulamaların gerektirmesi,
- Palplanş perde yapım zorunluluğunun bulunması

Derin temeller, yükleri daha derin ve taşıma gücü yüksek zemin tabakalarına aktarma amaçlarına göre üç temel grupta sınıflandırılır: ayak temeller, delme kazıklar ve kazık temeller (Şekil 1). Bu sınıflandırma, derin temel sistemlerinin geometrik özellikleri, yapım yöntemleri ve taşıma mekanizmalarındaki farklılıklara dayanır. Şekil 1’de, derin temel türleri; kaplama borusu kullanılan ve kullanılmayan sistemler ile keson temellerin sınıflandırılması da dâhil olmak üzere kapsamlı şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada, derin temel türlerinden biri olan kazık temeller ele alındığından, devam eden bölümlerde kazık tipleri ve taşıma gücü özellikleri açıklanmıştır.



Şekil 1. Derin temel çeşitlerinin mühendislik esaslarına göre sınıflandırılması

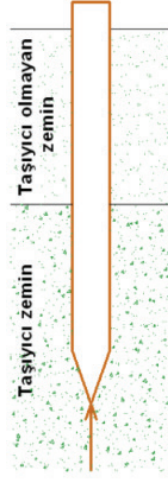
3. Kazık Temeller

Kazıklı temel, yapı yüklerinin daha derinde bulunan güçlü zemin tabakalarına güvenli bir şekilde aktarılabilmesi amacıyla zemine yerleştirilen ya da inşa edilen bir dizi düşey taşıyıcı eleman olarak tanımlanmaktadır. Kazıklar, genellikle beton gibi yüksek dayanımlı malzemelerden üretilen uzun, silindirik yapı elemanlarıdır ve üzerlerinde taşınacak yapılar için güvenilir bir mesnet oluşturmak üzere zemine çakılır veya yerinde dökülür. Bu elemanlar, üst yapı yüklerini daha yüksek taşıma kapasitesine sahip sert zemin katmanlarına, kayaya ya da yeterince güçlü toprak birimlerine iletir. Zemine sağlam bir şekilde ankrajlanan kazıklar, yapıya gerekli stabiliteyi sağlayarak güvenli yapı hizmeti sunar. Ayrıca, kazıklı temeller zemine derinlemesine oturdukları için erozyon ve yüzeyel aşınma etkilerine karşı diğer temel türlerine kıyasla daha dayanıklı bir çözüm oluşturmaktadır. Alternatif temel sistemlerinin maliyet açısından sınırlayıcı olduğu veya teknik gereklilikleri karşılamadığı durumlarda, kazıklı temeller hem pratik hem de ekonomik bir çözüm olarak öne çıkar. İnşaat projelerinde kazıklı temel kullanımına karar verilirken, maliyet ve uygulanabilirlik kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Kullanılan malzeme türü toplam maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca kazıkların sahada yerleştirilmesi, genellikle özel ekipman ve nitelikli iş gücü gerektirdiğinden montaj maliyetlerini artırabilmektedir. Bu nedenle, kazıklı temellerin davranışını, taşıma mekanizmalarını ve tasarım prensiplerini doğru şekilde kavramak büyük önem taşımaktadır. Kazıkların yük aktarım süreçlerinin, zemin-kazık etkileşiminin ve tasarım parametrelerinin ayrıntılı olarak anlaşılması, hem güvenli hem de ekonomik mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine olanak sağlar. Ayrıca, kazıklı temel sistemlerine ilişkin hesaplama ilkelerinin bilinmesi, tasarım sürecinde belirsizliklerin azaltılmasına ve saha koşullarına uygun optimize edilmiş temel çözümlerinin oluşturulmasına katkı sunmaktadır.

3.1. Yüklerin zemine aktarılış şekillerine göre kazıklar

3.1.2. Uç kazığı

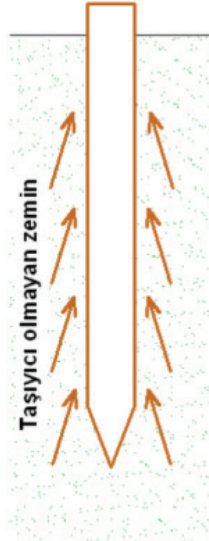
Uç kazıklar, taşıyıcı tabakaya veya temel kayaya kadar inerek yapısal yükleri doğrudan bu dayanımı yüksek zemine aktaran derin temel elemanlarıdır. Bu kazık türü, uç noktasının oturduğu sağlam tabakanın dayanımından yararlanarak aksel yükleri güvenli bir şekilde taşımak üzere tasarlanmıştır (Şekil 2). Böylece, yük transferinin büyük bölümü kazık ucu aracılığıyla gerçekleşir ve kazığın taşıma kapasitesi esas olarak kazık ucundaki zeminin penetrasyon direncinden almaktadır (Tomlinson & Woodward, 2008).



Şekil 2. Uç kazığı

3.1.3. Sürtünme (yüzen) kazığı

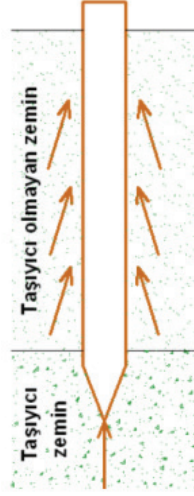
Kazık boyunun taşıyıcı tabakaya ulaşmadığı durumlarda tercih edilir. Yük, kazık ucu yerine çevresindeki zeminle kazık yüzeyi arasında oluşan sürtünme yoluyla zemine aktarılır (Şekil 3). Sürtünme kazıkları, çamurlaşmayan ve taneli yapıda olan kohezyonsuz zeminlere çakılır. Temel kullanım amacı, çakma sırasında oluşan titreşimlerin zemini sıkıştırarak dayanımını artırmasıdır. Çakma işlemi sırasında kumun kompaksiyona uğraması, kazıklarla kum zemininin bütünleşik bir blok gibi birlikte davranmasını sağlar.



Şekil 3. Sürtünme kazığı

3.1.4. Kombine (kısmen uç–kısmen sürtünme) kazık

Kombine kazıklar olarak adlandırılan kısmen uç–kısmen sürtünme kazıkları, taşıdıkları yükü hem kazık ucundaki taşıma kapasitesi hem de kazık çevresinde gelişen sürtünme direnci aracılığıyla zemine iletirler (Şekil 4).



Şekil 4. Kombine kazığı

3.2. Yüklerin taşınma şekline göre kazıklar

3.2.1. Basınç kazıkları

Basınç kazıkları, bir yapıdan gelen ve kazık eksenini boyunca aşağıya doğru etki eden itme veya sıkıştırma yüklerini taşımak üzere tasarlanmış en yaygın kazık türüdür (Das, 2010; Tomlinson & Woodward, 2008).

Basınç yükü, kazık malzemesinde bir kısalmaya (sıkışmaya) neden olur. Bu yük, kazık tarafından iki ana mekanizma ile zemine aktarılır:

Uç Direnci: Kazığın alt ucunun (tabanının) altındaki sağlam zeminin doğrudan taşıma gücü.

Yüzey Sürtünmesi: Kazığın yan yüzeyi ile çevresindeki zemin arasındaki sürtünme veya aderans kuvveti.

Basınç kazığının toplam taşıma gücü, bu iki bileşenin toplamıdır. Kazık, yükü güvenli bir şekilde zemin tabakalarına iletirken yapının oturması veya devrilmesini engeller.

3.2.2. Çekme Kazıkları

Çekme kazıkları, yapıdan gelen ve kazık eksenini boyunca yukarıya doğru etki eden çekme veya kaldırma kuvvetlerini taşımak üzere tasarlanmıştır.

Çekme yükü, kazık malzemesinde bir uzamaya (gerilmeye) neden olur ve kazığı zeminden dışarı çekmeye çalışır. Çekme kazıklarında yük, neredeyse tamamen (yanal sürtünme) ve kazığın başındaki özel ankraj sistemleri aracılığıyla taşınır.

Basınç kazıklarının aksine, çekme kazıklarında uç direncinin katkısı ihmal edilir çünkü yükün yönü kazığı yukarıya çekmektedir. Başarılı bir çekme kazığı, yan yüzeyi boyunca yeterli sürtünme sağlayarak, zeminle olan bağlantısını koparmadan yapıyı yerinde tutar. Bu nedenle, çekme kazıkları genellikle yüksek sürtünme sağlamak için daha uzun tasarlanır.

3.3. Zemin cinsi ve yapı özelliklerine göre kazıklar

3.3.1. Çakma kazıklar

Çakma kazıklar, önceden fabrikada imal edilmiş (prekast) veya çelikten yapılmış kazıkların, özel makineler (şahmerdanlar, vibrasyonlu çekiçler) kullanılarak zemine darbe veya titreşim ile zorla yerleştirildiği kazık tipidir.

Çakma kazıklar, şantiyeden bağımsız olarak önceden imal edilen (prekast betonarme, çelik veya ahşap) elemanların zemine çakılmasıyla uygulanan, zeminde belirgin yer değiştirme (deplasman) oluşturan derin temel elemanlarıdır. Kazığın zemine çakılması sırasında zemin yanlara ve aşağıya doğru sıkışarak yer değiştirir; bu durum özellikle gevşek ve granüler zeminlerde (kum, çakıl) parçacıkların yeniden düzenlenmesini sağlayarak zeminin taşıma gücünü artırır ve doğal bir zemin iyileştirmesi etkisi oluşturur. Liman, iskele, viyadük ve geniş endüstriyel alanlar gibi açık sahalarda yaygın olarak kullanılan çakma kazıklar, yüksek taşıma kapasitesi ve hava koşullarından bağımsız olarak hızlı imalat imkânı sunmalarıyla önemli avantaj sağlar. Ancak çakma işlemi sırasında oluşan yüksek titreşim ve gürültü, yoğun yerleşim alanlarında veya mevcut yapılara yakın bölgelerde kullanımını sınırlar. Ayrıca uzun kazıkların taşınması ve çakılması sırasında hasar görme riski de göz önünde bulundurulması gereken bir dezavantajdır.

3.3.2. Parçalı çakma kazıklar

Parçalı çakma kazıklar, esasen çakma kazıkların bir alt türüdür. Tek bir bütün halinde imal edilemeyecek kadar uzun olan kazıkların, şantiye-

de birden fazla parça (segment) halinde birleştirilerek zemine çakılmasıyla elde edilir. Parçalı kazıklar, önceden imal edilmiş kazık elemanlarının sahada birleştirilerek istenilen derinliğe kadar çakılması esasına dayanan bir kazık türüdür. Kazık parçaları, özel ekleme (splice/splays) detayları veya çelik kazıklarda olduğu gibi kaynak yöntemleri kullanılarak birbirine bağlanır ve çakma işlemine bu birleşim noktalarından sonra devam edilir. Bu yöntem, kazığın nihai boyunun sahada belirlenmesine olanak tanıdığı için önemli bir esneklik sağlar; zemine çakma sırasında istenilen taşıma gücüne ulaşıldığı anda işlem durdurulabilir. Parçalı kazıkların başlıca avantajları arasında çok büyük derinliklere inebilme imkânı, nakliye ve stoklama kolaylığı ile boy ayarlama esnekliği bulunur. Bununla birlikte, ek yerlerinin imalat kalitesi kritik bir unsur olup, birleşim işlemlerinin zaman alması toplam yapım hızını azaltabilir.

3.3.3. Delme kazıklar

Delme kazıklar, ülkemizde yaygın olarak kullanılan ismiyle fore kazıklar, zemin içerisine özel bir makine ile delik (kuyu) açılarak, bu deliğin içine donatı (çelik kafes) yerleştirilmesi ve ardından beton dökülmesi suretiyle yerinde imal edilen kazıklardır.

Delme (fore) kazıklar, kazığın tamamının inşaat sahasında oluşturulduğu ve zeminde yer değiştirme etkisi oluşturmayan (non-displacement) veya çok sınırlı yer değiştirme yapan bir kazık türüdür. Uygulama sırasında istenilen çap ve derinlikte bir kuyu açılır; zemin delme işlemiyle dışarı çıkarılır. Kuyu stabilitesini sağlamak amacıyla zemin koşullarına bağlı olarak geçici muhafaza borusu (kılıf) kullanılır veya bentonit bulaamacı ile kuyu duvarları desteklenir. Ardından önceden hazırlanmış çelik donatı kafesi kuyuya yerleştirilir ve beton, tremi borusu aracılığıyla kuyunun tabanından başlayarak yukarı doğru dökülerek kazık imal edilir. Titreşim ve gürültünün minimum düzeyde olması nedeniyle yoğun şehir içi alanlarda, komşu yapılara yakın bölgelerde ve titreşimin istenmediği uygulamalarda tercih edilir; ayrıca çok sert ve kayalık zeminlerde etkili bir çözüm sunar. Delme kazıkların başlıca avantajları arasında geniş zemin türlerine uygulanabilirlik, farklı çap ve derinliklerde üretim imkânı ve sert tabakaların kolaylıkla delinebilmesi yer alır. Ancak imalat kalitesi büyük ölçüde zemin suyu kontrolüne ve beton döküm sürecinin doğruluğuna bağlı olduğundan risk içerebilir; ayrıca çakma kazıklara kıyasla daha yavaş imal edilir ve genellikle daha yüksek maliyetlidir.

3.4. Yapıldıkları malzemeye göre çakma kazıklar

Kazıklar kullanılan malzemeye göre; çelik çakma kazığı, ahşap çakma kazığı ve betonarme çakma kazığı olarak sınıflandırılırlar.

3.4.1. Çelik çakma kazık

Çelik kazıklarda boy açısından bir sınırlama bulunmadığından, büyük derinliklere kadar çakılmaları mümkündür ve bu özellikleri onları derin temeller için oldukça elverişli kılar. Görece küçük kesit alanlarına sahip olmalarına rağmen yüksek dayanımları sayesinde sert zemin tabakalarına nüfuz etmeleri daha kolaydır. Ayrıca çelik malzeme, istenilen boylarda rahatlıkla kesilebilir veya kaynakla birleştirilerek daha uzun kazık elemanları elde edilebilir.

Çelik çakma kazıklar, genellikle H-kesitli profiller (H-kazıklar) ile dairesel veya kutu kesitli boru kazıklar şeklinde imal edilen ve çelik malzemenin yüksek dayanım özelliklerinden yararlanan kazık türleridir (Şekil 5). Birim kesit alanına düşen taşıma kapasitelerinin oldukça yüksek olması, bu kazıkları ağır yüklü yapılar için uygun hâle getirir (Yu et al., 2019). Sert ve yoğun zemin tabakalarında diğer malzemelere göre daha az hasarla ilerleyebilme özellikleri sayesinde zorlayıcı zemin koşullarında etkin bir şekilde çakılabilir; uçlarına sert kaya tabakalarını kırmak için özel pabuçlar da monte edilebilir. Ayrıca segmental (parçalı) uygulanabilmeleri sayesinde elemanlar sahada kolayca kaynaklanarak istenilen derinliklere ulaşılabilir. Korozyon açısından su seviyesinin altında ve nötr zemin koşullarında uzun ömürlü performans gösteren çelik kazıklar, agresif kimyasal ortamlarda veya su-hava seviyesi değişim bölgelerinde kaplama ya da katodik koruma gibi yöntemlerle korunmayı gerektirebilir (Uotinen & Rantala, 2013) Çelik kazıklar, küçük bir kesit alanına rağmen yüksek dayanım sunmaları, farklı geometrik kesitlerde üretilebilmeleri, kolay taşınmaları, birleştirilerek istenilen boylara kadar uzatılabilmeleri ve çakma işlemlerinin pratik olması gibi özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir; ayrıca 45°'ye varan açılarla uygulanabilmeleri önemli bir tasarım esnekliği sağlar. Ancak bu kazıkların dezavantajları da bulunmaktadır. Diğer kazık türlerine kıyasla daha yüksek maliyetli olmaları, korozyona maruz kalma riskinin bulunması ve özellikle H-profil çelik kazıklarda çakma sırasında eğilme veya burkulma olasılığının oluşması başlıca olumsuzluklar arasında yer alır.

Bununla birlikte, çelik kazıklar düşük pH değerine sahip ortamlara yerleştirildiğinde korozyon riski taşımaktadır. Yüksek maliyetleri nedeniyle diğer ön imalatlı kazık türlerine kıyasla kullanım oranları daha düşüktür. Türkiye'de çelik kazık kullanımına örnek olarak, İstanbul'daki Galata Köprüsü'nde uzunluğu 30 metreye ulaşan çelik çakma kazıkların tercih edilmesi gösterilebilir.



Şekil 5. Çelik kazık

Çelik kazıkları korozyona karşı korumak amacıyla uygulanan başlıca yöntemler şunlardır:

- Kazığın et kalınlığının artırılması,
- Kazık yüzeyinin beton ile kaplanması,
- Katodik korunma boyalarının uygulanması,
- Korozyona neden olabilecek zemin bileşenlerinin ortamdaki uzaklaştırılması,
- Çeliğe antikoroziv katkı maddeleri eklenmesi,
- Boya veya kaynamış katran ile yüzey kaplaması yapılması.

3.4.2. Ahşap çakma kazıklar

Ahşap çakma kazıklar, özellikle geçmişte yaygın olarak kullanılan ve genellikle çam, köknar gibi düz gövdeli ağaçların soyulup uçlarının sivriltilmesiyle hazırlanan kazık türleridir (Şekil 6). Diğer kazık türlerine kıyasla daha ekonomik olmaları önemli bir avantaj olsa da, yüksek dayanım gerektiren mühendislik uygulamaları için uygun değildir. Ahşabın uzun süre dayanıklı kalabilmesi için kazıkların sürekli olarak yeraltı su seviyesinin altında bulunması kritik öneme sahiptir; su seviyesinin üzerinde kalan ya da su seviyesinin sürekli değiştiği bölgelerde ahşap hızla çürür (Humar et al., 2021). Taşıma kapasiteleri çelik ve betonarme kazıklara göre daha düşük olup, çakma sırasında baş kısmının ezilmesini önlemek amacıyla çelik bilezikler kullanılır. Uzunlukları doğal ağaç boyutuyla sınırlı olduğundan, ekleme işlemleri hem zor hem de yapısal açıdan riskli olabilir. Bu nedenle ahşap kazıklar, düşük yük gerektiren yapılar ve yeraltı su seviyesinin daimi olarak yüksek olduğu sulak alanlarda tercih edilir.



Şekil 6. Ahşap kazık

Ahşap kazıkların doğal bir malzeme olmaları nedeniyle izin verilebilir tasarım gerilmelerinin kesin olarak belirlenmesi zordur; bu nedenle tasarım sürecinde çok sayıda faktör birlikte değerlendirilmelidir. Kullanılan ağacın türü, ahşabın kalitesi ve su içeriği, çakma sırasında meydana gelebilecek hasarın boyutu, uygulanan ıslah yöntemlerinin türü (ki çoğu zaman dayanımı azaltıcı etkileri vardır) ve bir kazık grubunda bulunan kazık sayısı gibi unsurlar tasarım kriterlerini doğrudan etkiler. Özellikle kazık grubundaki herhangi bir zayıf kazığın yük paylaşımındaki olumsuz etkisi göz önünde bulundurularak, güvenli tasarım için bu faktörlerin tümü dikkatle değerlendirilmelidir. Kullanılan ahşap malzemenin sağlıklı, çürümemiş ve böceklenmeye karşı korunmuş olması kritik öneme sahiptir. Bu kazıkların genellikle uygulanabildiği en büyük çakma derinliği yaklaşık 30–35 m'dir. Yaklaşık 4 m uzunluğundaki bir ahşap kazık için uygun çap 22–25 cm olarak kabul edilmekte, kazık boyu her 1 m arttığında çapın yaklaşık 1.5–2 cm kadar büyütülmesi önerilmektedir. Ahşap kazıklar darbelere karşı hassas olduklarından, çakma yönünün doğru seçilmesi ve kazığın çok sert tabakalara zorla sürülmemesi gerekmektedir. Bu kazıkların taşıyabileceği maksimum düşey yük yaklaşık 30 ton civarındadır. Çakma sırasında kazığın parçalanmasını önlemek amacıyla baş kısmına çelik başlık, uç kısmına ise çelik çarık yerleştirilir. Ahşap kazıklar, çeliğe kıyasla daha düşük maliyetli olmaları, kolay kesilip taşınabilmeleri, pratik bir şekilde çakılabilmeleri ve sürekli su altında kaldıklarında oldukça uzun bir hizmet ömrü sunmaları gibi önemli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, çok sert zemin tabakalarına çakılmalarının güç olması, taşıma kapasitelerinin sınırlı bulunması, üretilebilecek kazık boylarının doğal malzeme özellikleri nedeniyle belirli sınırlarla kısıtlı olması ve tekrarlayan ıslanma–kuruma döngülerine maruz kaldıklarında hızla çürüme riskinin ortaya çıkması ise başlıca dezavantajlarıdır.

3.4.3. Betonarme çakma kazıklar

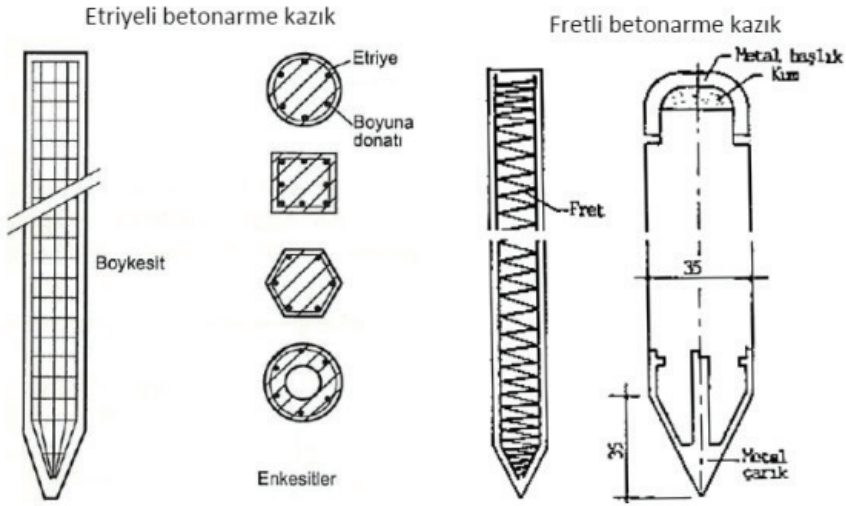
Betonarme çakma kazıklar, şantiyeden bağımsız olarak fabrikada kontrollü koşullarda dökülen ve kürlenmiş, ön gerilmeli ya da normal do-

natılı betonarme elemanlardan oluşur (Şekil 7). Çelik kazıklara yakın taşıma kapasitesine sahip olmaları ve deniz suyu gibi agresif kimyasalların bulunmadığı ortamlarda betonun donatıyı korozyona karşı koruması sayesinde yüksek kalıcılık sunmaları en önemli özelliklerindedir. Fabrika ortamında üretilmeleri, imalat kalitesinin yüksek ve homojen olmasını sağlar; ancak çakma sırasında oluşan darbe gerilmeleri nedeniyle çatlama veya kırılma riski bulunur. Bu riski azaltmak için özel çakma yastıkları kullanılır ve betonun yeterli dayanımı kazandıktan sonra uygulamaya geçilir. Ahşap kazıklara kıyasla daha derinlere çakılabilen betonarme kazıklar, gerektiğinde ekleme (splice/splays) detaylarıyla parçalı formda da kullanılabilir. Ağır yük taşıması gereken köprüler, büyük endüstriyel yapılar ve uygun kimyasal koruma sağlandığında deniz yapıları gibi yüksek dayanım ve kalıcılık gerektiren projelerde yaygın olarak tercih edilir.



Şekil 7. Betonarme kazık

Prefabrik betonarme kazıklar genellikle 400 kg/m^3 dozajlı beton kullanılarak ve çelik donatı ile güçlendirilerek üretilir; bu kazıklar sahada şahmerdan ile zemine çakılır. Kesit biçimleri dolu veya boş olmak üzere dikdörtgen, düzgün çokgen ya da dairesel formda imal edilebilir. Boyu 10 metreden uzun olan prefabrik kazıklarda, boyuna donatı kesit alanının, kazığın toplam kesit alanının en az %0.8'i kadar olması gerekmektedir (Şekil 8). Etriye ve fret aralıkları 12 cm'den büyük olmamalı; ayrıca kazığın baş ve uç bölgelerinde bulunan 1'er metrelik bölümlerde bu aralıklar 5 cm'ye kadar sıklaştırılmalıdır. Donatıların yer altı suyu ve zemindeki kimyasal etkilerden korunabilmesi için en az 4 cm pas payı bırakılması şarttır.

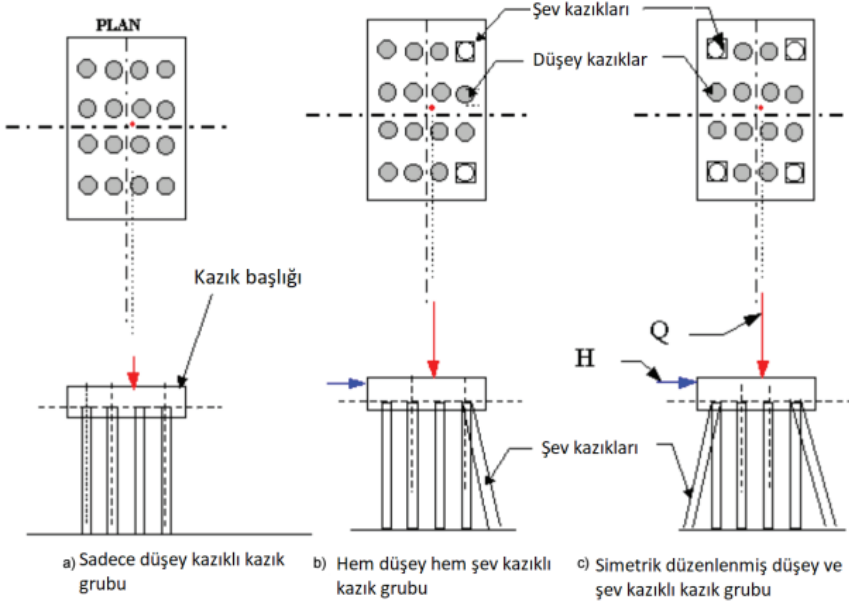


Şekil 8. Etriyeli ve fretli betonarme kazık boy kesitleri

Prefabrik betonarme kazıklar, ihtiyaç duyulan uzunluk ve dayanımda üretilebilmeleri, kullanılan malzeme türüne bağlı olarak dayanımın istenilen şekilde ayarlanabilmesi, deniz suyuna karşı yüksek direnç göstermeleri, üst yapı elemanlarına kolaylıkla bağlanabilmeleri ve 45°'ye kadar eğimli olarak çakılabilmeleri gibi önemli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, bu kazıkların taşınması ve yerleştirilmesi sırasında bütünlüğün korunmasının zor olması, kazık boyunda değişiklik gerektiğinde yeniden imalat yapılma zorunluluğu, çakma ekipmanlarının ağır yapısı nedeniyle uygulama sırasında yüksek titreşim oluşması, yakın çevredeki yapıların zemin kabarması nedeniyle hasar görme riski ve maksimum yaklaşık 60 cm çapın üzerinde büyük kesitli üretim yapılamaması gibi dezavantajlar da bulunmaktadır.

3.5. Kazıklı temelerde kazık düzeni

Genel olarak kazıklı temeller, bir kazık başlığı ile bunu taşıyan bir kazık grubundan oluşur. Kazık başlığı, üst yapıdan gelen yükleri her bir kazığa aktararak yükün güvenli biçimde zemine iletilmesini sağlar. Kazıklar, belirli aralıklarla kazık başlığına bağlanır ve bu bağlanma düzeni sayesinde yük paylaşımı gerçekleşir. Yapının özelliklerine ve yükün eksantrisitesine bağlı olarak kazıklar farklı geometrik dizilimlerde yerleştirilebilir. Şekil 9'da kazık gruplarına ait üç temel yerleşim düzeni sunulmaktadır.



Şekil 9. Farklı kazık türlerinin dizilimi

3.6. Kazık temelerde yük aktarımı

Derin temeller, uygulanan aksel yükleri, kenar sürtünme ve uç temas şeklinde iki mekanizma yoluyla zemine aktarır. Kenar sürtünme direnci (çevre sürtünme direnci) temelin kenarı boyunca kayma sürtünmesinin ve temel ile zemin arasındaki adezyonun bir sonucudur. Aksine uç temas direnci (nokta temas direnci, sivri uç temas direnci veya uç temas direnci olarak da bilinir) temel tabanı ve zemin arasındaki basınç yüklemesinin sonucudur ve yüzeysel temellerdeki yük aktarımına benzer.

3.7. Kazık temellerin taşıma gücü

Kazıkların taşıma kapasitesini kazık–zemin etkileşimi açısından belirleyen temel unsurlar, bir yandan kazığı çevreleyen zeminin dayanımını oluşturan mekanik özellikler, diğer yandan ise kazık malzemesinin kendi dayanım karakteristikleridir. Bu iki bileşen ayrı ayrı incelenerek, her birinin uygulanan yük altında güvenli davranış sergilediği bilinmektedir. Kazık temellerin nihai taşıma kapasitesinin hesaplanması için deneysel çalışmalardan elde edilen birçok yöntem ve ampirik denklem mevcuttur ve bunların çoğu sığ temel denklemlerine dayanmaktadır ((Coyle, H.M., and Castello, R.R., 1981; J.Hansen, 1970; Janbu, 1976; Meyerhof, 1963; Terzaghi, K, Peck, R.B., 1948; Vesic, 1977). Tasarım sürecinde ilk olarak, kazık malzemesinin dayanımına bağlı olan kesit kapasitesinin, aktarıla-

çak yük tarafından aşılması dikkate alınır. Kazık temelin taşıma gücü ise çoğunlukla teorik ya da ampirik bağıntılar aracılığıyla hesaplanır. Bu bağıntılar, kazık–zemin sisteminin statik dengesine dayanan ifadelerden veya çakma kazıklarda çakma sırasında harcanan enerji ve yapılan işin esas alındığı formüllerden oluşur. Ayrıca, kazıkların nihai taşıma kapasitesi sahada gerçekleştirilen yükleme deneyleriyle de doğrudan belirlenebilir.

3.7.1. Statik kazık formülleri

Bir kazığın çevresindeki zemin koşulları dikkate alındığında, toplam taşıma kapasitesi temel olarak iki ana durumdan meydana gelir: kazık ucunda gelişen uç direnci (Q_p) ve kazık çevresindeki yüzey boyunca mobilize olan çevresel sürtünme direnci (Q_s) Eşitlik 1’de verilen Q_u : Toplam taşıma gücü, Q_p : Uç direnci, Q_s : Çevre sürtünme direncidir.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1)$$

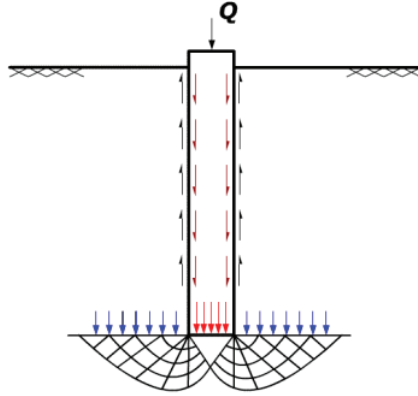
3.7.2. Uç kazıklarında dayanımın hesaplanması

Uç kazıkları, genellikle yüksek dayanımlı ve taşıyıcı niteliği belirgin olan bir zemin tabakasına oturtulur. Bu tür zeminlerin taşıma kapasitesi çoğu zaman kazık malzemesinin basınç dayanımından daha büyük olduğundan, kazığın toplam taşıma kapasitesi esasen kazığın kesit dayanımı ile sınırlı hâle gelir. Bu nedenle, bu tip kazıkların hesaplamalarında çoğunlukla yalnızca uç direnci (Q_p) dikkate alınır. Kazık ucundaki göçme mekanizması, yüzeysel temellerin tabanında meydana gelen göçme davranışıyla büyük ölçüde benzerlik gösterdiğinden, kazık uç mukavemetinin hesabında yüzeysel temellere yönelik taşıma gücü bağıntıları kullanılmaktadır. Eşitlik 2’de verilen denklemde, Q_p : Kazık uç direnci, q_p : kazık ucunda birim alan uç direnci (kN/m^2), A_p : Kazık uç kesit alanı, Eşitlik 3’te verilen denklemde, B : Taban genişliği, dairesel kazıklarda $B=D$ (m), L : kazık boyu, N_c, N_q, N_γ : Taşıma gücü faktörleri, c : kohezyon, γ : zeminin birim hacim ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 4’te ise kazık ucunda birim alan uç direncinin hesaplanmasının son hali verilmiştir. Kazık derinliği çapına göre çok büyük olduğu için N_γ teriminin N_q terimine göre oldukça küçük olduğu düşünülür ve ihmal edilebilir. Buna göre uç mukavemeti için:

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (2)$$

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (3)$$

$$q_p: c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q \text{ formülü kullanılmaktadır. (formülün en son hali)} \quad (4)$$



Şekil 10. Kazıkta uç mukavemeti ve çevresel sürtünme mukavemetini tanımlayan mekanizma

Eğer sistemde n adet kazık bulunuyorsa, kazık grubunun toplam taşıma kapasitesi (Q_g) (Eşitlik 5);

$$Q_g = n \times Q_p \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

3.7.3. Kazık çevre sürtünmesinin hesaplanması

Kazığın shaft sürtünme direnci, kazığın çevresel yüzey alanı ile zemin-kazık arayüzündeki birim sürtünme direncinin çarpımına bağlı olup, aşağıdaki Eşitlik 6'da verilen bağıntı kullanılarak hesaplanır. Burada, Q_s (kN): çevre sürtünmesi ile taşınan toplam yük, A_s (m^2): Kazık çevresinde sürtünme ile çalışan toplam alan, q_s (kN/m^2): çevre yüzeyde birim alanında etkili olan sürtünme, p (m): Kazık shaftının kesit çevre uzunluğu (dairese kazıklarda $p=\pi.D$), L (m): kazık boyu'dur.

$$Q_s = q_s \cdot A_s = p \cdot L \cdot q_s \quad (6)$$

3.7.3.a. Kohezyonlu zeminlerde kazık taşıma gücü

Kohezyonlu zeminlerde kazık taşıma gücü Eşitlik 7'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu kısımda Eşitlik 7'de verilen denklemde; Q_u : Kazığın nihai taşıma gücü, Q_p : Kazık uç direnci, Q_s : kazık sürtünme direncidir. Eşitlik 8 ve 9'da ise uç direnci hesaplanmasında kullanılan parametrelerin formülasyonları sunulmuştur.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (7)$$

$$Q_p = (q_p \cdot A_p) \quad Q_s = q_s \cdot A_s \quad (8)$$

$$q_p: c.N_c + \gamma.L.N_q \quad (9)$$

q_s : Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli dayanım hesaplarında, kazık shaftı ile zemin arasındaki aderans etkisi drenajsız kayma mukavemeti c_u 'ya bağlı olarak Eşitlik 10'daki denklemle ifade edilir. Buna göre;

$$q_s: c.A \quad (10)$$

Doygun kil zeminlerde kısa süreli davranışın değerlendirilmesi gerektiğinde, hesaplamalarda drenajsız kayma mukavemeti parametrelerinin kullanılması en uygun yaklaşımdır. Bu durumda;

$\phi = 0$ ve $c: c_u$ olur. $\phi: 0$ için; $N_c: 9.0$ (Derin temeller için) $\phi: 0$ için N_q terimi de ihmal edilebilir. Buna göre kohezyonlu zeminlerde drenajsız şartlardaki kazık uç mukavemeti q_p ve serbest basınç mukavemetine bağlı q_p değeri (Eşitlik 11)'deki gibi hesaplanır;

$$q_p: 9 \cdot c_u \quad (11)$$

3.7.3.b. Kohezyonsuz zeminlerde kazık taşıma gücü

Kohezyonsuz zeminlerde kazık taşıma gücü Eşitlik 12'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu kısımda; Q_u : Kazığın nihai taşıma gücü, Q_p : Kazık uç direnci, Q_s : kazık sürtünme direncidir. Eşitlik 13 ve 14'te ise uç direnci hesaplanmasında kullanılan parametrelerin formülasyonları sunulmuştur. Nihai olarak kohezyonsuz zeminlerde toplam kazık taşıma gücü Eşitlik 15 ve 16'da verilen şekilde hesaplanır.

$$Q_u: Q_p + Q_s \quad (12)$$

$$Q_p: (q_p \cdot A_p) \quad Q_s: q_s \cdot A_s \quad (13)$$

$$q_p: \gamma.L.N_q; \quad q_s: K_s \cdot \sigma' \cdot \tan \delta \quad (14)$$

Nihai olarak kohezyonsuz zeminlerde toplam kazık taşıma gücü;

$$Q_u: A_p \cdot (\gamma.L.N_q) + A_s \cdot (K_s \cdot \sigma' \cdot \tan \delta) \quad (15)$$

$$A_p: \text{Kazık uç kesit alanıdır. } A_s \text{ (kazık çevre alanı): } \pi.D.L \quad (16)$$

3.8. Standart penetrasyon deneyi ile kazık taşıma gücünün hesaplanması

SPT sonuçlarına dayalı yöntemler, özellikle kumlu ve siltli zeminlerde sıkça tercih edilir. Bu yöntemde kullanılan hesaplama Eşitlik 17'de verilmiştir (Genç, 2020).

$$Q_F = m.N.A_b + n.\bar{N}.D.A_s \quad (17)$$

QF : Kazık taşıma gücü

m: Deneysel katsayı (kPa), çakma kazıklar için 400, fore kazıklar için 120

N: kazık uç seviyesindeki SPT darbe sayısını

A_p : kazığın uç kesit alanı

n: Deneysel katsayı, çakma kazıklar için 2, fore kazıklar için 1,

\bar{N} : Kazık boyunca ortalama SPT sayısı

D: Kazık çapı

A_s : Kazık çevre alanı

Tablo 1. Kazık-zemin cinsine göre çevre sürtünmesi ve uç direnci sınır değerleri
(Canadian Geotechnical Society, 1985)

Kazık-Zemin cinsi	Çevre Sürtünmesi f_s (kPa)	Uç Direnci q_b (kPa)
Çakma kazıklar-kum	$2\bar{N}$	$40(L/N)N \leq 400N$
Çakma kazıklar-silt	$2\bar{N}$	$30(L/N)N \leq 300N$
Fore kazıklar-kum	\bar{N}	$13(L/N)N \leq 130N$
Fore kazıklar-silt	\bar{N}	$10(L/N)N \leq 100N$

KAYNAKLAR

- Chen, H., Gao, X., & Wang, Q. (2023). Research progress and prospect of frozen soil engineering disasters. *Cold Regions Science and Technology*, 212, 103901. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103901>
- Coduto, D. I. P. (1999). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*. Prentice hall., (PRENTICE H).
- Coyle, H.M., and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107(ASCE 16379).
- Canadian Geotechnical Society (1985). Canadian Foundation Engineering Manual, 2nd Edition, Vancouver, Canada.
- Das, B. M. (2010). *Geotechnical engineering handbook*. J. Ross Publishing.
- Genç, Z.S. (2020). Spt ve cpt verilerine göre kazık taşıma gücü hesabı (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Humar, M., Balzano, A., Kržišnik, D., & Lesar, B. (2021). Assessment of wooden foundation piles after 125 years of service. *Forests*, 12(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/f12020143>
- Iskander, M. G. (2002). Recent Developments in FRP Composite Piling Practice Recent Developments in FRP Composite Piling Practice. *TRB 2002 Session on Composite Piles*, 718.
- J.Hansen. (1970). *A revised and extended formula for bearing capacity*.
- Janbu, N. (1976). Static bearing capacity of friction piles. *In Sechste Europaeische Konferenz Fuer Bodenmechanik Und Grundbau*.
- Kaladi, F., Wang, F., & Zahra Kherazi, F. (2023). Structural Stability: A Comprehensive Review of Pile Foundations in Construction. *Journal of Asian Development Studies*, 12(4), 412–425. <https://doi.org/10.62345/jads.2023.12.4.31>
- Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16–26.
- Terzaghi, K, Peck, R.B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (John Wiley).
- Tomlinson, Michael; Woodward, J. (2008). *Pile design and construction practise* (fifth).
- Uotinen, V. M., & Rantala, J. (2013). Applications and development of modern steel pile technology. *Procedia Engineering*, 57, 1173–1182. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.148>
- Vesic, A. S. (1977). *Design of pile foundations*. NCHRP synthesis of highway practice.
- Yu, E., Ren, S., Tang, H., Li, Y., & Fang, C. (2019). Improvement on Structural Forms of Pile Group Foundations of Deepwater Bridges. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7381852>
- Zheng, S., Shi, X., Jia, H., Zhao, C., Qu, H., & Shi, X. (2020). Seismic response analysis of long-span and asymmetrical suspension bridges subjected

to near-fault ground motion. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104615.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104615>

//

Bölüm 7

**FARKLI UÇUCU KÜL İKAMELİ BETONARME
KOLONLARIN KLOR KAYNAKLI
KOROZYONA BAĞLI SERVİS ÖMÜRLERİNİN
LİFE 365 MODELİ İLE FARKLI BÖLGELERDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Seda AKDUMAN¹

¹ Dr.Öğretim Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye, sedaduyar@beun.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-8017-1891>

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar, malzemeye erişim rahatlığı, taşıyıcı sistemlere istenilen formun verilebilmesi, ekonomik olmaları ve farklı çevresel koşullara uyarlanabilmeleri nedeniyle dünya genelinde en çok tercih edilen yapı türleri arasında yer almaktadır (URL 1). Ancak betonarme yapıların uzun yıllar içindeki performansı sadece tasarım dayanım değerleri ile değil, aynı zamanda maruz kaldıkları çevresel etkilere karşı zaman içerisinde gösterdikleri dayanıklılık ile doğrudan ilişkilidir. Yapıların beklenen işlevlerini servis ömrü boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite denilmektedir (Baradan et al., 2010). Özellikle klor iyonlarının neden olduğu donatı korozyonu, betonarme yapılarda durabilite problemine yol açan en büyük bozulma mekanizmalarından biridir (Bertolini et al., 2004). Kıyı şeritlerinde yer alan yapılar, deniz suyuna doğrudan maruz kalan taşıyıcı elemanlar, liman ve iskele yapıları ile gelgit bölgelerinde bulunan betonarme yapılarda klor kaynaklı korozyon riski daha belirgindir. Klor iyonlarının beton içerisine nüfuz ederek donatı yüzeyine ulaşması, çeliğin pasif tabakasının bozulmasına ve korozyon sürecinin başlamasına neden olmaktadır. Bu süreç zarfında donatı enkesiti azalır ve donatı çevresinde de pas tabakası oluşur. Pas tabakası beton hacminde artışa sebep olur, kabuk betonda çekme gerilmeleri oluşur ve kabuk beton dökülür. Çevresel etkilere açık hale gelen donatı korozyon hızında artış meydana gelir. Tüm bu süreçlerin sonucunda da beton donatı aderansı azalır ve nihayetinde de betonarme yapının taşıma gücü performansı düşer (Vu&Stewart, 2000, Akduman&Öztürk, 2024). Donatı korozyonundan korunmak için, betonarme yapılar çevresel etkilere uygun tasarlanmalı ve uygun malzemeler seçilmelidir. Son yıllarda betonun durabilite özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral katkıların kullanımı yaygınlaşmıştır. Çevresel bir atık olan uçucu küle olan ilgi de bu bağlamda artmış ve uçucu kül kullanılarak üretilen betonun dayanım ile durabilitesini ortaya çıkaracak çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Sarker et al., 2014).

Termik santrallerde kömürün yüksek sıcaklıkta yanması sonucu ortaya çıkan ergimiş malzeme soğuyarak, 0,5 ile 150 mikron ebatlarında küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu tanecikler incelikleri sebebiyle baca gazları ile sürüklendiği için uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Termik santrallerde

üretilen uçucu kül miktarı dünyada yılda ortalama 600 milyon ton iken Türkiye’de ise 13 milyon kadardır. Uçucu küller çevreyi olumsuz yönde etkileyeceği için havaya karışmaları engellenmektedir. Bu amaçla kullanılan yöntem ise külleri, elektrostatik ve mekanik yöntemlerle baca etrafında toplayarak biriktirmektir.

Uçucu kül ile ilgili ilk araştırma 1950 yılında Davis tarafından ABD’de yapılmıştır (Arezoumandi&Volz, 2013). İngiltere’de yapılan Thames Barajı ile ABD’de yapılan Stillwater Barajlarının beton kütlelerinde %30 ile %75 oranlarında uçucu kül, hidratasyon ısısını azaltmak amacıyla çimento ile yer değiştirmiştir (ACI 232.2R, 2003). Sonradan yapılan araştırmalarla da uçucu külün yüksek durabilite ve düşük permeabilite gibi olumlu özelliklerinin olduğu ortaya koyulmuştur (Dunstan, 1976, 1980, 1984). Uçucu küllerin taşıyıcı betonarme elemanlarda kullanımı da zamanla araştırılmaya başlanmıştır. Taşıyıcı betonda uçucu kül kullanımında çimento ile yer değiştiren kül miktarı %15-25 olarak belirlenmiştir (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994). Yüksek mukavemetli uçucu küllü betonda ise %50 oranında kül ile çimento yer değiştirmektedir. Süreç zarfında yapılan araştırmalar, yüksek mukavemetli uçucu küllü betonların, düşük kuruma rötresi, sünme ve su geçirgenliğine ve diğer betonlara göre yüksek elastisite modülüne sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır (Malhotra, 1986, Gopalan, 1993). Carlos Andres Ortega Ordonez (2012) doktora çalışmasında uçucu külün kesme dayanımı ve göçme davranışına etkisini araştırmıştır. Ortega, %70 oranında uçucu kül ile çimento içeriğini değiştirerek, 304,8×457,2×4267,2 mm boyutlarında 36 adet kiriş üreterek, üç noktalı eğilme deneyi yaparak kesme kuvvetini araştırmıştır. Deneyler sonucunda, kesme kuvveti-sehim değerlerini, kesme kuvvetine göre oluşan çatlak mekanizmasını ve göçme şeklini incelemiştir. Sonuç olarak yazar geleneksel beton ile uçucu küllü betonun kesme kuvvetinin birbirine çok yakın çıktığını belirtmiştir. Arezoumandi (2013) yapmış olduğu doktora tezinde yüksek performanslı betonların eğilme ve kesme davranışlarını incelemiştir. Yüksek performans özelliğini kazandırmak için betona yüksek hacimde uçucu kül dahil etmiştir. Karışımında % 70uçucu kül, farklı etriye oranları ve farklı boyuna donatı oranları kullanarak 300x460x4270 mm boyutlarında, 16 adet kiriş dört noktalı eğilme deneyi yapmıştır. Yazar

uçucu kül artışı ile aderansın arttığını belirtmiş, artışın sebebi olarak da uçucu külün boşlukları doldurmasını göstermiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, %70 oranında yüksek hacimli uçucu kül kullanılması geleneksel betona göre daha fazla kesme dayanımı ve çatlama enerjisine sahiptir. Çatlama enerjisinin artışının da yine aderans ile ilgili olduğunu dolaylı olarak da uçucu külle bağlantılı olduğunu ifade etmiştir.

Literatürdeki çalışmalar uçucu kül ikamesinin durabiliteyi arttırdığını, betonarme yapılarda aderans ve taşıma gücü üzerinde de olumlu etkilerin olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada da farklı uçucu kül oranlarının klor iyonlarına maruz betonarme bir kolondaki servis ömürleri hesaplanmıştır.

2. BETONARME YAPILARDA KLOR KAYNAKLI KOROZYON

Metalik malzemelerin buldukları çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girmesi sonucu, zamanla fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini kaybederek bozulmasına korozyon denir. Betonarme yapılarda korozyon, klorür iyonlarının betona nüfuz etmesi sonucu donatı yüzeyindeki pasif tabakanın bozulmasıyla başlar. Yukarıda da açıklandığı üzere bu süreç, donatı enkesit alanının azalmasına, aderans kaybına, çatlak oluşumuna ve sonucunda taşıyıcı sistemin dayanım ve rijitliğinin azalmasına neden olur.

Klor iyonları agrega, çimento ve katkı maddeleri ile içeriden veya deniz suyu ile dışarıdan betona nüfus ederler. Klor iyonlarına maruz kalan betonarme yapıların servis ömrünü Tutti (1982) ikiye ayırmıştır; korozyon başlama (t_i) ve yayılma zamanı (t_p). Betonarme bir yapının servis ömrü (t) ise bu iki sürecin toplamından oluşmaktadır. Diğer bir deyişle betonarme yapılardaki servis ömrü de yapının işlevini güvenli ve kabul edilebilir performans seviyesinde sürdürebildiği süredir. Korozyon, klor iyonlarının kritik değere ulaşması ile başlar ve pasif tabaka kırılır. Bu süreç korozyon başlama sürecidir (t_i). Korozyon başladıktan sonra geçen zaman ise korozyon yayılma zamanıdır (t_p). Bu süreçte korozyonun olumsuz etkileri daha da artarak devam eder. Literatürde korozyon başlama ve yayılma zamanını farklı yöntemlerle inceleyen bazı çalışmalar yapılmıştır (Tuutti, 1982; Muthena et al., 2000; Ahmad, 2003; Kwon et al., 2009; Smilauer et al., 2013; Hajkova et al., 2018; Thomas&Bentz, 2018; Borah et al., 2020; Akduman 2025). Korozyon başlangıç

zamanı tahmin modelleri Fick'in ikinci difüzyon yasasına dayanır (Crank, 1956). Literatürde korozyon başlama zamanını tahmin etmek için Kwon's Modeli, Bazant Modeli, Life-365 Modeli, ClinClonc Modeli, Duracrete Modeli gibi bazı modeller önerilmiştir (Tuutti, 1982; Muthena et al., 2000; Ahmad, 2003; Kwon et al., 2009; Smilauer et al., 2013; Hajkova et al., 2018; Thomas&Bentz, 2018; Borah et al., 2020). Söz konusu çalışmada başlangıç modellerinden Life 365 Uygulaması açıklanacak, bu uygulama ile farklı uçucu küllü betonarme kolonların korozyon başlangıç zamanları incelenecektir.

Klor iyonları dışarıdan geliyorsa beton yüzeyinde birikmekte; difüzyon veya kılcallık gibi mekanizmalar ile beton içerisine taşınmaktadır. Klor iyonları beton içerisine girdikten sonra difüzyon yoluyla donatıya doğru ilerler ve donatı yüzeyinde birikme eğilimi gösterirler. Donatı yüzeyinde oluşan klor konsantrasyonu (C_s), korozyonun tetiklendiği kritik klorür eşiği (C_{th}) seviyesine ulaştığında, çeliği koruyan pasif tabakası bozulur ve korozyon mekanizması aktif hâle gelir. Bu nedenle, korozyonun meydana gelip gelmediği, donatı yüzeyindeki klorür miktarının eşik değeri aşıp aşmadığına bağlı olarak değerlendirilir.

Fick'in ikinci difüzyon yasasına göre korozyon başlangıç zamanı tahmini aşağıdaki denklem 1 ile hesaplanır:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$C(x, t)$ t anında, x derinliğindeki klor konsantrasyonu, D ise difüzyon katsayısıdır. $C(x, t)$ klor konsantrasyonu,

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_m(t)f(w)t}} \right) \right\} \quad (2)$$

ile hesaplanabilmektedir (Kwon et al., 2009). C_s yüzeydeki klor miktarı (kg/m^3), x klor ölçülen yerin yüzeyden uzaklığı (mm), D_m hesap yapılan zamandaki difüzyon katsayısı (mm^2/s), erf hata fonksiyonu, $f(w)$ ise korozyon

kaynaklı betonda oluşan çatlakların ivmesidir. Beton yüzeyindeki başlangıç klor miktarı bu denklemde sıfır kabul edilir.

Life 365 modelinde korozyon başlangıç zamanı deterministik çözüm ile hesaplanır ve servis ömrü korozyonun başlama ve yayılma sürelerini kapsar (URL 2). Model, korozyon başlangıç ve yayılma sürelerini birlikte ele alarak betonarme yapıların uzun dönem performansını değerlendirmektedir. Modelde yayılma süresi sabit ve korumasız çelik için 6 yıldır. Uygulamada ABD ve Kanada için kayıtlı coğrafi bölgelere ait meteorolojik veriler ve klor konsantrasyonları bulunmaktadır Modelin amacı farklı çevresel koşullara göre korozyondan en uygun korunma yöntemini belirleyebilmek olduğundan, belirlenen bölgeler için kullanıcı kendi bölge özelliklerini tanımlayabilmektedir. Veya kullanıcı servis ömrü tahmini yapmak istediği bölgeye en yakın programdaki kayıtlı bölgeyi seçerek inceleme imkânı bulabilmektedir. Bu avantajlar modelin her yerde kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Life 365 modeli de yine Fick'in ikinci difüzyon yasasına dayanır ve

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (3)$$

denklem 3 ile t anındaki difüzyon katsayısı hesaplanır. Burada m bozulma oran indeksi veya yaş faktörü olarak isimlendirilen bir sabittir. D_{ref} referans zamanın genellikle 28 gün kabul edildiği difüzyon katsayısıdır. Betonun su/çimento oranı, sıcaklık, bağlayıcı cinsi ve miktarları difüzyon katsayısını etkilemektedir. Thomas ve Bentz referans zamandaki difüzyon katsayısının su/çimento (w/c) oranına bağlı olarak hesaplandığı bir formül geliştirmişlerdir (Thomas&Bentz, 2018). Referans difüzyon katsayısı geleneksel portland çimentosu kullanılan betonda,

$$D_{ref} = D_{28} = 10^{(-12,06+2,40w/c)} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanırken; betona silis dumanının ilave edildiği (SF) yeni difüzyon katsayısı,

$$D_{SF} = D_{OPC} e^{-0,165\%SF} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. D_{OPC} portland çimentosunun hesaplanan difüzyon katsayısıdır (Borah et al., 2020). Sıcaklık Life 365 modelinde belirleyici bir faktördür ve difüzyon hesabında sıcaklığa bağlı değişiklikleri hesaba katmak için,

$$D(T) = D_{ref} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

denklemini kullanılır. $D(T)$, t zamanındaki T sıcaklığına bağlı difüzyon katsayısı, D_{ref} t_{ref} (28 gün) zamanındaki difüzyon katsayısı, T_{ref} (=293 K) sıcaklık değeri, U difüzyon işleminin aktivasyon enerjisi (35000 j/mol), R gaz sabitini vermektedir. D_{ref} 28.gündeki difüzyon katsayıları da portland çimentosu için denklem 4 ile, katkı çimento için ise denklem 5 ile hesaplanmaktadır. m bozulma oran indeksidir ve tüm çimento tipleri için,

$$m = 0,2 + 0,4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem uçucu kül için maksimum %50 ve çürük için %70 ikame oranlarına kadar kullanılabilir. Modelde korozyon klor eşik değeri (C_{th}) beton ağırlığına göre %0,05 olarak alınmaktadır.

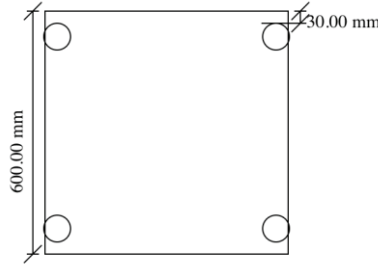
Deniz suyuna maruz kalan beton yüzeydeki klor konsantrasyonu denizin coğrafi konumuna ve deniz seviyesinden olan uzaklığa bağlıdır. Life 365 bu bölgeleri etkilerine göre; otoparklar, kırsal otoyol köprüleri, şehir otoyol köprüleri, deniz püskürtme bölgesi; deniz gelgit bölgesi ve okyanustan 1,5 km içeride olmak üzere altı bölgeye ayırmaktadır.

3. LIFE 365 SERVİS ÖMRÜ TAHMİN MODELLERİ

Bu bölümde Life 365 modeline göre seçilen özelliklerdeki betonarme kolonların korozyon başlangıç süreleri ve dolayısıyla servis ömürleri hesaplanacaktır. Life 365 Uygulaması online olarak herkesin kolaylıkla ulaşabildiği ve kullanabildiği servis ömrü hesaplama modelidir. Uygulamada servis ömrünü belirleyen birçok farklı parametre bulunmakla birlikte en

önemlileri yapının coğrafi konumu, sıcaklık, betonarme kesit özellikleri, pas payı kalınlığı, su/çimento oranı ve beton içeriğindeki katkılardır. Veri tabanında tanımlı coğrafi konum ve çevresel maruziyet koşulları seçildiğinde, program ilgili bölgeye ait sıcaklık ve coğrafi parametreleri esas alarak maksimum yüzey klorür konsantrasyonu ile karakteristik sıcaklık değerlerini otomatik olarak kullanmaktadır. Söz konusu veri tabanı, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki eyaletleri ile Kanada'yı kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Uygulamada bu konumlar haricindeki bölgeler için çalışma yapmak için uygun sıcaklık değerlerinin olduğu benzer eyaletlerin seçilebileceği önerilmektedir. Bu sebeple çalışmada Türkiye'de Akdeniz ve Karadeniz bölgesinde püskürtme deniz suyuna maruz kalan betonarme yapılar incelenmek istendiğinden bu bölgelerin mevsim koşullarına en uygun yerler seçilmiştir. Çalışmada asıl incelenmek istenen uçucu külün servis ömrü üzerindeki etkisi olduğundan literatürde yapılan çalışmalar da baz alınarak maksimum %50, orta %25 ve düşük %10 olmak üzere üç farklı oranda uçucu kül ikamesi ile elde edilen servis ömürleri hiç uçucu kül olmayan geleneksel portland çimentolu beton servis ömrü ile karşılaştırılmıştır.

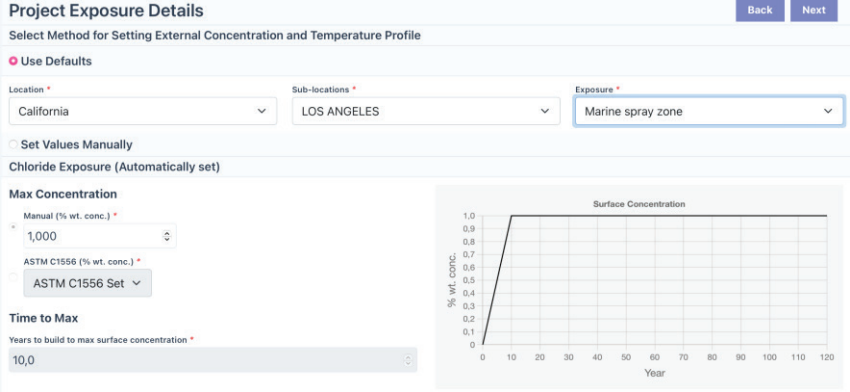
Betonarme kolon kesiti 600x600 mm, paspayı 30 mm, uzunluğu ise 3000 mm alınmıştır (Şekil 1). Su/çimento oranı 0,42, kolondaki donatı %1,2 olarak seçilmiştir. Yapının 2023 yılında yapıldığı varsayılmıştır.



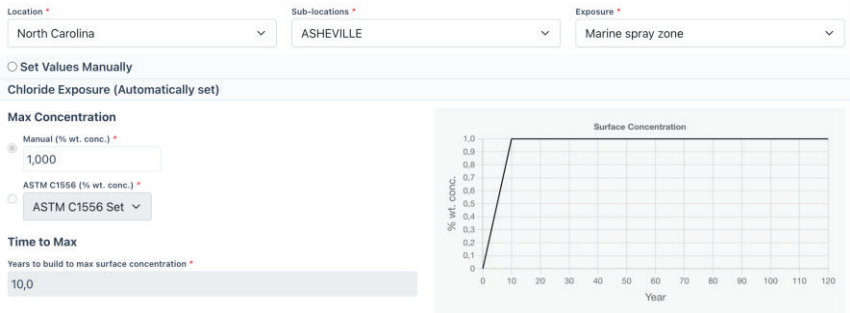
Şekil 1. Betonarme Kolon Kesiti

Uygulamada Akdeniz bölgesine benzer olarak California Los Angeles, Karadeniz bölgesine benzer olarak North Carolina Ashville; püskürtme etkisi için marine spray zone bölgesi seçilmiştir (Şekil 2-3). Bu bölgede maksimum yüzey klor konsantrasyonuna 10 yılda ulaşılacağı görülmektedir. Binanın

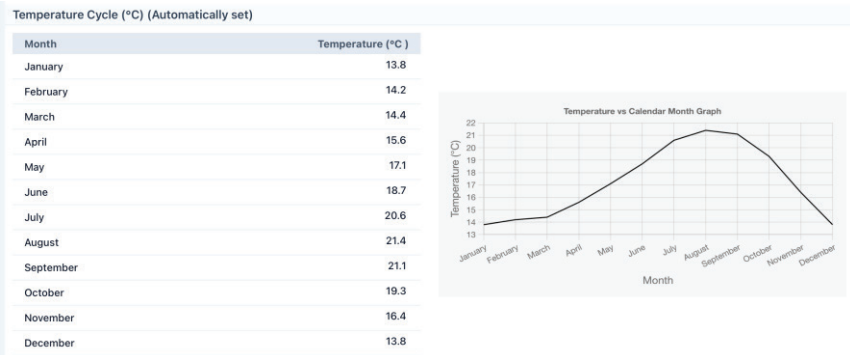
yapım yılı 2023 olarak seçildiğinden o yıla ait uygulamanın verdiği sıcaklıklar Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



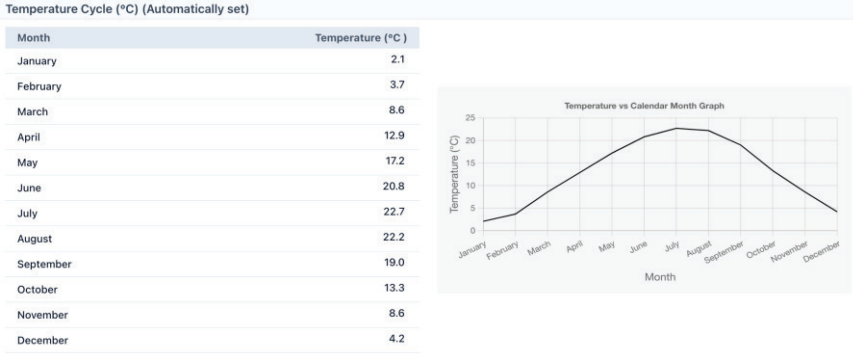
Şekil 2. Life 365 Uygulamasındaki California Los Angeles Eyalet Özellikleri.



Şekil 3. Life 365 Uygulamasındaki North Carolina Asheville Eyalet Özellikleri.



Şekil 4. Life 365 Uygulamasındaki California Los Angeles Eyalet Sıcaklık Değerleri



Şekil 5. Life 365 Uygulamasındaki North Carolina Ashville Eyalet Sıcaklık Değerleri

California ve North Carolina için yukarıda verilen özelliklerde toplam 8 adet uygulama yapılmış olup özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Uçucu Kül Oranları

Modeller	Uçucu Kül Oranları (%)	Bölge
Referans 1	0	California
Model 1	10	California
Model 2	25	California
Model 3	50	California
Referans 2	0	North Carolina
Model 4	10	North Carolina
Model 5	25	North Carolina
Model 6	50	North Carolina

California için bulunan elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Uygulamada korozyonu başlatacak klor eşik değeri ağırlıkça betonun %0,05’idir (C_{th}). Difüzyon katsayısının tüm modellerde aynı kaldığı görülmektedir. Çünkü difüzyon katsayısı belirleyen parametre su/çimento oranıdır. Bu oran tüm modellerde 0,42 olarak aynı kaldığından bu değer aynı kalması zaten beklenen bir durumdur. Difüzyon katsayısı tüm modellerde $8,87E-12$ m²/s olarak ortaya çıkmıştır. Bozulma oranı ise çimento içeriğine giren uçucu kül ile değiştiğinden, her modelde farklı çıkmıştır. Bozulma oranı uçucu külsüz modelde 0,20, %10 uçucu küllü modelde 0,28,

%25 uçucu küllü modelde 0,40, %50 uçucu küllü modelde 0,60 olarak hesaplanmıştır. Kül oran artışının bozulma oranını da arttırdığı görülmektedir. Korozyon başlangıç süresinin ise uçucu kül oran artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Şöyle ki; uçucu kül kullanılmayan modelde 2,58 yılda korozyon başlaması beklenirken, %10 uçucu küllü modelde bu süre 3 yıl, %25 uçucu küllü modelde 3,92 yıl, %50 uçucu küllü modelde ise 7,17 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durum uçucu kül miktarının durabiliteyi arttırdığı ve dolayısıyla korozyon başlama süresini de uzattığını açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Life 365 Uygulamasına Ait California Los Angeles Analiz Çıktıları

Modeller	Uçucu Kül Oranları (%)	Difüzyon Kats. (m ² /s)	Bozulma Oranı (m)	Korozyon başlangıç süresi (t _i)
Referans1	0	8,87E-12	0,20	2,58
Model 1	10	8,87E-12	0,28	3
Model 2	25	8,87E-12	0,40	3,92
Model 3	50	8,87E-12	0,60	7,17

North Carolina'da da benzer durumlar gözlemlenmiştir. Difüzyon katsayısı ve bozulma oranları California ile benzer çıkmıştır (Tablo 3). Korozyon başlangıç süresi de uçucu kül oranı ile artmıştır. Uçucu kül kullanılmayan modelde 2,58 yılda korozyon başlaması beklenirken, %10 uçucu küllü modelde bu süre 3,42 yıl, %25 uçucu küllü modelde 4,50 yıl, %50 uçucu küllü modelde ise 8,58 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu bölgede de uçucu kül oran artışı korozyon başlama süresini uzatmıştır.

Tablo 3. Life 365 Uygulamasına Ait North Carolina Ashville Analiz Çıktıları

Modeller	Uçucu Kül Oranları (%)	Difüzyon Kats. (m ² /s)	Bozulma Oranı (m)	Korozyon başlangıç süresi (t _i)
Referans2	0	8,87E-12	0,20	2,58
Model 4	10	8,87E-12	0,28	3,42
Model 5	25	8,87E-12	0,40	4,50
Model 6	50	8,87E-12	0,60	8,58

Bölgelere ait servis ömürleri Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Her iki bölgede de referans modele ait servis ömrünün değişmediği görülmektedir. Uçucu kül ikamesinin North Carolina'da daha fazla fark yarattığı açıkça görülmektedir. California'da %10 uçucu kül ikamesi ile başlama süresinde %16,3 artış olurken, North Carolina'da %32,6 artış gözlemlenmiştir. Diğer ikame oranları da değerlendirilecek olursa California'da %25 uçucu kül ikamesi ile başlama süresinde %51,9 artış olurken, North Carolina'da %74,4 artış; California'da %50 uçucu kül ikamesi ile başlama süresinde %177,9 artış olurken, North Carolina'da %232,6 artış ortaya çıkmıştır. Bu durum uçucu kül ikame artışının her iki bölgede de durabiliteyi arttırdığını, ama North Carolina'daki artışın California'ya göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Buradaki ana etkenin sıcaklık farkları olduğu açıktır. Daha soğuk olan bölgede uçucu kül oran artışı başlama süresini uzatmıştır. Servis ömürleri de değerlendirilecek olursa; uygulama yayılma sürelerini eşit ve 6 yıl olarak kabul etmektedir. Dolayısıyla servis ömrü başlama zamanına 6 yıl ilave edilmesiyle bulunmuştur. En düşük servis ömrü 8,58 yıl ile uçucu külsüz referans kolonda çıkarken, en uzun servis ömrü 14,58 yıl ile North Carolina'da %50 uçucu küllü kolonda çıkmıştır.

Tablo 4. Life 365 Uygulamasından Elde Edilen Servis Ömrü Karşılaştırmaları.

Modeller	Uçucu Kül Oranları (%)	Korozyon başlangıç süresi (t _i)	Korozyon yayılma süresi (t _p)	Servis ömrü
Referans1	0	2,58	6	8,58
Model 1	10	3	6	9
Model 2	25	3,92	6	9,92
Model 3	50	7,17	6	13,17
Referans2	0	2,58	6	8,58
Model 4	10	3,42	6	9,42
Model 5	25	4,50	6	10,50
Model 6	50	8,58	6	14,58

4. SONUÇLAR

California ve North Carolina’da aynı özelliklere sahip betonarme kolona farklı uçucu kül ikamesi yapılarak, uçucu kül oranının ve coğrafi konumun servis ömrü üzerindeki etkileri Life 365 uygulaması ile araştırılmıştır.

Sonuç olarak, Life 365 uygulaması kullanılarak California ve North Carolina’da aynı özelliklere sahip betonarme kolonlar üzerinde gerçekleştirilen analizler, uçucu kül kullanımının betonun durabilitesini ve servis ömrünü önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Uçucu kül ikame oranındaki artışın, klor iyonu etkisi altında korozyon başlama zamanını belirgin şekilde geciktirdiği, buna karşılık yüksek sıcaklığa sahip iklim koşullarının korozyon başlangıcını hızlandığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, yıllık sıcaklık verileri dikkate alınarak daha sıcak iklim bölgelerinde daha yüksek oranlarda uçucu kül kullanılması, yapıların servis ömrünün artırılmasına katkı sağlayacaktır. Diğer bir deyişle Akdeniz bölgesinde Karadeniz bölgesine kıyasla daha fazla uçucu kül kullanılması servis ömrünü uzatacaktır. Ayrıca uçucu kül kullanımı ile çimento tüketiminin azalması, hem çimento üretiminden kaynaklanan karbon salınımını ve çevresel kirliliği azaltmakta, hem de çevresel bir atık olan uçucu külün değerlendirilmesini sağlayarak sürdürülebilir yapı üretimine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle uçucu kül kullanımının, durabiliteyi artırmasının yanı sıra, dolaylı olarak çevresel etkileri azaltan önemli bir malzeme alternatifi olduğundan, klor iyonlarına bağlı korozyona maruz betonarme yapılarda uçucu kül kullanılması önerilmektedir.

REFERANLSAR

- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review. *Cement&Concrete Composites*. 25, s. 459-471. doi:10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- Akduman, S. (2025). A Parametric Study on Determining the Corrosion Initiation and Propagation Times of Reinforced Concrete Structures Using Different Methods. *Buildings*, 15(5), 666. <https://doi.org/10.3390/buildings15050666>
- Akduman, S. & Öztürk, H. (2024). Effect of Reinforcement Corrosion on Structural Behavior in Reinforced Concrete Structures According to Initiation and Propagation Periods. *Buildings*, 14(12), 4026. <https://doi.org/10.3390/buildings14124026>
- American Concrete Institute Committee 232, (2003). Use of Fly Ash in Concrete. ACI 232.2R-03. USA: American Concrete Institute.
- Arezoumandi, M. & Volz, J. (2013). Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams, *Journal of Cleaner Production*, 59, 120-130.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2010). *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R., (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. Wiley-VCH, Weinheim.
- American Concrete Institute Committee 211, (1993). Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash. ACI 226.4R. ACI Materials Journal 90, 272-283.
- Arezoumandi, M. (2013). Shear and Fracture Behavior of High Performance Concretes. Missouri University of Science and Technology, Phd Dissertation.
- Berry, E.E., Hemmings, R.T., Zhang, M.H., Cornelious, B.J., Golden, D.M. (1994). Hydration in high-volume fly ash binders. *ACI Materials Journal*, 91, 382-389.
- Borah, M.M., Dey, A., Sil, A., (2020). Service life assessment of chloride affected bridge located in coastal region of India considering variation in the inherent structural parameters. *Structures*. 23, s. 191-203. doi: 10.1016/j.istruc.2019.09.020.
- Crank, J., (1956). *The mathematics of diffusion*.Oxford: The Clarendon Press.

- Dunstan, E.R. (1976). Performance of Lignite and Sub-bituminous Fly Ash in Concrete, Report No. REC-ERC-76, Bureau of Reclamation.
- Dunstan, E.R. (1980). A possible method for identifying fly ashes that will improve the sulfate resistance of concretes, *Cement, Concrete, and Aggregates*, 2 (1), 20-30.
- Dunstan, E.R. (1984). Fly Ash and Fly Ash Concrete, Report No. REC-ERC-82-1, Bureau of Reclamation.
- Gopalan, M.K. (1993). Nucleation and Pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete, *ACI Materials Journal*, 90, 117-121.
- Hajkova, K., Smilauer, V., Jendele, L., (2018). Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Engineering Structures*. 174, s. 768-777. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.006.
- Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S. et al. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*. 31(1), s. 75 – 83. doi: 10.1016/j.strusafe.2008.03.004
- Malhotra, V.M. (1986). Superplasticized fly ash concrete for structural applications, *Concrete International*, 8, 28-31.
- Muthena, A., Andrade, C., Nilsson, L.O., Edvardsen, C., (2000). DuraCrete Final Technical Report. *Technical Report*.
- Ortega, C.A. (2012). Shear and Fracture Behavior of High Volume Fly Ash Reinforced Concrete for Sustainable Construction. Missouri University of Science and Technology, Phd Dissertation.
- Sarker, P.K., Kelly, S. Ve Yao, Z., (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials and Design* 63 (2014) 584-592.
- Smilauer, V., Jendele, L., Cervenka, J., (2013). *Prediction of carbonation and chloride ingress in cracked concrete structures*. Scotland : Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing.Civil-Comp Press, 2013.
- Thomas, M.D.A.&Bentz, D., (2018). *Life 365 computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete structures exposed to chlorides. User Manual (version 2.2.3)*. Life-365 Consortium III.

Tuutti, K., (1982). *Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete.* Stockholm.

Vu, K.A.T. & Stewart, M.G., (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety.* 22. s. 313-333. doi: 10.1016/S0167-4730(00)00018-7.

URL 1. <https://www.britannica.com/technology/reinforced-concrete>

URL2. <https://life-365.org>

//

Bölüm 8

EĞRİ EKSENLİ ÇUBUKLAR VE KULLANIM ALANLARI

Mustafa Haluk SARAÇOĞLU¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl.,
Yapı ABD,

Kütahya, TÜRKİYE, mhaluk.saracoglu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3842-5699

1. Giriş

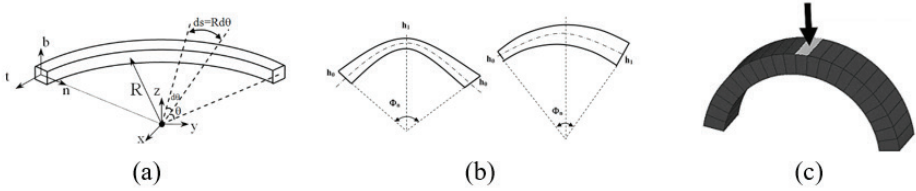
Mühendislik yapılarının en temel taşıyıcı elemanlarından biri çubuk elemanlardır. Çubuk elemanlar, basit yapılarından dolayı yüzyıllardır çeşitli yapılarda kullanılmış, taşıyıcı sistemlerin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir. Çubukların temel özelliği, uzunluklarının kesit boyutlarına göre çok büyük olması ve yük taşıma davranışlarının esas olarak eksenleri boyunca gerçekleşmesidir. Yapı analizinde çubukların düz eksenli olduğu varsayımı yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak modern mühendislik uygulamaları, her zaman düz eksenli çubukların yeterli olmadığı durumları ortaya çıkarmıştır. Özellikle kemer köprüler, kubbe yapıları, gemi ve uçak gövdeleri, basınçlı kaplar ve biyomedikal aletler gibi birçok alanda eğri eksenli çubuklar tercih edilmektedir.

Eğri eksenli çubuklar, düz çubuklara göre daha karmaşık bir iç kuvvet ve şekil değiştirme davranışı sergiler. Bunun nedeni, çubuğun başlangıçtaki geometrisinin doğrusal olmaması ve bu eğriliğin taşıma kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olmasıdır. Eğrilik hem yük dağılımını hem de kesitlerde oluşan gerilme ve deformasyonları değiştirmekte, dolayısıyla mühendislik tasarımında dikkate alınması gereken yeni parametreler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle eğri eksenli çubukların teorisi, düz eksenli çubuklara kıyasla daha farklıdır ve özel yöntemler gerektirir. Nitekim, Timoshenko tipi yaklaşımlar eğrilik etkilerini tanımlamak için geliştirilmiş olup, başlangıç eğriliği ve ön burulmanın hem statik hem de dinamik davranış üzerindeki etkilerini açıklamaktadır (Yu et al., 2002). Eğri kirişlerin geometrik olarak doğrusal olmayan davranışlarını modelleyen çalışmalar, eğriliğin artmasıyla kesitlerdeki gerilme dağılımının belirgin biçimde değiştiğini göstermiştir (Ghuku & Saha, 2019; Rosen & Rand, 1986). Ayrıca, Velčić tarafından geliştirilen zayıf eğrilikli çubuk modeli, üç boyutlu elastisite kuramından türetilerek eğrilik parametresinin enerji ifadelerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymuştur (Velčić, 2012). Güncel olarak, geometrisi düzgün olan eğri çubuk teorileri, karmaşık geometrilere sahip sistemlerin doğrulukla modellenebilmesi için yeni bir temel sunmaktadır (Li et al., 2024).

Bu çalışmada eğri eksenli çubukların tanımı, teorik altyapısı, mekanik davranışı, çözüm yöntemleri ve kullanım alanları ayrıntılı biçimde incelenecektir. Ayrıca literatürdeki güncel gelişmeler değerlendirilecek ve bu yapı elemanlarının mühendislikteki geleceğine ilişkin çıkarımlar yapılacaktır.

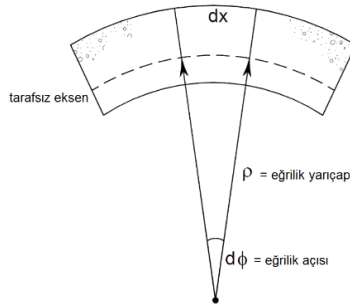
2. Eğri Eksenli Çubukların Tanımı ve Teorik Altyapısı

Eğri eksenli çubuk, eksenini doğrusal olmayan bir uzay eğrisi şeklinde tanımlanabilen, boyutları itibarıyla uzunluğu kesit ölçülerine göre çok daha büyük olan yapı elemanıdır (Şekil 1). Çubuğun eksenini belirleyen bu eğrilik, onun yük altındaki davranışında belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 1. Eğri eksenli çubuk örnekleri (a) (Karaca & Çalın, 2015) (b) (Özdemirci Yiğit & Tüfekçi, 2011) (c) (Kömürcü, 2025)

Bir çubuğun eğriliği, diferansiyel geometri kapsamında tanımlanan kavramlarla açıklanabilir. Eğrilik yarıçapı, eğriye en iyi yaklaşan dairesel yayın yarıçapıdır. Bu büyüklük çubuğun ne kadar kavisli olduğunun göstergesidir. Şekil 2’de eğri eksenli çubukta eğrilik yarıçapı ve eğrilik açısı gösterilmektedir. Eğri eksenli çubukların en temel özelliği, eğrilik yarıçapının sonlu bir değere sahip olmasıdır. Bu durumda yük etkileri yalnızca eksene paralel doğrultuda değil, aynı zamanda eksenin eğrilik merkezine bağlı yönlerde de farklılık göstermektedir.



Şekil 2. Eğri eksenli çubukta eğrilik yarıçapı ve eğrilik açısı

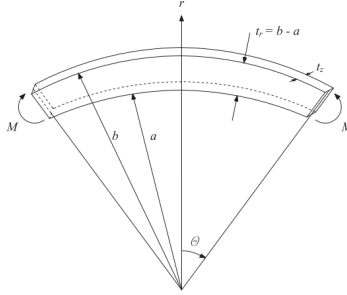
Teorik altyapı bakımından, eğri eksenli çubukların analizi klasik elastisite kuramına ve çubuk teorisine dayanmaktadır. Ancak düz çubuklar için geliştirilen Euler – Bernoulli ya da Timoshenko çubuk teorileri, eğrilik etkilerini tam olarak kapsamaz. Bu nedenle eğri eksenli çubuklar için genişletilmiş teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerde, eksen boyunca tanımlanan yerel koordinat sistemleri kullanılarak eğrilik etkileri doğrudan denklemlere dâhil edilmektedir.

Sonuç olarak eğri eksenli çubukların teorik incelenmesi hem geometrinin hem de malzemenin özelliklerinin birlikte ele alınmasını gerektirir. Özellikle büyük eğrilik değerlerinde, düz çubuk varsayımından doğan hatalar büyüyecektir. Bu sebeple kesin sonuçlar için eğrilik etkisinin mutlaka hesaba katılması gerekmektedir.

3. Eğri Eksenli Çubukların Mekanik Davranışı

Eğri eksenli çubukların eğilme, burulma davranışları, kesitlerinde oluşan gerilmeler, stabilite sorunları, dinamik davranışları düz eksenli çubuklardan önemli ölçüde farklıdır.

Düz çubuklarda eksene dik uygulanan yükler esas olarak eğilme momentleri doğurur. Ancak eğri eksenli çubuklarda aynı yük, eğriliğin yönüne bağlı olarak hem eğilme momenti hem de normal kuvvet bileşeni oluşturur.



Şekil 3. Eğilme momenti etkisi altında eğri eksenli çubuk (Arslan & Eraslan, 2013).

Bu durum, özellikle kemer elemanlarda önemli bir üstünlük sağlar; çünkü yüklerin bir kısmı basınç kuvveti olarak taşınır ve eğilme etkileri azalır.

Eğri eksenli çubuklarda burulma davranışı daha karmaşık olup, eğrilik nedeniyle kesitlerin dönme biçimi farklılaşır (Şekil 4). Özellikle dairesel yay biçimindeki çubuklarda eksene uygulanan burulma momenti hem burulma hem de eğilme deformasyonlarına yol açabilir.

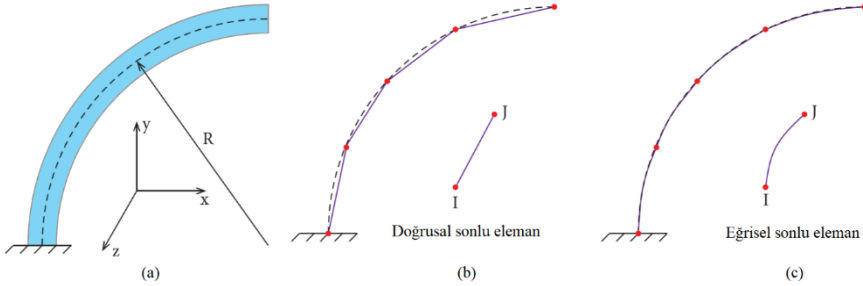
maşık eğriliklerde analitik çözümler ya mümkün değildir ya da çok sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir.

4.1. Klasik Çözüm Yöntemleri

Enerji yöntemleri, virtüel iş ilkesi ve diferansiyel denklem çözümleri eğri çubuklar için kullanılan klasik yöntemlerdir. Bu yöntemler, daha çok teorik çalışmaların temelini oluşturur.

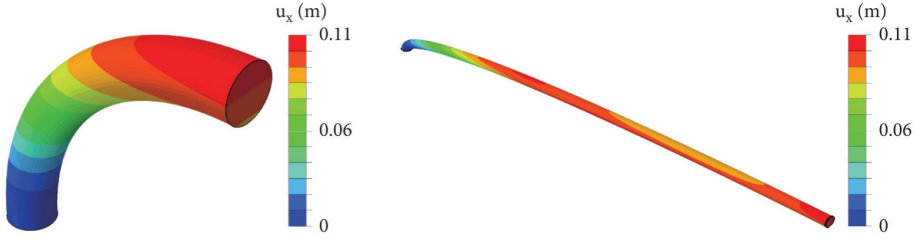
4.2. Sayısal Çözüm Yöntemleri

Modern mühendislikte en yaygın kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem, eğri eksenli çubukların karmaşık geometrilerini ve sınır koşullarını modelleme imkânı sunar. Geliştirilen özel çubuk ve kabuk elemanları sayesinde eğrilik etkileri kolaylıkla modellenebilir. Pek çok ticari sonlu elemanlar programının kütüphanesinde eğri eksenli çubuklar için geliştirilmiş bir sonlu eleman bulunmaktadır. Bu elemanlar, eğri olmayan elemanlarla yaklaşık olarak modellenen problemde elde edilen sonuçlara göre daha kesin ve doğru sonuçlar hesaplamaktadır. Wang, yaptığı çalışmada bu durumu şematik olarak göstermiştir (Şekil 6).



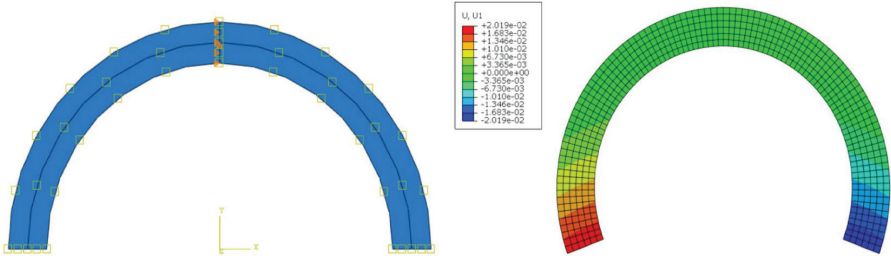
Şekil 6. Eğri eksenli bir kirişin şematik çizimleri. (a) Yarıçapı R olan çeyrek yay şeklindeki eğri eksenli bir kiriş, (b) iki düğümlü doğrusal eleman (c) iki düğümlü eğrisel eleman (Wang, 2021).

Farklı eğriliklere sahip eğri eksenli çubukların deplasman sonuçları da yine aynı çalışmada verilmiştir (Şekil 7)



Şekil 7. Farklı eğriliklerdeki çubukların deplasman sonuçları (Wang, 2021).

Eğri eksenli çubukların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ile ilgili bir başka çalışmada ele alınan problemin sonlu eleman ağ görüntüsü ve deplasman sonuçları Şekil 8’te verilmiştir.



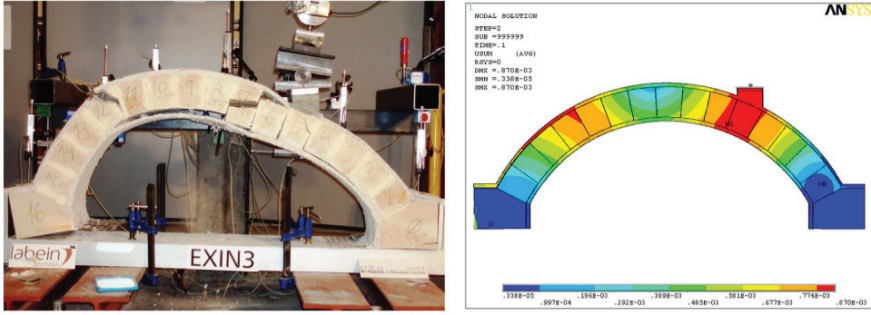
Şekil 8. Eğri eksenli çubuğa ait sonlu eleman ağ görüntüsü ve deplasman sonuçları (Huang et al., 2022).

Ayrıca sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemleri de belirli durumlarda bu tür problemlerin çözümü için kullanılmaktadır.

4.3. Deneysel Yaklaşımlar

Teorik ve sayısal çözümlerin doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Eğri eksenli çubukların laboratuvar ortamında yüklenmesi, gerilme ve deformasyonların ölçülmesi, tasarımların güvenilirliği açısından büyük önem taşır.

Garmendia vd., kemer yapıların laboratuvar ortamında deneysel davranışlarını ve analitik yaklaşımları ortaya koymuşlardır (Garmendia et al., 2014). Deneyler ile ilgili görseller Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. Kemer bir yapının deneysel sonuçları ve sonlu elemanlar simülasyonu.

5. Eğri Eksenli Çubukların Kullanım Alanları

Eğri eksenli çubuklar, inşaat, makine, havacılık, uzay, denizcilik gibi farklı mühendislik disiplinlerinde ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır.

Yüzyıllardır kullanılan en önemli yapılardan birisi de kemer köprülerdir. Eğrilikleri sayesinde yükler basınca dönüşür ve malzeme verimliliği artar. Büyük açıklıkların örtülmesinde kubbeler ve tonozlarda bulunan eğri eksenli çubuklar önemli rol oynar.



Şekil 10. Çatı sistemlerinde eğri eksenli çubuklar

Ayrıca modern spor salonları ve sergi merkezleri gibi yapıların çatı sistemlerinde de eğri kiriş sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 10).



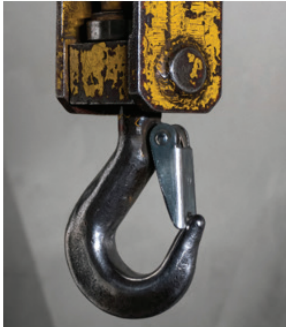
Şekil 11. Aydınlatmada ve trafikte eğri eksenli çubuklar

Eğri eksenli çubuklar trafik lambalarında ve aydınlatma lambalarında da kullanılmaktadır (Şekil 11).



Şekil 12. Yaylar

Makinalarda eğri eksenli çubuklar yaylarda kullanılmaktadır. Krank millerinde dönel hareketi eğri eksenli kollar sağlamaktadır. Dişli sistemlerinde kullanılan eğri eksenli çubukların eğrilikleri, yük aktarımını optimize eder.



Şekil 13. Kancalar

Uçak gövdelerinde basınç yüklerini karşılamak için eğri çubuklar kullanılır. Tüp şeklindeki bu yapıların gövdelerinde halka şeklinde eğri

eksenli çubuklar bulunmaktadır (Şekil 14). Uçak gövdelerine benzer olarak roket yapılarında dairesel güçlendirme halkaları bulunmaktadır.



Şekil 14. Uçak gövde halkaları

Basınçlı tanklarda çelik halkalar ve kemer elemanlar yük dağılımında önemli görev üstlenir. Ortopedik implantlarda kullanılan bazı biyomalzemeler de eğri eksene sahiptir. Bu uygulamalarda eğri eksenli plaklar ve çubuklar kemiklerle uyumlu hale getirilerek kullanılırlar. Bazı kardiyoloji tedavilerinde de damar içerisine mikro ölçekteki eğri eksenli çubuklar kullanılmaktadır.

Tüm bu taşıyıcı sistemlerde, yapılarda tasarlanıp kullanılan eğri eksenli çubukların ilham kaynağı belki de doğada bulunan bu tür yapılar olabilir. Doğadaki eğri eksenli yapılara örnek olarak Polonya'da çam ağaçlarından oluşmuş eğri veya çarpık orman gösterilebilir (Şekil 15).



Şekil 15. Polonya'daki eğri orman (Strzelczyk, 2007).

Doğal olarak oluşan eğri eksenli yapılara bir başka örnek te Amerika Birleşik Devletleri'nin Utah eyaletinde bulunan kemerler millî parkıdır. Bu parkta binlerce sayıda doğal kumtaşı kaya kemer bulunmaktadır (Vikipedi, 2013). Burada bulunan kemerlerden bazıları Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Kemerler millî parkında bulunan kumtaşı kaya kemerlere örnekler.

6. Güncel Araştırmalar ve Literatür Eğilimleri

Son yıllarda eğri eksenli çubuklar üzerine yapılan araştırmalar, özellikle kompozit malzemelerin ve gelişmiş analiz yöntemlerinin kullanımıyla çeşitlenmiştir. Kompozit çubuklar, daha yüksek mukavemet ve düşük ağırlık avantajları sayesinde uçak ve uzay yapılarında ön plana çıkmaktadır.

Ayrıca nanoteknoloji alanında eğri eksenli elemanların kullanımını giderek artmaktadır. Nano ölçekli yaylar, sensörler ve aktüatörlerde eğri eksenli yapıların esneklik ve dayanım özelliklerinden yararlanılmaktadır.

Sayısal yöntemlerde ise yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon teknikleri eğri eksenli çubukların tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Böylece en uygun geometrilerin hızlı ve güvenilir biçimde elde edilmesi mümkün hale gelmektedir.

7. Sonuç ve Değerlendirme

Eğri eksenli çubuklar, mühendislik uygulamalarında düz eksenli çubuklara kıyasla daha karmaşık bir davranış sergilese de sağladıkları üstünlükler sayesinde birçok alanda tercih edilmektedir. Kemer köprülerden uçak yapılarındaki basınç halkalarına, yaylardan biyomedikal uygulamalara kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Teorik, sayısal ve deneysel araştırmalar, eğri eksenli çubukların mühendislikteki önemini artırmış; kompozit malzemeler, nano yapılar ve yapay zekâ tabanlı tasarım yöntemleriyle bu elemanların gelecekte daha da fazla kullanılacağını göstermiştir.

Bu bağlamda eğri eksenli çubukların mühendislikteki yeri yalnızca tarihsel bir miras değil, aynı zamanda geleceğin yapı teknolojilerinin de temel bileşenlerinden biri olacaktır.

Kaynaklar

- Arslan, E., & Eraslan, A. N. (2013). Bending of graded curved bars at elastic limits and beyond. *International Journal of Solids and Structures*, 50(5), 806–814. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.11.016>
- Garmendia, L., Marcos, I., Garbin, E., & Valluzzi, M. R. (2014). Strengthening of masonry arches with Textile-Reinforced Mortar: experimental behaviour and analytical approaches. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(12), 2067–2080. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0339-Y/TABLES/5>
- Ghuku, S., & Saha, K. N. (2019). A parametric study on geometrically nonlinear behavior of curved beams with single and double link rods, and supported on moving boundary. *International Journal of Mechanical Sciences*, 161–162, 105065. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2019.105065>
- Huang, J., Fu, M., & Zheng, B. (2022). Elastic mechanics solution of thermal expansion of bi-material curved beam and its application to negative thermal expansion metamaterials. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/S41598-022-16036-2;SUBJMETA>
- Karaca, N., & Çalım, F. (2015). DAİRE EKSENLİ KİRİŞLERİN TAŞIMA VE RİJİTLİK MATRİSİ YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 59–67. <https://doi.org/10.28948/NGUMUH.239361>
- Kömürcü, S. (2025). Kohezif ara yüzey elemanlar aracılığıyla dairesel yığma kemerlerin sistematik olarak modellenmesi ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 14(2), 504–515. <https://doi.org/10.28948/NGUMUH.1590866>
- Li, X., Yu, W., Zhu, X., Liu, J., & Yuan, H. (2024). Geometrically exact 3D arbitrarily curved rod theory for dynamic analysis: Application to predicting the motion of hard-magnetic soft robotic arm. *Applied Mathematical Modelling*, 134, 71–96. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2024.05.044>
- Mirzaeifar, R., Desroches, R., & Yavari, A. (2011). A combined analytical, numerical, and experimental study of shape-memory-alloy helical springs. *International Journal of Solids and Structures*, 48(3–4), 611–624. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2010.10.026>
- Özdemirci Yiğit, Ö., & Tüfekçi, E. (2011). Investigation of vibrations of circular arches with varying cross-sections. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, 10(2), 129–138. http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/viewFile/1305/1203
- Rosen, A., & Rand, O. (1986). Numerical model of the nonlinear behavior of curved rods. *Computers & Structures*, 22(5), 785–799. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(86\)90268-3](https://doi.org/10.1016/0045-7949(86)90268-3)
- Strzelczyk, A. (2007, August 5). *Eğri Orman* - *Wikipedi*. Wikimedia.Org. https://tr.wikipedia.org/wiki/E%C4%9Fri_Orman

- Tüfekçi, E., & Arpacı, A. (1998). Exact Solution of In-plane Vibrations of Circular Arches with Account Taken of Axial Extension, Transverse Shear and Rotatory Inertia Effects. *Journal of Sound and Vibration*, 209(5), 845–856.
- Velčić, I. (2012). Nonlinear weakly curved rod by Γ -Convergence. *Journal of Elasticity*, 108(2), 125–150. <https://doi.org/10.1007/S10659-011-9358-X/METRICS>
- Wikipedi. (2013, June 26). *Kemerler Millî Parkı - Wikipedi*. Wikipedia. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kemerler_Mill%C3%AE_Park%C4%B1
- Wang, Y. (2021). Improved Strategy of Two-Node Curved Beam Element Based on the Same Beam's Nodes Information. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 2093096. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/2093096>
- Yu, W., Hodges, D. H., Volovoi, V., & Cesnik, C. E. S. (2002). On Timoshenko-like modeling of initially curved and twisted composite beams. *International Journal of Solids and Structures*, 39(19), 5101–5121. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00399-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00399-2)

//

Bölüm 9

**ZEMİN BÜYÜTMESİNDE BOYUT ETKİSİNİN
TBDY 2018'E GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**EVALUATION OF DIMENSIONAL EFFECTS
ON SITE AMPLIFICATION ACCORDING TO
TBDY 2018¹**

Utku TUNA², Ersin GÜLER³, Kamil Bekir AFACAN⁴

1 Bu çalışma yazar Utku TUNA'nın "Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması" başlıklı ve Dr.Öğr.Üyesi Ersin GÜLER ve Doç.Dr.Kamil Bekir AFACAN danışmanlıklarında olan yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

2 İnşaat Yüksek Mühendisi, Türk Telekomünikasyon A.Ş.

3 Dr.Öğr.Üyesi, İnşaat Bölümü, Sivrihisar MYO, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

4 Doç.Dr., İnşaat Müh.Böl., Mühendislik-Mimarlık Fak., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

1.GİRİŞ

Depremler sırasında açığa çıkan sismik dalgalar, deprem kaynağından başlayarak zemin katmanları boyunca farklı hız ve özelliklerle yayılmakta, yeryüzüne ulaştıklarında ise titreşim hareketlerini oluşturmaktadır. Bu titreşimlerin şiddeti ve süresi; depremin büyüklüğü, kaynağa olan uzaklık, dalgaların yayıldığı ortamın fiziksel özellikleri ile zemin ve anakaya özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Anakayada başlayan sismik hareket, özellikleri birbirinden farklı olan zemin tabakaları içerisinde ilerlerken önemli ölçüde değişime uğramakta ve yüzeyde gözlenen yer hareketlerinin karakteristiklerini büyük ölçüde belirlemektedir (Gazetas, G., Mylonakis, G. 1998; Jing, L., & Luan, M. 2016).

Zemin tabakaları, sismik dalgaların yayılımı sırasında farklı davranışlar sergileyebilir. Bazı zemin türleri dalga enerjisinin sönmülmesine neden olurken, özellikle gevşek ve yumuşak zeminler dalga genliklerinin artmasına yol açabilmektedir. Sismik dalga genliklerinin zemin tabakalarından geçiş sırasında artması olgusu, literatürde zemin büyütmesi olarak tanımlanmaktadır (Yalçınkaya, 2004). Bu etki, zeminlerin fiziksel ve dinamik özelliklerine bağlı olarak gelişmekte ve mühendislik yapıları açısından önemli hasar riskleri oluşturmaktadır.

Zemin büyütmesinin değerlendirilmesinde kullanılan analiz yöntemleri, problemin geometrik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak farklı boyutlarda ele alınmaktadır. Bir boyutlu yer tepki analizlerinde, zemin tabakalarının yatay olduğu ve sismik dalgaların anakayadan düşey yönde yayılan SH dalgaları şeklinde ilerlediği varsayılmaktadır. Bu yaklaşımlarda zemin ve anakaya yüzeylerinin yatay doğrultuda sonsuz olduğu kabul edilmekte olup, elde edilen sonuçların birçok deprem kaydında ölçülen yer tepkileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak düzensiz zemin geometrileri, rijit yapıların varlığı, istinat duvarları, tüneller ve benzeri mühendislik yapılarının bulunduğu durumlarda bir boyutlu analizlerin yetersiz kaldığı bilinmektedir (Güler, E. 2021).

Bu tür karmaşık problemlerde iki boyutlu analizlerin uygulanması gerekli olmakta, bazı özel durumlarda ise üç boyutlu dalga yayılımının dik-kate alınması zorunlu hale gelmektedir. Üç boyutlu analizler, iki boyutlu yaklaşımlarla benzer temel prensiplere sahip olmakla birlikte, zemin davranışını daha gerçekçi bir biçimde temsil etmektedir. Bu kapsamda eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar kullanılarak dinamik sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmektedir. Zemin-yapı etkileşimi ve çok boyutlu dalga yayılımı üzerine literatürde çok sayıda üç boyutlu çalışma bulunmaktadır (Kramer, 1996).

Bu kitap bölümünde ele alınan çalışmada; bir boyutlu yer tepki analizleri için DeepSoil, iki boyutlu dinamik analizler için Plaxis 2D ve bir ile iki boyutlu yaklaşımların yetersiz kaldığı durumlar için Plaxis 3D yazılımları kullanılarak kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır. Her bir analiz boyutu için önerilen yöntemler karşılaştırmalı olarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı boyutlarda gerçekleştirilen analizler arasındaki ilişkileri ortaya koymak, gerekli durumlarda daha kısa sürede tamamlanabilen analiz yöntemleri ile güvenilir sonuçlar elde edebilmek ve böylece mühendislik uygulamalarında zaman ve maliyet açısından daha ekonomik çözümler sunmaktır.

Zemin büyütmesinin değerlendirilmesinde kullanılan bir, iki ve üç boyutlu yer tepki analizlerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve analiz boyutunun zemin tepkisi üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Çalışmanın özgünlüğü, TBDY 2018 kapsamında yaygın olarak kullanılan bir boyutlu analizlerin hangi koşullarda yeterli kaldığını ve hangi durumlarda iki ve üç boyutlu analizlere ihtiyaç duyulduğunu nicel sonuçlarla irdelemesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle karmaşık tabakalanmaya sahip zeminlerde ve uzun periyot aralıklarında boyut etkisinin zemin büyütmesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, mühendislik uygulamalarında analiz yöntemi seçimine ışık tutmayı ve daha güvenilir tasarımlara katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. ZEMİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ VE ANALİZLERİ

Deprem etkisi altında zeminlerin gösterdiği dinamik davranış, yapıların güvenli tasarımı açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), sahaya özgü zemin koşullarının dikkate alınmasını esas alarak, deprem yer hareketinin zemin özelliklerine bağlı olarak doğru şekilde tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır (TBDY, 2018). Bu kapsamda zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, zemin-yapı etkileşiminin değerlendirilmesi ve olası sıvılaşma risklerinin analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır (Park, D., & Hashash, Y. M. 2004; 2005).

Yerel zemin koşulları; zemin türü, tabakalanma, kayma dalgası hızı, sönüm oranı ve yeraltı su seviyesi gibi parametrelere bağlı olarak deprem dalgalarının genliğini ve frekans içeriğini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. TBDY 2018 ile birlikte yerel zemin sınıfları güncellenmiş, tasarım ivme spektrumlarının sahaya özgü olarak belirlenmesi mümkün hale gelmiştir. Özellikle “ZF” sınıfı zeminler, ayrıntılı saha araştırmaları ve özel analizler gerektiren zeminler olarak tanımlanmıştır.

Yerel Zemin Sınıfı	Zeminin Cinsi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrıışmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşıabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.

Şekil 1. *TBDY 2018'e göre zemin sınıfları (TBDY, 2018).*

Deprem dalgalarının anakayadan yüzeye doğru ilerlerken zemin tabakaları içerisinde uğradığı yansıma, kırılma ve empedans değişimleri, zemin büyütmesi olgusunu ortaya çıkarmaktadır. Yumuşak ve gevşek zemin tabakalarında sismik dalga genliklerinin artması, yüzeyde daha büyük ivmelere ve hasar potansiyeline neden olabilmektedir. Zemin büyütmesi; empedans oranı, sönüm özellikleri, tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı gibi dinamik parametreler ile ilişkilidir ve zeminin hâkim periyodu bu parametreler kullanılarak tanımlanmaktadır (Peng, Z., & Chen, J. 2020; Rathje, E. M., Wang, Y., & Kottke, A. R. 2007). Deprem dalgalarının taşımakta olduğu enerji, basit harmonik bir dalga için incelenirse, enerji değeri (E);

$$E=A^2w^2\rho V/2 \quad (2.1.)$$

açısal frekans (ω), dalganın genliği (A), yoğunluk (ρ) ve ortamın dalga hızıyla (V) belirlenir (Denklem 2.1). Enerji yüzeye doğru hareket ederken ne kadar göstereceği büyütme miktarı (B) empedans oranına ve sönüm oranına bağlıdır. Zemin büyütmesi, empedans oranının artmasıyla artar, buna karşılık sönüm oranının artmasıyla azalır (Denklem 2.2).

$$B = \frac{1}{(1/\alpha) + (\pi/2)\xi} \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{V_r \rho_r}{V_s \rho_s} \quad (2.3)$$

$$\xi = \frac{\eta w}{2G} \quad (2.4)$$

α : Empedans oranı

ξ : Sönüm oranı

Empedans oranı ve sönüm özellikleri, zemin büyütmesinin büyüklüğünü belirleyen temel parametrelerdir. Rijit anakaya üzerinde yer alan yumuşak ve gevşek zemin tabakalarında empedans farkının artması, sismik dalga genliklerinin yüzeye doğru önemli ölçüde büyümesine neden olmaktadır. Buna karşılık, yüksek sönüm oranına sahip zeminlerde dalga enerjisinin bir kısmı sönümlenerek büyütme etkisi sınırlanmaktadır. Bu mekanizma, özellikle kalın alüvyon tabakaların bulunduğu sahalarda zemin büyütmesinin neden daha belirgin hale geldiğini açıklamakta ve yerel zemin koşullarının tasarım sürecinde dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Sahaya özgü zemin davranışının belirlenmesinde bir, iki ve üç boyutlu yer tepki analizleri kullanılmaktadır. Bir boyutlu analizler, tabakaların yatay ve sonsuz kabul edildiği durumlar için uygun olup birçok saha için yeterli sonuçlar verebilmektedir. Ancak düzensiz zemin geometrileri, eğimli tabakalar, gömülü yapılar ve tüneller gibi karmaşık durumlarda iki ve üç boyutlu dinamik analizler gerekmektedir (Makra, K., & Chávez-García, F. J. 2016). Bu tür problemlerin çözümünde, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar içeren dinamik sonlu eleman yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, zeminlerin dinamik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması ve uygun analiz boyutunun seçilmesi, deprem etkilerinin gerçekçi biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Sahaya özgü zemin dinamik analizleri, hem mühendislik tasarımının güvenilirliğini artırmakta hem de deprem riskinin azaltılmasına yönelik daha etkin ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

3. ÇALIŞMA BÖLGESİ VE BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ

Türkiye, jeolojik ve tektonik konumu nedeniyle dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Anadolu Levhası'nın kuzeyde Avrasya Levhası, güneyde Afrika ve Arap Levhaları ile etkileşimi sonucunda ülke genelinde yoğun bir sismik aktivite gözlenmektedir. Bu kapsamda, Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) ve Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) Türkiye'nin en önemli ve aktif tektonik yapılarıdır. Ayrıca batı Anadolu'da hâkim olan genişleme rejimi, Ege Bölgesi'nde normal faylanma mekanizmalarıyla karakterize edilmektedir (Emre vd.,1998; Fırat vd. 2016).

Türkiye'de meydana gelen 1939 Erzincan, 1944 Bolu-Gerede, 1999 Kocaeli ve 2011 Van depremleri gibi yıkıcı depremler, ülkenin yüksek deprem tehlikesini açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle, deprem tehlike ve risk analizleri düzenli olarak güncellenmekte, yerel zemin koşullarının deprem davranışı üzerindeki etkisi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle alüvyon ve gevşek zeminlerin bulunduğu bölgelerde zemin büyütmesi ve sıvılaşma gibi etkiler, yapı güvenliği açısından önemlidir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan Sakarya ili, Marmara Bölgesi'nde yer almakta olup Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın doğrudan etkisi altında bulunan yüksek deprem riskli bir bölgedir. Yaklaşık 4895 km² yüzölçümüne sahip olan Sakarya, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nde ciddi hasar görmüş ve bu durum ilin deprem tehlikesine olan duyarlılığını açık biçimde göstermiştir. Sakarya'nın aktif faylara yakınlığı, bölgedeki yapılaşma ve altyapı çalışmalarında deprem güvenliğinin öncelikli bir kriter olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Sakarya ilinin çalışma bölgesi olarak seçilmesinde, aktif fay hatlarına yakınlığı, geçmişte yıkıcı depremlere maruz kalmış olması ve geniş alanlarda zayıf zemin koşullarının yaygın olarak bulunması etkili olmuştur. Özellikle alüvyon zeminlerin hâkim olduğu bölgelerde zemin büyütmesi ve dalga yayılımının çok boyutlu etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle Sakarya, zemin büyütmesinde boyut etkisinin incelenmesi açısından temsil gücü yüksek ve mühendislik uygulamaları bakımından kritik bir çalışma alanı sunmaktadır.

3.1. Sakarya'nın Jeolojik Özellikleri ve Aktif Fay Hatları

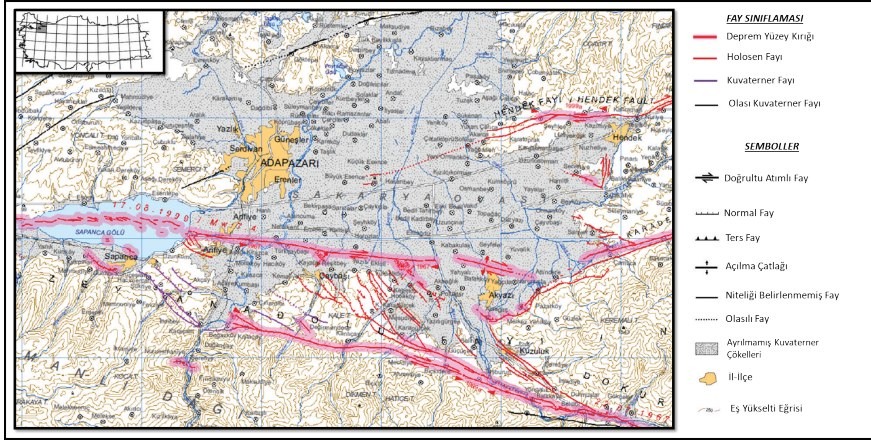
Sakarya ili, Türkiye'nin en aktif ve en uzun fay sistemlerinden biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın etkisi altındadır. Doğu-batı doğrultusunda uzanan bu fay hattı, tarihsel ve aletsel dönemde çok sayıda büyük depreme neden olmuştur. Özellikle 1999 İzmit Depremi, Sakarya ve

çevresinde ağır yapısal hasarlara yol açarak bölgenin sismik tehlikesini ortaya koymuştur. Fay hareketleri, yalnızca yüzey kırıklarıyla sınırlı kalmayıp zemin tabakalarının deformasyonu, yeraltı su seviyelerinin değişimi ve sıvılaşma potansiyelinin artması gibi jeoteknik sorunlara da neden olmaktadır.

Sakarya ili, jeolojik açıdan farklı zemin türlerini bir arada barındırmaktadır. Bölgedeki en yaygın zemin türü, Sakarya Nehri ve yan kolları tarafından taşınan malzemelerden oluşan alüvyon zeminlerdir. Bu zeminler genellikle gevşek yapılı, suya doymuş ve düşük taşıma kapasitesine sahip olup deprem sırasında sıvılaşma riski taşımaktadır. Kil ve silt zeminler de bölgede yaygın olarak bulunmaktadır. Bu zeminler, su içeriğine bağlı olarak plastisite ve deformasyon özellikleri göstermekte; yüksek su muhtevası durumunda taşıma kapasitelerinde önemli azalmalar meydana gelebilmektedir (Bol 2003). Buna karşılık, bölgenin bazı kesimlerinde yer alan kaya zeminler daha rijit ve dayanıklı bir yapı sergileyerek deprem dalgalarına karşı daha sınırlı deformasyon göstermektedir. Ancak kaya zeminlerde de kırılma ve çatlama riskleri göz ardı edilmemelidir.

Sakarya'daki zeminlerin jeoteknik özellikleri; taşıma kapasitesi, oturma davranışı ve stabilite açısından yapı güvenliğini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Özellikle alüvyon ve kil zeminlerde meydana gelebilecek aşırı oturmalar ve stabilite problemleri, deprem sırasında yapısal hasar riskini artırmaktadır. Bu nedenle, temel tasarımında sahaya özgü jeoteknik verilerin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

Sakarya ilinin yüksek deprem tehlikesi, karmaşık jeolojik yapısı ve zayıf zemin koşulları birlikte değerlendirildiğinde, sahaya özel zemin davranışının belirlenmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Zeminlerin dinamik özellikleri, zemin büyütmesi ve zemin-yapı etkileşimi gibi faktörler, yapıların deprem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, Sakarya'nın deprensellik ve jeolojik özellikleri, dinamik zemin analizleri ve mühendislik tasarımlarında temel bir veri kaynağı olarak ele alınmaktadır (Güler, 2021).



Şekil 2. Bölgenin aktif fay hatları (Emre vd. 2011).

3.2. Kullanılan zemin parametreleri ve depremler

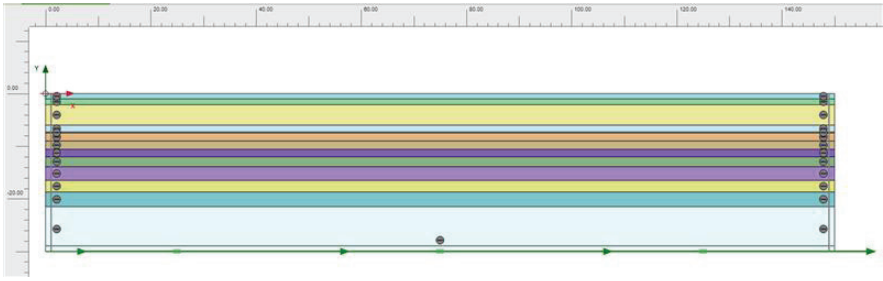
Çalışma kapsamında Sakarya ilinden elde edilen örselenmemiş numuneler ile tanımlama deneyleri yapılmıştır. Ardından numunenin mekanik parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler Şekil 3'te gösterilmektedir.

Derinlik	Cinsi	Litoloji	Ortalama SPT-N	Ortalama N_{60}	V_s	Maksimum Tabaka Kalınlığı	c_u (kPa)	ϕ (°)	μ	k	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
1.50 m	KİLLİ SİLT		7.00	5.00	141	1.00	24.65	1	0.35	0,00001	6,000	15,000	18,000
3.00 m	ML		8.00	6.00	151	1.10	29.58	1	0.35	0,00001	7,000	17,500	21,000
4.50 m													
6.00 m	SİLTİLİ KİL		11.50	10.00	182	1.30	49.30	1	0.35	0,00001	10,000	25,000	30,000
7.50 m	CL												
9.00 m	KİLLİ SİLT		18.00	17.00	229	1.60	83.81	1	0.33	0,00001	15,000	37,500	45,000
10.50 m	ML												
12.00 m	SİLTİLİ KİL		23.00	23.00	260	1.90	113.39	1	0.33	0,00001	20,000	50,000	60,000
14.50 m	CL												
17.00 m	KİLLİ SİLT		31.50	32.00	305	2.20	157.76	1	0.30	0,00001	35,000	87,500	105,000
19.50 m	ML												
			52.00	52.00	396	2.80	256.36	1	0.30	0,00001	45,000	112,500	135,000

Şekil 3. Bölgedeki zemin profillerine ait genel bilgiler

Bu bilgiler ile hem 1B analizler için DeepSoil hem de 2B ve 3B analizler için Plaxis programına tanıtılmıştır. Ayrıca 19,50 m derinliğe sahip zemin profili deneyler sonucunda Şekil 4'teki gibi belirlenmiştir. Plaxis'e de zemin profili bu şekilde işlenmiştir.

- 1,50 m – 6,00 m arası: Killi Silt (ML)
- 6,00 m – 7,50 m arası: Siltli Kil (CL)
- 7,50 m – 9,00 m arası: Killi Silt (ML)
- 9,00 m – 12,00 m arası: Siltli Kil (CL)
- 12,00 m – 19,50 m arası: Killi Silt (ML)



Şekil 4. Plaxis programına tanımlanmış zemin profili

Çalışmada hem 2B hem de 3B etkisinin incelenmesi amacıyla toplamda 22 adet analiz yapılmıştır. Analizlerde sahanın depremsellik özelliklerini yansıtan 11 adet ölçeklendirilmiş deprem ivme kaydı (Şekil 5) ile anakayadan yüzeye doğru ivmelerin değişimi, yüzeyde oluşan ivme değerleri, spektral ivmeler ve zemin büyütme faktörleri elde edilmiştir.

Deprem	İstasyon	RSN	Yıl	Magnitüd	PGA	Rrup (km)	Rjb (km)	V ₃₀ (m/s)
El Mayor-Cucapah, Mexico	Cerro Prieto Geothermal	5825	2010	7.2	0.29	10.92	8.88	242.05
Darfield, New Zealand	LINC	6927	2010	7.0	0.46	7.11	5.07	263.20
Parkfield-02, CA	Parkfield - Cholame 4AW	4104	2004	6.0	0.30	5.53	4.81	283.38
Kocaeli, Turkey	Yarimca	1176	1999	7.51	0.23	4.83	1.38	297.00
Duzce, Turkey	Duzce	1605	1999	7.14	0.40	6.58	0	281.86
Kobe, Japan	Amagasaki	1101	1995	6.9	0.28	11.34	11.34	256.00
Morgan Hill	Gilroy Array #4	458	1984	6.19	0.22	11.54	11.53	221.78
Imperial Valley-06	El Centro Array #4	179	1979	6.53	0.48	7.05	4.90	208.91
Managua, Nicaragua-01	Managua, ESSO	95	1972	6.24	0.37	4.06	3.51	288.77
Parkfield	Cholame - Shandon Array #5	30	1969	6.19	0.44	9.58	9.58	289.56
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	6	1940	6.95	0.28	6.09	6.09	213.44

Şekil 5. Analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) zemin büyütme analizlerinden elde edilen spektral ivme-periyot ilişkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve boyut etkisinin zemin tepkisi üzerindeki rolü tartışılmıştır.

Bir boyutlu analizler sonucunda yüzeyde elde edilen spektral ivme-periyot değerleri Şekil 6-8'de sunulmuştur. Elde edilen bulgular, özellikle $T \approx 1.0$ s civarında spektral ivme değerlerinin belirgin şekilde arttığını ve

boyut etkisinin bu periyot aralığında daha baskın hale geldiğini göstermektedir.

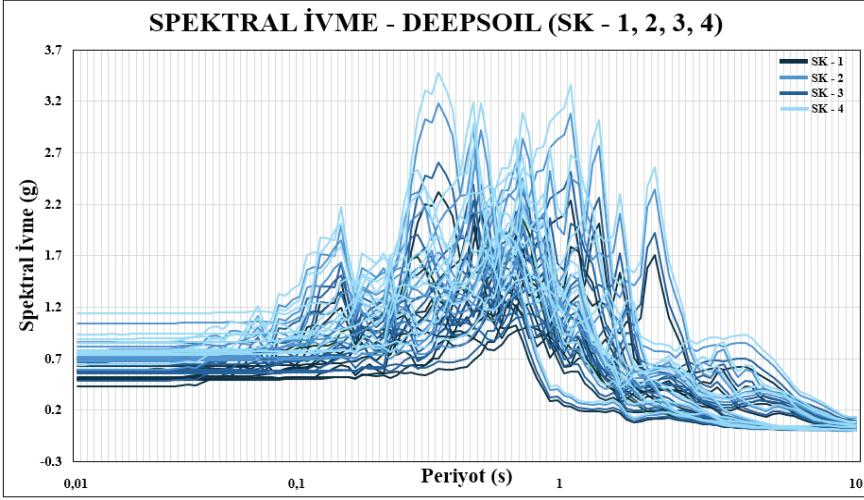
İki boyutlu analizler sonucunda yüzeyde meydana gelen spektral ivme-periyot ilişkileri Şekil 7’de sunulmuştur. Üç boyutlu analizler sonucunda elde edilen spektral ivme-periyot değerleri ise Şekil 8’de gösterilmektedir. Özellikle $T \approx 1.0$ s sonrasında hem 2B hem de 3B analizlerde spektral ivme değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, boyut arttıkça zemin tepkisinin daha karmaşık hale geldiğini ve dalga yayılımının çok yönlü etkilerinin daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır.

Bir, iki ve üç boyutlu analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, analiz boyutu arttıkça zemin tepkisinin daha karmaşık bir karakter kazandığı görülmektedir. Bir boyutlu analizlerde dalga yayılımının yalnızca düşey doğrultuda ele alınması, yatay heterojenliklerin ve geometrik etkilerin göz ardı edilmesine neden olmaktadır. İki ve üç boyutlu analizlerde ise zemin tabakalarının süreksizliği, dalga yansımaları ve kenar etkileri daha gerçekçi biçimde temsil edilmekte; bu durum özellikle orta ve uzun periyot aralıklarında spektral ivme değerlerinin belirgin şekilde artmasına yol açmaktadır. Elde edilen sonuçlar, boyut etkisinin zemin büyütmesi üzerindeki rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

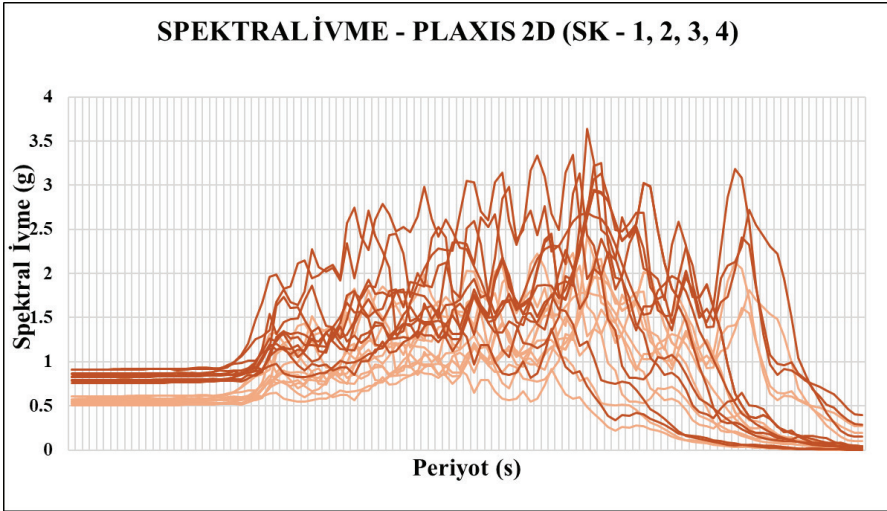
Analizlerde kullanılan dört adet sondaj kuyusu, bir boyutlu analizlerde birbirinden bağımsız dört ayrı zemin profili olarak değerlendirilmiştir. İki boyutlu analizlerde bu profiller SK-1-SK-2 ve SK-3-SK-4 olacak şekilde iki profile indirgenmiştir. Üç boyutlu analizlerde ise tüm sondajlar tek bir zemin modeli içerisinde birleştirilmiştir. Deprem dalgalarının anakayadan yüzeye doğru ilerlerken zemin tabakalarından geçişi sırasında genliklerinde meydana gelen değişimler, zemin büyütmesi olgusunu ortaya çıkarmaktadır. Deprem dalgalarının farklı frekans içeriklerine sahip olması nedeniyle, aynı zemin tabakası farklı frekanslarda farklı tepkiler verebilmektedir. Bu nedenle zemin büyütmesi; depremin frekans içeriğine, zemin tabakasının dinamik özelliklerine ve dalga yayılım hızına bağlıdır. Maksimum büyütmenin gözlemlendiği periyot, zeminin hakim periyodu (T_0) olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).

Elde edilen spektral ivme değerleri, TBDY 2018 kapsamında sunulan interaktif web uygulaması aracılığıyla belirlenen tasarım tepki spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları Şekil 12-14’te verilmiştir. İncelemeler sonucunda, boyut etkisi nedeniyle spektral ivme değerlerinde önemli farklılıklar oluştuğu ve özellikle yüksek periyot aralıklarında spektrum zarfının tam olarak kapsanamadığı görülmüştür. Üç

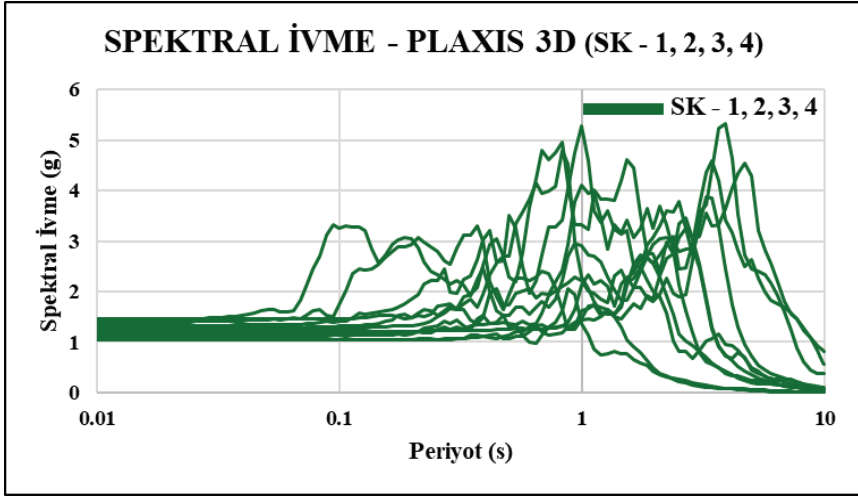
boyutlu analizlerde elde edilen spektral ivmelerin, bir ve iki boyutlu analizlere kıyasla belirgin biçimde farklılaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. 1B spektral ivme değerleri

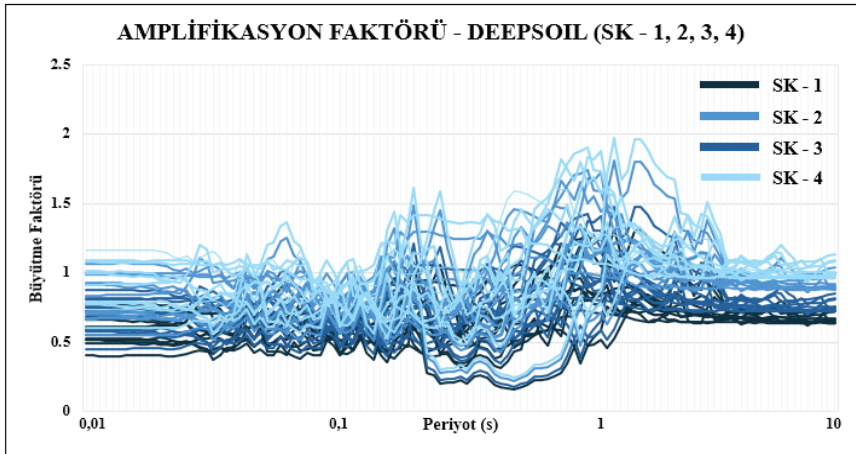


Şekil 7. 2B spektral ivme değerleri

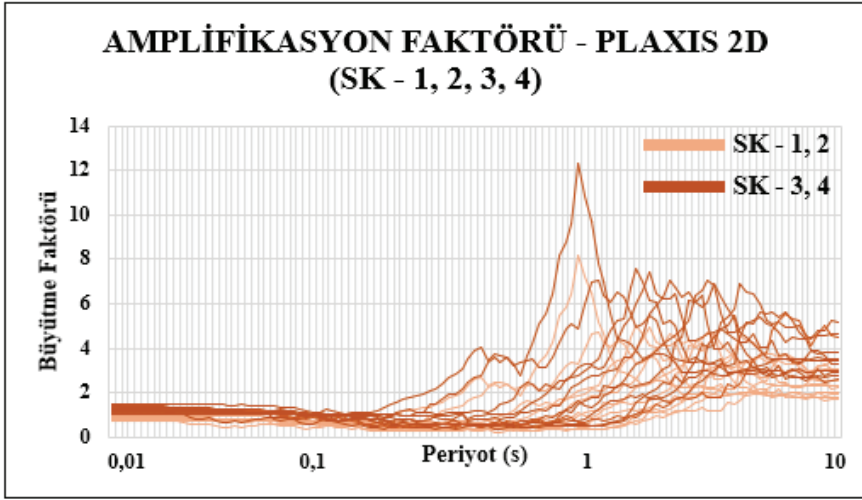


Şekil 8. 3B spektral ivme değerleri

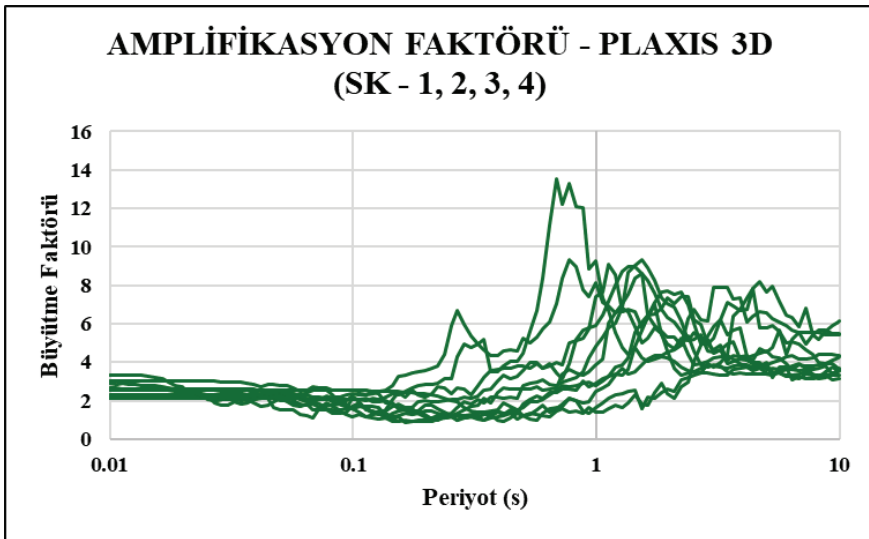
Yapılan analizler sonucunda zemin büyütme (amplifikasyon) değerleri elde edilmiştir. Amplifikasyon faktörünün 1.0'dan büyük olduğu durumlarda zemin büyütmesi meydana geldiği kabul edilmektedir. Bu kapsamda elde edilen amplifikasyon faktörleri Şekil 9-11'de sunulmuş, bir boyutlu analizlere ait özet grafik ise Şekil 9'da verilmiştir. Boyut etkisinin zemin büyütmesi üzerindeki etkisi, özellikle iki ve üç boyutlu analizlerde daha belirgin hale gelmiştir. Plaxis 2D programı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde (Şekil 10) yüksek amplifikasyon değerleri elde edilmiştir. Plaxis 3D programı ile yapılan üç boyutlu analizlerde ise (Şekil 11) amplifikasyon değerlerinin daha da arttığı ve zemin tepkisinin boyut etkisine oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. 1B amplifikasyon faktörü değerleri



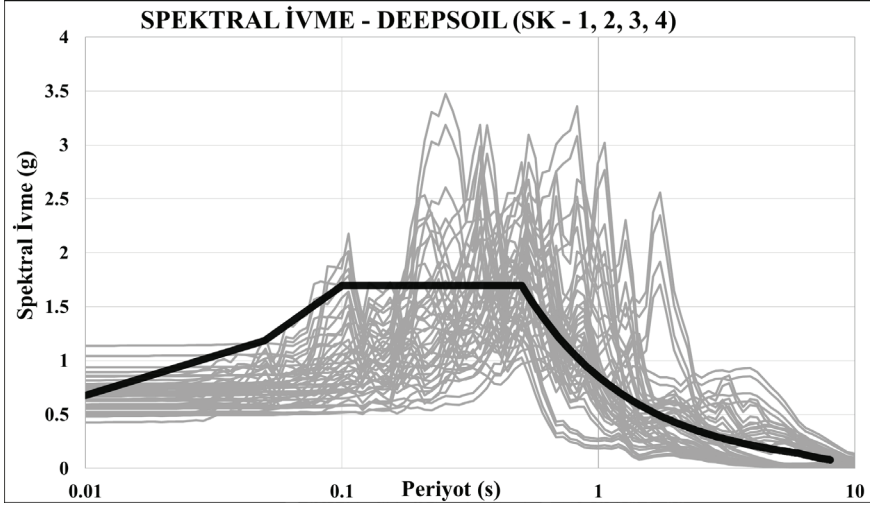
Şekil 10. 2B amplifikasyon faktörü değerleri



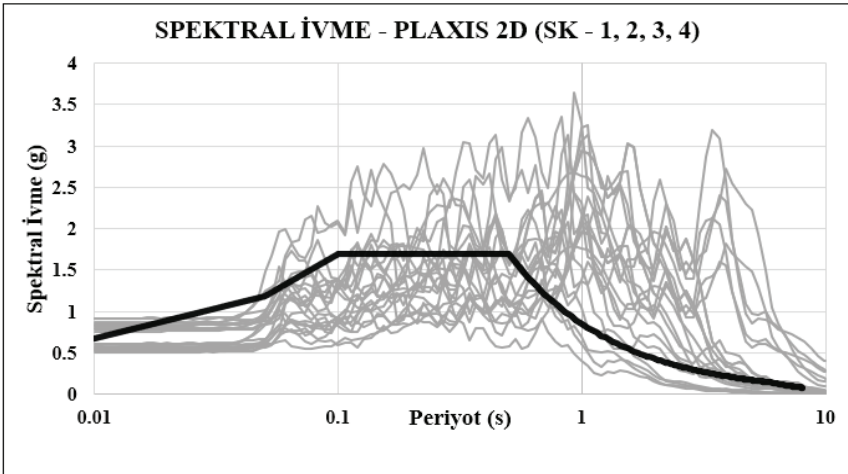
Şekil 11. 3B amplifikasyon faktörü değerleri

TBDY 2018 tarafından önerilen spektrum zarfının, ivme büyüklüğü açısından 1B ve 2B analizleri genel olarak temsil edebildiği; ancak plato bölgesinin daha yüksek periyot değerlerine kaydırılması gerektiği değerlendirilmiştir. Her üç analiz türünde de özellikle yüksek periyot aralıklarında tasarım spektrumunun zemin tepkisini tam olarak kapsayamadığı belirlenmiştir. Bu durum, sahaya özgü ve boyut etkisini dikkate alan analizlerin mühendislik tasarımlarında önemini açıkça ortaya koymaktadır.

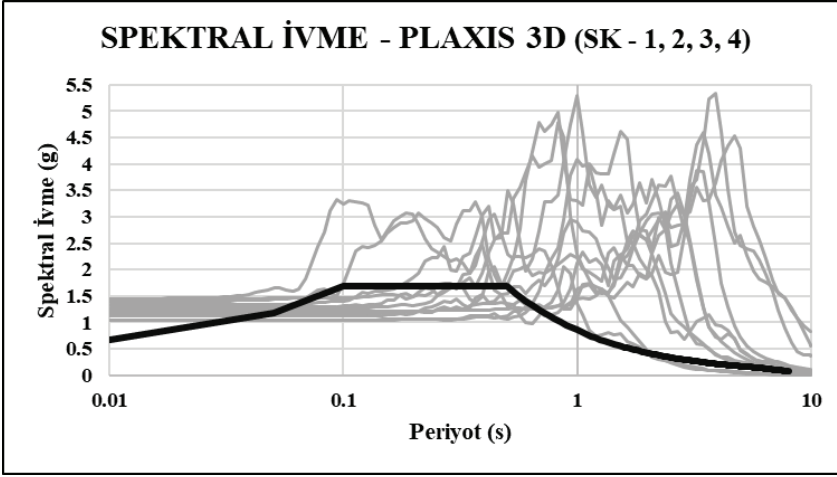
TBDY 2018 kapsamında önerilen tasarım tepki spektrumunun, bir boyutlu analiz sonuçlarını genel olarak temsil edebildiği; ancak iki ve üç boyutlu analizlerde elde edilen spektral ivmeleri özellikle yüksek periyot aralıklarında yeterince kapsayamadığı görülmüştür. Bu durum, sahaya özgü ve boyut etkisini dikkate alan analizlerin önemini ortaya koymakta ve standart spektrumların her zemin koşulu için güvenli tarafta kalmayabileceğini göstermektedir. Özellikle uzun periyotlu yapıların tasarımında, çok boyutlu analiz sonuçlarının dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir.



Şekil 12. 1B analizler ile TBDY 2018'in karşılaştırılması



Şekil 13. 2B analizler ile TBDY 2018'in karşılaştırılması



Şekil 14. 3B analizler ile TBDY 2018'in karşılaştırılması

5.SONUÇ

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir. Çalışma alanından temin edilen örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde öncelikle zemin tanımlama deneyleri gerçekleştirilmiş ve sahaya ait temel geoteknik özellikler belirlenmiştir. Bölgenin depremsellik özelliklerini temsil edecek şekilde, TBDY 2018'de önerilen kriterler doğrultusunda 11 adet deprem ivme kaydı seçilmiş ve uygun ölçeklendirme işlemleri uygulanmıştır. Ardından DeepSoil yazılımı kullanılarak sahaya özgü eşdeğer doğrusal olmayan yaklaşık bir boyutlu zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, zemin büyütmesinde boyut etkisinin belirgin bir rol oynadığı görülmüştür. Analiz boyutu arttıkça, zemin tabakalarının sayısı ve etkileşimi nedeniyle yüzeyde elde edilen ivme ve spektral ivme değerlerinde anlamlı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bir boyutlu analizlerde sismik dalgaların yalnızca düşey doğrultuda yayılımı dikkate alınırken, iki ve üç boyutlu analizlerde farklı zemin tabakalarının ve geometrik etkilerin devreye girmesiyle ivme değerlerinde daha karmaşık bir davranış gözlenmiştir.

Zemin büyütme analizleri arasındaki bu farklılıkların temel nedeninin, zemin tabakalarının sayısı ve bu tabakalara ait dinamik parametrelerin dalga yayılımı üzerindeki etkisi olduğu değerlendirilmiştir. Deprem dalgalarının anakayadan yüzeye doğru ilerlerken farklı tabakalardan geçmesi, ivme değerlerinin her bir tabaka ile birlikte değişmesine neden olmakta; bu durum boyut etkisinin zemin tepkisi üzerindeki önemini

açıkça ortaya koymaktadır. İki ve üç boyutlu analizlerde genel bir eğilim yakalanmakla birlikte, tabaka sayısının artması nedeniyle üç boyutlu analizlerde zemin büyütme değerlerinin daha yüksek seviyelere ulaştığı belirlenmiştir.

Maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerinin derinlik boyunca değişimi incelendiğinde, bir boyutlu analizlerde daha düzenli ve stabil bir dağılım gözlenirken, iki ve üç boyutlu analizlerde ivme değerlerinin daha değişken bir karakter sergilediği tespit edilmiştir. Çalışma alanı için TBDY 2018 kapsamında önerilen tasarım spektrumu ile elde edilen spektral ivmeler karşılaştırıldığında, genel olarak bir boyutlu analiz sonuçlarının tasarım spektrumuna daha uyumlu olduğu görülmüştür. Buna karşın, spektral ivme zarfının iki ve üç boyutlu analiz sonuçlarını özellikle yüksek periyot aralıklarında yeterince temsil edemediği ve bu periyotlarda belirgin farklılıkların oluştuğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, zemin büyütmesi analizlerinde boyut etkisinin göz ardı edilmesi, özellikle karmaşık tabakalanmaya sahip sahalarda gerçeği yansıtmayan değerlendirmelere yol açabilmektedir. Yapının önemi, geometrik özellikleri, hâkim periyodu ve yerel zemin koşulları birlikte ele alınarak uygun analiz boyutunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma, mühendislik uygulamalarında yalnızca bir boyutlu analizlere dayanılmasının her koşulda yeterli olmadığını ortaya koymakta; özellikle kritik ve büyük ölçekli yapılarda iki ve üç boyutlu zemin dinamik analizlerinin tasarım sürecine entegre edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2023-2553 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Bu çalışma Utku TUNA'nın "Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bol, E. (2003). Adapazarı zeminlerinin dinamik özellikleri. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., & Özalp, S. (2011). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Adapazarı (NK 36-13) Paftası, Seri No:14. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., & Ünay, E. (1998). Doğu Marmara Bölgesi'nin Neojen–Kuvaterner'deki evrimi. MTA Dergisi, No:120, Ankara.
- Fırat, S., Işık, N. S., Arman, H., Demir, M., & Vural, I. (2016). Investigation of the soil amplification factor in the Adapazarı region. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75, 141–152.
- Gazetas, G., & Mylonakis, G. (1998). Seismic soil–structure interaction: New evidence and emerging issues. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, 2, 1119–1174.
- Güler, E. (2021). Zeminlerin dinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve zemin büyütme analizlerinin yapılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 149 s.
- Jing, L., & Luan, M. (2016). Analysis of topography amplification effects on ground motion using a spectral element method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 88, 1–11.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. United States of America: Prentice Hall.
- Makra, K., & Chávez-García, F. J. (2016). Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: An evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest. Bulletin of Earthquake Engineering, 14(4), 1177–1194.
- Park, D., & Hashash, Y. M. (2004). Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis. Journal of Earthquake Engineering, 8(2), 249–274.
- Park, D., & Hashash, Y. M. (2005). Evaluation of seismic site response including linear and nonlinear soil behavior. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(7–10), 663–671.
- Peng, Z., & Chen, J. (2020). Evaluation of seismic amplification factors for soil sites in Korea based on nonlinear site response analysis. Geotechnical and Geological Engineering, 38(6), 6501–6517.
- Rathje, E. M., Wang, Y., & Kottke, A. R. (2007). Use of ground motion attenuation relationships for seismic hazard analysis in Texas. Journal of Earthquake Engineering, 11(3), 364–383.
- TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara.

Yalçınkaya, E. (2004). Bir boyutlu modeller için zemin büyütmesine etki eden parametrelerin incelenmesi. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 17(1), 47-56.

//

Bölüm 10

**27 EKİM 2025 BALIKESİR SINDIRGI
(MW = 6.1) DEPREMİ YER HAREKETİ
KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Evren SEYREK¹

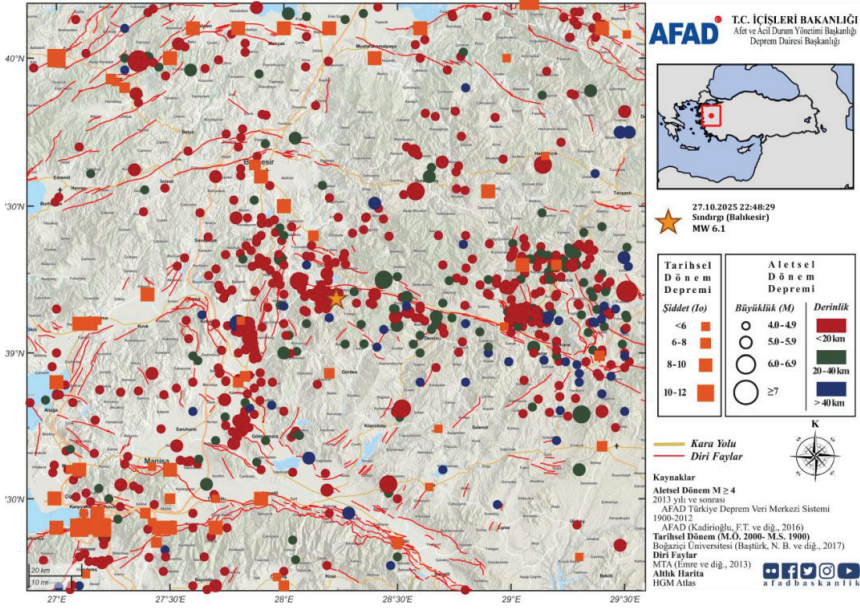
¹ Doç.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, e-mail: evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4373-6723.

1.GİRİŞ

Depremler, milyonlarca yıldır yeryüzü oluşumuyla birlikte meydana gelmektedir. Dünyanın depremsellik yönünden en aktif bölgelerinden biri olan Türkiye’de de çok sayıda hasar yapıcı deprem meydana gelmiştir. 1939 Erzincan depremi (M=7.9), 1970 Gediz depremi (M=7.2), 1976 Çaldıran depremi (M=7.5), 1999 Gölcük depremi (M=7.4), 1999 Düzce depremi (M=7.2), 2011 Van depremi (M=7.2), 2020 İzmir depremi (M=6.6) bunlar içerisinde yıkıcılık açısından en önemlilerindendir (Güngör, 2023). Son olarak ülkemizin en yıkıcı depremleri olarak kayda geçen 06 Şubat depremleri olan Pazarcık-Kahramanmaraş (M=7.7) ve Elbistan-Kahramanmaraş (M=7.6) depremleri meydana gelmiştir. Bu depremler esnasında gerçekleşen yer hareketleri sebebi ile can kayıpları ve yapılarda ağır maddi hasar oluşmaktadır.

Türkiye’nin batısında yer alan ve yaklaşık 90 251 km²’lik yüzölçüme sahip Ege Bölgesi, kuzeyde Marmara, doğuda İç Anadolu, güneyde Akdeniz bölgesi ile batıda Ege Denizi ile çevrilidir. Türkiye’nin en uzun kıyı şeridinde sahip olan Ege Bölgesi sınırları içerisinde İzmir, Manisa, Aydın, Denizli, Muğla, Afyonkarahisar, Kütahya ve Uşak illeri yer almaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre 2019 yılı itibari ile Ege Bölgesi’nde yer alan illerdeki nüfus, Türkiye ülke nüfusunun yaklaşık %13’ünü oluşturmaktadır (www.data.tuik.gov.tr, 2019).

Ege bölgesinde yaşayan nüfus yoğunluğu düşünüldüğünde ve gerek tarihsel gerekse aletsel dönem içerisinde yıkıcı pek çok depreme maruz kaldığı dikkate alındığında deprem tehlikesi, depreme dayanıklı yapı tasarımı ve deprem sonrası acil eylem planlarının hazırlanması konusu son derece önemli hale gelmektedir (Gürel, 2021). Batı Anadolu, genişleme kuvvetleri etkisinde şekil değişimine uğramış ve bu genişlemenin en belirgin özelliği olarak kabul edilen graben sistemleri ve bunlar arasında yükselim gösteren horst sistemleri oluşmuştur. Bakırçay, doğu-batı uzanımlı Edremit, Simav, Kütahya, Küçük Menderes, Gediz, Büyük Menderes ve Gökova grabenleri ve havza sınırlarındaki aktif normal faylar bölgenin önemli tektonik unsurlarıdır (Mckenzie, 1978). Şekil 1.1’de bu yapıların sadeleştirilmiş halleri verilmektedir.



Şekil 1.3. Bölgenin depremselliği (AFAD, 2025)

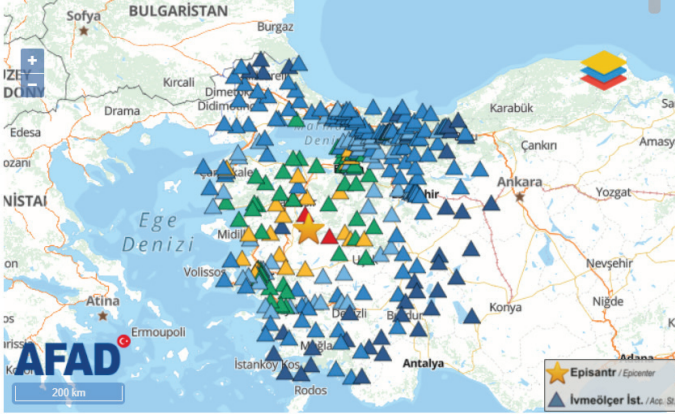
Bu çalışma kapsamında Ekim 2025 Sındırgı depreminin AFAD kuvvetli yer hareketi veri tabanında yer alan 313 adet istasyondaki ivme kayıtları incelenmiş ve kayıtların uzaklık, zemin türü gibi değişkenlere göre dağılımları incelenmiş ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Ekim 2025 Sındırgı depremi Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ağındaki 313 istasyon tarafından kaydedilmiştir (<https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/35278>). İstasyonların deprem kaynağına olan iç kaynak mesafeleri 5.36 km ile 353.98 km arasında değişmektedir. Kayıtlar incelendiğinde en büyük yatay yer ivmesi değerlerinin 0.000226 cm/s^2 ile 373.590 cm/s^2 arasında değiştiği anlaşılmaktadır. İlgili veriler değerlendirildiğinde en büyük yatay yer ivmesi değerinin 373.590 cm/s^2 değeri ile 1015 nolu Sındırgı istasyonunda kaydedildiği görülmüştür. İlgili istasyona ait bilgiler Tablo 2.1'de sunulurken depremi kaydeden istasyonların coğrafi konumları ise Şekil 2.1'de paylaşılmıştır.

Tablo 2.1. 1015 numaralı istasyona ait bilgiler

Ağ	İstasyon Kodu	İl	İlçe	Lİtoloji	Vs30 (m/s)	Ec8 (EuroCode)
TK	1015	Balıkesir	Sındırgı	Ayrışmamış Kuvaterner	238	C



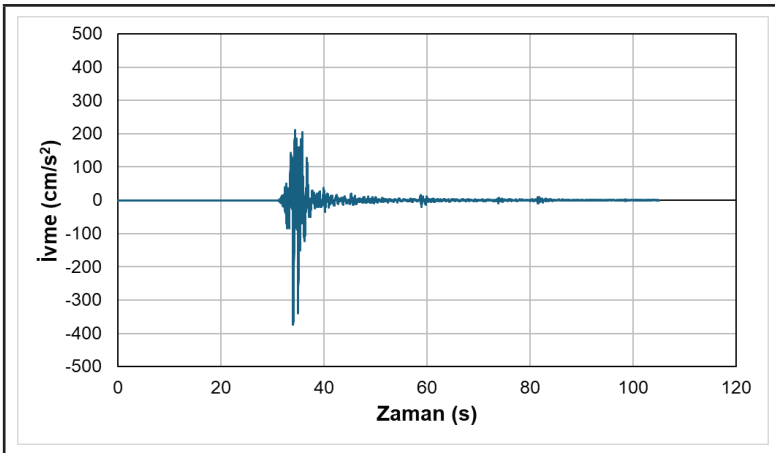
Sınıflanma: ● PGA (cm/s²) ○ PGV (cm/s) ○ PGD (cm)

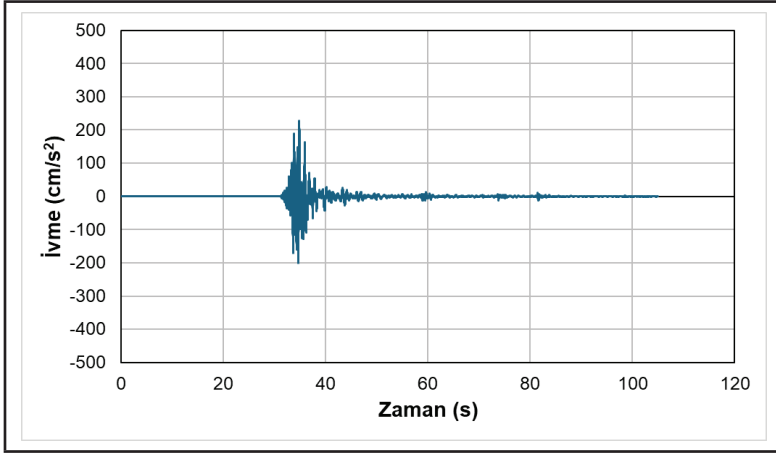
Lejant

▲ <1 ▲ 1-5 ▲ 5-10 ▲ 10-20 ▲ 20-50 ▲ 50-100 ▲ 100-300 ▲ >300

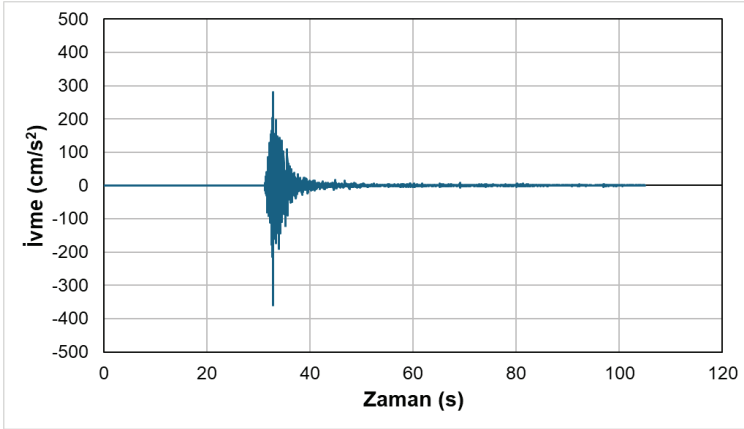
Şekil 2.1. Depremi kaydeden istasyonların coğrafi konumları

1015 nolu istasyonda kaydedilen yatay ivme-zaman grafikleri Şekil 2.2’de verilir iken aynı istasyona ait düşey ivme kaydı ise Şekil 2.3’de paylaşılmıştır.





Şekil 2.2. 1015 nolu istasyona ait yatay ivme kayıtları (üst panel: E-W alt panel: N-S)

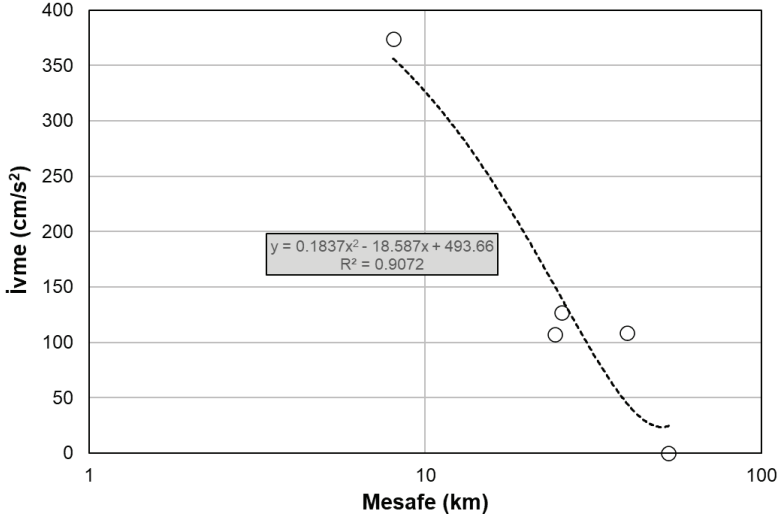


Şekil 2.3. 1015 nolu istasyona ait düşey ivme kaydı

27 Ekim 2025 Sındırgı depreminde kaydedilmiş en büyük yatay ivme değerleri toplu olarak Tablo 2.2’de sunulmuştur. İlgili tablodan da görüleceği gibi en büyük ivme değerlerinin gözlemlendiği istasyonların dış merkez uzaklıkları (R_{epi}) 8.03 km ise 52.90 km arasında değişmektedir. Bu beş kayda ait uzaklık-ivme ilişkisi ise Şekil 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kaydedilen en büyük ivme değerleri ve ait oldukları istasyonlar

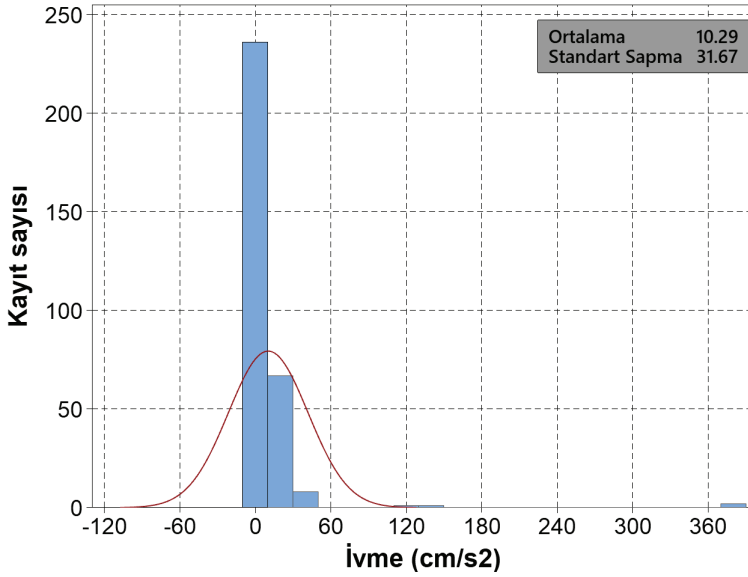
Kodu	İstasyon			Ölçülen İvme Değerleri (gal)			Düşey	Uzaklık R_{epi} (km)
	İl	İlçe	Enlem	Boylam	K-G	D-B		
1015	Balıkesir	Sındırgı	39.2395	28.1714	228.12	373.58	358.13	8.03
1031	Balıkesir	Bigadiç	39.4001	28.2663	181.46	107.01	73.68	24.23
1030	Balıkesir	Bigadiç	39.3989	28.1283	110.21	126.72	37.08	25.46
4504	Manisa	Demirci	39.0350	28.6481	134.12	108.89	73.16	39.63
4513	Manisa	Soma	39.1892	27.6171	0.35	0.25	0.21	52.90

**Şekil 2.4.** En büyük beş ivme kaydına ait uzaklık-ivme ilişkisi

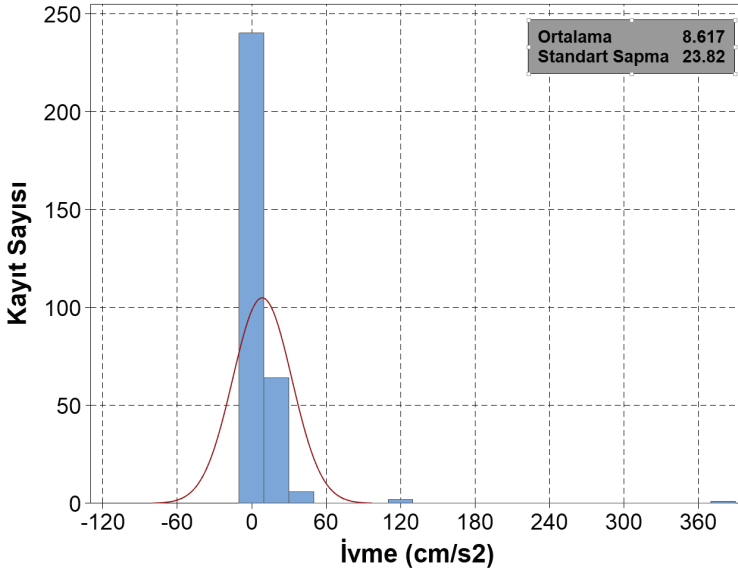
Söz konusu depreme ait en büyük hız ve en büyük yer değiştirme miktarları ise en büyük ivme değerini kaydeden istasyondan farklı olarak 1713 nolu istasyonda gözlenmiştir. En büyük hız değeri 64.99 cm/s ve en büyük yer değiştirme ise 410.93 cm olarak kayda geçmiştir. 1713 nolu istasyonun depremin dış merkezinden olan mesafesi ise 186.96 km'dir.

3. KAYITLARIN ANALİZİ

Ekim 2025 Sındırgı depreminin kaydedilen 313 ayrı istasyondaki en büyük yatay ivme değeri ve yatay bileşenlere ait geometrik ortalama değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 3.1' ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. İstasyonlara ait en büyük yatay ivme değerleri

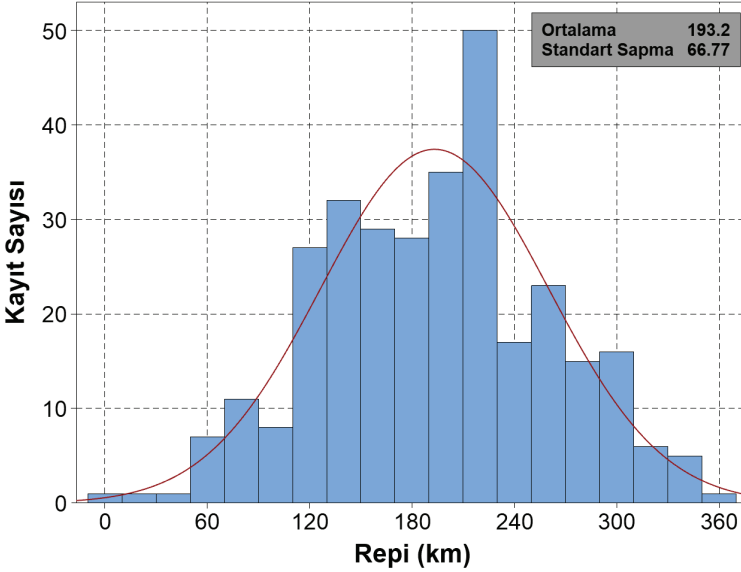


Şekil 3.2. İstasyonlara ait en büyük yatay ivme bileşenlerinin geometrik ortalama değerleri

İlgili şekillerden de görüldüğü gibi, en büyük yatay ivme değerlerinin (PGA_{max}) ortalaması 10.29 cm/s^2 standart sapması ise 31.67 cm/s^2 olarak belirlenmiştir. Benzer değerlendirme geometrik ortalama değeri ($PGA-$

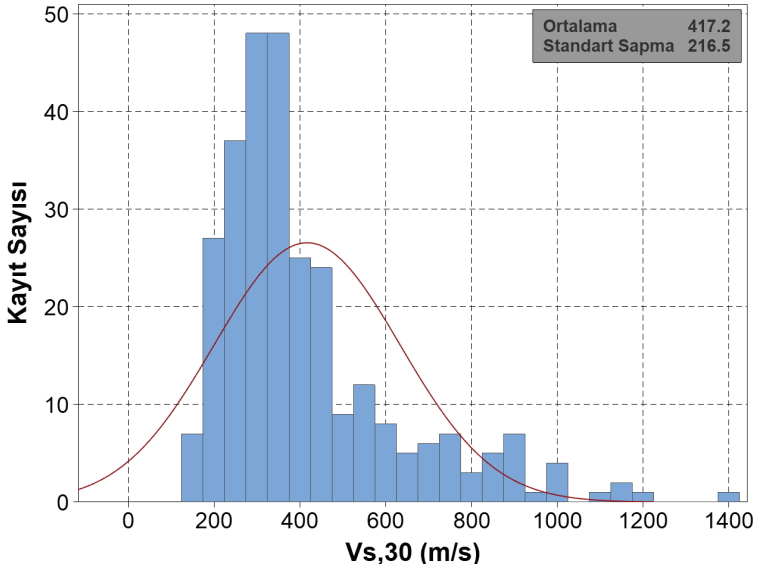
geo) üzerinden de yapıldığında ortalama ivme değeri 8.62 cm/s^2 standart sapma ise 23.82 cm/s^2 olarak belirlenmiştir. Her iki şekle göre kayıtların yaklaşık %75'indeki ivme değeri $0-25 \text{ cm/s}^2$ arasındadır.

Kaydedilen verilerin uzaklıklara göre değişimi ise Şekil 3.3.'de paylaşılmıştır. Buna göre dış merkez uzaklıkları (R_{epi}) 5.36 km ile 351.98 km arasında değişmekte olup ortalama 193.2 km değerine sahiptir. Standart sapma değeri ise 66.77 km olarak belirlenmiştir. Kayıtların %27'sinin sahip olduğu dış merkez uzaklığı ise $190-230 \text{ km}$ aralığındadır. Verilerin çok büyük bir kısmı kaynaktan 110 km ile 230 km arasındaki uzaklıktaki istasyonlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Kayıtlara ait dış merkez uzaklıklarının değişimi

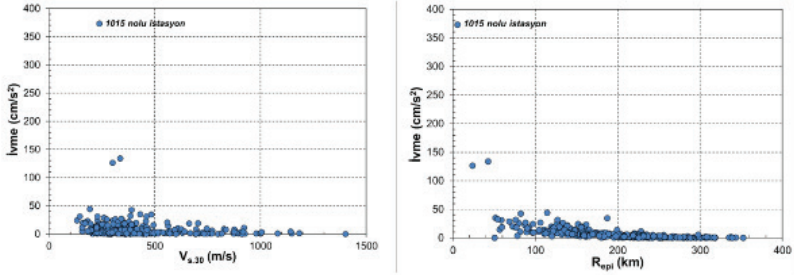
İstasyonlara ait yerel zemin koşulu üst 30 m deki ortalama kayma dalga hızı ($V_{s,30}$) üzerinden değerlendirildiğinde, istasyonların yaklaşık %66'sında $V_{s,30}$ değeri $200-450 \text{ m/s}$ arasındadır. 313 istasyonda ortalama kayma dalga hızı 417.2 m/s olarak belirlenmiştir. 25 istasyona ait $V_{s,30}$ değeri ise bulunmamaktadır. İstasyonların bulunduğu zemin koşulları gevşek zemin ($V_{s,30} \leq 180 \text{ m/s}$), yumuşak zemin ($180 < V_{s,30} \leq 360 \text{ m/s}$), sert zemin ($360 < V_{s,30} \leq 760 \text{ m/s}$ ve kaya zemin ($V_{s,30} > 760 \text{ m/s}$) olarak sınıflandırıldığında, kayıtların %47.9'u yumuşak zemin, %32.9'u ise sert zemin koşullarına sahip istasyonlardan elde edilmiştir. %9.2'lik kısım ise kaya zemin üzerindeki istasyonları oluşturmaktadır.



Şekil 3.4. Kayıtların alındığı istasyonlardaki kayma dalga hızlarının değişimi

Sındırıcı depremine ait ivme değerlerinin üst 30 m'deki ortalama kayma dalga hızı ve mesafe ile değişimi ise Şekil 3.5'de verilmiştir. İlgili şekle göre en büyük üç ivme değerinin olduğu istasyonların deprem dış merkezine olan mesafeleri yaklaşık <40 km; kayma dalga hızları ise 200-300 m/s arasındadır.

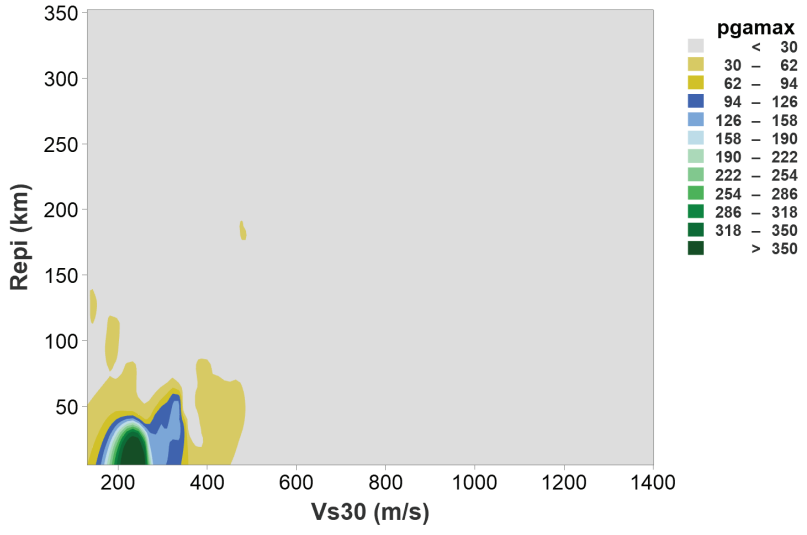
Şekil 3.5. Ölçülen ivme değerlerinin kayma dalga hızı ve mesafe ile değişimi



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 27 Ekim 2025 Sındırğa depremine ($M_w=6.1$) 313 ivme kaydı incelenmiştir. İncelenen kayıtlar Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Gözlem Ağı tarafından kaydedilmiş kuvvetli yer hareketlerinden elde edilmiştir (<https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/35278>). Kayıtların ayrıntılı olarak incelenmesi sonrası aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yerin 6.07 km derininde meydana gelen bu depremin en yakın yerleşim birimi olan Balıkesir ilinin Sındırğa ilçesine bağlı İlicali köyüne uzaklığı 2.66 km'dir .
- İstasyonların deprem kaynağına olan iç kaynak mesafeleri 5.36 km ile 353.98 km arasında değişmekte olup ortalama 193.2 km değerine sahiptir.
- Kayıtların yaklaşık %75'indeki ivme değeri 0-25 cm/s^2 arasındadır. En büyük yatay yer ivmesi değerleri 0.000226 cm/s^2 ile 373.590 cm/s^2 arasındadır. Ortalama 10.29 cm/s^2 değerine sahiptir.
- Kaydedilen en büyük yatay yer ivmesi değeri 373.590 cm/s^2 olup 1015 nolu Sındırğa istasyonunda elde edilmiştir.
- Kayıtların %47.9'u yumuşak zemin ($180 < V_{s,30} \leq 360$ m/s), %32.9'u ise sert zemin ($360 < V_{s,30} \leq 760$ m/s) koşullarına sahip istasyonlardan elde edilmiştir. %9.2'lik kısım ise kaya zemin ($V_{s,30} > 760$ m/s) üzerindeki istasyonları oluşturmaktadır.
- Uzaklık ve kayma dalga hızlarına bağlı ivme değerinin değişimi ise Şekil 4.1'de sunulmuştur. İlgili şekle göre verilerin en yoğun olduğu bölge $V_{s,30}$ değerinin 420 m/s değerinden R_{epi} değerinin 75 km'den düşük olduğu alana karşılık gelmektedir.



5. KAYNAKLAR

- AFAD, 2025, 27 Ekim 2025 Sındırgı (Balıkesir) Mw 6.1 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, Ekim 2025, Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı.
- Bozkurt E. (2001). Neotectonics of Turkey – a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3-30.
- Güngör, Ş.S., 2023, Ege Bölgesi için Gen İfadeli Programlamaya Dayalı Yer Hareketi Tahmin Denkleminin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya, 89 s.
- Gürel, E., 2021, Yerel Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin Performansının Ege Bölgesi için İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya, 98 s.
- Mckenzie, D.P., (1978), Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt, the Aegean Sea and surrounding regions, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 55(1), 217-254.
- (www.data.tuik.gov.tr, 2019).
- (<https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/35278>).

//

Bölüm 11

ESNEK VE RİJİT KARAYOLU ÜSTYAPILARININ TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

Yaşar VİTOŞOĞLU¹, Tayfun ŞENGÜL²

1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5543-9673.

2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3473-7724.

1. GİRİŞ

İnsanlar, çok eski çağlardan bu yana yaşamlarını sürdürebilmek ve korunmak için sürekli olarak yer değiştirme ihtiyacı duymuştur [1]. Ulaşım, insanların yaşamsal kaynaklara erişiminde ve bu kaynakların ihtiyaç duyulan bölgelere taşınmasında her zaman kritik bir rol oynamıştır. Karayolları, köprüler, tüneller, kanallar, demiryolları, havayolları, boru hatları, limanlar ve iskelelerin yanı sıra şehirlerin büyümesiyle gelişen tramvay, otobüs, trolleybüs ve metro gibi toplu taşıma sistemleri, ulaşım altyapısının temel unsurlarını oluşturur [2]. Bu altyapı içinde karayolları, kapıdan kapıya ulaşım hizmeti sağladığından ayrı bir öneme sahiptir. Güzergâh, yolculuk hızı ve zaman açısından yüksek esneklik sunmaları nedeniyle, karayolları çoğu ülkenin altyapı yatırımları içinde büyük bir paya sahiptir. Ülkelerin kalkınması da yerleşim alanlarının yeterli bir karayolu ağı ile birbirine bağlanmasına büyük ölçüde bağlıdır. Yük ve yolcu taşımacılığında ana arterler olan karayollarına yapılan yatırımların getirileri genellikle dolaylı, uzun vadeli ve hemen gözlemlenmeyen niteliktedir. Dolayısıyla, karayolları dikkatli bir şekilde planlanmalı ve inşa edilmelidir [3]. Artan nüfus, hızlı şehirleşme ve ticari hareketlilik, karayolu ağlarının daha yüksek taşıma kapasitesiyle ve uzun hizmet ömrüyle işletilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durum, karayolu üstyapılarının dayanıklılık, bakım maliyetleri ve hizmet ömrü açısından etkin şekilde tasarlanmasını ve uygun üstyapı tipinin belirlenmesini önemli bir mühendislik ve ekonomi sorunu hâline getirmektedir.

Karayolu üstyapısı, üzerinde hareket eden trafik yükünü taşımak üzere tasarlanıp inşa edilen ve tesviye yüzeyi üzerine yerleştirilen tabakalı yol yapısıdır [4]. Üstyapı, gerekli sürtünmeyi sağlayarak taşıtların konforlu ve güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlamanın yanında trafik yükünü üst yüzeyden taban zeminine aktarır. Nihai amaç, taşıt tekerleklerinden kaynaklanan ve alt tabakalara iletilen gerilmelerin, taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde azaltılmasıdır. Bunun yanı sıra, yol üstyapısı yeterli kayma direnci, uygun sürüş konforu, elverişli ışık yansıtma özellikleri ve düşük gürültü düzeyi sağlamalıdır.

Karayolu üstyapıları genel olarak esnek (bitümlü) üstyapılar ve rijit (beton) üstyapılar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Esnek üstyapılar, yükleri çok katmanlı bir yapı içerisinde alt tabakalara dağıtırlar. Bu üstyapıların stabiliteyi agrega kilitlemesi, tane sürtünmesi ve kohezyondan kaynaklanır. Bitümlü bağlayıcı sayesinde sıcaklık ve trafik etkilerine belirli ölçüde uyum sağlayabilirler. Rijit üstyapılar ise yüksek basınç dayanımına sahip Portland çimentosundan üretilen beton plaklar aracılığıyla yükleri geniş bir alana yayar ve deformasyona karşı daha dirençli davranış sergilerler. Her iki üstyapı türünün de kendine özgü avantaj ve

dezavantajları vardır. Bu nedenle, üstyapı tipi seçimi yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve bakım kolaylığı gibi faktörler açısından da değerlendirilmelidir.

Ağır taşıt trafiği altında rijit üstyapıların uzun vadede daha düşük bakım maliyetine sahip olduğu, ancak ilk yapım giderlerinin yüksek olduğu belirtilmektedir [5]. Buna karşın, esnek üstyapıların kısa sürede inşa edilebilmesi ve başlangıç maliyetlerinin düşük olması nedeniyle birçok ülkede daha yaygın olarak tercih edildikleri bilinmektedir. Ayrıca iklim koşulları, trafik yoğunluğu ve bakım uygulamalarına bağlı olarak iki üstyapı türünün tercih edilmesinde bölgesel farklılıklar bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, esnek ve rijit karayolu üstyapılarını teknik ve ekonomik yönlerden karşılaştırarak hangi koşullarda hangi üstyapı tipinin daha uygun olduğunu bütüncül biçimde değerlendirmektir. Çalışmada öncelikle iki üstyapı türünün temel özellikleri açıklanmış, ardından yapısal davranış, dayanıklılık ve bakım gereksinimleri bakımından teknik analizler yapılmıştır. Daha sonra, ilk yapım ve bakım maliyetleri dikkate alınarak yaşam döngüsü maliyet analizi yaklaşımıyla ekonomik karşılaştırmalar ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, karayolu üstyapı seçiminin yalnızca ilk yapım maliyetine göre değil, toplam maliyet ve hizmet performansı esas alınarak yapılması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, karayolu üstyapılarının planlanmasında teknik ve ekonomik etkenlerin birlikte değerlendirilmesinin önemini vurgulamakta ve mühendislik tasarımı süreçlerinde rasyonel karar verme mekanizmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. ESNEK VE RİJİT ÜSTYAPI SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Karayolu üstyapıları, taşıt yüklerini güvenli bir şekilde alt yapıya iletmek, yüzeyde ise taşıtların konforlu ve güvenli bir şekilde seyretmelerini sağlamak amacıyla tasarlanan çok tabakalı sistemlerdir. Üstyapının temel görevi, tekerlek yüklerini taban zemininin taşıma gücünü aşmadan dağıtmak ve tekrarlı yüklemeler altında deformasyonların kalıcı hâle gelmesini önlemektir. Bu bağlamda, karayolu üstyapılarının tasarımı, trafik yükü, taban zemininin taşıma gücü, iklim koşulları ve üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olarak gerçekleştirilir.

İdeal bir karayolu üstyapısı, taşıt yüklerini güvenli ve konforlu bir biçimde zemine aktarmak için belirli teknik ve işlevsel gereksinimleri karşılamalıdır. Öncelikle, tekerlek yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri taban zemininin taşıyabileceği seviyelere indirgeyebilmek için yeterli kalınlığa sahip olmalıdır. Bunun yanı sıra, üstyapı tabakalarının yapısal

dayanımının, üzerlerine etkiyen her türlü gerilmelere karşı yeterli olması gerekir. Yol güvenliği açısından ise, üstyapı yüzeyinin taşıtların kaymasını önleyecek düzeyde sürtünme katsayısına sahip olması büyük önem taşır. Aynı zamanda, yüksek hızlarda dahi sürücülere konforlu bir seyir imkânı sağlayacak ölçüde düzgün bir yüzey dokusuna sahip olmalıdır. Ayrıca, üstyapı yüzeyinin, taban zemininin suyun zararlı etkilerinden korunabilmesi ve stabilitesinin bozulmaması için geçirimsiz nitelikte olması gerekir. Bunu yanı sıra, yol yüzeyinin toz oluşumunu en aza indirmesi, görüş mesafesinin azalması ve dolayısıyla trafik güvenliğinin olumsuz etkilenmesi riskini önemli ölçüde azaltır. Gürültü kontrolü bakımından da üstyapı, hareketli taşıtlardan kaynaklanan gürültüyü mümkün olan en düşük seviyeye indirgemelidir. Son olarak, ideal bir karayolu üstyapısı, uzun bir tasarım ömrüne sahip olmalı ve bu süre boyunca düşük bakım maliyetleriyle hizmet verebilmelidir [6].

Daha önce de belirtildiği gibi, yapısal karakteristiklerine ve yapımlarında kullanılan malzemelerin özelliklerine göre karayolu üstyapıları genel olarak esnek ve rijit üstyapılar olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Bu iki üstyapı türü, yük taşıma mekanizmaları, yapısal davranışları ve bakım gereksinimleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir.

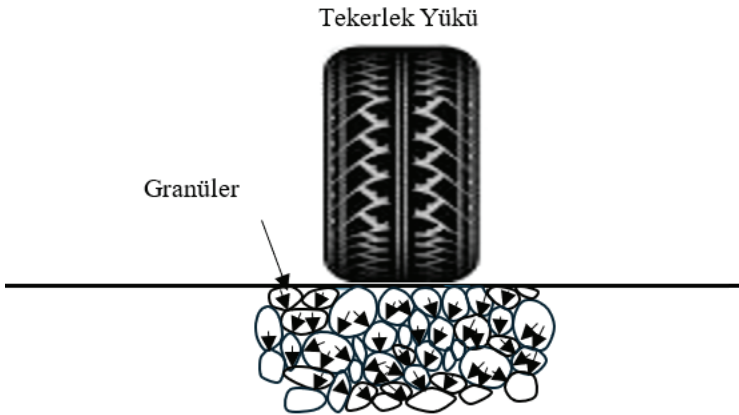
2.1. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapılar, yükleri birden fazla tabaka boyunca kademeli olarak dağıtan ve tabakalar arası sürekliliği esas alan sistemlerdir. Tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan bu üstyapıların stabiliteyi agrega kilitlemesine, tane sürtünmesine ve koheziona bağlıdır [4]. Esnek üstyapılar ile yol yüzeyinde hareket eden taşıtların taban zemininde oluşturduğu gerilmelerin geniş bir alana yayılarak azaltılması ve taban zemininin önemli deformasyonlara uğramasının önlenmesi amaçlanır. Ayrıca, yol üstyapısı tabakalarının kendilerinin de üstyapının sürüş kalitesini ve işlevselliğini etkileyecek ölçüde bozulmaması gerekir. Esnek üstyapılar genellikle kaplama tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakası olmak üzere üç tabakadan oluşurlar. Taban zemininin taşıma gücünün düşük olması durumunda üstyapı tabanını oluşturmak için seçme malzemedan bir koruyucu tabaka ayrıca teşkil edilir. Bunun aksine, taban zemininin taşıma gücünün yüksek olması ve dona karşı hassas olmaması durumunda ise alt temel tabakasının yapımına gerek kalmayabilir [4].

Esnek üstyapılar yaygın olarak düşük ve orta hacimli yollarda kullanılırken, yüksek hacimli otoyollarda da önemli bir kullanım alanı bulmaktadır. Uygulanan tekerlek yükleri ve yük uygulamalarının sayısı arttıkça, taban zeminlerinin ve esnek üstyapının bağlayıcısız granüler malzeme-

den teşkil edilen temel ve alt temel tabakalarının davranışını doğru bir şekilde karakterize etmek önemli hale gelir [4]. Esnek üstyapılar, Şekil 1’de gösterildiği gibi, tekerlek yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri granüler yapıdaki temas noktaları aracılığıyla taneden taneye transfer yoluyla alt tabakalara iletir. Böylece, üstyapıya etki eden tekerlek yükleri daha geniş bir alana dağıtılır ve gerilmeler derinlikle azalır. Esnek üstyapıların gerilmeleri bu şekilde dağıtma özelliğinden faydalanmak için bu üstyapılar birçok tabakaya sahiptir. Bu nedenle, esnek üstyapıların tasarımı takakalı sistem konseptini kullanır [3]. Esnek üstyapılar ihmal edilebilir düzeyde eğilme mukavemetine sahip olup, genellikle yoğun trafik ve zorlu çevre koşullarından kaynaklanan tekerlek izi oluşumuna karşı hassastırlar [5].

Esnek üstyapılar, esas olarak geleneksel tabakalı esnek üstyapı, tam derinlikli asfalt kaplama ve çevrelenmiş kaya asfalt matı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır [7]. Geleneksel esnek üstyapılar, yüksek kaliteli pahalı malzemelerin gerilmelerin yüksek olduğu üst tabakalara, düşük kaliteli ucuz malzemelerin ise alt katmanlara yerleştirildiği tabakalı sistemlerdir. Diğer taraftan, tam derinlikli asfalt kaplamalar, bitümlü tabakaların doğrudan taban zemininin üzerine serilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yöntem, trafiğin yoğun olduğu ve yerel granüler malzemelerin bol bulunmadığı durumlarda daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Çevrelenmiş kaya asfalt matları ise, iki asfalt tabakası arasında yoğun ya da açık granülometreli agrega tabakaları yerleştirilerek oluşturulur. Taban zemininin üzerine serilen modifiye yoğun granülometreli asfalt betonu, taban zeminindeki düşey basınç gerilmesini önemli ölçüde azaltır ve taban zeminini yüzey sularından korur. Türkiye’de tam derinlikli asfalt kaplamaların ve çevrelenmiş kaya asfalt matların kullanımı sınırlı olup esnek üstyapılar denildiğinde aklı geleneksel tabakalı esnek üstyapılar gelmektedir.



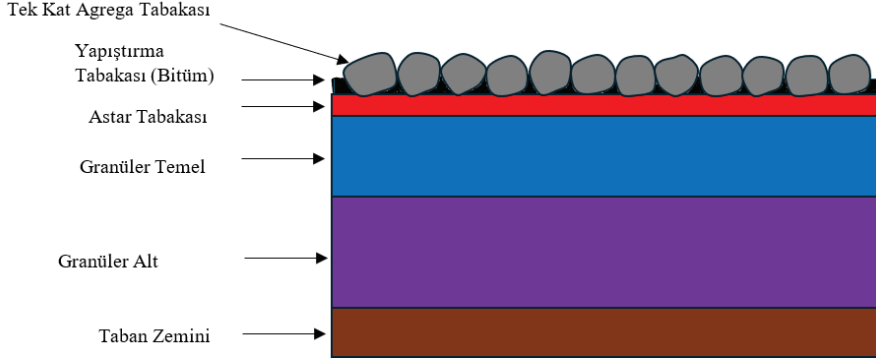
Şekil 1. Esnek üstyapılarda granüler yapı içinde taneden taneye yük dağılımı

Esnek üstyapıların veya geleneksel tabakalı esnek üstyapıların en üst tabakası olan kaplama tabakası genellikle sathi kaplama veya asfalt betonundan oluşur. Kaplama tabakası, trafiğin aşındırmasına, kaymaya ve iklim koşullarının ayrıştırma etkisine karşı koyar. Bu tabakanın ayrıca konforlu ve emniyetli bir sürüş temin etmek, yüzeysel suların temel tabakasına sızmasını engellemek, temel ve alt temel tabakalarına iletilen basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak ve yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak gibi işlevleri de vardır [4]. Kaplama tabakası genellikle bitümlü bağlayıcı ve agrega karışımı malzemedir oluşur. Bitümlü bağlayıcı malzemenin viskoelastik karakteri sayesinde bu üstyapılar sıcaklık ve tekrarlı yük etkilerine karşı belirli bir esneklik gösterirler. Az trafikli yollarda kaplama olarak kullanılan sathi (yüzeysel) kaplamada bitümlü bağlayıcı ve agrega birbirinin peşi sıra uygulanır ve silindire sıkıştırılır. Trafiğin durumuna göre sathi kaplamalar tek kat ya da çift kat olarak teşkil edilmektedir. Tek kat ve çift kat sathi kaplamalı esnek üstyapıların enkesitleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Sathi kaplamalı esnek üstyapılar Türkiye dahil birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Trafiğin yoğun olduğu yollarda ise kaplama olarak asfalt betonu kullanılır. Kaba agrega, ince agrega ve fillerin belirli bir granülometriye sahip olacak şekilde bitümlü bağlayıcı ile uygun bir oranda karıştırıldıktan sonra serilip sıkıştırılmasından oluşan asfalt betonu kaplamalar da aşınma ve binder olmak üzere iki ayrı tabaka halinde inşa edilirler. Bu kaplamalar stabilitesini içsel sürtünmeye ve kohezyona bağlı olarak kazanır. Agrega gradasyonu, bitüm miktarı ve karışımın sıkışma miktarı ise içsel sürtünme ve kohezyonu etkileyen en önemli parametrelerdir. Beton asfalt kaplamalı esnek üstyapının enkesiti Şekil 3’te gösterilmektedir.

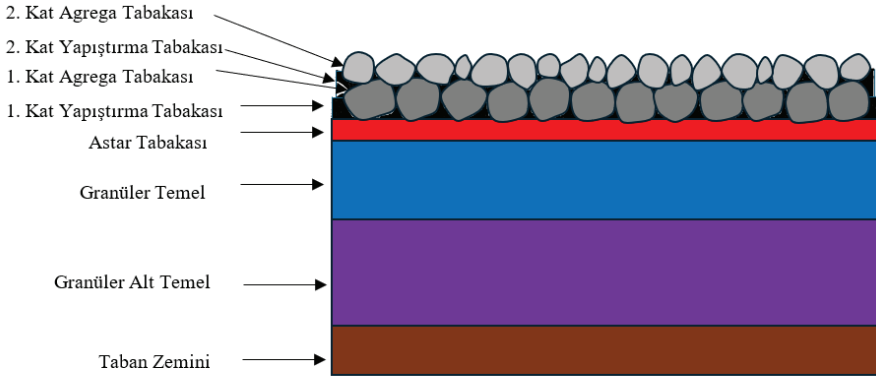
Temel tabakası, alt temel üzerine belirlenen bir kalınlıkta inşa edilen ve belirli fiziksel özelliklere sahip tabaka veya tabakalardan oluşmaktadır. Temel tabakası, esnek üstyapıların ana yapısal elemanlarından biridir. Bu tabakanın, alt temel tabakasına ve taban zeminine gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir düzeylere indirmek ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplama tabakasının kırılmasını önlemek gibi fonksiyonları vardır. Ayrıca, temel tabakası gerilmeleri yaymada, don etkisini azaltmada ve iyi bir drenaj sağlamada da önemli bir rol oynar. Başlıca temel türleri, granüler temel, plent-miks temel ve çimento bağlayıcılı granüler temeldir. Sıcak bitümlü temel ise, özellikle yoğun trafikli yollarda bu tür temel tabakaları üzerinde kullanılan bir üst temel tipidir.

Alt temel, taban zemini üzerine hesaplanan kalınlıkta yerleştirilen ve temel tabakasını taşıyan üstyapının en alt tabakası olup belirli fiziksel özelliklere sahip granüler malzemedir teşkil edilir. Alt temel tabakası, taban zemininde oluşacak don etkisinin üstyapıya yansımalarını ve taban zeminin taşıma gücünü aşabilecek gerilmeleri engelleyecek özelliklere sahip olmalıdır. Bu tabaka, ekonomik koşullar da göz önünde tutularak

bölgede nispeten bol miktarda bulunan ve şartname kriterlerini sağlayan kırmataş ya da kum-çakıl malzemeden teşkil edilmelidir.



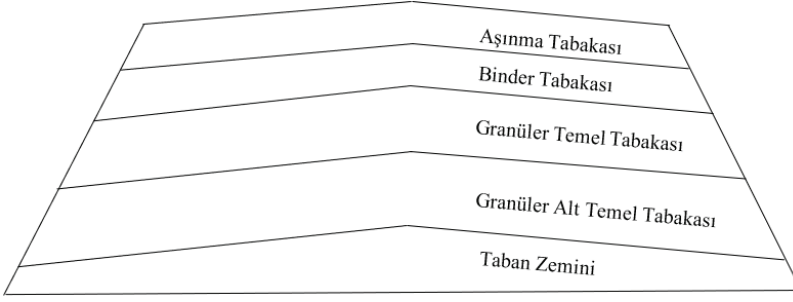
a) Tek kat sathi kaplamalı esnek üstyapı enkesiti



b) Çift kat sathi kaplamalı esnek üstyapı enkesiti

Şekil 2. Tek kat ve çift kat sathi kaplamalı esnek üstyapı enkesitleri

Esnek üstyapıların yük taşıma mekanizması, elastik teoriye dayalı çok tabakalı sistem analiziyle açıklanır. Üstyapıya etki eden tekerlek yükü, üst tabakalarda büyük oranda dağıtılır. Alt tabakalara inildikçe gerilme azalarak taban zemininin taşıyabileceği düzeylere indirgenir. Bu nedenle, üst tabakalarda yüksek dayanımlı malzemeler, alt tabakalarda ise ekonomik granüler malzemeler tercih edilir.



Şekil 3. Beton asfalt (bitümlü sıcak karışım) kaplamalı esnek üstyapı

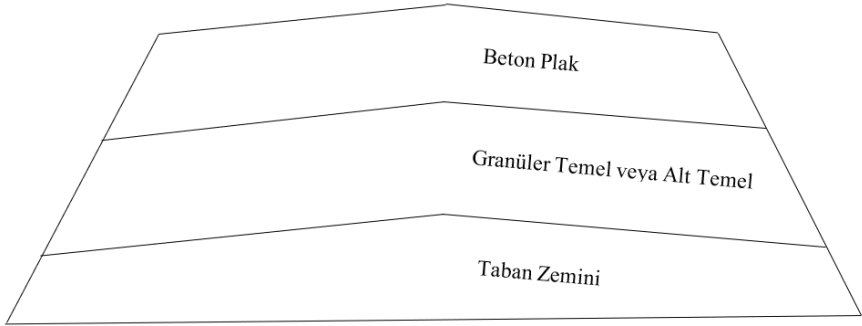
Esnek üstyapıların başlıca avantajları, inşaat sürelerinin kısa olması, bakım ve onarım işlemlerinin kolaylığı ve ilk yapım maliyetlerinin görece düşük olmasıdır. Ayrıca, deformasyon oluşsa bile çoğu zaman yüzeysel onarımlarla yolun hizmete devam etmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık değişimlerine ve ağır taşıt yüklerine karşı daha duyarlıdır. Ek olarak, ondülasyon, tekerlek izi ve çatlaklar gibi deformasyonların sıkça oluşması bu üstyapıların başlıca dezavantajlarıdır.

2.2. Rijit Üstyapılar

Rijit üstyapılar, yüksek basınç ve yeterli eğilme dayanımına sahip olan beton plaklar aracılığıyla yükleri geniş bir alana dağıtarak taşıyan sistemlerdir. Bu üstyapılarda esas yük taşıyıcı eleman, bitümlü karışımdan yapılmış kaplama tabakası yerine Portland çimentosu bağlayıcılı beton plaktır. Beton plaklar ya doğrudan hazırlanmış taban zemini üzerine ya da granüler veya stabilize malzemedan yapılmış ve genellikle alt temel veya temel tabakası olarak adlandırılan tek bir tabaka üzerine yerleştirilir [6]. Genel bir kural olarak, alt temel veya temel tabakası hariç beton plak, üstyapı olarak adlandırılır. Beton plak, rijitliği ve yüksek elastisite modülü nedeniyle, uygulanan yükü nispeten geniş bir zemin alanına dağıtır. Bu nedenle, yapısal kapasitenin büyük bir kısmı plağın kendisi tarafından sağlanır [8]. Rijit üstyapılarda beton plaklar birbirinden boyuna ve enine derzlerle ayrılır. Bu derzler, betonun ısıl genişleme ve büzülme etkileri altında çatlamasını kontrol eder. Rijit üstyapının enkesiti Şekil 4'te gösterilmektedir.

Rijit üstyapılarda yük transferi, beton plağın rijitliği ve taban zemini veya alt temel tabakasının reaksiyonu ile sağlanmakta olup üstyapı, viskoz bir ortam üzerine oturan elastik bir plak gibi davranır. Dolayısıyla, rijit üstyapılar tabaka teorisi yerine plak teorisi ile analiz edilirler. Plak teorisi, beton döşemeyi yüklemeye önce düz olan ve yüklemeye sonra da düz kalan orta kalınlıkta bir plak olarak varsayan tabaka teorisinin

basitleştirilmiş bir versiyonudur. Bu kapsamda, Westergaard teorisi, rijit üstyapıların tasarımında en yaygın kullanılan analitik yaklaşım olup plak kalınlığı, zeminin yatak katsayısı (k), yük şiddeti ve derzler arası mesafe gibi parametrelere göre belirlenir. Bundan başka, rijit üstyapıların gerilme durumu, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da analiz edilmektedir [9]. Rijit üstyapılar esas olarak derzli donatısız beton yollar, derzli donatılı beton yollar ve sürekli donatılı beton yollar olmak üzere üç sınıfa ayrılır [10].



Şekil 4. Beton yol (rijit esnek üstyapı)

2.2.1. Derzli donatısız beton yollar

Derzli donatısız beton yollar, genişmeden kaynaklanan gerilmeleri önlemek ve çatlakları kontrol altına almak için derzlerle ayrılmış ve yerinde dökülmüş donatısız beton plaklardan meydana gelir. Plakların boyutları, betonun kürlenmesi işlemi sırasında büzülmeden dolayı çatlamlarını engellemek için küçük tutulur. Plaklar, genellikle kareye yakın şekillere sahip olup trafik yüklerini alt temele veya taban zeminine aktarabilmek için enine derzler boyunca kayma demirleri, boyuna derzler boyunca ise bağ demirleri içerirler. Boyuna yönde plaklar genellikle düşey hareketi önlemek ve enine derzler boyunca agrega kenetlenmesini sağlamak için kayma demirleri ile birbirine bağlanırlar. Ayrıca, plakları enine yönde paralel plaklara bağlayan ve temel işlevi yatay hareketi diğer bir deyişle eğrilmiş derzlerin açılmasını önlemek olan bağ demirleri bulunur [10]. Derzli donatısız beton yollar, kayma ve bağ demirleri dışında herhangi bir donatı içermemeleri yüzünden maliyet bakımından daha uygundurlar [11].

2.2.2. Derzli donatılı beton yollar

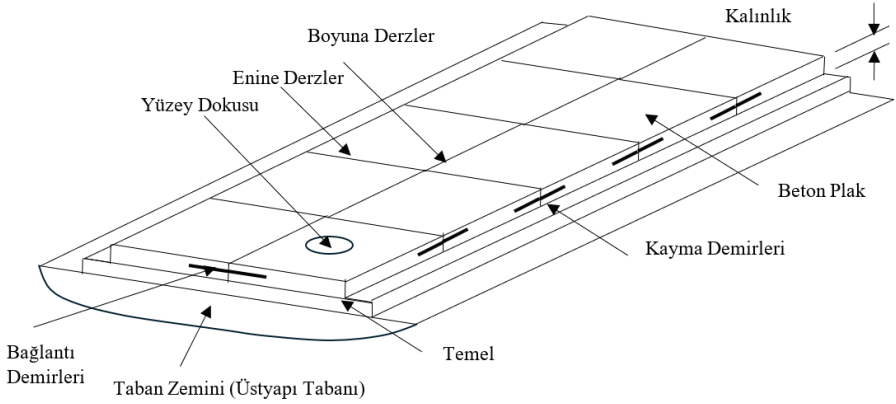
Derzli donatılı beton yollar, genişmenin neden olacağı gerilmeleri önlemek ve çatlakları kontrol altına almak için derzlerle ayrılmış ve yerinde dökülmüş çelik donatılı beton plaklardan oluşur. Bu üstyapılarda,

plakların içerisinde klasik betonarme çeliği kullanılarak beton plakların blok uzunlukları ve dolayısıyla derzler arası mesafeler artırılmaktadır [10]. Kullanılacak çeliğin miktarı çatlakların kontrolünde önemli bir parametredir. Çelikle güçlendirilmiş beton plaklarda güçlendirme olmasına rağmen donatının yetersiz kaldığı durumlarda bağlantı ve kayma demirleri devreye girer. Dolayısıyla, bu rijit üstyapı tipinde de plaklar, düşey gerilmeleri iletmek için kayma ve bağlantı demirleriyle birbirine bağlanırlar. Derzli donatılı beton yollar, zemin hareketi veya sıcaklık ya da nem değişiminden kaynaklanan gerilmeler nedeniyle enine çatlama olasılığının bulunduğu durumlarda kullanılır. Boyuna donatı ana donatıdır. Çoğu durumda gerekli olmasa da boyuna donatıların yerleştirilmesini kolaylaştırmak için enine donatı da eklenir.

2.2.3. Sürekli donatılı beton yollar

Derzsiz ve yerinde dökülmüş betonarme plaktan yapılan sürekli donatılı beton yollar, yüksek bir konfor seviyesinin beklendiği, nispeten yoğun trafiğe sahip yollarda kullanılır. Bu üstyapılarda, yük transferini sağlamak amacıyla hem enine hem de boyuna doğrultuda tüm kesit boyunca donatı yerleştirilir. Ana donatı, beton plağın orta derinliğine üstyapının uzunluğu boyunca sürekli olarak yerleştirilen çeliktir. Bu uzunlamasına yerleştirilen donatı, betondaki hacim değişikliğinden dolayı üstyapıda oluşan çatlakları kontrol etmek için kullanılır [10]. Genleşme ve büzülme hareketleri, yüksek düzeyde alt temel kısıtlamasıyla önlenir. Sık görülen enine çatlakların açılması ise, uzunlamasına sürekli olarak yerleştirilmiş yüksek çekme dayanımlı çelik donatı ile engellenir. Enine derz içermeyen ve enine derzlerin sadece imalat bitimlerinde konulduğu sürekli donatılı beton yolların maliyetleri yüksek olsa da konfor açısından daha iyidirler [11].

Rijit üstyapıların, uzun hizmet ömrüne (20-40 yıl), düşük bakım sıklığına ve yüksek taşıma kapasitesine sahip olmaları, avantajlarından bazılarıdır. Ayrıca düzgün yüzey özellikleri sayesinde taşıtlar için daha az yakıt tüketimi ve daha yüksek sürüş konforu sağlarlar. Buna karşılık, ilk yatırım maliyetleri yüksek, yapım süreleri uzun ve onarım işlemleri karmaşık olabilmektedir. Donma-çözülme döngülerinin yoğun olduğu bölgelerde derzlerin korunması ve drenajın sağlanması da kritik öneme sahiptir [10]. Rijit üstyapı elemanlarının başlıcaları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Rijit üstyapı elemanları (genel gösterim)

3. TEKNİK KARŞILAŞTIRMA

Karayolu üstyapılarının teknik performansı, kullanılan malzemelerin özelliklerine, yük taşıma kapasitesine, iklim etkilerine karşı dayanıklılığın ve hizmet ömrü boyunca gösterdiği deformasyon davranışına bağlıdır. Esnek ve rijit üstyapılar, bu faktörler bakımından belirgin farklılıklar gösterirler. Her iki üstyapı tipinin mühendislik açısından performansını değerlendirmek için yalnızca yapısal dayanıklılığın değil, aynı zamanda bakım kolaylığı ve sürdürülebilirliğin de analiz edilmesi gerekir.

3.1. Malzeme Özellikleri ve Yapısal Davranış

Esnek üstyapılar, esas olarak bitümlü bağlayıcılar ile granüler malzemelerden oluşur. Bitümlü bağlayıcılar, karbon sülfürde tamamen eriyen hidrokarbonlar olup esnek üstyapıların en karakteristik malzemesidir. Bu bağlayıcılar yükleme hızının yanısıra termoplastik maddeler olduklarından sıcaklık değişimlerine karşı da oldukça duyarlıdır. Sıcaklığa bağlı olarak bu bağlayıcılar, gevrek elastik, elastoplastik, viskoelastik ve viskoz olmak üzere farklı reolojik davranış biçimleri sergilerler. Dolayısıyla, düşük sıcaklıklarda gevrekleşme, yüksek sıcaklıklarda ise akma eğilimi gösterirler. Sıcaklık ve yükleme süresi arttıkça bitümlü bağlayıcıların deformasyon direnci ve rijitliği (elastisite modülü) azaldığından yüksek sıcaklıklarda ve düşük araç hızlarında kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Daha sert bağlayıcı kullanılması bu sakıncaları azaltsa da bu durum düşük sıcaklıklarda çatlama oluşması olasılığını artırır. Bu yüzden, bitümlü bağlayıcının uygun sertlikte seçilmesi, üstyapının performansı açısından büyük önem taşır. Bu bağlamda, stiren-bütadien-stiren (SBS) gibi polimer katkıları viskoelastik davranışı iyileştirir. Dolayısıyla bu tür katkılarla modifiye edilmiş bitümler klasik bitümlerle-

re kıyasla daha yüksek esneklik gösterir ve sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklı olurlar. Bitümlü bağlayıcıların bu özelliği uygun tane dağılımına sahip agrega ile bitümlü bağlayıcının karışımından oluşan asfalt betonunun özelliklerine de aynen yansır. Bu nedenle, asfalt betonunun plent adı verilen karıştırma tesisinde hazırlanması, yola serilmesi ve yolda sıkıştırılması sırasında, şartnamede belirtilen sıcaklık derecelerine tam olarak uyulması gerekir. Dolayısıyla bir bütün olarak esnek üstyapının davranışı da sıcaklık, yükleme hızı ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Buna karşın, rijit üstyapılarda bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosunun özellikleri ise sıcaklığa bağlı olmadığından böyle bir sakınca yoktur [12]. Üstyapı tabakaları arasındaki yük transferi, sürtünme ve kohezyon etkisiyle sağlanır.

Asfalt betonunun mekanik dayanımı, agrega tanelerinin şekline, yüzeylerinin pürüzlülüğüne, tane boyutu dağılımına, bitümlü bağlayıcı miktarına ve sıkıştırma derecesine bağlıdır. Sıcaklık arttıkça asfalt betonunun rijitliği azaldığından, tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonların oluşma riski yükselir. Düşük sıcaklıklarda ise karışım gevreklediğinden çatlak oluşumu kolaylaşır. Uygun karışım tasarımı, bu iki zıt davranış arasında optimum bir denge kurulmasını amaçlar. Asfalt karışımlarının performansı, Marshall, Superpave veya gyratory sıkıştırma deneyleriyle belirlenir. Ayrıca yorulma, çekme ve kalıcı deformasyon testleri de karışımın uzun dönem dayanımını değerlendirmek için kullanılır.

Asfalt betonu, sıcaklık ve yükleme süresine duyarlı viskoelastik bir malzeme olup hem elastik hem de viskoz deformasyon özellikleri gösterir. Bu nedenle uygulanan yükün büyüklüğü, süresi ve sıcaklık koşulları, malzemenin davranışını önemli ölçüde etkiler. Düşük sıcaklıkta veya kısa süreli yükleme altında asfalt betonu daha elastik davranırken eğrinin eğimi yüksektir ve deformasyon küçük olur. Yüksek sıcaklıkta veya uzun süreli yükleme altında ise viskoz davranış baskın olup deformasyon artar ve kalıcı şekil değişiklikleri meydana gelir. Dolayısıyla asfalt betonunun gerilme-deformasyon ilişkisi doğrusal değildir ve zamanla değişir. Bu nedenle, asfalt betonunda gerilme (σ) yalnızca deformasyona (ϵ) değil, deformasyonun zaman içindeki değişimine de bağlıdır. Diğer bir deyişle, asfalt betonu çimento betonunda olduğu gibi sabit bir elastisite modülü ve Poisson oranına sahip değildir. Asfalt betonunda elastisite modülü (E), sıcaklığa bağlı olarak geniş bir aralıkta değişim gösterir. Düşük sıcaklıklarda elastisite modülü 5.000 ila 10.000 Mpa arasında değerler alırken yüksek sıcaklıklarda 500 ila 2.000 MPa arasında değişir. Üstyapı projelendirme yöntemleri ise genellikle elastik davranış varsayımına dayandığından esnek üstyapıların projelendirilmesi rijit üstyapıların projelendirilmesiyle karşılaştırıldığında daha zordur. Bundan başka, yolun takviye edilmesi planlanırken, taşıma gücü açısından en elverişsiz

koşulların dikkate alınması gerekli olduğundan bu güçlük yolun takviye edilmesi sırasında da kendini gösterir. Taban zemini genellikle, don çözülmesinin meydana geldiği ilkbahar mevsiminin başlangıcı ile yağışların fazla olduğu sonbahar mevsimi sonlarında kolayca deforme olan bir yapıda iken bitümlü kaplama tabakası ise en sıcak mevsim olan yazın en düşük taşıma gücüne sahiptir. Dolayısıyla, yolun hangi mevsimde en zayıf durumda olduğunu belirlemek güçtür [12].

Bitümlü bağlayıcıların yaşlanması, bağlayıcı içindeki uçucu bileşenlerin zamanla ortamdaki uzaklaşması nedeniyle bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde zamanla meydana gelen değişimler olup geri dönüşsüz bir süreçtir. Bu sürecin sonunda bağlayıcının oksidasyon, ultraviyole, uçucu bileşen kaybı ve fiziksel sertleşme gibi etkiler sonucunda daha kırılğan hâle gelmesi söz konusudur. Yaşlanma, bitümlü karışımın dayanıklılığını, çatlama direncini ve servis ömrünü olumsuz yönde etkiler. Bitümlü bağlayıcı yaşlandıkça penetrasyon değeri düşer, viskozitesi **artar ve yumuşama noktası yükselir**. Sonuç olarak, yaşlanma asfalt betonu kaplamalarda çatlama, soyulma ve yüzey bozulmalarının artmasına yol açar. Bu nedenle hem üretim aşamasında hem de servis ömrü boyunca yaşlanmayı azaltacak önlemler alınmalıdır. Dolayısıyla bitümlü bağlayıcıların yaşlanma davranışının anlaşılması, üstyapı tasarımı ve bakım stratejilerinin geliştirilmesi bakımından büyük önem taşır. Diğer taraftan, taşıtlardan yola dökülen motorin, benzin ve yağ gibi maddeler de bitümlü bağlayıcıların kimyasal yapısında değişikliklere neden olur. Rijit üstyapılarda ise bu tür sakıncalar söz konusu değildir [13].

Bitümlü karışımların iskeletini oluşturan agregalar, karışımın stabilitesi, rijitliği ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Uygun tane boyutu dağılımı, karışımın boşluk oranını, yoğunluğunu ve sıkışabilirliğini belirler. Agregaların yüzey pürüzlülüğü ve şekli, bitümlü bağlayıcının agregalara yapışma kalitesini etkileyen başlıca faktörlerdir. Agregaların kalitesinin yüksek sayılabilmesi için sağlam, aşınmaya karşı dayanıklı, su emme oranının düşük ve donma-çözülme çevrimlerine karşı dirençli olması gerekir.

Esnek üstyapılarda temel ve alt temel tabakaları, tekerlek yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri taban zemini üzerine yayarak onun taşıyabileceği seviyelere indirgemekle yükümlüdürler. Bu tabakalar, genellikle granüler veya stabilize edilmiş malzemelerden oluşur. Granüler malzemelerden oluşan tabakalar, çoğunlukla kırmataş ve kum-çakıl malzemeyle teşkil edilmekte olup taşıma gücü ve drenaj sağlamak amacıyla kullanılırlar. Tane boyutu dağılımı, sıkıştırılabilirlik ve drenaj özellikleri performansı belirleyen temel etkenlerdir. Stabilize tabakalar ise çimento, kireç veya bitüm katkılarıyla rijitliği artırılmış tabakalar olup hem

dayanım hem de deformasyon kontrolü açısından üstyapı bütünlüğünü güçlendirirler. Bitümlü temel karışımları veya çimento ile stabilize edilmiş karışımlar bu tabakalarda en çok kullanılan malzemelerdir. Uygun şekilde drene edilmeyen alt temel tabakaları, özellikle don etkisi ve suya doygunluk durumlarında ciddi bozulmalara neden olabilir. Temel ve alt temel tabakalarında malzeme seçimi, taban zemininin taşıma gücü, drenaj koşulları, iklimsel koşullar ve ekonomik faktörler dikkate alınarak gerçekleştirilir.

Üstyapının altında yer alan taban zemini, sistemin taşıma kapasitesini belirleyen en zayıf bölümdür. Zeminin CBR değeri, elastisite modülü, su içeriği ve donma-çözülme davranışı, üstyapı tasarımının temel girdilerindedir.

Rijit üstyapılarda esas yük taşıyıcı eleman yüksek basınç dayanımına sahip Portland çimentosu betonu olup çimento, su, ince ve iri agrega ile gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddelerinden oluşur. Betonun performansı, su/çimento oranı, kür koşulları, çimento türü ve katkı maddeleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Basınç dayanımı genellikle 30-50 MPa arasında değerler alır. Betonun çekme dayanımı ise düşük olup basınç dayanımının yaklaşık %10-15'i düzeyindedir. Bu yüzden beton plaklarda çekme gerilmelerinin denetim altında tutulması rijit üstyapı tasarımının en kritik aşamasıdır. Betonun elastisite modülü 25-40 GPa aralığında değerler alır. Bu değerler oldukça yüksek olup yükleri geniş bir alana yayabilir. Diğer bir deyişle, rijit üstyapılarda beton plaktan alt temel tabakasına ve taban zeminine iletilen gerilmeler esnek üstyapılarla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Rijit üstyapılar bu nedenle zeminin taşıma gücünün düşük olduğu yerlerde daha avantajlıdır. Ancak betonun çekme dayanımı düşük gevrek bir malzeme olması, derz ve donatı detaylarının doğru bir şekilde tasarlanmasını gerektirir [10].

Rijit üstyapılarda beton plaklar arasında ısıl genleşme ve büzülmeden kaynaklanan gerilmeleri dengelemek için gerekli olan derzler bırakılır. Derzlerin aralıkları, plak kalınlığı ve çevresel koşullara göre belirlenir. Termal genleşme katsayısı ve rötre davranışı da beton plak boyutlarının ve derz aralıklarının belirlenmesinde dikkate alınan faktörlerdir. Betona ilave edilen kimyasal ve mineral katkıları, işlenebilirlik, dayanıklılık ve çatlama direnci açısından önemli iyileşmeler sağlarlar. Lif katkılı betonlar, erken yaşta çatlama riskini azaltarak yüzey bütünlüğünü korurlar.

Beton plaklar arasında yük aktarımını sağlamak amacıyla kayma demiri adı verilen çelik çubuklar kullanılır. Kayma demirleri, tekerlek yükü bir plaktan diğerine geçtiğinde seviye farklarının oluşmasını engeller. Ayrıca bağlantı demiri adı verilen donatılar, plakların birbirinden

ayrılmasını önler. Derz dolgu malzemeleri ise suyun beton plağın altına sızmasını engelleyerek taban zemininin ve varsa alt temel tabakasının zayıflamasının önüne geçer.

Rijit üstyapılarda beton plağın altına yerleştirilen temel veya alt temel tabakası, beton plağın düzgün oturmasını sağlamak, drenajı kolaylaştırmak ve don etkilerini azaltmak amacıyla kullanılır. Genellikle granüler stabilize malzeme veya çimentolu stabilize tabakadan teşkil edilir. Bu tabakanın düzgünlüğü ve sıklığı, beton plağın uzun ömürlü performansı için kritik bir parametredir.

Esnek ve rijit üstyapıların yük taşıma ve gerilmeleri dağıtma biçimleri farklı olduğundan bu üstyapıların yapısal analiz açısından tasarım yöntemleri de farklılıklar göstermektedir. Esnek üstyapılar, yükleri alttaki tabakalara kademeli olarak aktaran çok tabakalı sistemler olduklarından bu üstyapıların tasarımında genellikle **tabakalı elastisite teorisi** esas alınır. Bu teoride her tabaka, belirli bir elastisite modülüne ve Poisson oranına sahip, elastik davranış gösteren bir ortam olarak kabul edilir. Burada amaç, dingil yüklerinin etkisinde taban zemini üzerinde oluşan gerilmelerin izin verilen sınır değerleri aşmamasını sağlamaktır. Bu prensibe dayalı olarak geliştirilen **Burmister teorisi**, modern esnek üstyapı analizlerinin temelini oluşturmaktadır. Günümüzde **KENLAYER** ve **EL-SYM5** gibi bilgisayar programları bu teorik çerçeveyi esas alarak gerilme ve şekil değiştirme analizleri yapmaktadır [14].

Tarihsel olarak esnek üstyapı tasarımı, daha çok saha gözlemlerine dayalı **ampirik yöntemlerle** gerçekleştirilmiştir. Özellikle **AASHTO 1993** yöntemi, belirli trafik yükleri altında yol performansının saha gözlemleri ve deneysel verilerle ilişkilendirildiği bir ampirik yaklaşıma dayanmaktadır [5]. Ancak günümüzde, yalnızca saha gözlemleri ve deneysel verilere dayalı yöntemlerin yetersiz kalması nedeniyle, mekanistik analizlerle ampirik verilerin birleştirildiği **Mekanistik Ampirik Tasarım Yöntemi** yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, hem yükleme koşullarına bağlı gerilme ve deformasyon analizlerini hem de uzun dönem performans tahminlerini dikkate alarak daha güvenilir bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır [15].

Rijit üstyapılar ise yükleri, yüksek rijitliğe sahip beton plaklar aracılığıyla daha geniş bir alana yayarak taşır. Bu nedenle, rijit üstyapıların yapısal tasarımı genellikle elastik plak teorisine dayanmaktadır. Bu yaklaşımın temelini ise Westergaard tarafından geliştirilen model oluşturmaktadır. Bu modele göre beton kaplama, elastik bir taban zemini üzerine oturan, homojen ve izotrop bir plak olarak kabul edilir. Dingil yüklerinin etkisinde plağın orta noktasında, kenarında ve köşesinde meydana gelen

eğilme momentleri ve çekme gerilmeleri hesaplanır. Zeminin rijitliği ise taban reaksiyon modülü (k) ile temsil edilir [16].

Rijit üstyapı tasarımında da ampirik ve yarı-ampirik yöntemler kullanılmaktadır. **AASHTO 1993** yöntemi, sahada gözlemlenen performans verilerinden elde edilen bağıntılara dayanarak beton plakaların kalınlıklarının ve donatı gereksinimlerinin belirlenmesini sağlar [5]. Günümüzde rijit üstyapılar için de **Mekanistik Ampirik Tasarım Yöntemi** kullanılmakta, böylece mekanistik analizlerle ampirik performans modelleri bir araya getirilmektedir.

Sonuç olarak, esnek üstyapıların tasarımında **tabakalı elastisite teorisi** kullanılırken rijit üstyapıların tasarımında ise **elastik plak teorisi** esas alınmaktadır. Esnek üstyapılar genellikle viskoelastik davranış gösterdiklerinden sıcaklık ve yükleme hızı gibi çevresel değişkenlerden daha fazla etkilenirler. Buna karşın, rijit üstyapılar elastik davranış sergiler ve sıcaklık değişimlerinden neredeyse hiç etkilenmezler. Bu nedenle, esnek üstyapıların tasarımı daha karmaşık ve çevresel koşullara daha duyarlı iken, rijit üstyapıların tasarımı daha deterministik olup plak davranışına dayalı bir karakter taşımaktadır.

3.2. Trafik Yüğü ve İklim Koşullarına Dayanıklılık

Esnek üstyapılar, birbiriyle etkileşim içinde olan birden fazla tabakadan meydana gelir. Trafik yüklerinin artması ve ağır taşıt oranlarının yükselmesi, esnek üstyapılarda bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda yumuşaması nedeniyle tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara, çatlaklara ve yüzey bozulmalarına yol açabilir. Bu nedenle ağır taşıt trafiği fazla olan ve özellikle sıcak iklime sahip bölgelerde yer alan karayollarında esnek üstyapıların ömrü önemli ölçüde kısalabilir.

Rijit üstyapılar, yüksek eğilme rijitliğine sahip beton plaklardan oluşur. Rijit üstyapılar, yüksek sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenirler. Betonun termal genişmesi derzler aracılığıyla kontrol altına alındığından yüzeydeki bozulmalar minimum düzeyde kalmaktadır. Ancak düşük sıcaklıklarda donma-çözülme döngülerinin sık yaşandığı bölgelerde derz dolgu malzemelerinin yıpranması söz konusu olabilir ve beton yüzeylerde pul pul dökülme görülebilir. Buna rağmen, rijit üstyapıların iklimsel etkiler karşısında genellikle daha kararlı bir performans sergilediği kabul edilmektedir.

Trafik hacminin ve yıllık trafik artış oranının yüksek olduğu, ayrıca trafik içerisinde ağır taşıtların fazla bulunduğu yollarda **rijit üstyapılar** daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Buna karşılık, trafik artış hızının düşük olduğu durumlarda, **kademeli inşaata** elverişli olan **esnek üstyapı**

pılar tercih edilerek gelişen trafik taleplerine uyum sağlamak mümkün olmaktadır. Trafik arttıkça mevcut makadam bir yolu önce sathi kaplamalı bir esnek üstyapıya daha sonra da beton asfalt kaplamalı bir esnek üstyapıya dönüştürmek ve böylece gerek ağırlık gerekse sayı olarak yüksek hacimdeki trafiğe cevap verebilecek bir yapı elde etmek kolaydır. Buna karşılık, **beton yolların kademeli inşaata uygun olmamaları nedeniyle** mevcut yolların iyileştirilmesinde kullanılmaları genellikle mümkün değildir. Bunun başlıca sebebi, iyi nitelikte bir temel tabakasının varlığında dahi, beton plak kalınlığının **en fazla dörtte bir oranında** azaltılabilmesidir. Bu nedenle, rijit üstyapılar çoğunlukla yeni yolların yapımında tercih edilirken mevcut yolların takviyesinde ise esnek üstyapılar daha ekonomik ve uygulanabilir bir seçenek sunmaktadır [13].

Esnek üstyapıların kaplama ve sıcak bitümlü temel tabakalarının davranışı, sıcaklık değişimlerinden büyük oranda etkilenir. Bu tabakaların yapımında kullanılan bitümlü bağlayıcının viskoelastik karakteri, sıcaklık arttıkça tabakaların yumuşamasına, sıcaklık azaldıkça ise sertleşip kırılma eğilimine girmesine neden olur. Bu yüzden, sıcak yaz mevsiminde tekerlek izi ve yüzey dalgalanmaları meydana gelirken soğuk kış mevsiminde termal çatlaklar oluşur. Ayrıca donma-çözülme döngülerinde tabaka ayrışmaları ve su etkisiyle soyulmalar meydana gelir [17]. Dolayısıyla, mevsimler arasında büyük sıcaklık farklarının olduğu karasal iklime sahip bölgelerde, hem yaz aylarında tekerlek izi ve yüzey dalgalanmalarının oluşumuna karşı dirençli olan hem de kış aylarında çatlama eğilimi göstermeyen bir bitümlü karışımın tasarlanması oldukça zordur. Bu tür iklimlerde, sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenen **rijit üstyapıların** kullanılması genellikle daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, bu tür bölgelerde rijit üstyapıların kullanılması bazı sorunlara da yol açabilir. Rijit üstyapılarda iklimsel etkiler, esas olarak sıcaklık değişimleri sonucu termal genleşme ve büzülmenin meydana gelmesi şeklinde ortaya çıkar. Beton plaklar arasındaki dilatasyon derzleri, bu hacim değişimlerini karşılamak amacıyla tasarlanıp kullanılır. Uygun derz genişliği ve dolgu malzemesi seçilmezse, çatlak oluşumu veya plak yükselmesi gibi bozulmalar bu üstyapılarda görülebilir [18]. Özellikle düşük sıcaklıklarda, beton plaklar arasındaki dilatasyon **derzleri** önemli ölçüde açılabilir. Bu durum, **pompaj olayının** meydana gelmesini kolaylaştırır. Bilindiği gibi, pompaj özellikle ince taneli taban zemininin suya doygun hâle gelmesiyle birlikte, **su-toprak karışımının yüzeye fıskırması ve plak altlarında boşluk oluşması** şeklinde tanımlanır. Bu sorunun önemli ölçüde önlenmesi için, derz boşluklarının uygun elastik malzemelerle doldurulması, plak kenarlarının yatay hareketlerini sınırlamak amacıyla **kayma demirlerinin** kullanılması ve beton plak ile taban zemini arasında **granüler malzemeden temel veya alt temel tabakasının** yerleştirilme-

si gibi çeşitli önlemler alınabilir. Diğer yandan, **bitümlü kaplamaların uygulanacağı taban zemininin** kuru veya en fazla %2 oranında nemli olması ve hava sıcaklığının 15 °C'den fazla olması gerekir. Bu durum, özellikle yağışlı bölgelerde bitümlü kaplama ve temel tabakalarının uygulanabileceği süreyi önemli ölçüde kısaltır. Buna karşılık, **beton yollar** nemli zeminler üzerine de inşa edilebildiklerinden, bu tür bölgelerde yapım süresi ve iklimsel kısıtlamalar açısından avantaj sağlamaktadır [13].

3.3. Taşıma Kapasitesi ve Gerilme Dağılımı

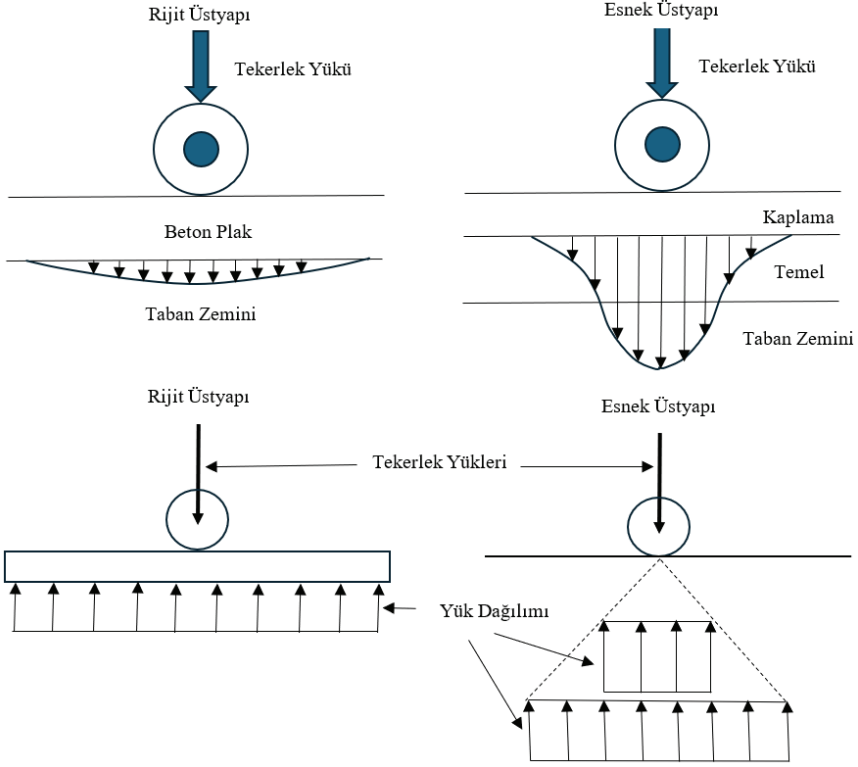
Karayolu üst yapısının temel amacı, tekerlek yüklerinden kaynaklanan gerilmeleri daha geniş alanlara yayarak taban zemininin taşıyabileceği seviyeye indirmektir. Bu işlev, üst yapının türüne bağlı olarak farklı mekanizmalarla yerine getirilir. Esnek üst yapılar, yükleri çok tabakalı elastik sistem mantığına göre, tabakalar arasında kademeli olarak dağıtır. Rijit üst yapılar ise, yüksek eğilme rijitlikleri sayesinde yükleri geniş bir alana yayarak alt tabakalarda düşük gerilmeler meydana getirir. Üst yapının aynı zamanda, bu işlevi yerine getirirken, kendi içinde de tahrip olmaması gerekir. Yolların tahrip olma mekanizması oldukça karmaşık olsa da bunun başlıca iki ana sebepten meydana geldiğini söylemek mümkündür [13].

- a. Taban zemininde veya karayolu üst yapısı tabakalarının birinde oluşan gerilmelerin, malzemenin taşıma gücünü aşması.
- b. Taban zemininde veya karayolu üst yapısı tabakalarının birinde oluşan yüksek basınç gerilmelerinin ve su muhtevastaki değişimlerin büyük oturmalara yol açması ve üstteki tabakaların bu oturmalara uyum sağlayamaması nedeniyle çatlakların ve kopmaların meydana gelmesi.

Esnek ve rijit üst yapılar, tekerlek yüklerini taban zeminine iletme ve tahrip olma şekilleri bakımından farklılıklar gösterir. Bu farklılıklar Şekil 6'da görülmektedir.

Esnek üst yapı, birbiriyle etkileşim içinde olan alt temel, temel ve kaplama tabakalarından meydana gelir ve bu tabakaların birbirlerine her noktada değdikleri kabul edilir. Alt temel ve temel tabakaları genellikle çekme dayanımı yüksek olmayan malzemelerden teşkil edilirken kaplama tabakasının teşkilinde kullanılan malzemeler ise nispeten daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Tekerlek yükünün yüzeydeki bitümlü bağlayıcı kaplama tabakasından alt tabakalara ve nihayet taban zeminine doğru iletilmesi, zemin içerisindeki klasik yük dağılımı prensiplerine benzer şekilde gerçekleşir. Tekerlek yükleri etkisi altında esnek üst yapı belirli bir deformasyona uğrar ve her tabaka, kendisine iletilen yükü bir

alttaki tabakaya daha geniş bir alana yayarak aktarır. Böylelikle taban zeminine ulaşan yük, nispeten geniş bir alana yayılmış olur. Diğer bir deyişle, esnek üstyapılarda her tabaka, yükün bir kısmını taşır ve deformasyonun belirli bir bölümünü sönümler.



Şekil 6. Rijit ve esnek üstyapılarda gerilme dağılımı

Esnek üstyapılarda meydana gelen gerilmeler, yüzeyden taban zeminine doğru inildikçe şiddet olarak azalır. Basınç karakterinde olan düşey yöndeki gerilme (σ_z), tekerlek yükünün etkidiği doğrultu boyunca yüzeye en yakın olan kaplama tabakasında en yüksek değerleri alırken derinlik arttıkça şiddeti azalır. Yatay yöndeki gerilmeler (σ_x ve σ_y) ise, yine tekerlek yükünün etkidiği doğrultu boyunca tabakaların üst kısımlarında basınç, alt kısımlarında da çekme karakterindedir. Bu gerilmelerin de şiddeti derinlik arttıkça azalır. Dolayısıyla, esnek üstyapılarda gerilme dağılımı sürekli ve kademeli olup, gerilmelerin şiddeti, yüzey tabakasından taban zeminine doğru inildikçe azaldığından, üstyapı tabakalarında kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılımına uygun olacak şekilde seçilmelidir. Esnek üstyapı iyi projelendirilmediği takdirde, yukarıda belirtilen iki nedenden biri yolun bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle, taban zemininin taşıma gücü, esnek üstyapının hem toplam

kalınlığını hem de tasarım ömrünü doğrudan belirleyen temel faktörlerden birisidir. Ayrıca, esnek üstyapıların taşıma kapasitesi, tabakaların kalınlıkları, esneklik modülü değerleri (E) ve bağlayıcının sıcaklığa bağlı rijitliği ile doğrudan ilişkilidir. Tekerlek yükü arttıkça, yüzeydekiler başta olmak üzere deformasyonlar artar. Yük tekrarları sonucu yorulma çatlakları veya kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir. Yüksek taşıma kapasitesi, daha kalın üstyapı tabakalarıyla sağlanır. Dolayısıyla, zayıf zemin koşullarında, taban zeminine iletilen yükleri azaltmak amacıyla üstyapı tabakalarının kalınlığı artırılabilir. Ancak bu yaklaşım, projenin ekonomik verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir.

Rijit üstyapılar, taban zemini veya alt temel üzerine inşa edilen beton plaktan oluşur. Yaklaşık 25-40 GPa aralığında değerler alan beton plağın elastisite modülü, esnek üstyapılardaki bitümlü karışımlara göre birkaç kat daha yüksektir. Bu nedenle, rijit üstyapılar, trafik yüklerini esnek üstyapılara göre taban zemine çok daha geniş bir alana yayarak aktarır.

Rijit üstyapılarda beton plak, elastik zemine oturan bir kiriş gibi davranır ve yükün plağın üzerinde etki ettiği bölgeye bağlı olarak plak alt yüzeyinde veya üst yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Trafik yükü beton plağın ortasına veya kenarına etki ettiğinde çekme gerilmeleri beton plağın alt yüzeyinde meydana gelirken yük beton plağın köşesine etki ettiğinde ise çekme gerilmeleri beton plağın üst yüzeyinde oluşur. Beton plağın kırılmasına neden olabilecek kritik çekme gerilmeleri genellikle plağın kenarlarında veya köşelerinde meydana gelir. Bu davranış, Westergaard tarafından 1926 geliştirilen elastik tabanlı plak teorisine açıklanmıştır [19]. Westergaard'ın göz önüne aldığı yükleme durumları Şekil 7'de gösterilmektedir. Rijit üstyapılar için önemli bir teorik analizin sunumunu gerçekleştiren Westergaard, burada Portland çimentosundan yapılmış beton plakların homojen, izotrop ve elastik katılar olarak davrandığını ve taban zeminlerinin ise bir sıvı gibi tepki verdiğini varsaymıştır. Sonuç olarak, plağın herhangi bir noktadaki defleksiyonları, yükün ve taban zemini reaksiyon modülünün bir fonksiyonudur. Taban zemini reaksiyon modülü ise taban zemininin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve toprağın dayanım modülü ile ilişkilidir. Ayrıca bu teori, rijit üstyapılarda plak kalınlığı ile betonun rijitliğinin ve Poisson oranının yük taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir [16].

Beton plağın, taban zeminine sürekli temas halinde bulunması durumunda taşıyıcı bir eleman olarak görev yapması mümkündür. Ancak taban zemininin farklı nedenlerle yer yer oturması veya çökmesi söz konusu olursa, rijit beton plak zeminin deformasyonuna uyum sağlayamaz ve bu bölgelerde kiriş gibi çalışmaya başlar. Betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle, bu bölgelerde eğilmeden kaynaklanan çekme ge-

rilmeleri dayanım sınırını aştığında beton plak çatlak veya kırılır. Rijit üstyapıların bozulması, esasen bu mekanizmaya dayanmaktadır.

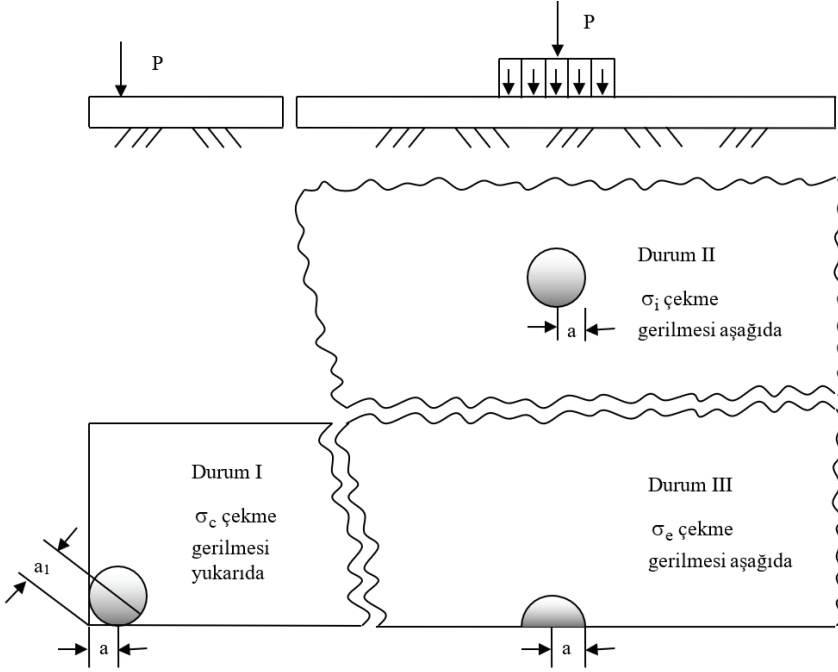
Bu açıklamalardan anlaşılacağı üzere, esnek üstyapılar (a) ve (b) olarak ifade edilen iki temel nedenle bozulmaya maruz kalırken, rijit üstyapıların bozulması yalnızca (b) nedenine, yani taban zemininin deformasyonlarına bağlı olarak gerçekleşmektedir [13].

Beton yolun taban zemini ile sürekli temas halindeyken elastik zemine oturan kiriş gibi çalışması, taşıma gücünün taban zemininin dayanımına çok bağlı olmayacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden, rijit üstyapıların zayıf taban zeminleri söz konusu olduğunda performansları, esnek üstyapılara göre daha yüksek olmaktadır [13].

3.4. Bakım ve Onarım Gereksinimleri

Esnek üstyapıların en önemli dezavantajlarından birisi, sık sık bakım yapılmasını gerektirmeleridir. Trafik yükleri ve iklim koşullarına bağlı olarak yüzeyde çatlak, deformasyon ve bozulmalar sık görülür. Ancak bu bakım işlemleri genellikle yeniden kaplama, dolgu veya yama yapma gibi yüzeysel işlemler olup, yolun kısa sürede trafiğe açılmasına olanak tanır.

Rijit üstyapılarda bakım gereksinimi çok daha seyrek olmasına rağmen oluşan hasarların onarımı genellikle karmaşık ve maliyetlidir. Beton plaklarda oluşan çatlakların onarımı veya derz tamiri, yolun uzun süre kapalı kalmasına neden olabilir. Dolayısıyla, rijit üstyapılar daha uzun ömürlü olsalar da bakım sürecinin yönetimi açısından daha dikkatli olmayı gerektirir [16].



Şekil 7. Westergaard yükleme durumları [16]

3.5. Hizmet Ömrü ve Performans Kriterleri

Üstyapı performansının değerlendirilmesinde en sık kullanılan göstergelerden biri Hizmet Kabiliyeti İndeksi (Present Serviceability Index- PSI)'dir. Esnek üstyapılarda PSI değeri genellikle 10 ila 15 yıl içinde hızla düşer ve kaplama tabakasının yeniden yapılması ihtiyacı ortaya çıkar. Rijit üstyapılarda ise PSI düşüşü daha yavaş gerçekleştiğinden bu üstyapıların hizmet ömrü 20 ila 40 yıl arasında değişir.

Performansın değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer kriter Uluslararası Pürüzlülük İndeksi (International Roughness Index - IRI) değeridir. Rijit üstyapılar, düzgün yüzey özellikleri sayesinde daha düşük IRI değerlerine sahip olduklarından sürüş konforu ve yakıt tüketimi açısından avantaj sağlarlar.

3.6. Trafikğin Engellenmesi

Beton yolların yapımı, esnek üstyapılarla karşılaştırıldığında daha uzun süreler gerektirir. Betonun priz sürecini tamamlayarak yeterli dayanımı kazanması için yapım işleminin ardından genellikle 7-14 gün kür süresi gereklidir. Bu süreçte yolun kısmen veya tamamen trafiğe kapatılması gerekir. Bu da yoğun trafiğe sahip bölgelerde önemli gecikmelere ve

dolayısıyla büyük ekonomik kayıplara yol açabilir. Yolun tamamen trafiğe kapatılması halinde, geçici bir servis yolunun inşa edilmesi gerekeceğinden, bu durum ilave maliyetlerin ortaya çıkmasına sebep olur. Hızlı priz alan çimentoların kullanıldığı beton teknolojileri ve prefabrik beton yollar bu süreyi azaltabilse de maliyeti önemli ölçüde artırır.

Buna karşılık, esnek üstyapıların yapımı, rijit üstyapılara göre daha kısa sürede tamamlanabilir. Dolayısıyla, esnek üstyapılar, yapım süresinin kısalığı bakımından önemli bir avantaja sahip olup, bağlayıcının yeterli düzeyde kurumamasından sonra birkaç saat içinde trafiğe açılabilirler. Bu nedenle esnek üstyapılar, özellikle trafiğin yoğun olduğu şehir içi yollarda veya gece saatlerinde onarımın yapılabileceği arterlerde tercih edilirler. İnşaat sürecinde modüler ve aşamalı yapım mümkün olduğundan yolun bir kısmı trafiğe açık bırakılarak diğer kısmında çalışma gerçekleştirilebilir. Ancak, esnek üstyapılar rijit üstyapılara kıyasla bozulmalara karşı daha duyarlı olduklarından, daha sık bakım ve onarıma ihtiyaç göstermektedir.

Yüksek düzeyde konforun ve kesintisiz trafik akışının arzu edildiği otoyol ve çevre yolu gibi yol türlerinde esnek üstyapıların tercih edilmesi, sık bakım ve onarım gereksiniminden kaynaklanan trafik aksamaları nedeniyle sürücülerde memnuniyetsizlik yaratabilir. Buna karşılık, doğru şekilde inşa edilmiş beton yollar, yüksek dayanıklılıkları ve düşük bakım gereksinimleri yüzünden otoyol ve çevre yollarında kullanım için daha elverişli bir alternatiftir [13].

3.7. Konfor ve Güvenlik

Karayolu üstyapılarının performansı kullanıcı konforu ve sürüş güvenliği açısından da değerlendirilmektedir [14, 20]. Üstyapı türü, yol yüzeyinin düzgünlüğünü, pürüzlülüğünü, gürültü düzeyini ve sürüş dinamiklerini doğrudan etkileyerek hem sürücü konforunu hem de trafik güvenliğini etkilemektedir [21]. Bu bağlamda, esnek ve rijit üstyapılar gerek yapısal gerekse fonksiyonel özellikleri bakımından birbirinden farklı performans sergilerler. Daha önce de ifade edildiği gibi, esnek üstyapılar kendi içinde sathi kaplamalı ve beton asfalt kaplamalı olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılar ve rijit üstyapılar, iyi yapılmaları koşuluyla, genellikle güvenli, konforlu ve zevkli bir seyir sağlarlar. Sathi kaplamalı esnek üstyapıların ise yüzey pürüzlülüğü fazla olduğundan titreşim ve gürültü düzeyleri yüksek olup özellikle yüksek hızlarda düşük sürüş konforu sunarlar. Siyah yüzeyli esnek üstyapıların aksine beton yolların açık renkleri nedeniyle gece görünürlüğü yüksektir.

Kullanıcı konforu, yüzey düzgünlüğü, gürültü seviyesi, titreşim, parlamalar ve yüzey homojenliği gibi faktörler göz önüne alınarak değerlendirilir. Bu unsurlar hem sürücü hem de taşıt açısından farklı etkiler doğurur. Sathi kaplamalı esnek üstyapıların yüzeyleri çok pürüzlü olduğundan bu üstyapıların titreşim ve gürültü düzeyleri yüksektir. Yüzeydeki agregaların zamanla gevşemesi, konforun azalmasına neden olmasının yanında taşıtların taş fırlatma olasılığını da arttırması sebebiyle seyir güvenliğini tehlikeye atar. Diğer taraftan, beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılar, homojen ve iyi sıkıştırılmış yüzey dokuları sayesinde yüksek düzeyde konfor sağlar. Yüzeyin düzgünlüğü ve sürekliliği hem titreşim hem de gürültü düzeyini azaltır [22]. Bu nedenle, şehirlerarası bölünmüş yol ve otoyol ağlarında en fazla tercih edilen kaplama türüdür. Rijit üstyapılar ise, başlangıçta düzgün bir yüzey sağlar. Ancak zamanla derz bölgelerinde oluşan seviye farkları, darbeleri geçişler ve çatlaklar konforu azaltır. Ayrıca, beton yüzeylerin güneş ışığını güçlü biçimde yansıtması sürücüde görsel olarak rahatsızlık yaratabilir. Bu nedenle, konfor açısından rijit üstyapılar beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılarla karşılaştırıldığında bazı durumlarda biraz daha sınırlı performans göstermektedir.

Sürüş güvenliği, taşıt lastiği-yol etkileşimi, kayma direnci, drenaj, fren mesafesi ve iklimsel koşullara duyarlılıkla ilişkilidir [23]. Sathi kaplamalı esnek üstyapılar, yüzeyleri fazla pürüzlü olduğundan kayma direnci bakımından avantajlıdırlar. Bu durum, özellikle yağışlı havalarda fren güvenliği açısından arzu edilir [24]. Ancak yüzeyde gevşek agregaların bulunması durumunda taşıt kontrolü güçleşebilir. Öte yandan, beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılar, başlangıçta iyi bir yüzey drenajı ve yeterli kayma direnci sağlarlar. Ancak zamanla aşınma sonucu yüzey dokusu kaybolduğunda kayma direnci azalır. Bu nedenle, belirli aralıklarla mikro kaplama veya aşınma tabakası yenilemesiyle yüzeyin sürtünme katsayısının korunması gerekir [20]. Yüzey drenajı ve eğim tasarımı yeterliyse güvenlik seviyesi yüksektir. Rijit üstyapılar ise, genellikle biraz daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptirler. Bu durum, özellikle ıslak ve buzlu yüzey koşullarında lastiklerin yol ile etkileşimini zayıflatabilir. Derz bölgelerinde su birikmesi veya yüzeydeki mikro çatlaklardan kaynaklanan buzlanma, kayma riskini artırabilir. Bu dezavantaj, yüzeyin tıraşlanması yoluyla azaltılabilir [25].

3.8. Genel Teknik Değerlendirme

Teknik açıdan değerlendirildiğinde, rijit üstyapılar uzun ömür, yüksek taşıma kapasitesi ve düşük deformasyon oranı bakımından üstünlük gösterirler. Diğer taraftan, esnek üstyapılar daha hızlı inşa edilebilme, kolay onarım ve düşük ilk yapım maliyeti gibi avantajlara sahiptirler. Teknik ölçütler esas alınarak üstyapı tipi seçimi yapılırsa, taşıma kapa-

sitesi düşük taban zeminine sahip, trafik hacminin yüksek ve ağır taşıt oranının fazla olduğu, ayrıca sıcaklık değişimlerinin belirgin olduğu durumlarda rijit üstyapı çözümleri tercih edilmektedir. Buna karşılık, trafik hacminin yüksek ancak yıllık artış oranının düşük olduğu kesimlerde ve güçlendirme uygulamalarında esnek üstyapıların daha elverişli olduğu değerlendirilmektedir. Dolayısıyla hangi üstyapı türünün uygun olacağı hususu sadece mühendislik parametrelerine göre değil, aynı zamanda trafik, iklim ve bakım yönetimi koşullarına da bağlıdır.

4. EKONOMİK KARŞILAŞTIRMA

Karayolu üstyapılarında teknik performans kadar ekonomik verimlilik de üstyapı tipi seçimini doğrudan etkileyen önemli bir kriterdir. Herhangi bir üstyapı türünün “ekonomik” olarak değerlendirilebilmesi, yalnızca ilk yapım maliyeti açısından değil, aynı zamanda hizmet ömrü boyunca ortaya çıkan bakım, onarım ve kullanıcı maliyetleri dikkate alınarak yapılacak yaşam döngüsü maliyet analizi sonucuna bağlıdır. Bu analiz, farklı üstyapı alternatiflerinin ekonomik sürdürülebilirliğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye imkân verir [10].

Ekonomik karşılaştırmaların yapılabilmesi için, farklı dönemlerde yapılan harcamaların aynı zaman dilimine indirgenerek güncellenmesi gerekmektedir. Bu güncelleştirme işleminin yapılabilmesi için faiz ve iskonto hesaplarından yararlanılır. Kullanılacak iskonto oranının belirlenmesi, ülkelerin makroekonomik politikalarına bağlı bir husustur. Endüstrileşmiş ülkelerde genellikle %8 gibi düşük oranlar tercih edilirken, gelişmekte olan ülkelerde bu oranlar çoğunlukla %12 düzeyinde uygulanmaktadır. Ekonomik ölçütler, toplam ekonomik maliyet, kullanıcı harcamaları, finansman kaynakları ve iskonto oranı ile enerji tüketimi olmak üzere dört ana başlık altında ele alınmaktadır [13].

4.1. Toplam Ekonomik Maliyet

Karayolu üstyapı türünün seçiminde göz önünde bulundurulacak en önemli husus, nispeten uzun bir proje ömrü için belirlenen toplam ekonomik maliyettir. Dolayısıyla, karayolu üstyapılarının ekonomik değerlendirilmesinde yalnızca ilk yapım maliyetlerinin değil, bakım ve onarım faaliyetlerinin maliyetleri ile tüm hizmet ömrü boyunca kullanıcılar açısından oluşacak diğer maliyetlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda esnek ve rijit üstyapılar hem ilk yapım maliyetleri hem de uzun dönem bakım ve onarım maliyetlerinin yanında diğer kullanıcı maliyetleri açısından farklı ekonomik karakteristikler göstermektedir.

4.1.1. İlk yapım maliyeti

İlk yapım maliyeti, genellikle tasarım aşamasında üstyapı tipini belirlemede en önemli faktördür. Bu maliyet, esas olarak karayolu üstyapısı kalınlığına, taban zemininin dayanımına ve trafik yüküne, malzeme maliyetine ve işin uygulama maliyetine bağlı olarak değişir.

Bir üstyapının ilk yapım maliyetinin hesaplanabilmesi için öncelikle kullanılacak malzemelerin türlerinin, miktarlarının ve kaynaktaki maliyetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, mevcut ve potansiyel yeni agrega, donatı çeliği, su, bitümlü bağlayıcı ve Portland çimentosu kaynaklarının yanı sıra, kısa ve uzun vadede değerlendirilebilecek yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve plastik gibi endüstriyel atık ürünlerin miktarlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Ayrıca mevcut malzemelerin, standart kalite kontrol yöntemleri doğrultusunda sınıflandırılması ve kaynaktaki fiyatlarının doğru şekilde belirlenmesi gereklidir. Bu veriler elde edildikten sonra, tasarlanan üstyapıda kullanılacak malzeme türleri ve miktarları belirlenerek toplam yapım maliyeti hesaplanır.

Malzeme miktarlarının hesaplanabilmesi için her iki üstyapı türünde de öncelikle tabaka kalınlıklarının ve proje alanının belirlenmesi gerekir. Esnek üstyapılarda tabaka kalınlıkları arttıkça bitümlü sıcak karışım ve granüler tabakalarda ihtiyaç duyulan malzeme miktarı ton bazında yükselir. Benzer şekilde rijit üstyapılarda beton plak ve varsa alt temel kalınlığı arttıkça, beton hacmi ve buna bağlı olarak çimento ile agrega ihtiyacı artar. Dolayısıyla yapım maliyetinin tahmin edilmesi için gerekli ilk adım, her tabaka için hacim hesaplarının yapılmasıdır. Hacim değerleri daha sonra ilgili malzemelerin sıkışmış yoğunlukları ile çarpılarak ton veya metreküp bazında ihtiyaç duyulan kesin miktarlara dönüştürülür.

Malzemelerin kaynaktaki maliyetlerinin belirlenmesi, ilk yapım maliyetinin doğru bir şekilde hesaplanması bakımından kritik öneme sahiptir. Bitümlü karışımlar için bitüm fiyatları uluslararası piyasalardaki petrol fiyatlarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu nedenle güncel bitümlü bağlayıcı fiyatlarının ve bitümlü karışımların plentteki üretim bedellerinin tedarikçilerden alınması gerekir. Granüler malzeme fiyatları ise çoğunlukla taş ocağı işletme maliyetlerine, malzeme kalitesine ve kırma-eleme süreçlerine bağlıdır. Rijit üstyapılarda çimento fiyatları üreticiye ve bölgeye göre değişkenlik gösterir. Agregası fiyatları ise ocak uzaklığına ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

Esnek üstyapıların yapımında kullanılan esas malzemeler, çoğunlukla kaplama tabakalarında kullanılan bitümlü sıcak karışımlar, granüler temel ve alt temel tabakalarında kullanılan agrega malzemeleri ile yüzeysel bağlayıcılardan oluşur. Bitümlü sıcak karışımlar, agrega ile bitümlü bağ-

layıcının plentte belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir ve üstyapının en maliyetli bileşenlerinden biridir. Bununla birlikte bitümlü sıcak karışım kullanılan agrega türü ve kaynağı, bitümlü bağlayıcının viskozitesi, karışım tasarımında öngörülen bağlayıcı yüzdesi ve plent üretim maliyeti toplam maliyet üzerinde belirleyicidir. Ayrıca granüler temel ve alt temel tabakalarında kullanılan kırmataş, çakıl, kum veya stabilize malzemelerin ocaklardan temin edilme maliyetleri, malzeme kalitesi, kaynağa olan uzaklık ve taşıma giderleri de esnek üstyapının ilk yapım maliyetini doğrudan etkiler.

Rijit üstyapılarda ana malzeme beton olduğundan, malzeme bileşenleri daha sınırlı fakat birim maliyetleri daha yüksektir. Beton üretimi için kullanılan çimentonun türü ve birim fiyatı, agrega kaynakları, su kalitesi ve varsa kimyasal katkıların tür ve miktarları rijit üstyapıların temel maliyet bileşenlerini oluşturur. Beton karışımında çimento dozajı arttıkça hem malzeme maliyeti hem de kalite kontrol gereklilikleri artar. Ayrıca rijit üstyapılarda kayma ve bağlantı demirleri, kür malzemeleri ve derz dolgu malzemeleri gibi ek bileşenler yer alır. Bu unsurlar beton kaplamanın performansı için zorunlu olmakla birlikte ilk yapım maliyetini yükselten kalemlerdir. Eğer prefabrike donatı veya özel katkıları kullanılıyorsa, bunların temin edilmesi ve taşınması için yapılan harcamalar da maliyet hesabına dahil edilir. Bundan başka rijit üstyapı temel veya alt temel tabakası da içeriyorsa bu tabakada kullanılan kırmataş, çakıl, kum veya stabilize malzemelerin ocaklardan temin edilme maliyetlerinin de hesaplamalarda göz önünde bulundurulması gerekir.

Agregalar, tüm üstyapı türlerinin temel bileşenleri arasında yer aldıklarından toplam maliyet üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Rijit üstyapılarda betonun yapısal olarak rijit olması yüzünden üstyapı kalınlığının azaltılabilmesi, agrega tüketiminde tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca beton agregasının, bitümlü kaplamalarda kullanılan agregalar kadar yüksek kaliteli olması gerekmediğinden, sağlam agrega kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde temizlik ve granülometri koşullarını karşılaması şartıyla daha düşük kaliteli agregaların kullanılması mümkün olmaktadır. Türkiye’de kullanılan bitümlü bağlayıcıların çoğunlukla asfalt formunda olması ve büyük oranda ithal edilen ham petrolün damıtılması sonucu yan ürün olarak elde edilmesi, döviz harcamasını artıran bir faktördür. Bununla birlikte, petrol rafinerilerinin yaklaşık %80 oranında yabancı kaynaklara bağımlı olarak kurulması da bu durumu pekiştirmektedir. Öte yandan, Portland çimentosunun hammaddesi tamamen yerli kaynaklardan temin edilmekte olup, çimento fabrikalarının kuruluşunda da %100’e yakın oranda yerli kaynakların kullanılması mümkündür [13].

Bir üstyapının ilk yapım maliyetini etkileyen önemli unsurlardan biri de malzemelerin taşınma uzaklığıdır. Hem esnek hem de rijit üstyapıda

taşıma maliyetleri, malzemenin taşınacağı mesafeye bağlı olarak toplam maliyetin önemli bir kısmını oluşturabilir. Bu nedenle ilk maliyet hesabında, malzemenin sahaya taşınması için gereken taşıma birim fiyatlarının ve mesafelerin dikkatle belirlenmesi gerekir. Türkiye’de rafinerilerin az sayıda olması nedeniyle, asfaltın üretim tesislerinden şantiye alanlarına taşınması yüksek maliyetlerle gerçekleşmektedir. Buna karşılık, çimento fabrikalarının çok sayıda ve ülke genelinde yaygın bir şekilde konumlanmış olması, çimentonun taşınma maliyetlerinin asfaltla karşılaştırıldığında oldukça düşük düzeylerde kalmasını sağlamaktadır [13].

Yol malzemelerinin hazırlanması, serilmesi ve yapımın bütün aşamalarının kontrol edilmesi için gerekli işçilik giderleri bir diğer önemli ilk yapım maliyeti bileşenidir. Rijit üstyapıların yapımında, değişik konularda uzmanlaşmış nitelikli işçi ihtiyacı daha fazladır.

Makinelerin amortisman, işletme ve bakım giderleri de ilk yapım maliyetini hesaplamak için göz önüne alınır. İnşaatin maliyeti ve üstyapının başarısı kullanılan inşaat makinelerine sıkı sıkıya bağlıdır.

Portland çimentosu betonunun üretiminin gerçekleştirildiği santrallerde depolama ve bağlayıcı için dozajlama sistemleri gerekli olup dozaj değişikliklerinin kolayca yapılabileceği süreksiz santraller tercih edilir. Sıcak bitümlü karışımların üretimi ise kurutma ve yeniden ısıtma gibi ek üniteler içeren daha pahalı santrallerin kurulmasını gerektirir. Bu tip santraller çevre kirliliği açısından da çeşitli sorunlar yaratır. Öte yandan, esnek ve rijit üstyapıların inşasında şantiyelerin kurulması ve makinelerin yerleştirilmesi için yapılan masrafların da belirlenerek göz önünde bulundurulması gerekir.

Esnek üstyapıların üretim ve inşaat sürecinde kullanılan ekipman ve malzeme, daha düşük başlangıç maliyetine sahiptir. Bitümlü karışımların yerinde karıştırılması ve serilmesi, inşaat sürecini hızlandırdığından işçilik giderlerini de azaltır. Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğü’nün ortalama maliyet verilerine göre, esnek üstyapı inşaatının birim maliyeti, rijit üstyapıya kıyasla genellikle %25-40 oranında daha düşüktür [26].

Rijit üstyapılarda ise yüksek dayanımlı çimento, agrega ve donatı çeliği gibi malzemelerin kullanımı ilk yapım maliyetini artırır. Ayrıca, betonun kür süreci ve derz uygulamaları nedeniyle inşaat süresi daha uzundur. Ancak bu sistemlerde, daha uzun hizmet ömrü ve düşük bakım gereksinimi nedeniyle, uzun vadede yatırımın geri dönüşü mümkün olabilmektedir.

Bu bağlamda, kısa vadeli bütçe kısıtları altında esnek üstyapılar tercih edilirken, uzun vadeli planlamalarda rijit üstyapılar ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunabilir.

4.1.2. Bakım ve onarım maliyetleri

Üstyapıların maliyet analizlerinde en önemli kalemlerden biri bakım ve onarım giderleridir. Optimum bir bakım programında göz önüne alınacak en önemli husus üstyapının durumunun iyice bilinmesidir. Bakım ve onarım çalışmaları sırasında bakımın tipi, yollardaki bozuklukların türü ve derecesi, trafik yönünün değiştirilmesi ve iş sonrasındaki kontrol, bakım yapılacak yolların hizmet ömrü ile bakım çalışmaları için ayrılacak süre gibi hususlar dikkate alınmalıdır.

Esnek üstyapılar, çevresel etkilerden ve trafik yüklerinden daha fazla etkilendiklerinden bu faktörlere bağlı olarak belirli periyotlarda yenileme ve yüzey onarımı gerektirir. Bitümlü bağlayıcının yaşlanması, tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları ve termal çatlaklar esnek üstyapıların performansını sınırlayan başlıca mekanizmalardır. Genellikle 20 yıllık bir süre için projelendirilen beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılarda, yolda görülen yerel bozuklukların her kış mevsimi sonunda onarımına ek olarak bu süre içinde 3-4 kez ince yüzey kaplaması yenilemesi, yama, sathi kaplama veya yüzeysel mikro onarım uygulamalarını gerektirebilir. Bu işlemler kısa sürede tamamlanabilse de uzun vadede toplam bakım maliyetini artırır [10]. Esnek üstyapı 20 yıl sonra tasarım ömrünün sonuna geleceğinden, üstyapının takviye edilmesi gerekir. Temel tabakasının trafik yükleri ile zayıfladığı ve tekerlek izlerinin 10 mm'yi aştığı kesimlerde, sorun dikkatle izlenmeli ve temel tabakası yeniden yapılmalıdır [13].

Bunların dışında, temel ve alt temel tabakalarının onarımı ve yeniden yapımı gibi çok önemli bakım ve yenilemeler de gerekli olabilir. Bu bakım ve onarım çalışmaları yüksek maliyetlere sebep olurken, bu çalışmalar sırasında aynı zamanda yolun bir şeridinin veya tamamının kapatılması nedeniyle trafikte önemli aksamalar da meydana gelir. Trafik yoğunluğunun yüksek olduğu otoyollarda ve çevre yollarında bu gecikmelerin esnek üstyapıların maliyeti üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Rijit üstyapılar, esnek üstyapılara kıyasla daha az deformasyona uğrar ve bakım gereksinimleri daha azdır. Dolayısıyla, daha uzun bakım aralıklarına sahiptirler. Rijit üstyapılarda en yaygın bakım gereksinimleri, çatlak onarımları, derz yenilemeleri, lokal plak değişimleri ve kenar kırılmalarının tamiridir. Bununla birlikte, rijit üstyapılarda meydana gelen ciddi plak kırıkları veya don hasarları durumunda onarım maliyeti yüksek olabilir. Pek çok saha çalışması, rijit üstyapıların 25-30 yıllık hizmet

ömürleri boyunca ciddi yapısal yenileme gerektirmeksizin hizmet verebildiğini göstermektedir [27]. Bu nedenle bakım sıklığının düşük olması, yüksek ilk yatırım maliyetinin uzun dönemde dengelenmesine katkı sağlar.

Rijit üstyapılarda yüzey yenileme ve takviye işlemlerine çoğu zaman ihtiyaç duyulmaz. Projelendirme ve yapımın titiz bir şekilde gerçekleştirilmesi halinde, rijit üstyapılar tüm hizmet ömürleri boyunca az miktarda bakım gerektirirler. Periyodik dikkat isteyen tek şey yaklaşık 4-5 yılda bir derz dolgularının yenilenmesidir. Bu ise trafiğe müdahale etmeden kolaylıkla gerçekleştirilebilen düşük maliyetli bir iştir. Bunun dışında, çok sık meydana gelmesi de pompaj olayı nedeniyle çöken plakların altına beton enjekte edilerek yükseltilmesi gerekebilir. Ayrıca, taze betonda oluşabilen küçük çatlakların çimento veya sentetik reçine harcı ile kapatılması gibi bakım onarım çalışmaları söz konusu olabilir. Burada, rijit üstyapıların pahalı ve zor tamirlere sebep olabilecek projelendirme ve yapım hatalarına esnek üstyapılardan daha duyarlı olduklarının vurgulanması gerekir. Bu yüzden beton yolların, yüksek projelendirme ve yapım standartlarına göre yapılması zorunluluk arz etmektedir [13].

4.2. Yolu Kullananların Maliyetleri

Yol kullanıcılarının maliyetleri, üstyapıların ekonomik analizinde çoğu zaman dolaylı bir maliyet kalemi olarak değerlendirilir. Normal koşullar altında, lastik aşınması ile yağ ve yakıt tüketimi gibi taşıt işletme giderleri, beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılar ile rijit üstyapılar arasında büyük ölçüde benzerlik göstermektedir [13]. Ancak, sathi kaplamalı esnek üstyapılarda söz konusu giderler daha yüksek düzeydedir. Yaklaşık 20-30 yıllık hizmet ömrü süresince, bakım ve onarım çalışmaları nedeniyle ortaya çıkan gecikmeler, esnek üstyapılarda önemli ekonomik kayıplara neden olurken rijit üstyapılarda bu olumsuzluk çok daha sınırlı düzeydedir.

Esnek üstyapılarda bakım ve onarım sıklığının fazla olması, trafik kesintileri ve hızda azalmalar nedeniyle kullanıcı maliyetlerini artırır. Ayrıca, yüzey bozulmalarının fazla olması, yakıt tüketiminde ve araç bakım maliyetlerinde artışa neden olabilir.

Rijit üstyapılar, düzgün yüzeyleri sayesinde daha düşük Uluslararası Pürüzlülük İndeksi (IRI) değerine sahiptir. Bu husus yakıt verimliliğini artırır ve araç yıpranmasını azaltır. Federal Karayolu İdaresi (Federal Highway Agency – FHWA) tarafından 2019 [25] yılında gerçekleştirilen çalışmaya göre, rijit üstyapılarda sürücü başına yıllık yakıt tasarrufu

%3-6 seviyesindedir. Bu tasarruf, makro ölçekte değerlendirildiğinde toplam ekonomik kazanç açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

4.3. Finansman Kaynakları ve İskonto Oranı

Karayolu üstyapı projelerinin ekonomik değerlendirmesi, yalnızca mühendislik açısından performansını değil, aynı zamanda projelerin hangi finansman modelleri ile gerçekleştirileceğini ve yaşam döngüsü maliyeti analizlerinde kullanılacak iskonto oranının belirlenmesini de içeren çok boyutlu bir yaklaşım gerektirir. Esnek ve rijit üstyapı alternatifleri hem başlangıç maliyetleri hem de bakım-onarım stratejilerinin zamanlaması açısından farklı nakit akışı profillerine sahip olduklarından, finansman kaynaklarının ve iskonto oranının seçimi bu iki alternatifin görece maliyet etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

Karayolu üstyapısı tipinin seçimi, projenin finansman yönteminden etkilenmektedir. Bu bağlamda, zamanla artan trafik hacmine uyum sağlamak amacıyla üstyapı tabakalarının kademeli olarak inşa edildiği ve yatırım kaynaklarının sınırlı olduğu durumlarda esnek üstyapıların kullanılması daha avantajlıdır. Özellikle kamu kaynaklarıyla finanse edilen projelerde bütçe kısıtları çoğu zaman ilk yapım maliyeti düşük olan esnek üstyapıların tercih edilmesine neden olmaktadır. Ancak, bu durumda esnek üstyapının yeterli bir hizmet düzeyinde tutulabilmesi için önemli düzeyde bakım fonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Rijit üstyapılar ise ilk yapım maliyetleri yüksek olduğundan kamu bütçesi üzerinde ani bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle kamu projelerinde rijit üstyapı seçimi, genellikle uzun vadeli performans avantajının ve bakım-onarım maliyetlerinin düşük olmasının bütçeye olumlu etki göstereceğinin düşünüldüğü hâllerde mümkün görülmektedir. Bu nedenle uzun dönem maliyetlerin öncelikli olduğu kabul edilen kamu yatırımlarında rijit üstyapılar daha akılcı bir seçenek olabilmektedir. Örneğin, uluslararası finans kuruluşu kredileri veya altyapı tahvilleri gibi uzun vadeli borçlanma araçlarının kullanıldığı projelerde, uzun hizmet ömrü ve düşük bakım-onarım maliyeti nedeniyle rijit üstyapılar finansman açısından daha uygun kabul edilmektedir. Çünkü yüksek ilk maliyet uzun vadeli krediyle karşılanabilir ve daha sonra bakım-onarım giderleri düşük olduğu için proje bütçesi üzerindeki toplam yük azaltılabilir. Ayrıca yalnızca ilk yapım maliyetlerinin finanse edildiği ve bakım-onarım giderlerinin dikkate alınmadığı durumlarda rijit üstyapıların tercih edilmesi daha uygun olmaktadır.

Esnek üstyapılar ise ilk yapım maliyetleri düşük olsa da sık bakım gerektirdiklerinden, borçlanma ile finansman modellerinde nakit akışı

projeksiyonları daha uzun ve daha düzensiz bakım harcamalarını içermek durumundadır.

Kamu ve özel sektör iş birliği ile gerçekleştirilecek projelerde yüklenici şirketin uzun dönemde işletme ve bakım sorumluluğunu üstlenmesi nedeniyle toplam yaşam döngüsü maliyeti büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yüklenici şirketin uzun vadeli işletme ve bakım sorumluluğunu üstlendiği kamu ve özel sektör iş birliği modellerinde, düşük bakım sıklığının yüklenici açısından maliyet ve riskleri azalttığı rijit üstyapılar daha çok tercih edilmektedir. Buna karşılık kısa süreli işletme ve geri ödeme dönemleri için esnek üstyapılar daha düşük ilk yapım maliyetleri yüzünden daha uygun olabilirler.

İskonto oranı, yaşam döngüsü maliyet analizlerinde farklı zamanlarda meydana gelen nakit akımlarının bugünkü değerini belirleyen temel parametrelerden biridir. Esnek ve rijit üstyapılar, bakım-onarım zamanlaması ve ilk yapım maliyetleri açısından farklı nakit akımı profillerine sahip olduklarından, iskonto oranındaki değişim bu iki alternatifin göreceli ekonomik üstünlüğünü doğrudan etkilemektedir.

Esnek üstyapılarda, ilk yapım maliyetleri düşüktür. Bununla birlikte, bakım-onarım işlemleri sık gerçekleştirilmesine rağmen maliyetleri düşük ve orta seviyededir. Dolayısıyla iskonto oranı yükseldiğinde gelecekteki bakım-onarım harcamalarının bugünkü değeri küçüldüğünden esnek üstyapıların daha ekonomik olma eğilimi artar.

Rijit üstyapılar ise, yüksek ilk yapım maliyetlerine, uzun bakım aralıklarına ve düşük yenileme maliyetlerine sahiptir. Bu nedenle iskonto oranı yükseldiğinde gelecekteki bakım tasarruflarının bugünkü değeri azalır ve yüksek ilk yapım maliyeti daha baskın hale gelir. Dolayısıyla yüksek iskonto oranları rijit üstyapıların göreceli ekonomik avantajını azaltır. %3-4 gibi düşük iskonto oranlarında ise, gelecekteki bakım tasarruflarının bugünkü değeri daha yüksek çıkacağı için, rijit üstyapı ekonomik olarak daha avantajlı hâle gelir [27, 28].

Kamu kurumları, genellikle %3-6 aralığında olan sosyal iskonto oranı kullanmaktadır [29]. Bu aralık, rijit üstyapıların avantajlı olduğu bir aralıktır. Özel sektör ise, daha yüksek risk primi ve fırsat maliyeti nedeniyle %8-12 aralığında iskonto oranı kullanmaktadır. Bu durumda esnek üstyapılar göreceli olarak daha maliyet etkin görünmektedir. Dolayısıyla üstyapı türünün ekonomik tercih edilirliliği, kullanılan iskonto oranına ve yatırımcının finansman modeline bağlı olmaktadır.

4.4. Enerji Tüketimi

Enerji sorunlarının ciddiyeti, zamana ve ülkelere göre değişiklik gösterse de yolların yapımında kullanılan enerji miktarı, çoğu zaman bu yolları kullanan araçların toplam yakıt tüketimiyle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Ancak, üstyapı türünün seçiminde en önemli ölçütler olan yapım ve bakım maliyetlerine ek olarak, problemin enerji tüketimi yönü de dolaylı biçimde üstyapı tipinin seçiminde etkili olabilmektedir [13].

Karayolu üstyapılarının yapımı ve bakımı sırasında tüketilen enerji, kullanılan malzemelerin özelliklerine, üretim süreçlerinin enerji kullanım yoğunluğuna ve bakım sıklığına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda esnek ve rijit üstyapıların enerji gereksinimleri, yaşam döngülerinin çeşitli aşamalarında birbirlerinden farklıdır.

Esnek üstyapılarda enerji tüketimi, esas olarak bitümlü bağlayıcının rafinerizasyon sürecinde ortaya çıkan enerji ihtiyacı ile sıcak karışım asfaltın üretimi sırasında agregaların ve bitümün ısıtılmasından kaynaklanır. Sıcak karışım asfalt üretiminin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi, toplam enerji tüketimini artıran temel etkenlerden biridir. Bunun yanında asfaltın serimi ve sıkıştırılması ile kullanılan makinelerin yakıt tüketimi de ek bir enerji tüketimine neden olur. Esnek üstyapıların bakım periyotlarının daha kısa olması, uzun vadede enerji tüketimini artıran bir başka unsurdur. Yüzey yenileme, kaplama takviyesi veya yeniden kaplama yapımı gibi işlemler, kullanım ömrü boyunca düzenli aralıklarla enerji harcanmasına neden olur. Buna karşın asfaltın geri dönüştürülebilir bir malzeme olması, yeni malzeme üretimi için gerekli enerji miktarını azaltarak toplam enerji tüketimini kısmen düşürür.

Rijit üstyapılarda enerji tüketiminin büyük kısmı, beton üretiminde kullanılan çimentonun üretim aşamalarından olan ve yüksek enerji gerektiren klinkerleşme ve öğütme işlemlerinde meydana gelir. Çimento üretimi, malzeme bazında yol yapımındaki en enerji yoğun süreçlerden birisidir. Beton karışımında çimento oranı arttıkça toplam enerji tüketimi de artar. Ancak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve silika dumanı gibi ilave bağlayıcı malzemeler çimento miktarını azaltarak üretim aşamasındaki enerji tüketimini azaltabilir. Rijit üstyapıların yapımı sırasında betonun taşınması, yerleştirilmesi, vibrasyonu ve kür işlemleri de ek enerji tüketimine neden olsa da bu tüketim genellikle malzemelerin üretimindeki kadar çok değildir.

Bakım ve onarım açısından değerlendirildiğinde ise rijit üstyapıların daha uzun servis ömrüne sahip olmaları nedeniyle enerji tüketimleri genellikle daha düşüktür. Beton yollar uzun süre büyük ölçüde bakım ve

onarım gerektirmeden hizmet verebilir. Ancak rijit üstyapılarda plakların kırılması veya derin çatlakların oluşması gibi büyük ölçekli hasarların meydana gelmesi durumunda onarım işlemleri yüksek miktarda enerji gerektirebilir. Bununla birlikte bu tür büyük onarım işlemleri esnek üstyapılara kıyasla daha seyrek yapılır. Buna karşılık esnek üstyapıların daha sık aralıklarla yüzey yenilemesi veya takviyesi gerektirmesi, bakım ve onarım işlemlerinde tüketilen enerjinin uzun dönemde artmasına neden olabilmektedir.

Üstyapı türlerinin enerji tüketimine dolaylı olarak etkide bulunan bir diğer özelliği ise kullanımları sırasında araçların yakıt tüketimi üzerine olan etkileridir. Pürüzlülüğü düşük ve düzgün yüzeyler taşıtların daha az enerji harcamasına neden olur. Bazı çalışmalarda iyi inşa edilmiş beton yolların, esnek üstyapılarla karşılaştırıldığında araçların yakıt tüketimini bir miktar azaltabileceği ileri sürülmektedir. Bununla birlikte yüzey bozulmaları, ek yerleri veya tasarım hataları bu avantajı ortadan kaldıracaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, esnek üstyapılar ilk yapım sırasında görece daha düşük enerji tüketimi gerektirmekte, ancak bakım ve onarım döngülerinin sıklığı nedeniyle uzun vadede enerji gereksinimleri artış gösterebilmektedir. Buna karşılık rijit üstyapılar başlangıçta yüksek enerji tüketimine neden olmakla birlikte, uzun hizmet ömürleri ve nispeten az bakım gereksinimleri sayesinde yaşam döngüleri boyunca daha dengeli veya yer yer daha düşük toplam enerji tüketimi sunabilmektedir. Bununla birlikte sonuçlar, yerel malzeme kaynakları, bakım stratejileri, trafik yükü, iklim koşulları, geri dönüşüm oranları ve özellikle çimento yerine kullanılan ilave bağlayıcı malzemelerin oranlarına bağlı olarak değişliklik gösterebilir.

4.5. Hizmet Ömrü ve Yenileme Süreleri

Üstyapıların ekonomik değerlendirmesinde hizmet ömrü kritik bir parametredir. Beton asfalt kaplamalı esnek üstyapılar ortalama 15-20 yıl hizmet ömrüne sahipken rijit üstyapılar ortalama 25-40 yıl hizmet ömrü sunar. Sathi kaplamalı esnek üstyapılarda ise bu süre 6-10 yıl olarak kabul edilir [30, 31]. Bu farklar, toplam yatırım maliyetinin zamana bağlı değerini değiştirir. Rijit üstyapılarda yenileme periyodu uzun olduğundan, bakım-onarım için ayrılan fonların Net Bugünkü Değeri (NBD) daha düşüktür.

Bir karayolu üstyapısı alternatifinin seçimi sürecinde, üstyapının tüm yaşam döngüsü boyunca göstereceği performansın ve buna ilişkin maliyetlerin bütüncül bir biçimde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ka-

rayolu üstyapısı türünü, tasarım ömrünü ve gelecekteki onarımlar açısından farklı seçenekleri etkili bir şekilde değerlendirmek için genel maliyet ve değer in uzun yıllar boyunca belirlenmesi gerekir. Yaşam döngüsü maliyet analizi, karayolu üstyapısı türü ile üstyapı bakım ve onarım seçeneklerinin belirlenmesinde yıllardır kullanılmaktadır [10]. Matematiksel olarak, bir üstyapının toplam Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM) aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$YDM = I + \sum_{t=1}^n \frac{M_t + U_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Burada:

I : İlk yapım maliyeti,

M_t : t yılındaki bakım ve onarım maliyeti,

U_t : t yılındaki kullanıcı maliyeti (örneğin, gecikme, yakıt tüketimi),

r : iskonto oranı ve

n : analiz veya proje süresidir.

Bu denklem, farklı üstyapı alternatiflerinin bugünkü maliyetlerinin karşılaştırılmasını mümkün kılar.

4.6. Genel Ekonomik Değerlendirme

Ekonomik açıdan bakıldığında, esnek üstyapılar kısa vadede düşük ilk yapım maliyetine sahip olduklarından avantajlı görünmektedir. Ancak bakım çalışmalarının sıklığı ve hizmet ömürlerinin kısalığı nedeniyle uzun vadede toplam maliyetleri yükselmektedir. Rijit üstyapılar ise yüksek ilk yapım maliyetlerine rağmen, uzun hizmet ömürleri, düşük bakım giderleri ve sağladıkları kullanıcı konforunun nispeten daha yüksek olması nedeniyle ekonomik yönden daha sürdürülebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla ekonomik parametrelere göre üstyapı seçimi yapıldığında, bitümlü malzemenin azlığı, yüksek kaliteli agreganın eksikliği, hidrolik bağlayıcının bolluğu ve enerjinin azlığı halinde rijit üstyapılar, ülkedeki iskonto oranının yüksekliği ve yol yatırım kaynağının kıtlığı halinde ise esnek üstyapılar uygun olmaktadır. Dolayısıyla, üstyapı tipi seçimi yalnızca yatırım bütçesine göre değil, aynı zamanda trafik hacmi, iklim koşulları, hizmet süresi ve finansman politikası gibi faktörler de dikkate alınarak yapılmalıdır.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Karayolu üstyapı tiplerinin doğru seçimi, yalnızca yapısal performans açısından değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve sunulan hizmet kalitesi bakımından da kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında, esnek ve rijit karayolu üstyapı türleri teknik ve ekonomik ölçütler doğrultusunda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki üstyapı tipinin de farklı proje koşulları altında belirli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Teknik açıdan incelendiğinde, rijit üstyapıların yüksek taşıma kapasiteleri, uzun hizmet ömürleri ve deformasyonlara karşı gösterdikleri direnç sayesinde özellikle ağır trafik yükleri altında üstün performans sergiledikleri belirlenmiştir. Buna karşılık esnek üstyapılar; yapım kolaylığı, bakım ve onarım işlemlerinin hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve kısa sürede yeniden trafiğe açılabilme özellikleri ile öne çıkmaktadır. Esnek üstyapıların sıcaklık değişimleri ve ağır taşıt yüklerine karşı daha hassas olduğu, rijit üstyapıların ise iklimsel etkilere karşı daha stabil bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Ekonomik değerlendirmeler, esnek üstyapıların düşük ilk yapım maliyetleri nedeniyle kısa vadede avantajlı olduğunu; ancak daha sık bakım ve onarım gerektirmeleri sebebiyle uzun vadede toplam maliyetlerinin artabildiğini göstermektedir. Rijit üstyapılar ise yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen, düşük bakım gereksinimleri ve uzun hizmet ömürleri sayesinde yaşam döngüsü maliyeti açısından daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bunun yanı sıra, düzgün yüzey özellikleri sayesinde taşıtların yakıt tüketimini ve işletme giderlerini azaltarak dolaylı ekonomik faydalar sağlamaktadır.

Bu bulgular doğrultusunda, üstyapı tipi seçiminde yalnızca ilk yapım maliyetinin değil; trafik yoğunluğu, iklim koşulları, zemin özellikleri, bakım-onarım olanakları ve planlanan hizmet süresinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu, zemin taşıma gücünün düşük olduğu ya da bakım-onarım faaliyetlerinin kısıtlı olduğu yol kesimlerinde rijit üstyapılar daha uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, yapım süresinin kritik olduğu, kısa süreli hizmet hedeflenen veya bütçe kısıtlarının bulunduğu projelerde esnek üstyapıların tercih edilmesi daha rasyonel bir yaklaşım olabilir.

Sonuç olarak, karayolu üstyapılarının sürdürülebilir biçimde tasarlanması ve uygulanabilmesi için teknik yeterlilik ve ekonomik etkinliğin yanı sıra çevresel etkiler ile sosyal maliyetlerin birlikte değerlendirildiği çok ölçütlü bir karar verme yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Nadir Yayla (2008). Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [2] Kumares C. Sinha, Darcy Bullock, Chris T. Hendrickson, Development of Transportation Engineering Research, Education, and Practice in a Changing Civil Engineering World, ASCE, JTE, July/ August 2002.128:301-313.
- [3] Uijarevic, M., Supic, S. (2016). Comparative Analysis of Flexible And Rigid Pavement Design. Contemporary Achievements in Civil Engineering 22, Serbia, 591-601.
- [4] Ahmet Sağlık, A. Gürkan Güngör (2008). Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü. Teknik Araştırma Başkanlığı Üstyapı Şubesi Başkanlığı, Ankara.
- [5] AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington D. C., USA.
- [6] Tom V. Mathew, K V Krishna Rao, Introduction to Transportation Engineering, NPTEL May 3, 2007.
- [7] Milind V. Mohod, K.N. Kadam, (2016). A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Volume 13, Issue 3 Ver. VII (May- Jun. 2016), 84-88.
- [8] Mohd. Imran Khan, Harwalkar A. B., Mechanistic Analysis of Rigid Pavement for Wheel Load Stresses Using Ansys, IJRCE, Vol -4, ISSN 2248-9649.
- [9] Yu T. Chou, M. ASCE, Comparative Analyses of Rigid Pavements, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 5, September, 1983.
- [10] Dagimwork Asele Manuka, Mengistu Mena Kuleno (2019). Suitability and Cost-wise Comparative Analysis of Rigid and Flexible Pavements: A Review. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2019, Vol. 4, Issue 6, ISSN No. 2455-2143, 20-28.
- [11] Serdar Kâşâk, Muhammet Komut (2019). Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara-2019.
- [12] Faruk Umar, Emine Ağar (1985). Yol Üstyapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, 1985.
- [13] Emine Ağar, İlhan Süttaş, Güven Öztaş (1998). Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları). İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, 1998.
- [14] Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. Prentice Hall.

- [15] Murat Bostancıoğlu (2000). AASHTO-93 Yönteminin Mekanistik Ampirik Tasarım Yöntemleri ile Uyumunun Belirlenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi* (Turkish Journal of Nature and Science), Cilt 9, Sayı 2, 64-75.
- [16] Fred L. Mannering, Scott S. Washburn, and Walter P. Kilareski (2008). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [17] Asphalt Institute (2007). *The Asphalt Handbook (MS-4)*, 7th Ed., Lexington, KY.
- [18] ACI Committee 325 (2002). *Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads*. American Concrete Institute, Michigan.
- [19] Westergaard, H.M. (1926) Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. *Public Roads*, 7, 25-35.
- [20] AASHTO (2012). *Pavement Management Guide*, 2nd Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [21] A. T. Papagiannakis, E. A. Masad (2008). *Pavement Design and Materials*. Wiley and Sons, ISBN: 978-0-471-21461-8.
- [22] Sandberg, U., Ejsmont, J. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*. INFORMEX, Sweden.
- [23] TRB (2018). *Arterial Roadways Research Needs and Concerns. Informing the Planning, Design, and Operation of Arterial Roadways Considering Public Health*. Transportation Research Circular E-C239. Transportation Research Board, 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001.
- [24] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (2020). *Sathi Kaplama Dizayn Rehberi. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü* Ankara.
- [25] Mark B. Snyder (2019). *TechBrief: Concrete Pavement Texturing FHWA-HIF-17-011*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.
- [26] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (2016). *Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi*. Karayolları Genel Müdürlüğü Program ve İzleme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [27] Norbert Delatte (2008). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. Taylor & Francis, New York, NY, USA.
- [28] ARA, Inc., ERES Consultants Division. (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A Final Report," ERES Consultants Division, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [29] World Bank (2016). *Discounting Costs and Benefits in Economic Analysis of World Bank Projects*.
- [30] Kutsel Kübra Çalışkan, Savaş Nedim Tutan, Muhammet Komut (2024). *Bitümlü Kaplamalar Koruyucu Bakım ve Onarım Rehberi*. Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

- [31] PIARC (1987). Concrete Roads - Practical Guidelines for Technology Transfer. World Road Association (PIARC).

//

Bölüm 12

DELİKLİ PLAKLARIN KAPSAMLI DEĞERLENDİRİLMESİ: TARİHÇE, UYGULAMA ALANLARI, GEOMETRİ VE GÜNCEL ARAŞTIRMA EĞİMLERİ

Uğur ALBAYRAK¹, Mustafa Haluk SARAÇOĞLU²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., Yapı ABD,

Eskişehir, TÜRKİYE, albayrak@ogu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7326-3213

2 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Yapı ABD,

Kütahya, TÜRKİYE, mhaluk.saracoglu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3842-5699

1. Giriş

Delikli plaklar, yüzeyinde belirli bir düzene göre veya rastgele biçimde yerleştirilmiş boşlukların (deliklerin) bulunduğu düzlemsel yapı elemanlarıdır. Bu boşluklar; geometrik boyut, yerleşim düzeni, boşluk oranı, şekil (daire, kare, elips, uzun delik vb.) ve kenar aralıkları gibi parametrelere bağlı olarak plağın genel mekanik davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Delikli plaklar, yalnızca bir ağırlık azaltma çözümü olmanın ötesinde, çok çeşitli mühendislik alanlarında fonksiyonel ve performans artırıcı özellikleri sayesinde tercih edilmektedir.

Bu tür plaklar; havacılık ve uzay yapıları, gemi ve denizcilik endüstrisi, otomotiv bileşenleri, akustik paneller, ısı ve kütle transferi uygulamaları, filtre ve ayırma sistemleri, soğutma ve havalandırma elemanları, balistik ve zırh sistemleri, mimari cephe tasarımları ve enerji ekipmanları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalardaki bu çeşitlilik, delikli plakların hem yük taşıma kapasitesinin hem de titreşim, stabilite, yorulma, ısı transferi ve akışkan etkileşimi gibi çok yönlü fiziksel süreçlerle ilişkili davranışlarının detaylı olarak araştırılmasını gerektirmektedir.

Deliksiz plaklar ile karşılaştırıldığında delikli plakların davranışı belirgin şekilde farklıdır. Deliklerin varlığı, plağın rijitliğini düşürmekte, yerel gerilme yığılmalarına neden olmakta ve özellikle sınır bölgelerinde karmaşık gerilme-titreşim modlarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu durum, yapı elemanının hem eğilme, kesme, gerilme gibi statik yükler hem de serbest titreşim, zorlanmış titreşim, darbeli yükler gibi dinamik etkiler altındaki performansını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca deliklerin yerleşim düzeni de değiştirilebilir. Örneğin delikler tek bir merkezi delik şeklinde, birden fazla deliğin oluşturduğu bir dizilim olarak, izotrop veya anizotrop bir düzende ya da periyodik hücre yapısına göre tasarlanabilir. Bu farklı yerleşim seçenekleri, mimari, akustik veya mekanik performans gereksinimlerine göre optimize edilerek en uygun plak yapısı elde edilir.

Deliklerin plak davranışına etkisi özellikle şu parametrelerle ilişkilendirilir:

- Boşluk oranı: Toplam delik alanının plak alanına oranı, rijitlik ve dayanım üzerinde birincil etkindir.
- Delik şekli ve yönlenmesi: Dairesel delikler gerilme geçişini daha düzgün dağıtırken, keskin köşeli veya çentikli delikler yüksek gerilme yoğunlaşmalarına neden olabilir.

- Delik yerleşim düzeni: Periyodik, üçgen, kare veya düzensiz dizilimler, yük aktarım yollarını önemli ölçüde değiştirir.
- Delik sayısı ve açıklık aralığı: Çok delikli sistemlerde delikler arası etkileşim, yerel stabilite ve titreşim modlarında kritik rol oynar.
- Plak malzemesi ve kalınlığı: İnce plaklarda delik etkisi daha belirgin olup, kalın plaklar için kesme etkileri ve 3B gerilme durumu ön plana çıkar.

Delikli plakların mühendislik analizlerinde, klasik plak teorileri (Kirchhoff-Love ve Mindlin teorileri), yüksek mertebe kayma deformasyon teorileri, homojenleştirme yöntemleri, eşdeğer ortotrop malzeme yaklaşımları ve sonlu eleman yöntemleri gibi çeşitli modeller kullanılmaktadır. Son yıllarda delikli plaklara yönelik çalışmalarda sonlu eleman temelli nümerik analizler, ağ yakınsama analizleri, delik çevresi sınır tabakası davranışları, kritik burkulma yükü hesaplamaları, doğal frekansların belirlenmesi, mod şekli değişimleri ve makine öğrenmesi, optimizasyon algoritmaları vb. gibi yapay zekâ destekli mühendislik modelleri giderek daha yaygın hale gelmiştir.

Deliklerin mekanik performansı zayıflatıcı etkileri bulunmasına rağmen, uygun şekilde tasarlanmış delik düzenleri sayesinde plağın akustik geçirgenliği, ısı performansı, ağırlık/rijitlik oranı ve enerji soğurma kapasitesi optimize edilebilmektedir. Bu nedenle delikli plak tasarımı, yalnızca mukavemet açısından değil; aynı zamanda çok kriterli tasarım prensipleri doğrultusunda yapılması gereken kapsamlı bir mühendislik problemidir.

Bu çalışmanın amacı, delikli plaklar konusunda kapsamlı bir değerlendirme sunmaktır. Bu kapsamda delikli plakların tarihçelerine, kullanım alanlarına ilişkin bilgiler verilecek ve konuya yönelik güncel araştırmalar ile literatürdeki eğilimler ortaya koyulacaktır.

2. Delikli Plakların Tarihçesi ve Uygulama Alanları

Delikli metalin tarihsel gelişimi, ilk örneklerini II. Dünya Savaşı'nda geçici pist ve iniş-kalkış alanlarının inşasında kullanılan delikli çelik plaklarda göstermiştir.



Şekil 1. Delikli çelik plaklardan imal edilmiş geçici pist ve iniş-kalkış alanı.

Bununla birlikte, delik oluşturma işlemi insanlık tarihindeki temel üretim faaliyetlerinin doğal bir uzantısıdır. İlkel toplumlarda tamamen elle yapılan bu süreç, zaman içinde metal işleme tekniklerinin gelişmesiyle daha sistematik ve işlevsel bir hâl almıştır.

Farklı uygarlıklar metal paraları delerek hem malzeme tasarrufu sağlamış hem de saklama ve taşıma kolaylığı elde etmiştir.



Şekil 2. Delikli metal paralara örnekler.

1600'lü yıllarda haddehanelerin ortaya çıkması ve 1800'lü yıllarda ilk otomatik delme makinelerinin geliştirilmesi, metal levhaların seri şekilde delinebilmesini mümkün kılmıştır. Eli Hendrick'in geliştirdiği eş zamanlı delik açma mekanizmaları, modern delme makinalarının prototipi niteliğindedir. 19. yüzyılın sonlarında Birleşik Krallık'ta geliştirilen sıfır atık prensibine dayalı delme teknikleri ve döküm teknolojileri, desen ve

biçim çeşitliliğini artırarak delikli plakların endüstriyel tasarımda daha geniş kullanım alanı bulmasını sağlamıştır.

Aynı zamanda delikler, zırh ve benzeri ekipmanlarda hem süsleme hem de havalandırma amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3. Delikli zırh örnekleri.

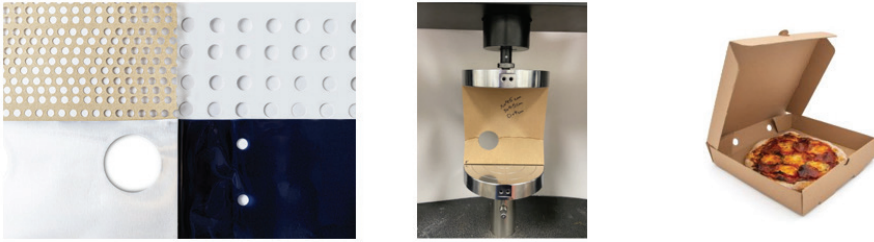
2000’li yıllarda dijital üretim teknolojileriyle birlikte delikli plaklar yeni bir ivme kazanmış; bilgisayar destekli tasarım ve gelişmiş makine parkurlarının kullanımı hem estetik hem de işlevsel performans gereksinimlerine yönelik yenilikçi uygulamaların önünü açmıştır. Örneğin, 2015 sonrası yürütülen çalışmalar, binaların dış cephelerinde ikinci bir kaplama olarak kullanılan delikli metal yüzeylerin enerji tüketimini azaltabildiğini, özellikle ısı kontrolü ve doğal aydınlatma üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermiştir.

O’Donnell ve Langer, 1962 yılında modern delikli plak mühendisliğinin temel taşlarından biri olarak kabul edilen bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmada, üçgen delik düzenine sahip plakların hesaplanması için kuramsal ve deneysel temelli bir yöntem sunmuşlardır. Ortalama aderans gerilmelerini teorik olarak, en büyük gerilmeleri ise deneysel ve fotoelastik yöntemlerle belirlemişlerdir (O’Donnell & Langer, 1962).

Zamanla delikli plakların kullanım alanları büyük bir çeşitlilik kazanmıştır. Kimya mühendisliği literatüründe, hava-ayırıcı reaktörlerde delikli plakların gaz-sıvı kütle transferini artırıcı etkisi belgelendirilmiştir. Krichnavaruk ve Pavasant, yaptıkları çalışmada delikli plakların hava kaldırmalı kontaktörde gaz-sıvı kütle transferini artırdığını göstermiştir. Deliklerin akışa direnç oluşturarak gaz baloncuklarının kalış süresini uzattığı ve gaz tutulumunu yükselttiği belirlenmiştir. Sıvı hızındaki

azalma kütle transferini bir miktar düşürse de, gaz tutulumundaki artış baskın gelmiş ve toplam kütle transfer katsayısı genel olarak artmıştır. Ayrıca çalışmada optimum delik boyutu, delik sayısı ve plak adedi hesaplanmıştır (Krichnavaruk & Pavasant, 2002).

Shirzad ve Joodaky, çalışmalarında farklı konum ve çapta dairesel deliğe sahip ince plakaların kritik burkulma yüklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak burkulma yüklerinin tahmini için ikinci ve üçüncü dereceden polinom bağıntılar önerilmiş ve yöntem, özellikle havalandırılmalı gıda ambalajları başta olmak üzere farklı mühendislik uygulamaları için genellenebilir nitelikte sunulmuştur (Shirzad & Joodaky, 2023).



Şekil 10. Havalandırılmalı gıda ambalajı ve burkulma deneyi (Shirzad & Joodaky, 2023)

Mimari ve akustik uygulamalarda ise, yapısal performans ve estetik gereksinimleri birleştiren çalışmalarda delikli plaklar yaygınlaşmıştır. Örneğin, Naqash tarafından yapılan bir değerlendirmede, Mashra-biya kökenli delikli plakların cephe uygulamaları Robot ile SAP2000 programları kullanılarak yapısal hesaplamaları yapılmıştır. Analizler sonucunda, farklı konum ve boyutlardaki delikli plaklarda gerilme ve sehimlerin kabul edilebilir düzeyde olduğu ve cephe mühendislerine tasarım için yol gösterdiği vurgulanmıştır (Naqash, 2021).

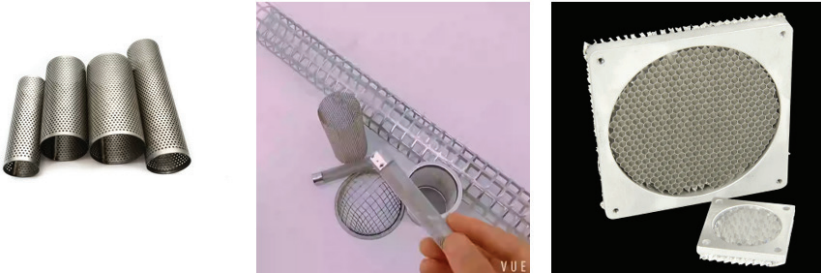
Delikli plaklar balistik ve koruyucu sistemlerde stratejik bir tasarım elemanı olarak ta kullanılmaktadır. Delikli plaklar, zırh sistemlerinde temel plak ile birlikte konumlandırıldığında mermi çekirdeğinde eğilme gerilmesi oluşturarak çekirdeğin kırılmasına neden olabilir ve böylece temeldeki koruyucu tabakanın aşınmasını azaltır. Balos'un yaptığı kapsamlı bir derlemede, bu tür plakların çoklu darbe dayanımı yüksek olup, hafif zırh sistemlerinde maliyet açısından cazip olduğuna dikkat çekilmektedir (Balos et al., 2021). Yükselen balistik uygulamalarda kritik bir bileşen haline gelen bu tür yapılar ile ilgili Kılıç ve arkadaşları, yüksek sertlikli delikli çelik plakların 7,62 mm zırh delici mermiye karşı davranı-

şını sayısal analiz ile inceleyerek, delik geometrisi ve yerleşiminin balistik performansı önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Kılıç et al., 2014).

Delikli plaklar, akustik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mikro delikli plaklar özellikle ses emici özellikleriyle dikkat çekerler. Gaz türbinlerinin yanma odası uçak motorlarında kullanılan, doğrusal olmayan akustik davranış sergileyerek titreşim ve gürültü bastırma işlevi görürler. Örneğin Liu ve arkadaşlarının çalışmasında, yüksek akustik basınç seviyelerinde delikli plakların emilim katsayısındaki değişimler deneysel ve teorik olarak ortaya konmuştur (Liu et al., 2025). Ayrıca, kalınlık ve delik oranı gibi geometrik parametrelerin mikro-delikli plakların akustik empedansına etkisi teorik olarak da araştırılmıştır. (Hamakawa et al., 2017).

Isı transferi açısından delikli plaklar, efüzyon soğutması ya da konvektif ısı taşıma uygulamalarında önemli bir rol oynar. Özellikle gaz türbinlerinde ve yüksek sıcaklıklı kanatlardaki soğutma tasarımlarında, delikli yapılar sayesinde hava veya gaz gibi soğutucu akışkan plak üzerinden kontrollü olarak akarak yüksek ısı akısı taşınmasını sağlar. Yeranee & Rao tarafından yapılan kapsamlı bir değerlendirmede, üç boyutlu baskı ile üretilen mikroyapılı delikli plakların, geleneksel film soğutması yöntemlerine kıyasla daha üstün soğutma etkinliği sağladığı vurgulanmıştır (Yeranee & Rao, 2025).

Bu tür plaklar hem bina içi gürültü kontrolünde hem de egzoz kanalları, fan uygulamaları gibi endüstriyel sistemlerde akustik düzenleme için tercih edilmektedir.



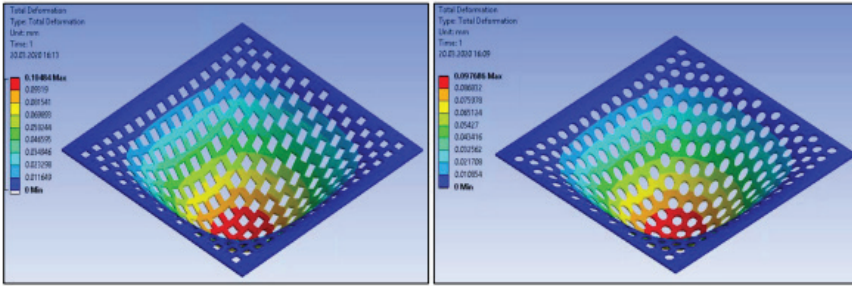
Şekil 9. Paslanmaz çelik delikli boru örnekleri ve delikli alüminyum petek fan kalkanı

Günümüzde delikli plaklar; akustik düzenleme, mahremiyet artırma, kaymaz yüzey oluşturma, drenaj sağlama, gölgeleme, endüstriyel pişirme, filtrasyon gibi çok çeşitli işlevsel amaçlarla kullanılmakta; otomotiv, mimarlık, inşaat ve birçok endüstriyel alanda geniş bir uygulama çeşitliliği sunmaktadır. Bu durum, delikli plakların modern tasarım, mühendis-

lik ve enerji verimliliği açısından çok yönlü bir malzeme hâline geldiğini göstermektedir.

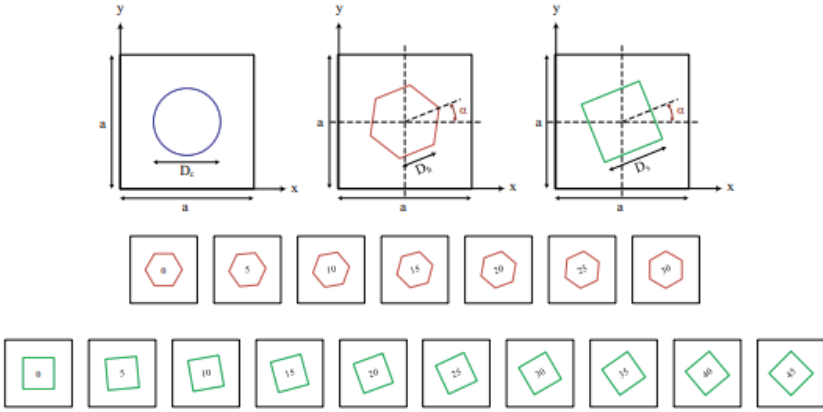
3. Delikli Plakların Sınıflandırılması ve Geometri

Delikli plaklar, geometrik özelliklerine göre sınıflandırıldığında öncelikle delik şekli, delik düzeni ve boşluk oranı açısından farklı kategorilere ayrılır. Delik şekli bakımından dairesel, kare, üçgen ve altıgen gibi formlar yaygındır. Örneğin, Saraçoğlu, Uslu ve Albayrak tarafından yapılan statik analiz çalışmasında kenar sayısı dörtten sonsuza, yani dairesel deliğe kadar olan sekiz farklı delik modeli ele alınmış ve delik şeklinin plakların nokta çökmesi ve gerilme dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Saraçoğlu et al., 2021).



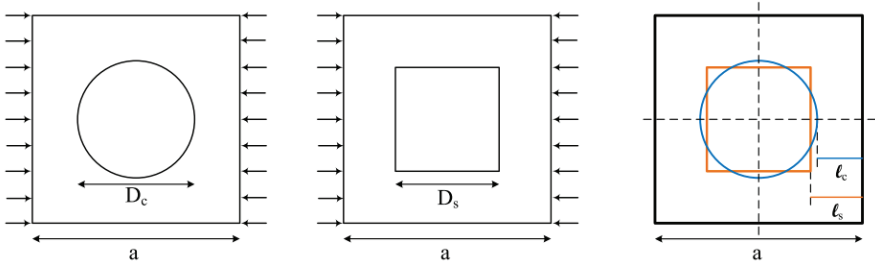
Şekil 4. Kare ve dairesel delik için orta nokta çökme değerleri (Saraçoğlu et al., 2021)

Delik düzeni açısından ise, ızgara, üçgen, kare gibi periyodik veya rastgele yerleşim gibi yapılar bulunabilir. Her bir düzen, yük aktarım yollarını ve yerel gerilme yoğunluklarını farklı şekilde etkiler. Ayrıca, deliklerin kenar oryantasyonu da kritik rol oynar: dörtgen veya altıgen deliklerde oryantasyon açısı değiştirildiğinde burkulma yükü değişimleri ortaya çıkabilir (Saraçoğlu et al., 2024).



Şekil 5. Delikli kare plak için farklı delik şekilleri ve oryantasyonları (Saraçoğlu et al., 2024)

Geometrik parametrelerin mekanik ve akışkan davranış üzerindeki etkisi de literatürde geniş biçimde çalışılmıştır. Boşluk oranı ve delik boyutu gibi parametreler, akışkan geçirgenliği açısından özellikle önemlidir: Peng ve arkadaşlarının CFD simülasyonlarına göre, boşluk oranı ve delik çapı arttıkça plaktaki akış katsayısı önemli ölçüde yükselmektedir. Bu çalışmada ayrıca daire, kare, üçgen gibi delik şekillerinin etkisi de değerlendirilmiştir. Aynı delik oranı ve alan için dairesel deliklerin kare veya üçgen deliklere göre daha yüksek akış katsayısı verdiğini ortaya koymuşlardır (Peng et al., 2023).



Şekil 6. Daire ve kare delikli kare plak modelleri. (Uslu et al., 2022).

Mekanik davranış açısından ise, Uslu ve arkadaşları, merkezî delikli kare plakların burkulma yüklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, delik geometrisinin (daire / kare) ve plak narinlik oranının burkulma kararlılığı üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermişlerdir (Uslu et al., 2022).

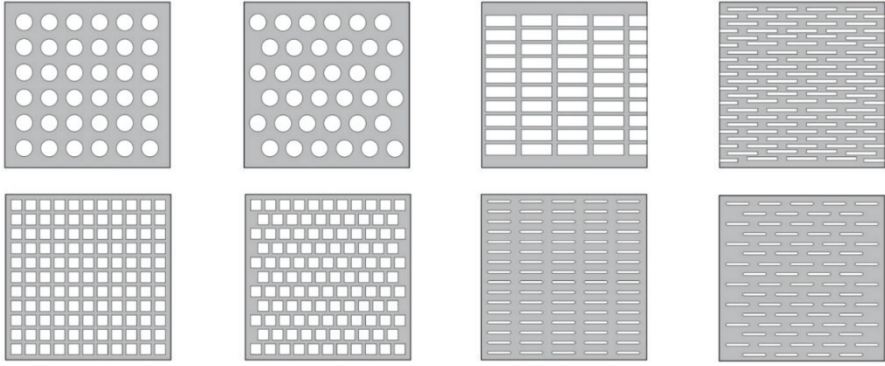
4. Delikli Plakların Üretim Teknikleri ve Malzeme Seçimi

Delikli plakların üretiminde geleneksel olarak mekanik delme ve kesme yöntemleri ile lazer ile kesme delme teknikleri öne çıkar. Yüksek hacimli ve ekonomik üretim için taret zımbası ve CNC kontrollü delme tezgâhları hâlen tercih edilirken, mikro-delikler, karmaşık geometri veya yüksek boyut hassasiyeti gerektiren uygulamalarda fiber ve yarıiletken lazer sistemleri yaygınlaşmıştır.



Şekil 7. Taret zımbası

Lazerle delmede enerji-yoğunluğu, malzeme termal iletkenliği ve spot-boyutu gibi parametreler delik oluşumu, kenar kalitesi ve ısıl etki bölgesinin büyüklüğü üzerinde belirleyicidir; özellikle 10kW-100kW aralığındaki yüksek güçlü lazerlerde malzeme türüne bağlı olarak boşluk oranı mekanizmaları değişmekte ve üretim hız/kalite dengesi yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu konudaki deneysel ve sayısal çalışmalar, lazer gücü ve yoğunluğu arttıkça erime, buharlaşma, plazma oluşumu gibi malzeme davranışının baskın süreçlere göre farklılaştığını göstermiştir. Dolayısıyla üretim yöntemi seçimi kenar toleransı, mikro-yapı değişimi, mekanik performans gibi uygulamanın hedeflerine göre yapılmalıdır (Mironovs et al., 2025; Reich et al., 2023).



Şekil 8. Metal plaklarda delik çeşitleri (Mironovs et al., 2025).

Malzeme seçimi, delikli plakların mekanik performansı, korozyon direnci ve üretim uygunluğu açısından merkezi bir rol oynar. Endüstriyel uygulamalarda alüminyum alaşımları, karbon çelikler, AISI 316L gibi paslanmaz çelikler sık kullanılırken; balistik veya yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda nanobeynit / beynit gibi ultra yüksek mukavemetli çelikler tercih edilmektedir. Lazer ve mekanik gibi delik oranı metodlarının malzemenin efektif elastik modülü, yorulma davranışı ve enerji soğurma kapasitesi üzerinde doğrudan etkileri olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Örneğin 316L paslanmaz çelikte delik alanı arttıkça efektif Young modülünde anlamlı düşüşler raporlanmıştır. Ayrıca zırh/balistik uygulama literatürü, delikli yüzeylerin mermi çekirdeği üzerindeki eğilme-gerilme etkisiyle nüfuz mekanizmalarını değiştirebildiğini ve malzeme-geometri kombinasyonlarının çoklu darbe/çoklu etki performansını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle malzeme seçiminde mukavemet gibi sadece tek bir özellik değil; üretim sonrası mikroyapısal değişimler, kenar bölgesindeki ısıl etkiler, korozyon ve uygulama gibi özel gereksinimler birlikte değerlendirilmelidir (Andrzejak et al., 2024; Balos et al., 2021; Mironovs et al., 2025).

5. Güncel Araştırmalar ve Literatür Eğilimleri

Son yıllarda delikli plaklar üzerine yapılan araştırmalarda mekanik kararlılık ve burkulma davranışları yoğun ilgi görmektedir. Örneğin, Saraçoğlu, Uslu ve Albayrak tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, dairesel, kare, altıgen gibi farklı biçimlerde ve farklı yönelimlerdeki deliklerin kare plakların kritik burkulma yüklerine etkisi sayısal olarak incelenmiş, delik şeklinin ve konumunun burkulma dayanımını belirgin biçimde etkilediği gösterilmiştir (Saraçoğlu et al., 2024).

Ayrıca, delik varlığının rezonans davranışı üzerindeki etkisi de güncel literatürde aktif olarak araştırılmaktadır: Cunningham ve ark., düz dairesel plakların doğal frekans modlarında, perforasyonun modal yapıyı ve titreşim modlarını nasıl değiştirdiğini incelemiştir (Cunningham et al., 2020).

Bu yöndeki eğilim, özellikle yapı ve uydu sistemleri, akustik paneller ve titreşim kontrolü uygulamaları için kritik öneme sahiptir.

Akustik performans ve ses yutumu bağlamında da delikli plak araştırmalarında yenilikler gözlenmektedir. Li, Liu ve Qin, mikro delik yapısına sahip plakları düşük frekanslı ses emilimi için tasarlayarak, adım büyüklüğünde açıklıklara sahip bir konfigürasyonun daha geniş frekans bandında etkili bir ses yutucu olabileceğini göstermişlerdir (Li et al., 2021).

Aynı zamanda, pek çok çalışma delikli plakların akustik ve mekanik çok işlevli performansını optimize etmek için delik oranı, geometri ve yerleşim düzeni gibi parametrelerin çok kriterli analizini hedeflemektedir.

Güncel literatürde ayrıca heterojen / kompozit ve mikro-yapılı delikli plaklar üzerine de artan bir odaklanma vardır. Örneğin, Esendemir ve Başaran, çalışmalarında dairesel delikli kompozit plakların düşük hızlı darbe davranışı deneysel olarak incelenmiş ve deliklerin çarpma yükü altındaki enerji soğurmadaki rolü ortaya konmuştur (Esendemir & Başaran, 2023).

Bunun yanı sıra, ileri çok ölçekli modelleme teknikleri geliştirilmekte; özellikle farklı delik düzenlerine sahip plakların homogenizasyonu ve makrop ve mikroyapı etkileşimlerini simüle eden sayısal analizler, mevcut yükleme koşulları altında maliyetten tasarruf sağlayan fakat yüksek doğruluk sunan modelleme yaklaşımlarını mümkün kılmaktadır.

Gelecekte yapay zeka tabanlı optimizasyon, akustik, mekanik, ısı transferi gibi çok işlevli delikli yapılar ve mikro delik, 3D baskı gibi ileriye dönük üretim teknikleri üzerine literatürde daha fazla çalışmanın olması öngörülmektedir.

6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada delikli plaklar; tarihsel gelişimleri, geometrik özellikleri, üretim teknikleri ve mühendislik uygulamaları kapsamında ele alınmıştır. Literatür bulguları, delik şekli, boşluk oranı, yerleşim düzeni ve yönelimin; plakların rijitliği, gerilme dağılımı, burkulma dayanımı ve titreşim karakteristikleri üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu or-

taya koymaktadır. Bu yönüyle delikli plakların davranışı, deliksiz plaklardan hem niceliksel hem de niteliksel olarak ayrılmaktadır.

İncelenen çalışmalar, uygun şekilde tasarlanmış delik geometrileri sayesinde akustik performans, ısı transfer etkinliği ve ağırlık/rijitlik oranı gibi özelliklerin iyileştirilebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, üretim yöntemi ve malzeme seçimi; yorulma, balistik dayanım ve servis ömrü açısından kritik öneme sahiptir ve tasarım sürecinde birlikte değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak delikli plaklar, çok kriterli tasarım yaklaşımlarını gerektiren ve sayısal modelleme, deneysel doğrulama ile desteklenmesi gereken karmaşık mühendislik elemanlarıdır. Güncel araştırma eğilimleri, yapay zekâ destekli optimizasyon, çok ölçekli modelleme ve ileri imalat teknikleri sayesinde delikli plakların gelecekte daha yüksek performanslı ve işlevsel yapılar olarak kullanılacağını göstermektedir.

Kaynaklar

- Andrzejak, K., Mrówczyński, D., Gajewski, T., & Garbowski, T. (2024). Investigating the Effect of Perforations on the Load-Bearing Capacity of Cardboard Packaging. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 4205, 17(17), 4205. <https://doi.org/10.3390/MA17174205>
- Balos, S., Howard, D., Brezulianu, A., & Zlatanović, D. L. (2021). Perforated Plate for Ballistic Protection—A Review. *Metals*, 11(4), 526. <https://doi.org/10.3390/MET11040526>
- Cunningham, S. M., Tanner, D. A., Clifford, S., Butan, D., & Southern, M. (2020). Effect of Perforations on Resonant Modes of Flat Circular Plates. *Key Engineering Materials*, 865, 31–35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.865.31>
- Esendemir, Ü., & Başaran, Ö. (2023). Dairesel Delikli Kompozit Plakaların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13(2), 20–27. <https://doi.org/10.35354/TBED.1280285>
- Hamakawa, H., Miyazaki, M., Asai, Y., Kurihara, E., Nishida, E., & Hayashi, H. (2017). Prediction of acoustic absorption performance of a perforated plate with air jets. *Journal of Thermal Science*, 26(4), 378–384. <https://doi.org/10.1007/S11630-017-0952-5>
- Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A., & Güden, M. (2014). Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 63, 427–438. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.06.030>
- Krichnavaruk, S., & Pavasant, P. (2002). Role of Perforated Plates in the Airlift Contactor. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 35(6), 533–539. <https://doi.org/10.1252/jcej.35.533>
- Li, X., Liu, B., & Qin, C. (2021). A Perforated Plate with Stepwise Apertures for Low Frequency Sound Absorption. *Applied Sciences*, 11(13), 6180. <https://doi.org/10.3390/APP11136180>
- Liu, Y., Guo, P., Wang, Y., & Yan, Y. (2025). Experimental and theoretical analysis of nonlinear acoustic characteristics of perforated acoustic liners. *Sound & Vibration*, 59(1), 1681–1681. <https://doi.org/10.59400/SV1681>
- Mironovs, V., Osipova, M., Akishin, P., Zemchenkova, V., & Serdjuks, D. (2025). Methods for Evaluating the Elastic Properties of Stainless Steel Perforated Plates. *Metals* 2025, Vol. 15, Page 711, 15(7), 711. <https://doi.org/10.3390/MET15070711>
- Naqash, M. T. (2021). A Note on the Structural Assessment of Perforated Panels used in Façade. *Journal of Engineering Research and Reports*, 20(6), 123–128.
- O'Donnell, W. J., & Langer, B. F. (1962). Design of perforated plates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 84(3), 307–319. <https://doi.org/10.1115/1.3667483>

- Peng, Y., Mao, H., Liu, Z., & Wei, C. (2023). Simulation Study on Geometric Parameters Influencing the Flow Coefficient of Perforated Plate. *Buildings*, 13(3), 804. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13030804>
- Reich, S., Goesmann, M., Heunoske, D., Schäffer, S., Lueck, M., Wickert, M., & Osterholz, J. (2023). Change of dominant material properties in laser perforation process with high-energy lasers up to 120 kilowatt. *Scientific Reports*, 13(21611). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48511-9>
- Saraçoğlu, M. H., Uslu, F., & Albayrak, U. (2021). Investigation of Hole Shape Effect on Static Analysis of Perforated Plates With Staggered Holes. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, 3. <https://doi.org/10.47933/ijeir.883510>
- Saraçoğlu, M. H., Uslu, F., & Albayrak, U. (2024). Buckling analysis of perforated square plates with different oriented various shaped polygon holes. *Gümüşhane University Journal of Science*, 14(1), 149–163. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1330261>
- Shirzad, K., & Joodaky, A. (2023). Buckling analysis of thin plates with circular cut-outs for sustainable ventilated food packaging design. *Food Packaging and Shelf Life*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101214>
- Uslu, F., Saraçoğlu, M. H., & Albayrak, U. (2022). Buckling of Square and Circular Perforated Square Plates under Uniaxial Loading. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 4(2), 61–75.
- Yeranee, K., & Rao, Y. (2025). A Review of Recent Research on Flow and Heat Transfer Analysis in Additively Manufactured Transpiration Cooling for Gas Turbines. *Energies*, 18(13), 3282. <https://doi.org/10.3390/EN18133282>

//

Bölüm 13

YAPISAL TASARIM HATALI BETONARME BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ İNCELENMESİ: OSMANİYE ÖRNEĞİ

Muhammed Emin IŞIK¹, Nuri ERDEM²

1 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Öğrencisi 202311330001@ogr.oku.edu.tr, ORCID ID 0009-0006-9590-6957, Osmaniye, Türkiye

2 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Harita Müh. Böl., Doç. Dr., nurierdem@osmaniye.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1850-4616, Osmaniye, Türkiye

GİRİŞ

İnsanoğlunun doğal afetlerle mücadelesi yüzyıllar boyudur kesintisiz bir şekilde devam etmektedir. Büyük kitleleri etkileyen ve büyük zararlar verebilen yüzü aşkın afet çeşidi vardır (Genç, 2007; Demirelli vd., 2023). Bu afetler içerisindeki en tehlikelisi depremdir (Gündoğdu vd., 2012; Demirelli vd., 2023). Diğer doğal afetler ile karşılaştırıldığında çok daha fazla hasar ve yıkım etkisine sahip olan depremler, dünya üzerinde yüksek oranda can ve mal kaybına sebep olmaktadır (Solağan, 2022). Depremler sonrasında, insanların barınma gibi en temel ihtiyacını karşılayan binalarda hasarlara ve yıkımlara sebep olan depremler için önlem alınması gerekir. Betonarme binalarda büyük hasarlar verebilen etkenlerin başında da deprem gelmektedir (AFAD, 2019).

Türkiye'nin yüzölçümünün %92'si aktif deprem kuşağındadır ve nüfusunun %70'i yüksek riskli bölgede olmak üzere, toplamda Türkiye coğrafyasının %95'lik gibi çok büyük bir kısmı deprem tehdidi altında bulunmaktadır (Özen vd., 2021). Ülkemizdeki yapı stoğunun büyük oranda betonarme binalardan oluştuğunu düşündüğümüzde betonarme binaların yapısal tasarımı aşamasında fen ve teknik kurallar ışığında, kanun ve yönetmelikler çerçevesinde yapısal tasarım hatalarından arınmış bir şekilde tasarım yapmak gerekmektedir. Çalışma konusu ise mevcut binaların yapısal tasarım hatalarının yapıya olumsuz etkilerinin ve hasar alma durumlarının incelenmesidir. Araştırmada yapısal tasarım hatasına haiz binaların hasar durumları tespiti yapılacaktır. Böylelikle bundan sonraki aşamalarda ilgili idareler projelendirme aşamasında hataların önüne geçmesi, uzmanların statik-taşıyıcı sistem özelliklerinin dikkate alınması ve kamuoyunda taşınmaz ile ilgili tasarrufta bulunacak kişilerin konuya dair dikkatlerini çekmek amaçlanmıştır.

YAPISAL TASARIM HATALARI

Yapısal hasarlar temelde, kolonlarda, perde ve taşıyıcı duvarlarda, kirişlerde, döşeme ve çatı gibi yapının taşıyıcı elemanlarında; yapısal olmayan hasarlar ise duvar, sıva, boya, kapı, pencere, kaplamalarda ve tesisat gibi tamamlayıcı elemanlarda görülmektedir. Ülkemizde yaşanan depremler sonrasında yapılan gözlem ve diğer araştırma sonuçlarına göre deprem hasar nedenleri şunlardır (Elyiğit ve Ekinci, 2023);

- **Projelendirme Hataları:** Yumuşak kat, yetersiz yanal rijitlik, kısa kolon etkisi, güçlü kiriş-zayıf kolon bağlantı türü, kapalı çıkma varlığı, bitişik/ayrık nizam durumu, düşey taşıyıcı yapı elemanlarının yanlış tasarlanması, düşey ve yatay doğrultuda düzensizlik vs.dir.

- **Donatı Hataları:** Yetersiz sargılama, düğüm (birleşim) noktalarında yetersiz veya eksik donatı düzenlemeleri, yetersiz veya yanlış kenetlenme (bindirme) boyları vs.dir.
- **Yapım Hataları:** Kötü işçilik, kontrol ve denetimin yetersiz olması, düşük malzeme kullanımı, eksik veya yanlış etriye bağlantılarının olması, yanlış düzenlenmiş kolon filizlerinin bulunması vs. olabilir. Ayrıca sıvılaşma, zeminde aşırı oturma ve zemin taşıma gücü kaybından kaynaklanan hasar nedenlerine örnek olarak sayılabilir (Yüksel, 2008; Elyiğit ve Ekinci, 2023).

Yumuşak (Zayıf) Kat Düzensizliği

Bir yapının herhangi bir katının, diğer alt ve üst katlara göre yatay yüklere karşı belli bir ölçüde daha az veya daha fazla rijitliğine Uluslararası Bina Kodu (BIC) göre yumuşak kat düzensizliği olarak tanımlar (Matiyas vd., 2023). Bu durum ülkemizde genellikle zemin katlarda ve bir üst katlarında karşımıza çıkmaktadır. Yapılarda yumuşak kat düzensizliğinin ortaya çıkmasının en temel sebepleri arasında katlar arasında bulunan dolgu duvar miktarındaki ani değişim ve kat yüksekliklerinin farklı olmasıdır (Şekil 1). Geçmişte meydana gelen sismik olaylarda, yumuşak kat düzensizliğine sahip betonarme binaların, deprem esnasında kötü performans gösterdiğini gün yüzüne çıkarmıştır (Esteva, 1992). Dolgu duvarların varlığı ya da kat yüksekliklerindeki değişiklikler, katlar arasında ani rijitlik farklarına neden olarak sismik enerjinin belirli bir katta birikmesine yol açmaktadır. Bu durum, betonarme yapıların göçme, kontrollü hasar ve göçme öncesi davranışlarında önemli bir rol oynamaktadır (Adalier ve Aydingun 2001; Doğançün, 2004; Izadpanah vd., 2023; Noorifard vd., 2020; Sezen vd., 2003). Nitekim 6 Şubat 2023 Pazarcık ve Elbistan (Kahramanmaraş) depremlerinden sonra birçok rapor ve deprem hakkında yapılan araştırmalar incelendiğinde birçok yapı, yumuşak kat düzensizliği sebebiyle hasar almıştır (Akbaş ve Çalışkan 2023; Avcil vd., 2024). Benzer şekilde, 2015 yılında meydana gelen 7,8 Mw büyüklüğündeki Gorkha Depremi sonrasında Katmandu Vadisi'nde incelenen 64 betonarme binanın %41'inin yumuşak kat etkisi nedeniyle çöktüğünü ortaya koymuştur (Thapa ve Shrestha, 2025). Hal böyle iken bu tarz tasarımı yapılan binaların olumsuz etkilerine rağmen yumuşak kat düzensizliğine sahip çok sayıda yapı hâlâ dünyanın birçok yerinde kullanılmakta ve yenileri inşa edilmeye devam edilmektedir (Izadpanah vd., 2023).



Şekil – 1: Yumuşak (Zayıf) Kat Düzensizliğine Sahip Bina Örneği (Arşiv)

Yılmaz ve Öncü (2025) yaptığı çalışmada; zemin kat yüksekliği tasarımında gereksiz yere artırılmamalı, optimum yükseklik belirlenerek yapının yatay rijitliği korunmalı, dolgu duvarlar tüm katlarda dengeli şekilde kullanılmalı ya da alternatif düzenlemelerle rijitlik dağılımı eşitlenmeli, mevcut yapıların ve yeni projelerin modellemeleri güncellenmeli, özellikle zemin kat rijitliği ile ilgili ayrıntılı analizler yapılarak, kritik risk bölgeleri tespit edilip, gerekli güçlendirme çalışmaları planlanmalıdır şeklinde sonuçlar elde etmişlerdir.

Kısa Kolon Varlığı

Her ne kadar ticari ve işlevsellik adına yapılan bir uygulama olsa da statik açıdan binanın taşıyıcı sistemini olumsuz etkileyen ve deprem anında bu bölgelerde kısa kolon etkisi ile daha fazla kesme kuvvetine maruz kalarak hasar alma derecesini arttıran etkenlerden birisidir (Şekil 2). Yapısal tasarım hatalarından kaynaklı hasarlar ve bina performanslarıyla ilgili literatürde pek çok akademik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalara göre hasarların temel nedenleri arasında, yumuşak (zayıf) kat, kısa kolon etkisi, kapalı çıkmanın varlığı, yetersiz enine donatının olması ve düşük beton dayanımı gibi yapısal düzensizlikler ve eksiklikler gelmektedir (Meral, 2019; Bayraktar vd., 2013; Inel vd., 2013; Ozmen vd., 2014; Yon vd., 2015). Kısa kolon hasarları sadece bant pencere gibi net açıklığı azaltan uygulamalar sonrasında oluşmaz, bazen de dolgu duvar

davranışı nedeniyle kısa kolon etkisini gösteren kolon elemanlarına rastlanabilir (Çaycı, 2012).



Şekil – 2: Kısa Kolon Etkisinde Kalan Bina Örneği (URL_1)

Kapalı Çıkma Varlığı

Özellikle ülkemizde yaygın olarak kullanılan binalarda kapalı çıkmaların bulunması binalara ek yük getirdiği gibi, taşıyıcı elemanların iç kuvvet sınırlarını zorlamaktadır (Akgöbek, 2021). Ülkemizdeki bu konuyla ilgili imar mevzuatında çeşitli hükümler bulunmaktadır. Ancak kapalı çıkmanın yapısal bir düzensizlik olarak geçmemektedir (Meral, 2019). Bu nedenle kapalı çıkmalar günümüzdeki binalarda da yapımına devam edilmektedir. Kapalı çıkmaların olduğu yerlerde çoğu zaman kirişler inşa edilmediğinden kolon-kiriş arasındaki bağlantının eksik kalmasına olur (Şekil 3). Kiriş eksikliklerinden dolayı çerçeve süreksizliği oluşmakta ve bu da kolon-kiriş arasındaki yük aktarım mekanizmasını olumsuz etkilenmektedir (Meral, 2019; Özmen vd., 2011). Ayrıca betonarme binalarda süreksiz kirişler kapalı (ağır) çıkma bulunan binalarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Zemin kat üzerinde bulunan katların imar planlarında yer alan Taban Alanı Kat Sayısı (TAKS) ve Kat Alanı Kat Sayısı (KAKS) bir diğer ifade ile Emsal değerlerinden kaynaklı alanının arttırılması ve oda içerisinde kiriş görülmesi istenmediği için kapalı çıkmaların olduğu cephede bina kolonları kiriş ile bağlanmamaktadır. Binanın bir cephesinde kapalı çıkma olabileceği gibi tüm cephelerinde

kapalı çıkma bulunan binalar ile uygulamada karşılaşılabilmektedir. Ayrıca betonarme binalarda, bina içerisinde koridorlarda kiriş görünmesi istenmediğinden kapalı çıkmaların varlığı çerçeve süreksizliği gibi önem arz eden olumsuz duruma neden olmaktadır (İnce vd., 2025). Ağır kapalı çıkmaları olan binalar son depremler sırasında düzenli olan binalara göre daha fazla hasar aldığı görülmüştür (Özcebe, 2004). Bu konuyla ilgili yapılan hasar görebilirlik çalışmaları sırasında genel parametrelerin yanı sıra ağır kapalı çıkmaların olması deprem etkisini daha da arttırmaktadır (Ahmed vd., 2014).

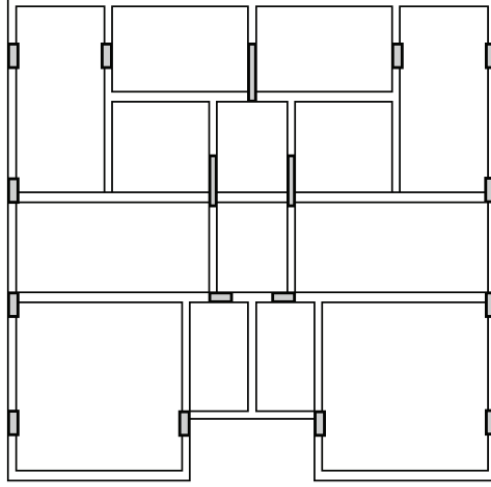


Şekil – 3: Kapalı Çıkmaya Sahip Bina Örneği (Google Maps)

Düşey Taşıyıcı Elemanlarının Tek Yönlü Olarak Düzenlenmesi

Taşıyıcı sistemde kolonların aynı doğrultuda düzenlenmesi genellikle mimari kaygılardan ötürü özellikle zemin katta işyeri olan binalarda yola cepheli kısımlarda bulunan düşey taşıyıcı elemanların tek yönlü düzenlenmesi daha geniş bir açıklık oluşturulmak istenmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 4). Binadaki kolonların tamamının kısa kenarlarının aynı yönde olması, bu doğrultuda bulunan ve kendilerinden daha kuvvetli olan kirişlere bağlanmasıyla zayıf kolon-kuvvetli kiriş durumu oluşur (Kaplan vd., 2006). Bu nedenle statik çerçeve sistem oluşturulurken

düşey taşıyıcı elemanlardan oluşan kolon ve perdelerin tek yönlü düzenlenmesi deprem gibi binaya etkiyecek ekstra kuvvetler esnasında binanın zorlanmasına hasar almasına müsait durumda getirmektedir.



Şekil – 4: Düşey Taşıyıcı Elemanların Tek Yönlü Düzenlenmiş Kalıp Planı Örneği (Özmen, 2011)

Düşey taşıyıcı elemanlardan kolon ve perdelerin hem x yönünde hem de y yönünde mümkün olduğunda eşit bir şekilde planlanması gerekmektedir. Zira depremin hangi yönden geleceği önceden bilinmemektedir. Bu şekilde bir tasarım yapılması depremin etkilerini en aza indirmek adına faydalı olacaktır.

Perde Kullanılmaması veya Yanlış Düzenlenmesi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre planda uzun kenarın kısa kenara oranı en az 6 olduğunda düşey taşıyıcı elemanlar perde duvar olarak nitelendirilir (TBDY, 2019), (Şekil 5). Bunun yanında perde duvarlar rijitlikleri nedeniyle depremler sırasında oluşan yatay yüklerin önemli bir kısmını karşıladığından diğer taşıyıcı elemanların hasar görmesini önlemektedir (Tozlu ve Gürsoy, 2024). Karma sistemlerde yapının üst kısmındaki perde eğilmesi çerçeveler tarafından, diğer taraftan çerçevelerin alt katlardaki kaymaları ise perdeler tarafından engellenmektedir. Perdeli olan bir yüksek yapıda yeterli rijitlik sağlanabilmesi amacıyla sistem çizgileri bir noktadan geçmeyen en az üç perde teşkil etmelidir. Deprem sırasındaki kuvvetler kat kütle merkezine etki etmektedir. Eğer kütle merkezi ve rijitlik merkezi çakışmazsa, yapı rijitlik merkezi etrafında döner (Akkaya, 2010). Perde sistemlerinin ideal şekilde düzen-



Şekil – 6: Yetersiz Dilatasyon (Deprem) Derzi Bırakılması Sonucu Orta Hasar Alan Bina Güçlendirme Örneği: Osmaniye İli (Arşiv)

Düşey Taşıyıcı Elemanlarda Ani Kesit Daralmasının İncelenmesi

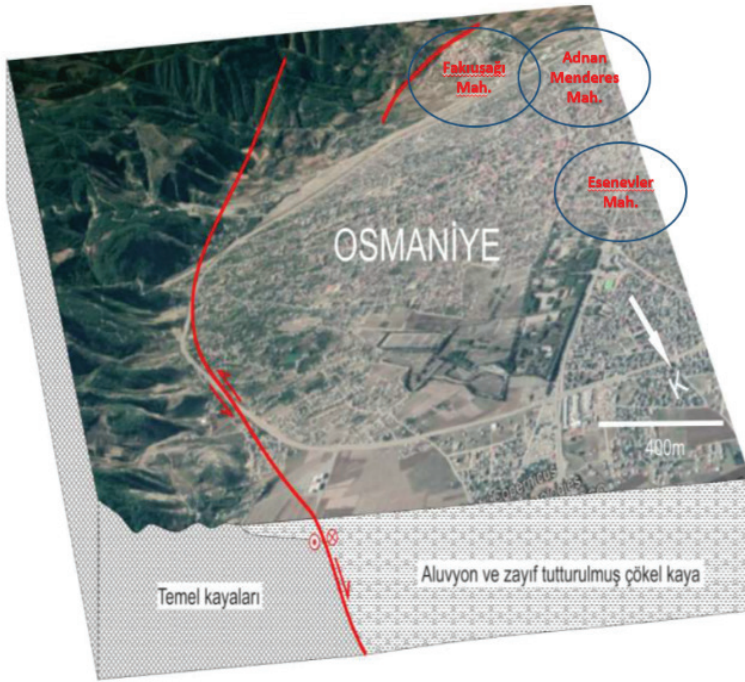
Kolon boyutlarının küçültülmesi uygulamasına sadece geçmişte yapılmış olan birçok eski yapıda rastlamak mümkündür. Ancak bu küçültme durumu çok hızlı yapılırsa, katlar arasında rijitlik ve dayanım düzensizliklerine neden olmaktadır. Kolon donatılarının daraltmanın yapılacağı yerde kesilmesi ya da donatıların kıvrılması şeklinde olan bu her iki uygulama şekli de uygun değildir (Kaplan vd., 2007).

Zemin Sınıfı, Taşıma Gücü Kaybı ve Zemin Büyütme Faktörlerinin İncelenmesi

Yapıların projelendirilmesi aşamasında zemin etüt raporları doğrultusunda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde belirtilen zemin sınıflarına ve zemin taşıma gücüne göre taşıyıcı sistem tasarımı yapılmaktadır. Zemin büyütme kavramı ise henüz yaygın bir şekilde tasarım aşamasında dikkate alınmamaktadır. Sismik deprem dalgalarının genlikleri, zemin

yüzeyine yakın mesafeden geçerken genlik ve ivme değerlerinde artma meydana gelebileceği düşünülmektedir. Bu artışa zemin büyütme faktörü denilmektedir (Ildır vd., 2020). Zeminin karakteristik özellikleri farklı katmanlardaki zemin büyütme faktörünün incelenmesi için kayma dalgası hızı da dikkate alınarak işleme dâhil edilmelidir (Borcherdt, 1994).

Osmaniye zayıf bir zemine sahiptir ve bu nedenle olası bir depremde çok şiddetli sarsılacaktır. Ayrıca şehir merkezindeki binaların altından diri fay geçmektedir ve bu nedenle de ayrıca büyük risk taşımaktadır (Şekil 7). Dolayısıyla Osmaniye'nin 6,5'ten büyük bir olası depremde çok hasar alabilir. Bu durumda yapılması gereken en akıllı yaklaşım yapıların kurallara uygun şekilde yapılmasıdır (JMO, 2021).



Şekil – 7: Osmaniye İli Merkez Kentsel Yerleşim Alanının Genel Yeraltı Zemin Yapısı (JMO, 2021). Kırmızı çizgiler diri fayları göstermektedir.

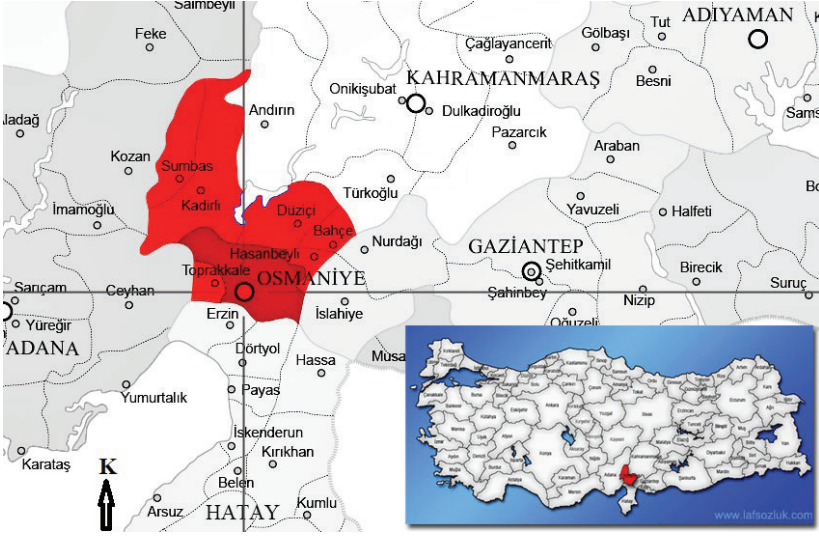
HASAR TESPİTİ ve KAPSAMI

Hasar tespiti çalışması; meydana gelen afetin yapıya vermiş olduğu hasarların gözlemsel olarak değerlendirilmesi ve derecelendirilmesidir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı hasar tespit çalışmalarında koordine Bakanlık konumundadır. Ayrıca Afet Sonrası

Bina Hasar Tespiti Yapılmasına İlişkin Genel Kurallar Hakkında Yönetmelikte belirtilen şekilde hasar tespit çalışmasında görevli personel inşaat mühendisleri, mimarlar ve inşaat teknikerlerinden oluşturulur (URL_2). Sahadaki hasar tespit çalışmaları afet sonrasında, o afetin binada oluşturduğu hasar boyutunun tespit edilmesi şeklindedir. Bunun dışındaki diğer tüm yapısal veya yapısal olmayan hataları ve geçmiş afetlerin izlerinin belirlenmesi gibi bir görevleri yoktur ve bu gibi durumlar tespit çalışmaları sırasında değerlendirmeye alınmaz (Erdem, 2024). Binalar; afet etkisi belirleme, hasarsız, az hasarlı, orta hasarlı, ağır hasarlı, acil yıktırılacak, yıkık, değerlendirme dışı, girilemeyen, tespit edilemedi ve kapsam dışı olmak üzere 10 farklı şekilde sınıflandırılır (AFAD Hasar tespit Genelgesi; URL_3).

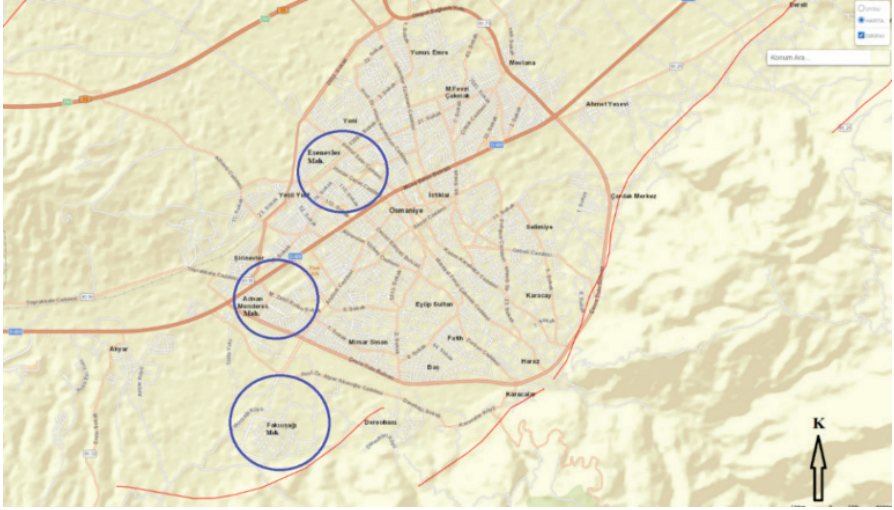
OSMANİYE İLİ İNCELEME ALANLARI

Osmaniye ili, Türkiye'nin güneyinde yer almakta olup, Doğu Akdeniz Bölge sınırları içerisinde, Çukurova olarak adlandırılan geniş tarım alanlarının bulunduğu alanda konumlanmaktadır (Şekil 8). Osmaniye; Kuzeyinde Kahramanmaraş, doğusunda Gaziantep, batısında Adana ve güneyinde Hatay illeriyle çevrilidir. Coğrafi olarak 37°04' kuzey enlemleri ile 36°15' doğu boylamları arasında yer almakta ve doğu-batı geçiş aksında stratejik bir noktada bulunmaktadır (Yıldırım, 2021). Özellikle Nur Dağları ve Gezit Dağı gibi yükseltilerle çevrelenmiş olması, ilin hem iklimsel hem de fiziki yapısını şekillendirmektedir. D-400 ve E-90 gibi önemli karayollarının yanı sıra kritik öneme sahip demiryolu bağlantılarına da sınırları içerisinde barındıran Osmaniye, bölgesel ulaşım ağının kilit noktalarından biridir (Kaya, 2019). Kent merkezi, Karaçay ve kollarının oluşturduğu birikinti havzası üzerinde yer almakta olup, bu fiziki yapı yerleşim morfolojisini önemli ölçüde şekillendirmiştir (Demirtaş, 2020). Osmaniye, doğusundaki Amanos (Nur) Dağları eteğinde ovaya doğru yerleşim göstermektedir. İl merkezinin üzerine kurulduğu ova Çukurova'yı oluşturan akarsuların alüvyonu üzerinde yer almaktadır (TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2021).



Şekil – 8: Osmaniye'nin Konumu (URL_4)

Osmaniye bulunduğu konum itibarıyla 1. Derece Deprem Bölgesinde yer almaktadır. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından hazırlanan Türkiye Diri Fay Haritası, deprem tehlikesini göstermek ve olası riskleri tahmin edebilmek için kullanılır (Şekil 9). MTA tarafından geliştirilmiş olan Yer Bilimleri Portalı, Ülkemizin yer altı jeolojik katmanlarını ve depremde zararlı olabilecek diri fay hatları, heyelanlar gibi olayları gösteren bir platformdur (URL_5). Osmaniye diri fay haritası incelendiğinde kent merkezi ve yakın çevresinin kuzey ve doğusunda, kuzeydoğu-güneybatı aksında uzanan 13 adet aktif fay hattının yer aldığı görülmektedir.



Şekil – 9: Osmaniye ve Çevresi Diri Fay Haritası (URL_6). Kırmızı çizgiler kent merkezinden geçen dirifayları göstermektedir. Mavi çember ile çevrili yerler çalışma alanlarını göstermektedir.

Çalışmanın bu evresinde Osmaniye İlinde depremde az, orta ve çok derecede etkilenen sırasıyla Adnan Menderes Mahallesi, Fakıuşağı Mahallesi ve Esenevler Mahallerindeki yapılardan yapısal tasarım hatalarına sahip binaların hasar durumları incelenmiştir. Öncelikle şunu belirtmek gerekir ki, yapısal tasarım hatasına sahip bir bina sadece bu nedenle hasar almaz. Bir yapının hasar alması için birçok faktör etki etmektedir. Örneğin donatı işçiliğinin projeye uygun olmaması, beton dayanımının standartlara uygun olmaması vb. etkenler binanın hasar alma derecesini önemli ölçüde etkilemektedir. Fakat bu tarz nedenler bir yapıyı gözlemsel olarak veya proje üzerinde incelendiğinde elde edilemeyecek verilerdir. Bu verileri elde etmek için kapsamlı bir çalışma yapmak daha detaylı incelemek gerekmektedir. Bu nedenle çalışma konusu olan yapısal tasarım hatalarının gözlemsel olarak değerlendirilecek şekilde yapıların mevcut durumlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Sonuçta bu şekilde tasarım hatalarının hasar durumuna etkisi sayısal olarak paylaşılmıştır. Bu faktörler eşliğinde çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Osmaniye il özelinde en fazla hasar alan ilçeler nüfus ile doğru orantılı olarak Merkez ve Kadirli ilçeleri ön plana çıkmaktadır (Tablo 1).

İlçe	Hasarsız	Az Hasarlı	Orta Hasarlı	Ağır Hasarlı	Acil Yıkılacak	Yıkılmış
Merkez	33128	13631	435	3479	335	243
Düziçi	13096	9050	268	1973	59	133
Bahçe	4214	1647	83	850	41	137
Kadirli	26476	7817	209	1823	29	110
Sumbas	4559	1310	11	231	3	10
Hasanbeyli	2567	759	51	542	53	38
Toprakkale	3591	818	31	113	11	8

Tablo – 1: *Osmaniye İli Hasar Durumu (Büyüköztürk ve Oral, 2024)*

SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Afete maruz kalan bir binanın hasar alma derecesi birçok farklı nedene bağlıdır. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen yapısal tasarım hataları ise bunlardan birkaç tanesidir. Elbette yapının hasar derecesini tek bir nedene bağlamak doğru bir yaklaşım değildir. Fakat çalışma kapsamında değerlendirilen yapısal tasarım hataları, binanın gözlemsel olarak tespitinin nispeten daha kolay ve mümkün olduğu durumları içermektedir. Bunun dışında betonarme binadaki donatı imalatının projeye uygun olmaması, beton dayanımının standartlara uygun olmaması, projelendirme aşamasında zemin faktörlerinin yetkin bir uzman tarafından değerlendirilmemesi, deprem yönetmeliğinde belirtilen güçlü kiriş-zayıf kolon prensibi vb. etkenlerde binanın hasar alma derecesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında gözlemsel olarak ve mimari, statik proje üzerinde tespiti mümkün olan durumlar irdelenmiştir. Böylelikle bundan sonra süreçlerde binaların tasarım ve projelendirme aşamasında her ne kadar yönetmelik ve mevzuatlarda engel olmamasına rağmen benzer yapısal tasarım hatalarının dikkate alınarak tasarım yapılması, projelendirilmesi ve uygulamaya geçilmesi en doğru yaklaşım olacaktır. Çevre düzeni planından sorumlu idare olan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı da şehrin planlanmasında üst idare görevini doğru bir şekilde yerine getirerek kent planlaması açısından ruhsat vermeye yetkili ilgili idareleri denetleme ve yaptırım gücü uygulama konumunda yer almalıdır.

Bilgilendirme: Bu çalışma, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi (OKÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen OKÜ-BAP-2024-PT2-032 Proje Numaralı ve “*Deprem Bölgesindeki Binalarda Yapısal Tasarım Hatalarının Taşınmaz Değerine Etkisinin İncelemesi: Osmaniye Örneği*” isimli Lisansüstü Eğitim Enstitüsü YL öğrencisi Muham-

med Emin IŞIK'ın hazırlamakta olduğu yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Katkılarından dolayı OKÜ-BAP birimine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Adalier, K., & Aydingun, O. (2001). Structural engineering aspects of the June 27, 1998 Adana-Ceyhan (Turkey) earthquake. *Engineering Structures*, 23(4), 343–355.
- AFAD, (2019). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/depremnedir> (Erişim Tarihi: 22.05.2025).
- Ahmed MM, Jahan I, Alam MJ. Earthquake vulnerability assessment of existing buildings in cox's-bazar using field survey & GIS. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2014; 3(8): 1147-1156.
- Akbaş, A., & Çalışkan, Ö. (2023). Deprem etkisinde hasar alan betonarme yapıların düzensizlik türleri yönü ile incelenmesi. In *International Conference on Scientific and Academic Research* (Vol. 1, pp. 428–435).
- Akkaya Y., Deprem Kuvvetlerine Karşı Betonarme Perdelerin Davranışı ve Boyutlandırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2007, İstanbul.
- Akgöbek B.A., 2021. Çıkmalı Betonarme Binaların Deprem Davranışının TBDY 2018'e Göre Analitik Olarak İncelenmesi ve Uygun Güçlendirme Yöntemlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Haziran 2021, Konya.
- Aktan S., Kıracı N., 2010. Betonarme Binalarda Perdelerin Davranışa Etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXIII, Sayı:1, 2010.*
- Avcil, F., Işık, E., İzol, R., Büyüksaraç, A., Arkan, E., Arslan, M. H., Aksoylu, C., Eysisüren, O., & Harirchian, E. (2024). Effects of the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake on structures in Kahramanmaraş city. *Natural Hazards*, 120(3), 2953–2991.
- Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Pehlivan, M. (2013). Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 49-72.
- Büyüköztürk E. ve Oral M., 2024. Kalıcı Deprem Konutlarında Kullanıcı Memnuniyeti Analizi: Osmaniye Örneği. *Artium* Vol. 12, Issue 1, February 2024.
- Borcherdt, R.D. (1994). Estimates of Site Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification). *Earthquake Spectra* 10:4, 617-654.
- Çaycı BT, Simav depremi sonrası bina yapısal özellikleri ile hasar seviyesi ilişkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2012.
- Demirtaş, A. (2020). Osmaniye Şehir Morfolojisinin Fiziki Coğrafya Unsurlarıyla İlişkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi.
- Doğangün, A. (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, 26(6), 841–856.

- Erdem N., 2024. Deprem Sonrasında Hazırlanan Hasar Tespit Raporlarının Konut Fiyatlarına Etkisi: Osmaniye İli Örneği. Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar Syf: 67-84, Mart 2024.
- Elyiğit, B. ve Ekinci, C.E., (2023). Betonarme Yapılarda Yapısal ve Yapısal Olmayan Hasarlar ve Hasar Tespiti Üzerine Bir Araştırma. Engineering Sciences, 18(2):19-42, DOI: 10.12739/NWSA.2023.18.2.1A0485.
- Esteva, L. (1992). Nonlinear seismic response of soft-first-story buildings subjected to narrow-band accelerograms. Earthquake Spectra, 8(3), 373–389.
- Ildır M., Vural İ., Kılıç S. (2020). Sıvılaştırma Potansiyeli Yüksek Adapazarı Zeminleri için Büyütme Faktörünün Araştırılması. Academic Platform Journal of Engineering and Science. <https://dergipark.org.tr/en/pub/apjes/issue/52467/581950>
- Izadpanah, M., Zibasokhan, H., Roussis, P. C., & Asteris, P. G. (2023). Pure-bending yielding dissipater for the seismic retrofitting of reinforced concrete buildings with soft-story irregularity. Structures, 55, 933–950. <https://doi.org/10.1016/j.iistruc.2023.06.078>
- İnce O., Çakıl B., İnce E.G. ve Atar M., 2025. Betonarme Binalarda Çerçeve Süreksizliğinin Deprem Performansına Etkisinin Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(3), 2025 Araştırma Makalesi.
- İnel M, Özmen HB, Çaycı BT. Simav ve Van depremleri (2011) yapı hasar nedenlerinin değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2013; 19(6): 256-265.
- Kamal M., Çaycı B.T., İnel M., 2018. Düşük ve Orta Yükseklikteki Binalarda Çekiçleme Etkisi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. Cilt:6 – Sayfa: 141 – 151. 2018. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/estubtdb/issue/42755/516079>
- Kaplan H., Tama Y.S., Ün H., Yılmaz S., (2007). Kamu Yapılarında Gözlenen Yapısal Kusurlar. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. Cilt: 13 Sayı: 2 Sayfa: 203-212, 2007. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20517/218454>
- Kaya, M. (2019). Osmaniye’de Ulaşım ve Mekânsal Gelişim. [Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi].
- Matiyas, S., Workeluel, N., Mohanty, T., & Saha, P. (2023). Review of different analysis and strengthening techniques of soft story buildings. Materials Today: Proceedings.
- Meral, E., (2019). Betonarme Binalarda Kısa Kolon Etkilerinin Araştırılması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi. Cilt: 11, Sayı: 2 Haziran 2019.
- Meral E., (2019). Kapalı Çıkmalı Betonarme Binaların Deprem Davranışının Değerlendirilmesi. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi 31(2), 309-318, 2019.

- Noorifard, A., Tabeshpour, M. R., & Mehdizadeh Saradj, F. (2020). New approximate method to identify soft story caused by infill walls. *Structures*, 24, 922–939.
- Ozmen, H.B., Inel, M., Akyol, E., Cayci, B.T., Un, H. (2014). Evaluations on the relation of RC building damages with structural parameters after May 19, 2011 Simav (Turkey) earthquake. *Natural Hazards*, 71(1), 63-84.
- Özcebe G. Deprem güvenliğinin saptanması için yöntemler geliştirilmesi. TÜBİTAK İÇTAG YMAÜ İ574 Numaralı Araştırma Projesi Sonuç Raporu, Ankara, 2004.
- Özen, R.F., Korkmaz, S.Z., Ecemiş, A.S., (2021). Mimari ve Strüktür Tasarım İlişkisinde Tekrarlanan Hatalar: 2020 İzmir Depremi İzlenimleri.
- Özmen HB, Düşük ve orta yükseklikteki betonarme yapıların deprem performanslarını etkileyen faktörlerin irdelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2011.
- Özmen HB, İnel M, Çaycı BT. Kapalı Çıkma Düzensizliğinin Betonarme Yapıların Sismik Davranışına Etkilerinin Değerlendirilmesi. Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı; 30 Mayıs-3 Haziran 2011; İstanbul.
- Sarı H. Mevcut betonarme yapılardaki tasarım olumsuzluklarının yapı performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2010.
- Sezen, H., Whittaker, A. S., Elwood, K. J., & Mosalam, K. M. (2003). Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey. *Engineering Structures*, 25(1), 103–114.
- Solağan, E., (2022). Uzun Periyotlu Yüzey Dalgalarının Yüksek Binalara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi.
- Tekel H., 2006. Betonarme Yapılarda %1 Oranında Perde Kullanımının Değerlendirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri / Sayı: 444-445-2006/4-5*.
- Thapa, R., & Shrestha, K. C. (2025). Gapped inclined bracing (GIB) retrofit for soft-story vulnerable reinforced concrete residential buildings in Nepal. *Structures*, 74, 108548.
- TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (Mart 2021, Sayı:22). Fay Üzerinde Yaşayan İllerimiz: Osmaniye Raporu-10.
- Tozlu İ., Gürsoy Ş., (2024) Farklı Yüksekliğe Sahip Betonarme Binalarda Perde Duvar Yerleşiminin Bina Davranışına Etkisinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerle İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2019).
- URL_1: <https://www.youtube.com/watch?v=7XDdEfjzxww> (Erişim Tarihi: 27.09.2025)

- URL_2: İçişleri Bakanlığı Afetler Sonrası Bina Hasar Tespiti Yapılmasına İlişkin Genel Kurallar Hakkında Yönetmelik. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/06/20250622-1.htm> (Erişim Tarihi: 28.09.2025)
- URL_3: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/Genelge/Hasar_Tespit_Genelgesi_ve_Ekleri (Erişim Tarihi: 28.09.2025)
- URL_4: Osmaniye'nin Konumu Görselleri. <https://www.lafsozluk.com/2009/05/osmaniye-merkez-nerededir.html> (Erişim Tarihi: 07.10.2025)
- URL_5: <https://halktv.com.tr/gundem/mta-diri-fay-haritasi-yenilendi-iste-haritalarla-turkiyedeki-aktif-fay-hatlari-815173h> (Erişim Tarihi: 27.09.2025)
- URL_6: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (Erişim Tarihi: 27.09.2025)
- Yıldırım, S. (2021). Osmaniye'nin Coğrafi Konumu ve Bölgesel Önemi. [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi].
- Yılmaz, A., Öncü, M.E., (2025). Deprem Etkisi Altında Yumuşak Kat Düzensizliğine Sahip Betonarme Binaların Hasar Görebilirlik Analizi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(3), 1574-1590.
- Yon, B., Sayin, E., Calayir, Y., Ulucan, Z.C., Karatas, M., Sahin, H. , Alyamac, K.E., Bildik, A.T. (2015). Lessons learned from recent destructive Van, Turkey earthquakes and Structures, 9(2), 431-453. doi: 10.12989/eas.2015.9.2.43
- Yüksel, İ., (2008). Betonarme Binaların Deprem Sonrası Acil Hasar Değerlendirmeleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24(1-2):260-276.

//

Bölüm 14

KARAYOLU YÜZEYLERİNDE AKIŞA GEÇEN YAĞMUR SULARININ KİRLETİCİLERİNİN AZALTIMINA GENEL BAKIŞ

İhsan GÜZEL¹, Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9153-8644, iguzel@bingol.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0863-6436, mceloglu@bingol.edu.tr

GİRİŞ

Dünyada hayat varlığının temeli olan su için oluşturulmuş hidrolojik çevrimin ana bileşenleri okyanuslarda su depolanması, evapotranspirasyon (Kara su yüzeyinde buharlaşma ve bitkilerde terleme), yağış, yüzeysel ve yeraltı suyu akışı, yeraltına sızma yoğunlaşma, yeraltı suyu beslemesi ve depolanmasıdır. Yeryüzüne düşen yağışın yaklaşık % 60-70 'i atmosferde su buharını oluşturmak için evapotranspirasyonla geri dönmektedir. Evapotranspirasyonun genel olarak meteorolojik (Güneş radyasyonu, hava buhar basıncı, sıcaklık, rüzgâr, hava basıncı) coğrafi - topoğrafik (Enlem, yükseklik, yön, arazi tipi), su kütlesi ve kalitesi (Alan, derinlik, tuzluluk, kirlenme, hareketlilik) faktörlerden etkilenmektedir. Hidrolojik çevrimde buharlaşmayı etkileyen yağış ise rakım, yer şekli, denize mesafe, deniz akıntıları ve bitki örtüsü ile ilişkilidir. Hidrolojik döngüde küresel su dengesi olarak yıllık yağışla buharlaşma yaklaşık eşittir.

Dünya yüzeyine yıllık yağdırılan yaklaşık 505 bin km³ (5x10¹⁴ ton) yağış atmosfer kütesinin % 0,001 dünyamızın su miktarının % 0.037'si, tatlı su kaynaklarının ise % 1.39 dur. Kara yüzeylerine yağın ortalama 758 mm yüksekliğinde toplam yıllık 110000 km³ yağışın yaklaşık %67'si buharlaşırken yüzeysel akışa geçen ve sızan yağmur suyu ise toprağa akarsulara, akiferlere, nehirlere, kapalı havzalarda bulunan göllere ve denizlere ulaşmaktadır. Karasal alandan denizlere ulaşan yağmur suları ve okyanuslara yağın yağışların tamamına yakını birlikte buharlaşmaktadır (Gültekin, 2024, s. 27; Karaman & Gökalp, 2010, s. 60)

Atmosfer ve kara-deniz ara yüzeyinde hareket eden suyun kara yüzeyinde hareketi yüzey akışı, yeraltı ve akarsu akışı ile sağlanır. Yeraltına sızan miktarının hidrolojik çevrime dönüşümü ise sızma ve akiferler içerisinde hareketle yeraltı suyuna katılarak buradan denizlere, nehirlere ve pınarlara deşarjla gerçekleştirilir. Bu dönüşümde Yerküre su kaynaklarından (%97.50 tuzlu su, %2.50 tatlı su) %69'u buzullarda bulunan tatlı suların yaklaşık %30'u olan yeraltı suları ve %1'i olan yüzeysel su olarak tanımlanan, nehir, göl, ıslak alan, toprak nemi beslenir.

Tatlı su kaynaklarına karasal alanda farklı dağılımı, nüfus artışı ve beraberinde besin ve gıda için suyun daha fazla tarımda kullanılması yanı sıra şehirleşen ve sanayileşen bölgelerde su ihtiyacı, yeraltında bulunan suların temininde mevcut teknik koşullar ve maliyetler nedeniyle erişim güçleşmiştir. Erişilen tatlı su kaynaklarında ise özellikle insan faaliyetlerinin yoğunlaştığı bölgelerde yüzeysel akışa geçen ve sızan suların kirliliğin artmasından dolayı kalitesi azalmaya başlamıştır.

Tatlı su katresini ve miktarını olumsuz yönde etkileyen en önemli sebeplerden biri olan kentleşen bölgelerde geçirimsiz yüzeylerin yüzeysel

akış hızını, sızan sularda kirletici miktarını artırması ve sızmayı azaltmasıdır. Doğal yüzeylerin %15, %40 ve %80 oranında geçirimsiz yüzeylerle kaplanması durumunda sırasıyla ortalama yüzeysel akışta 2, 3.50, 5 kat artış, sızmada %16, %30, %70 azalma, evapotranspirasyonda ise %5, %11, %25 azalma meydana getirmektedir (Raspati, Azrague, & Jotte, 2017).

Geçirimsiz yüzeylerden olan karayolu yüzey alanları kent dışı ve kent içi konumundadır. Kentsel alanlarda yol yüzey alanı yaklaşık %10 ile %15 arasında değişirken, ticari ve endüstriyel alanlarda otoparklarla beraber trafik ile ilgili alanlar % 45 seviyelerine kadar çıkmaktadır (Huber & Helmreich, 2016, s. 295). Kent dışı yol olarak değerlendirilen il, devlet, otoyol, köy yolu ve diğer yolların güzergâhları aynı zamanda çevre yoluyla doğrudan kent içinden veya yakınından geçebilmektedir. Kent dışı karayollarının yüzeysel alanları geometrik sınıflarıyla ilişkili olarak ülkelere göre değinmekle beraber ülke yüzölçümünün yaklaşık % 0,1 ile %0,3'ü arasındadır. Örneğin Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğunda bulunan yaklaşık 70000km il, devlet ve otoyolun ortalama platform genişliği 17 m kabul edildiğinde ülke yüzölçümünün yaklaşık %0,16'sıdır.

Kent dışı karayollarında akışa geçen yağmur suyu miktarının yıllık ortalama yağışa oranı az olmasına karşın; bu akışta bulunan kirleticilerin alıcı ortamlarda su kalitesine olumsuz etkileri daha fazladır. Kirleticiler genel olarak insan faaliyetlerinin artışının sonucu olan artan taşıt sayısı ve trafik yoğunluğundan, taşıt, üst yapı kaplama malzemesi, karayolu güzergâhlarda bulunan donanım (Trafik işaretleri, çelik oto korkuluk vb.), güzergâhlara yakın yapı ve arazi özelliklerinden ve atmosfer birikimlerinden kaynaklanır. Almanya'da 281 km² otoyol alanında yıllık 70 ton, 15750 km² olan tüm karayollarında (Demiryolları, hava alanları hariç, kaldırım, otopark alanları dâhil), 4073 ton ağır metalin trafik alanlarında akışa geçen yağmur suyuyla alıcı ortamlara taşındığı belirlenmiştir (Huber & Helmreich, 2016, s. 297).

Günümüzde iklim değişikliği ile beraber erişiminin giderek güçleştiği ve kalitesinin düştüğü tatlı suların küçük oranda kaynağı olan kent dışı yollarda yüzey akışına geçen yağmur suyunun yönetiminde kirleticilerin azaltılması gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Karayollarında başta trafik güvenliği olmak üzere karayolu yüzeylerinde akışa geçen suların etkilediği alıcı ortamlarda su kalitesinin korunması ve iyileştirilmesinin birlikte değerlendirilerek kirliliğin azaltılması için karayolu güzergâh özelliklerine göre yağmur suyu yönetiminde uygun drenaj sistemlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yağmur Suyu Drenaj Sistemlerine Genel Bakış

İnsan faaliyetinin yoğunlaştığı kentsel alanlarda geçirimsiz yüzeylerin artışı nedeniyle su döngüsünün önemli bir bileşeni olan yağmur suyunun yeraltına sızması azalmıştır. Buna bağlı olarak akışa geçen yağmur sularının akış hızı, hacim ve kirlenmenin artması su baskını, akarsu erozyonu, doğal bitki zararı, su yolu ve kanalizasyon tıkanıklığı, altyapı hasarı, su kalitesinin bozulması ve kirlenmiş yağmur suyunun neden olduğu insan sağlığı sorunları ve bu sorunların meydana getirdiği ek maliyetleri ortaya çıkarmıştır (Francis & Yang, 2020). Bu olumsuzluklarla beraber iklim değişikliği etkileri akışa geçen yağmur sularının korunması gereken değerli bir kaynak olduğunun daha iyi anlaşılması kalitesini çok az dikkat alan geleneksel yağmur suyu yönetimi yerine su kalitesini daha fazla dikkate alan entegre su yönetiminde yağmur suyu drenaj sistemlerinin önemi artmıştır.

Geleneksel yağmur suyu yönetiminde akışa geçen yağmur suyunun hızlı bir şekilde uzaklaştırmak için akışı toplayan ve kentsel gri altyapının bir ögesi olan taşıma sistemleriyle beraber veya ayrı olarak taşınır. Taşımada rögarların sınırlı alanlarında çökelmeler sağlanarak arıtma yapılmadan akışa geçen yağmur suyunun göl, deniz, akarsu gibi alıcı ortamlara iletilen drenaj sistemleri uygulanmaktadır.

Entegre su yönetiminde ise gelişen inşaat teknolojileriyle beraber genişleyen kentsel alanlarda drenaj sistemleri 1970 'li yıllardan itibaren tutma, bekletme sızdırmaya odaklanarak kentsel peyzaj alt yapısında değerlendirmiştir. Kentsel planlamada akışa geçen yağmur sularının yönetiminde hidrolojik fonksiyonlar, ekosistem korunması ve sürdürülebilirlik stratejilerine dayanan yakalama -bekletme -salma (detention), tutma-bekletme-sızdırma (retention), geri bırakma (recharge), yağmur sularının doğrudan toprağa sızması (infiltrasyon) ,filtrasyon, biyoarıtma ve arıtma tesisi tasarımlarını içeren yaklaşımlar uygulanmaya başlanmıştır (Gülcü, 2021). Yaklaşımların genel amaçları kentleşmeden önceki hidrolojiyi işlevsel olarak uygulamaya çalışarak hidrolojide değişikliklerin etkisinin azaltılması ve mümkün olduğunca doğal seviyelere veya yerel çevresel değerlere uygun hale getirerek akış rejiminin sağlanması, su kalitesinin iyileştirilmesi ve kirleticilerin azaltılması olup; diğer amaçları ise;

- Su tasarrufu sağlamak maliyetleri azaltmak,
- Suyu ilişkin tüm gereksinimleri başta antropolojik, enik, ekoloji olmak üzere yerel olarak çevresel, sosyal, kültürel ve ekonomik perspektifler göz önüne alınarak, kısa, orta ve uzun vadede çevresel, toplumsal, ekonomik ihtiyaçları dengelemek,

- Yüzeysel suyun akışının yönetiminde atık su, su temini dâhil olmak üzere tüm su döngüsünü, suyun yollarını ve taşkın yollarının entegrasyonunu sağlamak
- Akışa geçen yüzeysel su miktarını, su kalitesini, tatlı su ve biyolojik çeşitliliği korumak,
- Mevcut ve gelecekteki kullanılabilir su ihtiyaçlarını karşılamak için arazi ve akarsu koşullarını korumak, daha uygun bir bitki örtüsü ve toprak yapısını geri kazandırmak,
- Kentsel arazi kullanımını optimize etmek, yatırım maliyetlerini sınırlamak ve kentsel genişlemenin etkisini dengelemek
- Kentleşmenin etkilerinin meydana getirdiği akış hacmi ve pik akışlar göz önüne alınarak kentsel alanların sellere karşı duyarlılığını azaltma ve belli ölçüde alıcı ortamların kalitesini korumak,
- Akış kontrolü, buharlaşma ve sızmayı mümkün olduğunca kaynağa yakın bir yerde yapılarak yüzeysel suyun kentsel gelişimin hidrojolojisi ve alıcı ortamların su kalitesi üzerinde etkilerini azaltmak olarak sıralanmaktadır (Fletcher et al., 2015, ss. 530–545).

Kentlerde akışa geçen yağmur suyu yönetiminde ülkelerin ekonomik, kültürel, sosyal, kentleşmenin coğrafi konumu ve alanı, iklim ve su potansiyeli şartlarına göre;

- Düşük etkili kentsel gelişim tasarımı
- Suya duyarlı kentsel tasarım
- Entegre kentsel su yönetimi tasarımı
- Sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri (SUDs)
- En İyi Yönetim Pratikleri/ Yağmur suyu kontrol önlemleri (BMPs)
- Alternatif teknikler
- Kaynak denetimi
- Yeşil altyapılar
- Sünger kent tasarım altyapı yaklaşımları uygulanmaktadır.

Bu yaklaşımlardan sünger kent tasarımı yağmur suyu yönetimini gri altyapı ile beraber değerlendirerek, yağmur suyunu kaynağında tutma, su akışını yavaşlatma, suları uyumlu buluşturma ilkelerini doğa tabanlı çözümlerle (Göllendirme, adalaştırma, hendekleştirme ve gölçükleştirme)

sağlayamaya çalışmakta olup diğer yaklaşımlardan farklılıklar göstermektedir (Tunçay, 2022, s. 101).

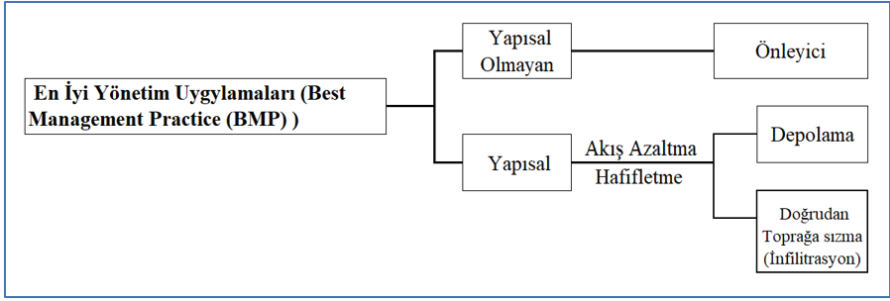
Sünger kent tasarımı dışında yaklaşımlar ise esas olarak akışa geçen yağmur suyu yönetimi ve kentin tüm su dönüşümü olmak üzere iki yönetime odaklanmaktadır. Bu yaklaşımlarda odaklanan yönetime göre uygulama teknikleri (yapısal ve yapısal olmayan), kavramlar bakımından benzerlikler olmakla beraber genel prensipleri bakımından özellikle entegre su yönetimi, suya duyarlı, düşük etkili kentsel gelişim ve kaynak denetimi kentsel drenaj yaklaşımları arasında yönetim bakımından farklılıklar bulunmaktadır (Fletcher et al., 2015, ss. 526-530).

Enerji verimliği, yağmur suyu yönetimi, yağmur suyu kalitesi, kentsel ekosistem hizmetleri ve su döngüsü yönetimini kapsayan peyzaj mimarisi ve peyzaj ekolojisine dayanan yeşil altyapılar (Gülcü, 2021) ise sünger kent tasarımı dışında kalan kentsel drenaj yaklaşımlarının tümünü kapsamaktadır.

Dünya genelinde kentlerde akışa geçen yağmur suyu yönetiminde yapısal ve yapısal olmayan yöntemlerle kaynağında yeşil önlemlere yönelmesi SUDs ve BSPs yaklaşımlarını giderek artırmıştır.

İngiltere’de geliştirilen SUDs geleneksel borulu drenaj sistemlerinden doğal süreçleri (yani sızma, buharlaşma, filtrasyon, tutma ve yeniden kullanım) kullanan ve geliştiren uygulamalarla akışın boru ve kanalizasyonlarla su kaynaklarına doğrudan yönlendirilmesi yerine kaynak kontrolü, ön arıtma, tutma ve sızma ilkelerine dayalı alternatif drenaj çözümleri sağlanmaktadır (Rathnayke & Srishantha, 2017, s. 237).

En İyi yönetim uygulamaları ise ABD’de 1972 yılında taslak haline getirilen Kuzey Amerika’da akışa geçen yağmur sularının kirliliği önlemek için bir tür uygulama veya yapılandırılma yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Fletcher & ark, 2015: 529). Mevcut ve gelecekteki kullanılabilir su ihtiyaçlarını karşılamak için arazi ve akarsu koşullarını korumak, daha uygun bir bitki örtüsü ve toprak yapısını geri kazandırmayı amaçlayan yapısal ve yapısal olmayan önlemlere dayalı tasarımlardır (Şekil 1).



Şekil 1. BMPs uygulama tipleri
Kaynak: Francis & Yang, (2020).

Yapısal olmayan uygulamalar genel olarak cadde sokak ve yakalama tutma alanlarının temizliği, kamuoyunu yönelik bilgilendirme, eğitim, atık ve çöp kontrolü, geçirimsiz yüzey kaplamalarında su kirlenmesini azaltıcı malzeme kullanımı kapsamaktadır. Yağmur suyu akışını ve kirlenmesini azaltıcı depolama ve sızdırma yapıları ise;

- Kuru uzun süreli tutma salma alanları
- Islak tutma bekletme sızdırma gölet alanları
- İnşa edilen sulak gölet alanları
- Yerinde yakalama-bekletme-salma yapıları
- Yeşil çatılar
- Geçirgen kaplamalar
- Sızdırma alanları
- Yeraltına sızdırma alanları
- Sızma Siperleri
- Hendekler
- Yağmur Bahçesi / Biyolojik Tutma alanları
- Kuru kuyular / Sızıntı Çukuru
- Yapılandırılmış Filtre alanları
- Çimenli Çukurlar
- Bitki örtülü filtre şeritleridir.

Akışa geçen yağmur suyu yönetiminin giderek bir parçası haline gelen En İyi Yönetim Uygulamaları maksimum akış hızını azaltarak kanalizasyon sistemine giren yağmur suyu hacmini azaltma veya geciktirme, filtreleme, biyolojik veya kimyasal işlemlerle su kalitesini iyileştirme olmak üzere üç ana esas dikkate alınarak tasarlanır. Tasarımda uygulama seçimini ise arazi kullanımı, fiziksel olarak yerinde uygulanabilirlik, akış kaynakları, bakım, iklim, kirletici türü ve maliyet faktörleri etkilenmektedir (Francis & Yang, 2020).

İl, devlet ve otoyolların kent dışı ve kent içi güzergâh durumuna göre SUDs ve BMPs ayrı veya beraber uygulanabilecek yaklaşımlardır.

Yağmur Suyu Drenaj Sistemlerine Genel Bakış

Ulaştırma sistemleri içerisinde karayolu ulaşımı diğer ulaşım türlerini tamamlayıcı özelliği yanı sıra yükün türü miktarı, coğrafi koşullar ve zamana göre esneklik, hızlı ve kolay taşıma imkânı ve günümüz koşullarında artan bireysel yaşam tercihlerinde zaman, mekân oluşum isteklerine ekonomik olarak en iyi karşılama avantajları bulunmaktadır. Karayolu ulaşımında birim maliyet, kullanılan enerji türü ve miktarı, çevre kirliliği, siyasi ve ekonomik gelişmelerden etkilenme gibi dezavantajlarına rağmen gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde en hızlı gelişen ve yük, yolcu taşınmasında en büyük paya sahip ulaşım türüdür (Ayhan, 2023, s. 19).

Karayolu ulaşım altyapıları toplumu ilgilendiren en önemli altyapılar olmakla beraber sürdürülebilir kalkınmanın ayrılmaz parçası olup ülkelerin en önemli öz varlıklarıdır. Karayolu altyapılarının yaşam döngüsü içerisinde yüksek maliyetleri, yapım bakım işletme aşamalarında doğal kaynak kullanım oranlarının fazlalığı (Örneğin bitümlü sıcak karışım tabakalarında %95 oranında agrega kullanımı) yanı sıra imalatlarda metal, kompozit kaplama, plastik ve kimyasal malzemeler bulunmaktadır. Bu durum sosyal, ekonomik ve çevre bileşenlerin beraber değerlendirildiği sürdürülebilir karayolu altyapısının önemini artırmaktadır (Demirtürk, 2021, s. 1085).

Sürdürülebilir karayolu altyapılarında sosyal ve ekonomik bileşenlerle ilişkili olarak kullanılabilirlik, uygulanabilirlik durumuna göre çevre bileşeninin dikkate alınması önemli olmaya başlamıştır.

Karayolu ulaşım altyapı projelerinde çevre ve toplumsal alanda etkileri giderek artan yüzeyde akışa geçen yağmur suyu yönetiminde trafik kazalarının azaltılarak yol kullanıcılarının güvenliği sağlanması ve bakım, kullanıcı maliyetlerinin azaltılması için aşağıda belirtilen öncelikli şartların sağlanması gerekmektedir (Ndon & Al-Manaseer, 2017).

- Güzergâhta sel ve taşkınların önlenmesi,
- Üst yapı kaplamalarında bozulmaların azaltmak ve üst yapı tabakalarını korunması,
- Kaplama yüzeyinde trafik etkisinden doğacak su jetleri ve püskürtmelerin ve kaplama yüzeyinde oluşan su filmi kalınlığının azaltılması,
- Sürtünme direncinin artırılması

Bu şartların sağlanması için güzergâhın kent içi ve kent dışı durumuna göre başta kaplama yüzeyinin enine eğimi olmak üzere güzergâhın düşey eksen eğimiyle beraber akışa geçen sular banket, orta refüj, tretuar kenarlarına yönlendirilerek yakalayıcı taşıyıcı (mazgal, boru, hendek) elemanlarla hızla uzaklaştırılarak alıcı ortama iletilmesi sağlamaktadır.

Alıcı ortamlara iletilen bu suların kirliliğinin su kaynaklarında olumsuz etkileri 1960 'lı yıllarda fark edilmesine rağmen Avrupa Bitliği tarafından 2000 yılında Su Çerçeve Direktifi 'in de kirleticilerin kontrol önlemlerinin alınmasının önemi vurgulanmıştır (Hallberg et al., 2022, s. 1654).

Kirleticilerin konsantrasyonu doğal ve insan faaliyetlerinden kaynaklı olarak mevsimsel, bölgesel ve mekânsal özelliklere göre farklılıklar göstermektedir. Doğal kaynaklı kirleticiler insan faaliyetleriyle atmosfere salınan gazlar dâhil olmak üzere atmosferde bulunan diğer maddelerin atmosferin hareketiyle ilişkili olarak kuru ve ıslak süreçlerle yüzeylerde birikir. Kuru atmosferik birikim toz, aerosol, gazın doğrudan toprak ve bitki yüzeylerine aktarılmasıdır. Bu süreçte kara yüzeyinde özellikle yüksek yoğunluklu parçacıklardan kaynaklanan kalıntılar meydana gelmektedir. Islak birikim ise atmosferden gelen kar, sis, ciy ve yağmurdan kaynaklanır. Bu süreç karayolu güzergâhlarında kuru atmosferik birikimlerle beraber mekânsal ve bölgesel olarak değişen çevre ve insan faaliyetlerinden kaynaklı kirleticiler olarak değerlendirilebilecek yol donanımı, yol bakım ve işletme faaliyetleri, yol üst yapı malzemeleri, taşıt ve trafik özelliklerinden kaynaklı kirleticilerin yüzeyden yıkanarak alıcı ortamlara taşınması sağlanmaktadır (Dierkes, Lucke, & Helmreich, 2015, s. 3034).

Karayolu yüzeylerinde ıslak yıkanma süreciyle akışa geçen sularda bulunana kirleticiler trafik, taşıt, yol donanım malzeme özellikleri, bölgeye özgü özellikler (YOGT: Yıllık ortalama günlük trafik, yağışsız dönem, drenaj alanı, maksimum yağış yoğunluğu ve arazi kullanımı), iklim fak-

törleri ve yol bakım uygulamalarından dolayı kirletici kategorisi, formu, parçacık boyutu, konsantrasyonları bakımından farklı özelliklerdedir.

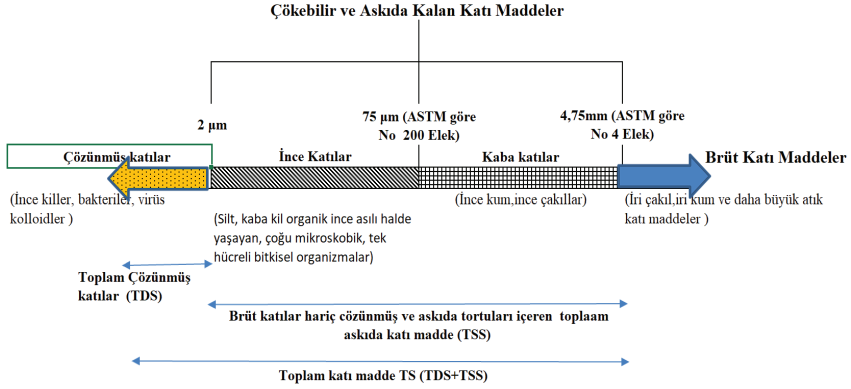
Kirleticilerin kategorilerinin kaynak ve etkileri Tablo 1’ de gösterilmiştir (Andersson et al., 2016). Besin ve buz çözücü kategorileri dışında kalan diğer kategorilerinin kirleticileri genel olarak taşıt, lastik, yol üst-yapı kaplama ve yol donanım özelliklerinden kaynaklıdır. Buz çözücü kategorisi kirleticilerinin kaynakları ise yol kaplama yüzeyinde buz çözücü olarak kullanılan katı ve sıvı halde maddelerdir.

Tablo 1. Karayolu yüzeylerinde akışa geçen yağmur sularında kirletici kategorileri ve etkileri

Kategori	Kaynak	Kirletici	Etkileri
Parçacıklar	Lastik ve yol donanım aşınması (mikro plastikler), fren balataları, yol donanımlarında (trafik levhası, oto korkuluk) aşınma, korozyon, yol kenarı erozyonu, atmosferik birikim, bakım faaliyetleri	Askıda toplam katı maddeler (TS)	Diğer kirleticilerin taşınmasında rol oynar, habitatların bozulması, siltasyon (kil ve silt boyunda partiküller kalıntıların neden olduğu su kirliliği)
Ağır Metaller	Yol aşınması, fren balataları, korozyon, katalitik konvektörler, yakıt, boya, yol donanımları (oto korkuluk, galvanizli çit trafik levhası buz çözücü tuz emisyonları)	Kadmiyum (Cd), Nikel (Ni), Krom (Cr), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Kurşun (Pb)	İnsanlar, hayvanlar ve flora üzerinde olumsuz sağlık, belirli yoğunluklar üzerinde toksit etkisi yapar
Organik maddeler	Lastik aşınması, yol aşınması, yakıt, karayoluna dökülen yağlar	PAH (Polisiklik aromatik hidrokarbonlar)	Su yaşamı ve insanlar için toksit kanserojen etki, suda çözünürlükleri düşük partiküller malzemelere absorbe olurlar
Buz çözücü maddeler	Yol tuzları	Sodyum, kalsiyum klorür	Artan tuzluluk, ağır metalleri hareketliği
Suda çözünür besinler	Atmosferik birikim, yanma dumanları, hayvan dışkı, yağlar, toprak parçacıkları, bitki kalıntıları, hayvan dışkı bitki kalıntıları, tarı arazilerinde kullanılan gübre	Fosfor (P), azot(N)	Ötrofikasyon (Besin elementlerinin artması)

Kaynak: Andersson et al. (2016)'dan uyarlanmıştır:

Farklı form ve konsantrasyonda olan kirleticilerin alıcı ortamlara taşınması hesaplamalarında ve kirliliğin azaltılmasında en fazla parçacık kategorisi dikkate alınmaktadır. Parçacık kirleticilerin boyutları nanometre boyutundaki koloidal organik maddelerden milimetre boyutundaki çakıllara kadar değişmektedir. Boyut sınıflandırılması birçok standardizasyon/ protokol (ISO: Uluslararası Standardizasyon Örgütü, ASTM: Amerikan Malzeme Test ve Ölçüm Derneği, WERF: Su Çevre Araştırma Vakfı, vb) ölçeğine göre değerlendirilmektedir. Sınıflandırma ölçeklerinde en belirgin farklılık kil-silt, ince kum ayırımında göz önüne alınan boyutlardır. ASTM standardizasyon ve WERF protokolünde 75 µm, ISO’da ise 63µm boyutu kil-silt, ince kum ayırımında referans olarak alınmaktadır. Yağmur suyu katularının WERF’ye göre sınıflandırılması Şekil 2’de gösterilmiştir (Semadeni-Davies, 2013).



Şekil 2. Yağmur suyu akışında katıların sınıflandırılmasının grafiksel gösterimi
Kaynak: Francis & Yang, (2020).

Kirliliğin özeti olan TSS, TDS ve TS parametrelerinin parçacık boyutu tanımlamasında standardizasyonlarda ve yapılan çalışmalarda farklılık bulunmaktadır. ABD' nin Kaliforniya Eyaleti Ulaştırma Bakanlığı (CALTRANS) parçacık yoğunluğu, akış hızı ve tipi gibi parametrelere göre değişiklikler olmakla beraber boyut ve davranışa dayalı olarak

1. Çözünmüş ($<0,001 \mu\text{m}$), kolloidal ($0,001-1 \mu\text{m}$) ve askıda katılar ($< 1 \mu\text{m}$)
2. Bulanıklığa neden olan ($0,001-10 \mu\text{m}$) ve çökebilen katılar ($>10 \mu\text{m}$)
3. TDS ($<0,45 \mu\text{m}$) ve TSS ($>0,45 \mu\text{m}$)
üç grup parçacık tanımlaması yapılmıştır.

Ağır metallere bakır, nikel, çinko ve kadmiyum genellikle çözünmüş fazda bulunurken krom ve kurşun yoğunlukla parçacıklara bağlı halde olduğundan taşınması ve değişim reaksiyonları kadmiyum ve çinkodan daha fazladır. Konsantrasyonu artışı en fazla olan bakır, çinko, kurşunun yaklaşık %31'i $2000 \text{ ile } 125 \mu\text{m}$, %22'si $63- 125 \mu\text{m}$, %22 si $63-32 \mu\text{m}$, %25 ise $0-32 \mu\text{m}$ aralığında parçacıklara adsorbe olduğu belirlenmiştir (Wong, Breen & Lloyd, 2000). Almanya'da karayolu alanlarında akışa geçen sularda (Otopark dahil) trafikten kaynaklı bazı ağır metal kirleticilerine ait yapılan çalışmada (Huber & Helmreich, 2016: 305) yıllık ağır metal toplamının yaklaşık %67'si çinko, %30'u bakır, %3'ü ise kurşun ve kadmiyumdur.

Tablo 2. Almanya karayolu alanlarında akışa gecen yağmur sularında trafik kaynaklı ağır metal miktarları

Kaynak	Ağır Metal (ton/yıl)			
	Cd	Cu	Pb	Zn
Lastik Aşınması	0,19	0,79	2,00	1255,00
Fren balatası aşınması	0,03	928,00	61,50	309,00
Yol aşınması	-	4,30	7,10	149,00
Lastik ağırlıkları	-	-	2,20	6,60
Çelik Korkuluk	-	-	-	313,00
Işıklı trafik işaretleri, trafik levhaları ve aydınlatma donanımları	-	-	--	60,00
Buz çözücü tuzlar	0,70	1,75	11,60	1,75
Toplam	0,92	935,00	84,40	2094,00

Kaynak: Huber & Helmreich, (2016).

Suda çözünür besinlerde bulunan azot ve fosfor bileşiklerinin alıcı ortamlarda konsantrasyona etkileri organik maddelerle karşılaştırıldığında ekolojik olarak ihmal edilebilir düzeydedir. Akışta toplam azotun büyük bir kısmı 11µm -150 µm boyut aralığındaki parçacıklara, toplam fosforun %60'tan fazlası 11 µm ile 150 µm arasında çapa sahip parçacıklara; bunun yaklaşık %40'ı ise 11µm ile 53 µm arasında parçacıklara bağlıdır.

Ana iyonların esas kaynağı akışta suda kolayca çözünen buz çözmek için kullanılan tuzlar ve çözeltilerdir. Karayolu kaplamalarında kullanılan tuzların alıcı ortamlarda konsantrasyonları güzergâhın coğrafi ve alıcı ortam konumlarına göre değişmekle beraber yaklaşık %60'ı yüzey suyu kaynaklarına, yaklaşık %40'ı toprak ve yeraltı suyu kaynaklarına karışmaktadır. Tuzun özellikle klor iyonunun değişim özelliği nedeniyle parçacığa bağlı ağır metal iyonlarını harekete geçirerek akış ve alıcı ortamlarda çözülmüş ağır metallerin oranını artırabilmektedir.

Organik maddelerden olan PAH'lar (Naftalin, benzokloroten, benzo-perilen, asenaftilen, fenantren vb.) iki veya daha fazla aromatik halkaya sahip kimyasal bileşiklerdir. Suda çözünürlükleri düşüktür ve çevreye girdiklerinde parçacıklara adsorbe olurlar. Yüksek ağırlıktaki PAH'lar parçacık, düşük ağırlıktaki olanlar ise çözülmüş formda olup; %45'i koloidal ve çözülmüş durumdadır. Yüksek PAH konsantrasyonlarının TSS konsantrasyonu ve nano boyutlu (10 nm) parçacıklarla ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Parçacık kategorisinde askıda kalan katı madde kirleticileri (TSS) ağır metaller, hidrokarbonlar, plastik ve kauçuk parçacıkları, besin maddeleri ve yol tuzundan kaynaklanan klorürlerden meydana gelen yaklaşık üçte biri organik madde içeren heterojen karışımlardır. Bu karışımlarda bulunan kirleticiler diğer kirleticilerin birlikte etkileşimi alıcı ortamlar için önemli bir ilave çevresel risk meydana getirmektedir.

Karayolu yüzeylerinde akışa gecen sulara kirleticiler arasında ilişkiyle ilgili yapılan çalışmalarda parçacık kategorisinde TSS ile COD (Kimyasal oksijen ihtiyacı), bulanıklık (Turbidity), metaller ve toplam PAH arasında yüksek korelasyon değerleri tespit edildiğinden (Tablo 3) TSS deneylerinin uygun fiyatlı ve kolayca ölçülebilir olması nedeniyle kirlilik ön değerlendirilmesinde göz alınan en önemli parametredir (Mooselua et al., 2022, s. 3).

Tablo 3. TSS ile kirleticiler arasında korelasyonlar

TSS ile ilişkili Parametreler	Korelasyon (R ²)
TSS-COD	0,95
TSS-Bulanıklık	0,80
TSS-Toplam PAH	0,80
TSS-(Partiküller Bakır nikel çinko, kurşun)	0,85

Kaynak: Mooselua et al., (2022).

Parçacıkların çözünmüş halde bulunmasını yağış pH'sı, katıların karakterizasyonu (boyut, çözünürlüğü ve gözenekliliği), yerleşim yerlerinin büyüklüğü, yüzey kaplama tipi, güzergâh sahası ve trafik akımı özelliklerinden etkilenmektedir

Çözünmüş kirleticiler genellikle daha hareketli olduğundan biyolojik alanda etkinliği daha fazladır. Yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarının kalitesini değiştirme ve amonyak ve nitrat toksitesiyle canlılara zarar verme sorunlarına sebep olur. Ayrıca metal kirleticilerin taşınmasını ve etkileşimini kontrol eden fiziksel ve kimyasal parametreler arasında çözünürlük önemli role sahiptir.

Kirleticilerin parçacıklara bağlı konsantrasyonları genellikle parçacıkların yüzey-hacim ve özellikle kil minerallerinin adsorpsiyon özellikleriyle ilişkilidir. Parçacıkların bileşimi, çözünürlüğü ve kirletici konsantrasyonları büyük ölçüde karayolu güzergâhının yerel ve trafik koşullarından etkilenmektedir.

Almanya’da yüksek trafikli karayollarında (YOGT>30000) akışa geçen sulara ampirik yöntemle bazı kirletici parametrelerine ait konsantrasyonların hesaplandığı çalışmaya (Göbel, Dierkes, & Coldewey, 2007, s. 34) göre özet parametrelerde TSS ve COD, ağır metal parametrelerinde çinko ve kurşun ana iyon parametrelerinde klorür, organik parametrelerde PAH kirleticilerinde en fazla konsantrasyon artışı meydana gelmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Karayolu yüzeyinde akışa geçen sulara kirletici kategori parametreleri ve konsantrasyonları

Kirletici Parametre (Birim)	Yağmur suyu		Yüksek yoğunluklu trafik alanları	
	Min.	Mak.	Min.	Mak.
Kimyasal ve fiziksel				
EC (µS/cm)	28	223	108	2436
pH	3,90	7,50	6,4	7,90
Özet				
TSS: (mg/L)	0,20	52	66(74)	937(74)
COD: (mg/L)	1,00	2	2	36
BOD: (ng/L)	5,00	55	63	146
Suda çözünür besinler				
Fosfor (mg/L)	0,01	0,19	0,23	0,34
Amonyum (mg/L)	0,10	2,00	0,50	2,30
Nitrat (mg/L)	0,00	7,40	0,00	16
Ağır Metaller				
Kadmiyum (µg/L)	0,01	3,90	0,30 (0,2)	13(0,5)
Çinko (µg/L)	5	235	120 (15)	2000 (1420)
Bakır (µg/L)	1	355	97 (21)	104 (140)
Kurşun (µg/L)	2	76	11 (98)	525 (170)
Nikel (µg/L)	1	14	4	70
Krom (µg/L)	2	8	6	50
Ana İyonlar (Buz çözücü maddeler)				
Sodyum (mg/L)	0,22	20	5	474
Magnezyum (mg/L)	0,03	0,33	1	1,40
Kalsiyum (mg/L)	1,10	67,13	13,70	57
Potasyum (mg/L)	0,46	0,65	1,70	3,80
Sülfat (mg/L)	0,56	14,40	5,10	139
Klorür (mg/L)	0,20	5,20	3,90	669
Organik				
PAH (µm/L)	0,04	0,76	0,74	17,10

MOH (mg/L)	0,29	0,41	0,51	6,50
EC: Elektriksel iletkenlik, BOD: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı COD: Kimyasal oksijen ihtiyacı TSS: Askıda kalan toplam katı madde PAH: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar MOH: Mineral yağ hidrokarbonlar				
() değerler YOGT<30000, mg=gram/1000 µg=gram/1000000				

Kaynak: Göbel, Dierkes, & Coldewey (2007).

Trafikten kaynaklı yayılan kirleticilerin yalnızca %5 ile %20'si arası yüzey akışıyla geriye kalan kısımlar rüzgâr ve püskürtme ile çevreye yayılarak alıcı ortamlara karışmaktadır. Ağır metallerin %17-25'i arası akışta, %21-38'i arası sıçrama suyunda, %19-45'i arası savrulup yoldan 25 m'ye kadar bir mesafede, %17-37'si arası ise 25 m den uzağa biriktiği tespit edilmiştir (Steiner et al., 2007, s. 849).

Karayollarında Kirletici Azaltımı

Karayolu güzergâhlarının boyuna doğrusal yapısı, su geçirimsizliği çok az olan kaplamaları, birden fazla havza alanında geçmesi, yağmur suyu akışının birçok noktadan deşarj edilmesi, kent içi veya kent dışı durumuna göre yetki alanlarının değişmesi nedeniyle karayolu güzergâhlarında akışa geçen yağmur suyu yönetimini diğer arazilerin yağmur suyu yönetiminden farklılaştırır. Başta trafik güvenliği, sel ve taşkın risklerini azaltmakla beraber taşıt, üst yapı kaplamaları, güzergâhlarda bulunan donanımlar (Trafik işaretleri, çelik otokorkuluk vb.), güzergâhlara yakın yapı ve arazilerden kaynaklı kirleticilerin giderilmesi ve azaltılması akışa geçen yönetiminin en önemli amaçlarından. Bu nedenle karayolu güzergâhı boyunca çok sayıda farklı konumlarda kirletici azaltma yapısının tasarlanması, yönetilmesi gerekmektedir.

Akışa geçen yağmur suyunda bulunan kirleticiler trafik özellikleri (Trafik yoğunluğu, hız) taşıt özellikleri (bileşimi, yakıt türü), bölgeye özgü saha özellikleri, iklim faktörleri, güzergâhta kullanılan kaplama malzemesi özellikleri ve bakım uygulamalarına göre zamansal-mekânsal olarak farklılık gösterir. Bu farklılıklar en önemli nedenleri ise iklim, trafik özellikleridir. İklim faktörlerinden yağışların zaman aralığı ve süresi atmosferde birikimle beraber yol yüzeyi ve çevresinde birikmiş kirleticilerin alıcı ortamlara taşınmasını ve alıcı ortamlarda kirletici konsantrasyonu etkileyen önemli etkenlerdir. Yaz mevsiminde kaplamalarda birikmiş olan kirleticiler sonbahar mevsiminin, yoğun kar ve buzlanma olan bölgelerde buzlanma önleyici madde kaynaklı ve diğer kirleticiler ilkbahar mevsiminin ilk yağışlarında alıcı ortam kirlenme konsantrasyonu artışında etkisi daha fazladır. Ayrıca sıcaklık artışları yağmur sularındaki

ağır metal konsantrasyonu artırmaktadır. Küresel ısınmaya bağlı olarak 2°C ve 1,5°C'lik sıcaklık artışının kentsel yüzeyler ve yağmur sularındaki ağır metal konsantrasyonunu sırasıyla %90 ve %50'den fazla artırdığı belirlenmiştir. Trafik özelliklerinin etkisi ise zamansal ve mekânsal olarak farklılık gösterebilen iklim faktörleriyle beraber taşıt, yol geometrik sınıfı, güzergâh arazi tipi özellikleriyle ilişkilidir.

Alıcı ortamlarda kirliliğin hesaplanması, akışa geçen suların arıtılması ve modelleme çalışmalarında trafikle ilgili kirletici miktarları kat edilen her taşıt kilometresi (mg/(araç km)), belirli bir süre boyunca belirli bir havza alanında kat edilen tüm araç kilometreleri için belirlenen madde emisyonu (mg/(ha km)), yıllık olarak yol uzunluğunda kirletici (g/km) ve trafik alanı (g/ha) ilişkili birimlerle değerlendirilmiştir (Huber & Helmreich, 2016, s. 297).

Kirliliğinin azaltılmasında seçilecek yöntem ve buna bağlı olarak belirlenecek yapı tasarımı genel olarak 63µm'den küçük yıllık beklenen TSS miktarı, taşıt başına günlük kirletici yükü, yeraltı suyu koruma alanları ve hassas ekosistemler dikkate alınmaktadır. Almanya'da Şehirler ve yerleşim yerlerindeki karayolunda akışa geçen suların yönetiminden sorumlu olan, DWA (Alman Su, Atık su ve Atık Birliği) mevzuatına göre suların arıtılması kararına 63µm 'den küçük askıda kalan kirletici miktarı referans alınarak yıllık olarak kg/ha birimine göre arıtıma kararı değerleri Tablo 5' de gösterilmiştir (Andersson et al., 2016).

Tablo 5. Yıllık askıda katı madde yüküne göre gerekli arıtma

63µm<askıda kalan madde miktarı (TSS) kg /ha/yıl	Kirletici yükü durumu	Arıtma işlemi
<280	Önemsiz	Arıtma gerekmez
280-530	Orta (Yüksek kirliliğin göstergesi)	Bazı durumlarda arıtma gerekli
530>	Yüksek	Arıtma gerekli

Kaynak: Andersson et al., (2016).

Kirleticilerle YOGT arasında ilişki için yapılan çalışmalarda kirletici konsantrasyonlarının, zamansal ve mekânsal farklılıklar nedeniyle niceliği ve niteliğindeki çeşitliğinden dolayı konsantrasyonla YOGT arasında zayıf korelasyon olmakla (Mooselu & ark., 2022: 4) beraber kirlilik seviyesinin belirlenmesi, akışa geçen yağmur suyu kalitesinin iyileştirmesinin karar verme aşamasının başlangıcında birçok Avrupa ülkesinde (Almanya Avusturya, Norveç İsviçre) mevzuatında YOGT referans alınarak

akış sınıflandırmalarına göre iyileştirme yöntem stratejileri belirlenmektedir (Tablo 6).

Tablo 6. YOGT'ye göre yağmur suyunun arıtılması

YOGT	Kirletici yükü durumu	Arıtma işlemi
<2000 (3000)	Düşük	Arıtma gerekmez
2000(3000)-15000 (30000)	Orta	Alıcı ortamlara iletilmeden önce iyileştirme
15000 (30000)>	Yüksek	Arıtma gerekli

() değerler Norveç diğerleri ise Almanya ve Avusturya aittir.

Kaynak: Andersson et al., (2016).

Kirleticilerin giderilmesi genel olarak yerçekimi kuvvetinden yararlanarak suyu katı parçacıklardan ayıran sedimentasyon (partiküllere bağlı kirleticilerin uzaklaştırılması), filtrasyon (çözünmüş/koloidal kirletici uzaklaştırılması), sıvı ve katı parçacıkların diğer bir maddeye bağlanması olarak tanımlanan adsorpsiyon (çözünmüş kirletici uzaklaştırma) ve bozuma, ayırma /oksidiyon süreçlerini kapsayan mikrobiyal süreçlerle sağlanmaktadır.

Arıtma sistemlerinin parçacık boyutlarına göre işlevselliği Tablo 7' de gösterilmiştir. Karayollarının geçtiği alanın özellikleri ve kirletici konsantrasyonuna ilişkin olarak 10µm- 0.45µm ve 0.45µmden küçük suda çözünmüş parçacıkların arıtılması sızma ve yağmur bahçeleriyle belli oranlarda sağlanmaktadır (Andersson et al., 2016). Özellikle 0.45µm'den küçük suda çözünmüş parçacıklar membran filtrenin uygulandığı ultrafiltrasyon tesisleriyle beraber, hidroksit çökmesi, sülfür çökmesi, demir eş çöktürmesi, humus (kompostlanmış yapraklar veya turba gibi humus içeren malzemelerin) adsorpsiyon gibi kimyasal süreçlerin uygulandığı tesislerde yapılmaktadır.

Tablo 7. Partikül boyut aralıklarına göre arıtma yöntemlerinin uygunluğu

Arıtma Sistemleri	Parçacık Boyut Aralığı				
	>5mm	5mm-125µm	125µm-10µm	10µm-0.45µm	<0.45 µm (Çözünmüş kirleticiler)
Sedimentasyon tuzağı	■				
Yeraltı tutma havzaları		■			
Yağmur suyu göleti		■	■		
Yağmur suyu Çukurları		■	■		
Sızma tesisi				■	
Yağmur bahçesi biofiltre				■	
Membran filtre					■

Kaynak: Andersson et al., (2016).

ABD ve Avrupa’da hacim azaltılması yapılarak arıtım verimliliğinin ve alıcı ortamlarda su kalitesinin artırılması için karayolu güzergâhında uygulanabilirliği ve maliyetlerden dolayı akışa geçen yağmur suların öncelikli olarak yeraltına sızması önceliklidir. 2019 yılı sonu itibariyle ABD’de bulunan 771 adet BMPs’nin yaklaşık %25’i otoyollarda uygulanmamıştır. Bu uygulamaların %25’i biofiltre, %22’si biyolojik tutma alanları, %36’sı ise arıtma tesisi ve filtrasyon cihazları, geriye kalanlar ise tutma göletleri, geçirgen kaplama, sulak alanlardır (Francis & Yang, 2020).

Çeşitli arıtma sistemlerinin kirlilik giderimin en yüksek verimliliği (Tablo 8) merkezi toprağa sızma tesisleri ve toprağa sızma ve sedimentasyon sistemlerinin birleşiminden meydana gelen tesislerden elde edilmiştir (Andersson et al., 2016).

Tablo 8. Çeşitli arıtma sistemlerinde kirleticilerin tahmini giderim verimliliği

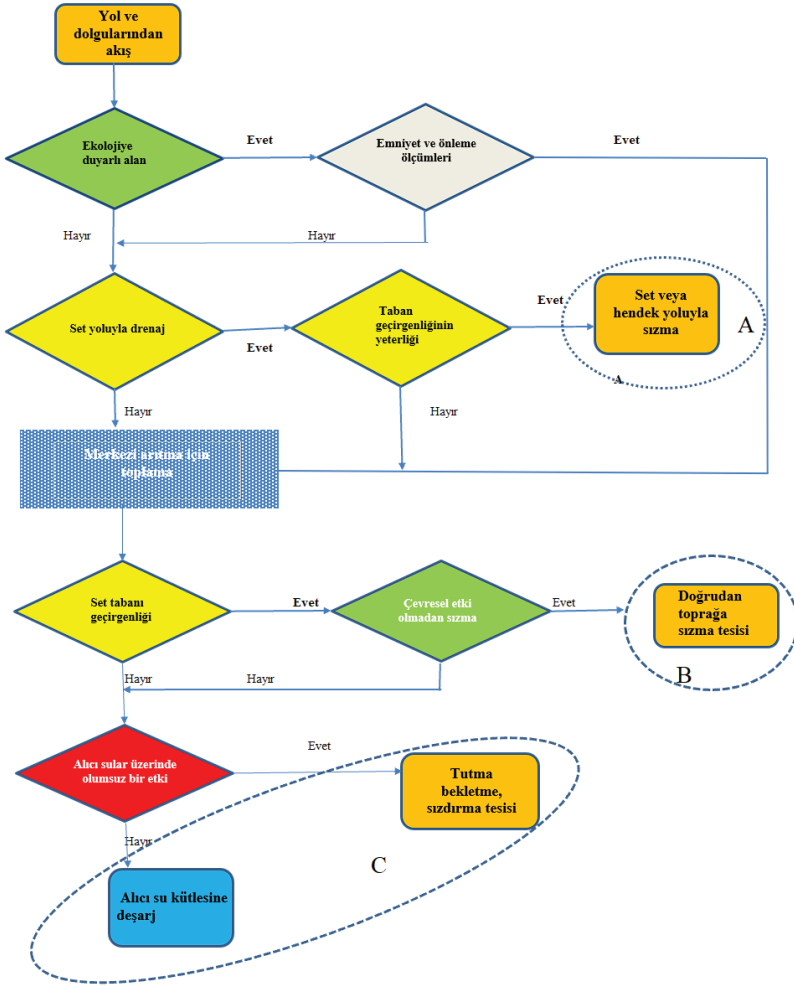
Arıtma Sistemi	Toplam P (%)	Toplam N (%)	Toplam Cu (%)	Toplam Zn (%)	Toplam TSS (%)	Yağ (%)	PAH (%)
Çimlendirilmiş kanal	30	40	65	65	70	80	60
Gölet	50	35	60	65	80	80	70
Islak alan	50	35	60	65	85	90	70
Sedimentasyon havzaları	55	15	60	65	75	65	60
Merkezi toprağa sızma tesisleri	65	40	65	85	80	80	85
Toprağa sızma ve sedimentasyon tesislerinin birleşimi	>65	>40	>65	>85	>80	>80	>85

Kaynak: Andersson et al., (2016).

Avrupa’da yüzey akışı arıtımı için ekolojik ve ekonomik avantajları bir araya getiren BMPs uygulamaları aşağıda belirtilmiştir (Mooselua & ark., 2022: 3)

- Yol kenarlarına, yol dolgularına ve çimenli alanlara sızma yan hendekler
- Yağmur suyu havuzları ve sulak alanlar
- Sedimentasyon havzaları ve merkezi sızma tesisleri
- Birleşik sedimentasyon ve merkezi sızma tesisleri

Karayolu yüzeylerinde akışa geçen yağmur suyunda bulunan kirleticilerin sızma yoluyla giderilmesinde genel olarak çevre dengesi, zemin geçirgenliği, çevre ve alıcı ortamlara ettileri göz önüne alınarak Şekil 3’de gösterilen tasarım şemasına göre A, B, C ön kararları alınır.



Şekil 3. Tasarım şemasına göre A, B, C ön kararları
Kaynak: Mooselua & ark., (2022)

Bu kararlarda YOGT etkisi belirleyicidir. A kararı YOGT ‘si 3000’den küçük, B kararı YOGT’si 3000-30000 aralığında, C kararı ise 30000’den büyük karayolu güzergahlarında uygulanır.

Karayolu ulaşımının en önemli yapılarından olan tünellerde egzoz kaynaklı kirleticiler ve diğer kirleticilerin çevreye yayılmaları olmadığından tünel iç kesitinde birikerek kirletici konsantrasyonlarını normal yol yüzeyine göre daha fazla artırmaktadır. Bu nedenle tünellerin temizliğinde kullanılan yıkama suları uzun uzun tünellerde flokülasyon ve/veya pH gibi kimyasal işlemlerle birlikte tünel içindeki bir çökeltme havuzuna yönlendirilerek arıtma işlemleri sonucunda alıcı ortamlara iletilir. Bu işlemlerin yapılmadığı uzun tüneller ve diğer tünellerde ise toplanan

yıkama suları ise ıslak alanlara veya inşaa edilmiş gölet veya filitre alanlarına deşarj edilerek gerekli arıtma işlemleri yapılarak alıcı ortamlara iletilmesi sallanmaktadır (Mooselua et al., 2022, s. 6).

Sonuç ve Tartışma

Karayolu güzergâhları farklı coğrafi, iklim, zemin, çevresel ve yerel koşullarından geçmektedir. Bu koşullarla beraber güzergâhın geometrik ve trafik özellikleri akışa geçen yağmur sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerini farklılaştıran faktörlerdir.

Kirleticilerin azaltımının ön değerdendirilmesi, alıcı ortamlarda su kalitesini iyileştirmesi, arıtma seçeneklerinin belirlenmesi ve arıtma verimliğinde YOGT ve 63µm' den küçük TSS değerleri göz alınan en önemli parametrelerdir

Akışta insan, ekolojik, alıcı ortam üzerinde olumsuz yönde en büyük etkileri olan ağır metal ve organik madde kategorilerinde kirleticiler lastik, fren balatası, çelik otokorkuluk ve yol kaplaması aşınmalarından kaynaklanmaktadır. Ağır metallerde en fazla orana sahip olan çinkonun yaklaşık %60'ı lastik, %15'i fren, 15'i çelik otokorkuluk, %7' si yol aşınması, %3'ü ise trafik levhaları ve aydınlatma donanımlarının aşınmasından kaynaklanmaktadır.

Geometrik sınıflandırmaya göre kent içi konumunda bulunan güzergâhlarda SUDs uygulamaları kentsel peyzajla birlikte değerdendirilerek öncelikli olarak sızma ve bio arıtma ile kirliliğın giderilerek alıcı ortamlara iletilmesinin sağlanması eski hidrolojik döngü koşulların yaklaşıması açısından öncelikli olmalıdır. Bu durumun yeterince sağlanmaması durumunda güzergâhlarda akışa geçen yağmur sularının kanalizasyon hatlarına bağlanmadan arıtma sistemlerine taşıma projelerinin hazırlanması alıcı ortamlarda su kitliğini azaltacaktır.

Kent dışı güzergâhlarda birçok noktadan deşarj olduğundan BMP uygulamalarından hendekler dolgu şevleri altında, geçirgen kaplama ve sızma siperleri ise yarma hendekleri ve banket kenarlarında uygulanabilmektedir. Bu güzergâhlarda boyuna ve arazi eğimine bağlı olarak hesaplanan debi ve kirletici konsantrasyonu ve alıcı ortamların zemin özelliklerine göre kuru uzun süreli tutma salma, ıslak tutma bekletme sızdırma gölet, inşaa edilen sulak gölet, sızdırma, yeraltına sızdırma yağmur bahçesi / biyolojik tutma, çukur, yapılandırılmış filtre alanı BMPs uygulamaları seçilebilir.

BMPs belirlenen hedefleri gerçekleşmesi ve verimli olmasında arazi kullanım faktörleri, fiziksel/yerinde uygulanabilirlik, mansap (yüzeyler-

de toplanan su) kaynağı, bakım, iklim, maliyet ve aşırı konsantrasyona sebebiyet veren kirletici faktörlerinin dikkate alınmalıdır.

Karayolu projelerinin su havzasında değişim etkileri karayolu ulaşımın önemi göz önüne alınarak değerlendirilerek, karayolu yapılmadan önceki hidrolojik koşulların asgari ölçüde sağlanması ve alıcı ortamlarda kirletici miktarlarının azaltılması günümüzde iklim değişikliği etkileriyle beraber önemini artırmaktadır. . Bu nedenle hidrolojik döngü ve su kirliliği önlenmesi alt başlığında rapor ve proje düzenlemelerin proje mevzuatlarında daha fazla dikkate alınması gerekmektedir

Alıcı ortamlarda kirliliğin azaltılması için yapısal olmayan önlemler olarak kent içi yollar ve trafik alanlarında kuru dönemlerde yüzey temizliğinin artırılması, kent dışı yollarda çelik otokorkuluk kullanımının ve buz çözücü madde kullanımının azaltılması kirletici konsantrasyonları ve trafik güvenliği göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.

Organik, ağır metal ve parçacık kategorilerinde kirleticilerin ana kaynağı olan taşıtların lastik ve fren balatalarının aşınmasının azaltılması için malzeme araştırmalarının artırılarak bu malzemelere ait standartların su ayak izide dikkate alınarak güncellenmesi kirletici konsantrasyonlarının azaltılmasında en önemli etken olacaktır.

Kaynakça

- Andersson, J., Mácsik, J., Van Der Nat, D., Norström, A., Albinsson, M., Åkerman, S., et al. (2018). *Reducing highway runoff pollution (REHIRUP): Sustainable design and maintenance of stormwater treatment facilities* (Technical report). (13.10.2025 tarihinde <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1364796/Fulltext01> adresinden erişilmiştir).
- Ayhan, F. (2023). Kalkınma planları ekseninde Türkiye’de karayolu ulaşımında görülen gelişmeler (1963–2023). *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 34(1), 17–34. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.1300395>
- Demirtürk, D. (2021). Sürdürülebilir ulaşım da sera gazı etkisini azaltmaya yönelik çalışmalar. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1080–1092. <https://doi.org/10.21923/jesd.932385>
- Dierkes, C., Lucke, T., & Helmreich, B. (2015). General technical approvals for decentralised sustainable urban drainage systems (SUDS) – the current situation in Germany. *Sustainability*, 7(3), 3031–3051. <https://doi.org/10.3390/su7033031>
- Francis, O., & Yang, L. (2020). *Stormwater drainage design and best management practices with applications to roadways and climate change* (No. PSR-UH-18-42) [Technical report]. (02.06.2025 tarihinde <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/54427> adresinden erişilmiştir).
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., et al. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542.
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1–2), 26–42.
- Gülcü, G. (2021). *Kentsel alanlarda yağmur suyu yönetiminin mekânsal bileşenlerinin Üsküdar Meydanı Havzası üzerinden değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. (12.04.2025 tarihinde <https://tez.yok.gov.tr/ulusaltezmerkezi> adresinden erişilmiştir).
- Gültekin, F. (2024). Su’ya dair her şey. *TMMOB Mavi Gezegen*, 32, 25–43.
- Hallberg, M., Renman, A., Berndtsson, L., & Renman, G. (2022). Evaluation of a sand filter material for road runoff treatment – pilot-scale field trial focused on copper and zinc removal. *Water Practice & Technology*, 17(8), 1652–1665.
- Huber, M., & Helmreich, B. (2016). Stormwater management: Calculation of traffic area runoff loads and traffic-related emissions. *Water*, 8(7), 294–314. <https://doi.org/10.3390/w8070294>
- Karaman, S., & Gökçalp, Z. (2010). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 59–66.

- Mooselua, M. G., Liltved, H., Hindar, A., & Amiri, H. (2022). Current European approaches in highway runoff management: A review. *Environmental Challenges*, 7, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100464>
- Ndon, U. J., & Al-Manaseer, A. (2017). *Permeable pavement as a sustainable management option for highway stormwater and safe use of roadways* (Report No. 12–13). (21.04.2025 tarihinde <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/1626-Permeable-Pavement-for-Highway-Stormwater-Sustainable-Management-and-Safe-Roadways> adresinden erişilmiştir).
- Rathnayke, U., & Srishantha, U. (2017). Sustainable urban drainage systems (SUDS) – what it is and where do we stand today? *Engineering and Applied Science Research*, 44(4), 235–241. <https://doi.org/10.14456/easr.2017.36>
- Raspati, G. S., Azrague, K., & Jotte, L. (2017). *Review of stormwater management practices (Klima 2050 Report)*. (13.05.2025 tarihinde <https://www.sintef.no/en/publications/publication/1477191> adresinden erişilmiştir).
- Semadeni-Davies, A. (2013). *Classification of stormwater-borne solids: A literature review* (Technical report No. 2013/017). (12.08.2025 tarihinde <https://knowledgeauckland.org.nz/media/1630/tr2013-017-classification-of-stormwater-borne-solids-a-literature-review.pdf> adresinden erişilmiştir).
- Steiner, M., Boller, M., Schulz, T., & Pronk, W. (2007). Modelling heavy metal fluxes from traffic into the environment. *Journal of Environmental Monitoring*, 9(8), 847–854.
- Tunçay, H. (2022). Sünger şehirler. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(2), 99–108.
- Wong, T., Breen, P., & Lloyd, S. (2000). *Water sensitive road design: Design options for improving stormwater quality of road runoff* (Technical report). (12.08.2025 tarihinde <https://ewater.org.au/archive/crcch/archive/pubs/pdfs/technical200001.pdf> adresinden erişilmiştir).

//

Bölüm 15

YAPI SEKTÖRÜNDE YENİLİKÇİ VE FONKSİYONEL MALZEMELER

Aylin AKYILDIZ¹

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, aakyildiz@nku.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2739-0689

1. GİRİŞ

Yapı sektöründe malzeme teknolojileri, bir yapının dayanımı, kullanım ömrü ve performansı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Geçmişten günümüze kullanılan geleneksel yapı malzemeleri, uzun süre boyunca temel yapı gereksinimlerini karşılamış olsa da, günümüz mimarisinde öne çıkan enerji etkinliği, çevresel sorumluluk ve tasarımsal kalite beklentileri doğrultusunda bu malzemeler yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle yapı sektöründe, yenilikçi ve yüksek performanslı malzemelere yönelik araştırmalar ve uygulamalar hız kazanmıştır [1, 2]. Malzeme teknolojilerindeki bu ilerlemeler, yapı güvenliğinin artırılmasının yanı sıra, uzun vadede bakım ve onarım maliyetlerinin düşürülmesine de olanak sağlamaktadır [3].

Gelişmiş yapı malzemeleri, yalnızca mekanik dayanımın artırılmasını değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve görsel kalite açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Örneğin, fotokatalitik özelliklere sahip betonlar kirliliği azaltarak çevresel fayda sağlarken [4], ışık yayan çimentolar enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik yenilikçi uygulamalar arasında yer almaktadır [5]. Modüler bambu sistemleri ve alüminyum köpük malzemeler; hafiflik, yüksek dayanım sunarken ve geri dönüştürülebilir özellikleriyle çağdaş yapı tasarımında çevre dostu tasarım olanağı sağlamaktadır [6]. Bu sayede modern yapılar, hem işlevsel hem de çevre dostu bir yaklaşım sergileyebilmektedir.

Bu bölümde, yapı sektöründe öne çıkan yenilikçi malzemeler, çalışma prensipleri, sağladıkları teknik ve çevresel avantajlar ile kullanım alanları ele alınmaktadır. Ayrıca, söz konusu malzemelerin çağdaş mimari tasarımlara etkileri ve gelecekteki kullanım potansiyelleri de değerlendirilmektedir.

2. FONKSİYONEL BETON VE ÇİMENTO TEKNOLOJİLERİ

2.1. Kendi Kendini Temizleyen Malzemeler

Kendi kendini temizleme özelliğine sahip yapı malzemeleri, günümüz yapı teknolojilerinde işlevsellik ve çevresel sürdürülebilirlik bakımından dikkat çeken yenilikçi uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu malzemeler, yüzeylerinde biriken kir, toz partiküllerini ve biyolojik oluşumları, çeşitli fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla parçalayıp etkisiz hâle getirebilmektedirler [7].

Kendi kendini temizleyen malzemelerin başlıca avantajları arasında, bakım ve temizlik maliyetlerinin azalması, yapıların estetik görünümünün uzun süre korunması ve kimyasal temizlik ürünlerine olan ihtiyacının azaltılması yer almaktadır (Şekil 1). Bununla birlikte, kirlenmeye bağlı yüzey bozulmalarının önlenmesi, yapı elemanlarının dayanıklılığını ar-

tırmakta ve kullanım ömrünü uzatmaktadır. Söz konusu avantajlar nedeniyle kendi kendini temizleyen malzemeler; dış cephe sistemleri, yaya yolları, kentsel meydanlar, köprüler ve tüneller gibi çevresel etkilere yoğun biçimde maruz kalan alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir [8].



Şekil 1. Japonya'da kullanılan fotokatalitik, kendini temizleyen yol döşemesi [9].

Bununla birlikte, kendi kendini temizleyen malzemeler çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmaktadır. Temizlik ve bakım süreçlerinde kullanılan kimyasal maddelerin azaltılması, su ve enerji tüketiminde tasarruf sağlanmasına olanak tanımaktadır [8]. Özellikle fotokatalitik ve süperhidrofobik yüzeylerin kentsel alanlarda uygulanması, yapı yüzeylerinin daha uzun süre temiz kalmasını sağlayarak daha sağlıklı, estetik ve yaşanabilir kentsel çevrelerin oluşmasına katkıda bulunmaktadır [10]. Bu özellikler doğrultusunda söz konusu malzemelere olan ilgi giderek artmakta ve gelecekte yapı sektöründe yaygın ve standart bir uygulama hâline gelmesi beklenmektedir [11].

Fotokatalitik beton, yüzeyinde eklenen özel katkı maddeleri sayesinde hava kirleticilerini ve organik bileşenleri parçalayabilen yenilikçi bir beton türüdür. Bu betonlarda yaygın olarak kullanılan titanyum dioksit (TiO_2) nanopartikülleri, UV ışığı ile aktive olmakta ve azot oksitler (NO_x) ile organik kirleticilerin fotokatalitik reaksiyonlar yoluyla ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Bu süreç beton yüzeyinin temiz kalmasını sağlarken aynı zamanda çevredeki hava kalitesinin iyileştirilmesine de yardımcı olmaktadır. Bu özellikleri sayesinde fotokatalitik beton, özellikle yoğun trafik yüküne sahip kentsel alanlar için çevresel sürdürülebilirliği destekleyen etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [12]. Kendi kendini temizleme, hava kirliliğinin azaltılması, bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve yapıların estetik görünümünün uzun süre korunması fotokatalitik betonun öne çıkan avantajları arasında yer almaktadır [13]. Ayrıca bu malzeme, sürdürülebilir şehircilik uygulamalarının des-

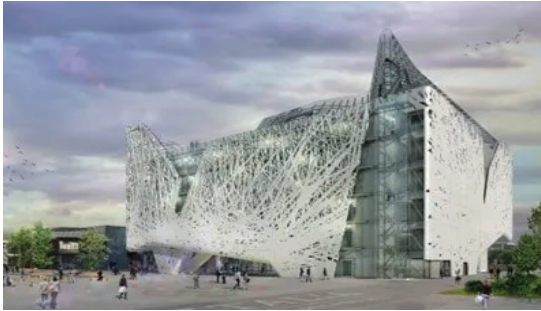
teklemesi ve çevresel farkındalığın artırılması amacıyla modern mimari projelerde giderek daha fazla tercih edilmektedir [14].

Roma'daki Jubilee Kilisesi (Chiesa di Dio Padre Misericordioso), fotokatalitik betonun mimari alandaki en dikkat çekici uygulama örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Şekil 2). Richard Meier tarafından tasarlanan ve 2003 yılında tamamlanan yapının beyaz ve kavisli beton kabuklarında, titanyum dioksit (TiO_2) katkılı fotokatalitik beton kullanılmıştır. Güneş ışığıyla aktive olan bu beton, hava kirleticilerini parçalayarak yüzeyde biriken kirlerin yağmur suyu ile uzaklaştırılmasını sağlamakta; böylece bakım ihtiyacını azaltmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır [15].



Şekil 2. Roma Jubilee Kilisesi'nde fotokatalitik beton [16].

Milano'daki Piazza Gae Aulenti projesi, fotokatalitik betonun kentsel ölçekteki önemli uygulamalarından biri olarak öne çıkmaktadır (Şekil 3) [17]. Bu projede kullanılan TiO_2 katkılı beton, UV ışığı ile aktive olmakta ve havadaki azot oksitler ile organik kirleticileri parçalayarak daha temiz bir çevre oluşmasına katkı sağlamaktadır. Bu sayede yaya alanlarının temizliği, bakım ihtiyacının azalması ve çevresel farkındalığın artırılması mümkün olmaktadır. Fotokatalitik beton İtalya, Japonya ve Hollanda gibi ülkelerde yaygınlaşmaktadır. Özellikle Tokyo'da yoğun trafik bölgelerinde uygulanan sistemlerin NO_x seviyelerinde belirgin azalmalar sağladığı bildirilmektedir.



Şekil 3. Milan Expo 2015 [17].

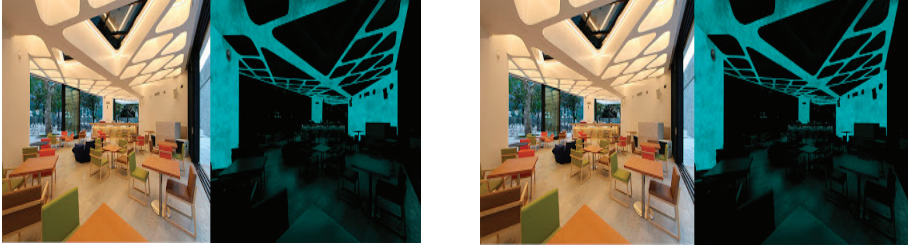
2.2. Işık Yayan Çimento ve Beton

Işık yayan çimentolar, güneş enerjisini depolayabilme ve karanlık ortamlarda bu enerjiyi kontrollü biçimde geri yayabilen yenilikçi yapı malzemeleri arasında yer almaktadır [18]. Bu malzemeler, çimento esaslı harcın içerisine eklenen fosforlu ya da fotolüminesans özellikteki katkı maddeleri sayesinde doğal ya da yapay ışık kaynaklarından gelen enerjiyi bünyelerinde biriktirebilmektedir. Depolanan enerji, ışık kaynağının ortadan kalkmasının ardından düşük yoğunluklu ancak süreklilik gösteren bir aydınlatma şeklinde çevreye salınmaktadır. Malzemenin çalışma mekanizması, ışık enerjisinin belirli bir süre bünyede tutulması ve karanlık koşullarda kontrollü olarak serbest bırakılması esasına dayanmaktadır. Bu özellik, özellikle elektrik altyapısının bulunmadığı ya da enerji tüketiminin azaltılmasının hedeflendiği alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Işık yayan çimentoların sağladığı temel kazanımlar arasında enerji verimliliğinin artırılması, kullanıcı güvenliğinin desteklenmesi ve görsel estetik yer almaktadır. Bu malzemeleri kullanılarak yaya yolları, park alanları, bahçe ve peyzaj düzenlemeleri, geceleri ek bir elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmadan görünür hâle getirilebilmektedir (Şekil 4) [19]. Ayrıca, elektrikle çalışan aydınlatma sistemlerine olan bağımlılığın azalması, aydınlatma maliyetlerinin düşürülmesine ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenlerle ışık yayan çimentolar, modern mimaride (Şekil 5) ve kentsel tasarım projelerinde, özellikle peyzaj tasarımı ve yol güvenliğini destekleyen uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir.



Şekil 4. Işıldayan beton yol [20].



Şekil 5. Işık yayan beton malzemeler [21].

3. YAPISAL YENİLİKLER VE MALZEMELER

3.1. CABKOMA Strand Çubuğu

CABKOMA Strand Çubuğu, yapı sektöründe deprem dayanımını artırmaya ve yapısal güvenliği iyileştirmeye yönelik geliştirilen yenilikçi bir güçlendirme malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Bu sistem, karbon fiber esaslı kompozit bir çubuk yapısı ile dikkat çeker; iç kısmında yüksek dayanımlı karbon lifleri, dış katmanında ise sentetik ve inorganik liflerle sarılı olup termoplastik reçine ile birleştirilmiştir [22]. Böyle bir kompozit malzeme, yüksek çekme mukavemeti ve aynı zamanda düşük yoğunluk gibi üstün mekanik performans özellikleri sunar, bu da deprem sırasında yapı yüklerinin dengeli dağılımına katkı sağlar [23]. Ayrıca malzemenin esnek yapısı sayesinde deprem kaynaklı yatay ve dikey kuvvetler tek bir noktada yoğunlaşmaz; bu da yapı elemanlarında hasar riskinin azalmasına yardımcı olur.

Bu malzemenin başlıca avantajları arasında yüksek mekanik dayanım, deprem enerjisinin sönmülmesi, düşük ağırlık ve uygulama kolaylığı yer almaktadır [24]. CABKOMA Strand Çubuğu, yalnızca deprem riski yüksek bölgelerdeki konut, ticari ve kamu yapılarında değil; aynı zamanda köprü ve viyadük projelerinde, mevcut yapıların sismik güçlendirilmesinde ve modern mimari tasarımlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem yapısal güvenlik hem de estetik bütünlük sağlaması, bu sistemin çağdaş yapı tasarımlarında tercih edilmesini desteklemektedir. Ayrıca, deprem yönetmeliklerine uygun, uzun ömürlü ve güvenli yapıların oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Japonya merkezli Komatsu Seiten Kumaş Laboratuvarı, 2016 yılında CABKOMA Strand Rod adı verilen karbon fiber esaslı kompozit bir sismik güçlendirme sistemi geliştirmiştir. Bu yenilikçi sistem, Komatsu Seiten'in merkez ofisinin dış cephesinde, deprem etkilerini azaltmak amacıyla uygulanmıştır (Şekil 6). Karbon fiber şeritlerden oluşan bu yapı, dokuma benzeri ve birbirine kenetlenen bir düzen içerisinde tasarlanarak, yapıda oluşan titreşimlerin azaltılmasını ve deprem enerjisinin kontrollü biçimde zemine aktarılmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle CABKOMA

Strand Rod, geleneksel güçlendirme yöntemlerine alternatif oluşturan, etkili ve çağdaş bir sismik çözüm olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. a. Cabkoma Strand Çubuğu kullanılan yapı b. Rulo CABKOMA Strand Çubuk [25].

3.2. Modüler Bambu Yapı Malzemeleri

Modüler bambu yapı malzemeleri, doğadan elde edilen yenilenebilir ve çevre dostu çözümler sunan yenilikçi bir yapı sistemidir. Bambu, yapı sektöründe sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmakta olup, hızlı büyüme hızı ve yüksek mekanik dayanımı sayesinde geleneksel yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır [26]. Ayrıca bambunun yoğunluğu düşük olduğu için modüler sistem uygulamalarında taşıma ve montaj kolaylığı sağlar.

Bu malzemenin modüler paneller veya yapı elemanları şeklinde tasarlanarak kullanılması, inşaat sürecini daha verimli hale getirmektedir. Modüler bambu elemanları kolayca birleştirilebilir ve sökülebilir olup, hem kısa sürede inşa edilen yapılar hem de esnek tasarım olanakları sunar. Bambu, aynı zamanda diğer yapı malzemelerine kıyasla çok daha hafif bir yapıya sahip olup, bu özelliği sayesinde taşıma ve montaj aşamalarında önemli kolaylıklar sağlamaktadır [26].

Modüler bambu sistemlerinin başlıca avantajları, dayanıklılık, hafiflik, sürdürülebilirlik ve çevreye duyarlı üretim özellikleri öne çıkmaktadır. Bambu, doğal olarak karbon tutucu bir malzeme olduğu için, üretimi sırasında atmosferdeki karbonu bünyesinde depolayarak çevreye katkıda bulunur. Ayrıca, bambu kısa sürede yenilenebilir ve biyolojik olarak çözünebilir bir malzeme olduğundan, geri dönüşümü çevre dostudur. Bu özellikler, bambu yapıların sürdürülebilir inşaat çözümleri sunmasını sağlar. Bambu yapılar, estetik olarak doğayla uyumlu bir görünüm sunar ve özellikle doğal ve ekolojik tasarımlar isteyen mimarlar için ideal bir tercih oluşturur.

Modüler bambu yapılar, konutlar, ticari yapılar, geçici barınaklar, çadır sistemleri ve kırsal bölgelerde hızlı inşaat gerektiren projeler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Gelişen üretim teknikleri sayesinde bambu, modern mimari projelerde de estetik ve dayanıklı yapılar oluşturulmak için kullanılmaktadır (Şekil 7). Günümüzde özellikle çevresel sürdürülebilirliğin ve hızlı yapımın ön planda olduğu projelerde, modüler bambu sistemlerinin kullanımı giderek artmaktadır.



Şekil 7. Bambu cephe [27].

3.3. Alüminyum Köpük

Alüminyum köpük, metal esaslı malzemelerin hafifliği ile enerji sönmüleme kapasitesini bir araya getiren yenilikçi bir yapı malzemesidir. Hüresel ve gözenekli bir içyapısı, malzemeyi düşük yoğunlukta olmasına rağmen darbelere ve titreşimlere karşı yüksek direnç gösterebilmektedir. Bu özellikleri, özellikle çarpışma ve darbe riski yüksek yapılar için enerji sönmüleme kapasitesi ile birleşerek yapısal güvenliğin artırılmasına katkı sağlar. Ayrıca malzemenin gözenekli yapısı, ses dalgalarını ve titreşimleri sönmüleyerek akustik konforun iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır [28].

Alüminyum köpüğün başlıca avantajları arasında hafiflik, darbe ve titreşim enerjisini emebilme yeteneği, yüksek yapısal performans ve uzun hizmet ömrü yer almaktadır. Bu özellikler, malzemenin ulaşım altyapıları, otomotiv ve savunma sanayi uygulamaları ile bina teknolojileri gibi farklı alanlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Örneğin, köprü ve tünel sistemlerinde titreşim azaltıcı eleman, gürültü kontrolü gereken mekanlarda akustik çözümler olarak tercih edilebilmektedir. Ayrıca, alüminyum köpüğün geri dönüştürülebilir ve çevre dostu bir malzeme olması, modern sürdürülebilir yapı projelerinde tercih edilmesinin bir diğer önemli nedenidir. Bu özellikler sayesinde alüminyum köpük, hem

mühendislik hem de mimari tasarım açısından hafiflik, dayanıklılık ve enerji emme kapasitesini bir arada sunan, çevreye duyarlı bir çözüm olarak geleceğin yapı ve ulaşım projelerinde önemli bir malzeme konumundadır.



Şekil 7. Alüminyum Köpük ile yapılan yapılar [29, 30]

3.4. Kirlilik Emici Tuğla

İklim değişikliğiyle meydana gelen sorunlardan biri de hava kirliliğidir. Canlılar üzerine büyük etkiler meydana getirmektedir. Etrafa yayılan çok fazla karbon, küresel sıcaklıkların artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı bu sorunları çözüm üretebilmek amacıyla inşaat sektöründe bu gibi olumsuz tehditleri en aza indireyecek sürdürülebilir yapı malzemesi olan kirliliği emen tuğlalara yönelmiştir.

Kirlilik emici tuğlalar, hava filtreleme tekniğiyle birlikte dışarıdan gelen havayı filtrelemektedir ve havayı yapının iç kısmına sağlamaktadır. Bu tuğlalar havadaki kirlenici toz parçacıklarını ayırarak havanın temiz ve sağlıklı bir ortam olmasını sağlamaktadır. Çevreye yararlı olan bu tuğlalar aynı zamanda diğer büyük çapta kullanılan hava filtreleme teknolojisine göre daha ekonomiktir. Bu tuğlalar normal duvarlara göre daha fazla yer kaplamaktadırlar. Bu nedenden dolayı yapı içerisindeki oturma alanını düşürmektedir. Aynı zamanda yük taşıma kapasitesi düşüktür ve çok katlı yüksek yapılar için kullanıma uygun değildir. Fakat çevre dostu olma özelliğiyle geleceğin sürdürülebilir yapı malzemelerinde yerini almıştır [31].



Şekil 8. Kirlilik emici tuğla [32].

Kullanım alanları özellikle yoğun trafik bölgeleri, şehir meydanları, parklar, ticari binalar ve toplu konut projeleri gibi hava kalitesinin önemli olduğu alanlarla sınırlı değildir. Ayrıca, fotokatalitik tuğlaların uygulanması, şehirlerde estetik ve çevresel farkındalığı artırmakta ve modern mimari tasarımlarda çevre dostu çözümlerin kullanımını teşvik etmektedir. Bu özellikleri sayesinde, hem mimari tasarımda esneklik sağlar hem de kentsel hava kalitesine doğrudan katkıda bulunur.

4. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Yapı sektöründe yenilikçi malzemeler, dayanım, dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve estetik değerler açısından kritik bir rol oynamaktadır. Kendi kendini temizleyen kaplamalardan fotokatalitik betonlara, ışık depolayabilen çimentolardan modüler bambu sistemlerine kadar birçok yenilikçi malzeme, hem enerji tüketimini hem de bakım maliyetleri ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu tür malzemeler, yapının kullanım ömrünü uzatırken kentsel alanlarda daha sağlıklı ve estetik yaşam ortamlarının oluşmasına katkı sağlamaktadır.

Geleceğe yönelik olarak, çevresel koşullara duyarlı ve akıllı malzemelerin önemi giderek artacaktır. Işık, sıcaklık veya nem değişimlerine yanıt veren malzemeler, yapı performansını optimize ederek enerji verimliliğini artırmakta ve kullanıcı konforunu geliştirmektedir. Ayrıca, geri dönüştürülebilir ve ekolojiye uygun malzemeler, döngüsel ekonomi ve yeşil bina uygulamalarının yaygınlaşmasını desteklemektedir. Nanoteknoloji, malzeme bilimi ve sürdürülebilir üretim teknikleri, fotokatalitik, enerji depolayan ve titreşim sönmüleyici malzemelerin geliştirilmesini mümkün kılarak hem ekonomik hem de çevresel faydaların artmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede, yenilikçi malzemeler yalnızca bugünün değil, geleceğin akıllı ve çevre dostu şehirlerinin temel yapı taşları olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Genç G. (2025). Geleneksel Yapım Yöntemleri Işığında Sürdürülebilir Yenilikçi Yapı Malzemelerinin Analizi, *İdealkent*, 47(17), 62-88. DOI:10.31198/idealkent.1574959
- [2] Sertkaya S. N., Tokuç A. (2020). Geleneksel ve Çağdaş Mimari Yapılar Üzerine Akademik Çalışmalar Editör: Doç. Dr. Murat Dal ISBN: 978-625-7897-47-1
- [3] İnternet Kaynağı 1. <https://www.yapiinsaatdergisi.com/yukse-performansli-yapi-malzemeleri-gelecegin-insaat-trendleri/>
- [4] Chen, J., & Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899–1906.
- [5] İnternet Kaynağı 2. <https://www.arkitera.com/haber/geceleri-isik-yayan-beton-gelistirildi/>
- [6] Aydın, Ö., Bayraktar Marangoz, D. (2022). Mimaride sürdürülebilir malzeme “bambu”. *Bodrum Journal of Art and Design*, 1(1), 77-94
- [7] Lapidus, A., Korolev, E., Topchiy, D., Kuzmina, T., Shekhovtsova, S., & Shestakov, N. (2022). Self-Cleaning Cement-Based Building Materials. *Buildings*, 12(5), 606. <https://doi.org/10.3390/buildings12050606>
- [8] Wei, Y., Wu, Q., Meng, H., Zhang, Y., & Cao, C. (2023). Recent advances in photocatalytic self-cleaning performances of TiO₂-based building materials. *RSC Advances*, 13, 20584–20597. <https://doi.org/10.1039/D2RA07839B>
- [9] İnternet Kaynağı 3. <https://www.concretedecor.net/departments/building-with-concrete/self-cleaning-concrete/>
- [10] Li, F., Liu, G., Liu, F., & Yang, S. (2023). A review of self-cleaning photocatalytic surface: Effect of surface characteristics on photocatalytic activity for NO. *Environmental Pollution*, 327, 121580. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121580>
- [11] Sherin, T., Motapothula, M. R., Dalapati, G. K., Ramakrishna, S., Sangaraju, S., Chakraborty, S., & Krishnamurthy, S. (2025). A comprehensive review on realization of self-cleaning surfaces by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 10, 1785–1808. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00734-6>
- [12] Chen, J., & Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899–1906.
- [13] Hamdany, A. H., Satyanaga, A., Zhang, D., Kim, Y., & Kim, J. R. (2022). Photocatalytic Cementitious Material for Eco-Efficient Construction—A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 12(17), 8741. <https://doi.org/10.3390/app12178741>

- [14] Acar, Ayşegül Hacer (2022). Nano Çimento Katkılı Fotokatalitik Prekast Cephe Elemanların Atmosferik Kirliliğe Etkisi-Ankara İl Örneği Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi
- [15] Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D.A. (2008) TiO₂ Photocatalysis and Related Surface Phenomena. *Surface Science Reports*, 63, 515-582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>
- [16] Internet Kaynağı 4. Wikipedia, Photocatalytic concrete
- [17] Internet Kaynağı 5. Italcementi Group. (2015). TX Active® photocatalytic cement: Environmental and architectural applications. Italcementi Technical Report.
- [18] Wang, W., Sha, A., Lu, Z., Jia, M., Jiang, W., Liu, Z., & Yuan, D. (2021). Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 269, 121267.
- [19] Gündüz, L., & Kalkan, Ş. O. (2023). Stronsiyum alüminat katkıli kompozit pigment bileşiminin çimento esaslı fotolüminesan harcın performansına etkisi. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 127-153.
- [20] Internet Kaynağı 6. <https://www.betonvecimento.com/beton-2/isildayan-beton>
- [21] Internet Kaynağı 7. <https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2016/07/isik-yayan-beton-duvarlara-hazir-misiniz.html>
- [22] Internet Kaynağı 8. <https://www.komatsumatere.co.jp/cabkoma/en/>
- [23] Internet Kaynağı 9. <https://specialtyfabricsreview.com/2016/07/29/reinforcement-of-seismic-proportions/>
- [24] Internet Kaynağı 10. <https://www.bdcnetwork.com/home/news/55160080/carbon-fiber-strings-make-japanese-office-building-earthquake-resistant?utm>
- [25] Internet Kaynağı 11. <https://www.archdaily.com/785175/komatsu-seiren-fabric-laboratory-creates-cabkoma-strand-rod-to-protect-building-from>
- [26] Rincón, C. E., Montoya, J. A., & Archila, H. F. (2023). Bamboo Construction Inspired by Vernacular Techniques for Reducing Carbon Footprint: A Life Cycle Assessment (LCA). *Sustainability*, 15(24), 16893. <https://doi.org/10.3390/su152416893>
- [27] Internet Kaynağı 12. <https://www.arkitera.com/haber/moduler-bambu-cepheli-tanitim-merkezi/>
- [28] Fu, W., & Li, Y. (2024). Fabrication, Processing, Properties, and Applications of Closed-Cell Aluminum Foams: A Review. *Materials*, 17(3), 560. <https://doi.org/10.3390/ma17030560>
- [29] Internet Kaynağı 13. <https://www.archdaily.com/910540/aluminum-foam-facades-architecture-rich-in-texture-porosity-and-brightness>
- [30] Internet Kaynağı 14. <https://www.metalfoamweb.com/innovative-building-materials-aluminum-foam-comes-to-the-fore-in-interior-and-exterior-wall-decorations/>

- [31] Internet Kaynağı 15. *Alternative Materials & #8211; Pollution Absorbing Bricks*. RTF | Rethinking the Future. <https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a794-alternative-materials-pollution-absorbing-bricks/>
- [32] Internet Kaynağı 16. <https://therealtytoday.com/news/construction-material/innovative-construction-material-pollution-absorbing-bricks-the-next-leap-in-sustainable-construction-solutions/>

//

Bölüm 16

**AFŞIN-ELBİSTAN TERMİK SANTRAL
UÇUCU KÜL VE YAN ÜRÜNLERİN İNŞAAT
MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR
İNCELEME**

MUHAMMET ÇINAR¹

ZAFER ÖZGEN²

1 DOÇ. DR. MUHAMMET ÇINAR, ORCID:0000-0001-5475-7787, KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ/MÜHENDİSLİK-MİMARLIK FAKÜLTESİ/İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ/GEOTEKNİK ANABİLİM DALI

2 ÖĞR. GÖR. ZAFER ÖZGEN, ORCID:0000-0002-8727-8309, KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ/AFŞIN MESLEK YÜKSEKOKULU/MADENCİLİK VE MADEN ÇIKARMA BÖLÜMÜ/MADENCİLİK TEKNOLOJİSİ PR.

Giriş

Kömür, sanayi devriminden günümüze kadar elektrik üretiminde kullanılan en yaygın fosil yakıtlardan biridir. 2024 yılı itibarıyla dünya elektrik üretimi 1.200 TWh'nin üzerindedir ve bu üretimin yaklaşık %36,3'ü kömür yakıtlı termik santrallerden sağlanmaktadır. Kömürün yanması sonucunda oluşan başlıca atıklardan biri olan uçucu kül, baca gazları içinde taşınan ince partiküllerin elektrostatik veya mekanik filtreler aracılığıyla tutulmasıyla elde edilen bir yan üründür. Günümüzde küresel ölçekte yıllık uçucu kül üretiminin 1 milyar tonu aştığı tahmin edilmektedir. En fazla üretim yapan ülkeler Çin, Hindistan ve ABD olup, bu ülkelerde uçucu kül; çimento, beton ve zemin iyileştirme gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında etkin biçimde değerlendirilmektedir.

Türkiye'de ise yıllık uçucu kül üretiminin 20–24 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmekte, ancak bu miktarın çok küçük bir kısmı geri kazanılmaktadır. Kimyasal bileşiminde yer alan yüksek sülfat (SO_3) ve serbest kireç (CaO) oranları, Afşin-Elbistan gibi santrallerden çıkan küllerin doğrudan çimento üretiminde kullanılmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle kül depolama alanlarında birikerek hava, su ve toprak kirliliğine neden olmaktadır.

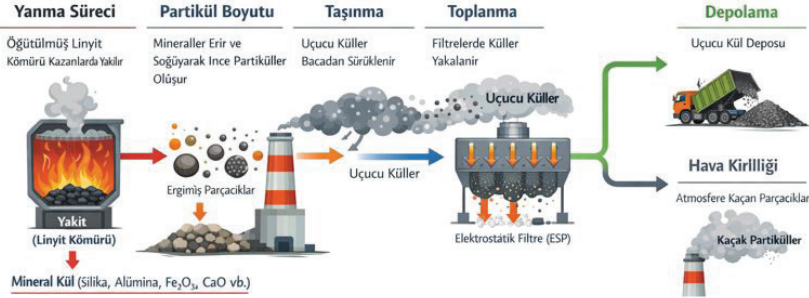
Uçucu külün ana hammaddeyi olan kömür, organik bileşenlerden oluşan yanabilir bir tortul kayadır. Kömür, nemli ve bataklık alanlarda bitkisel materyalin oksijensiz ortamda uzun yıllar boyunca birikmesiyle oluşur ve zamanla linyit, taşkömürü ve antrasit gibi farklı kömür türlerine dönüşür (Sütçü vd., 2024).

Kömür yakan termik santrallerde yanma sonucu açığa çıkan uçucu kül, inşaat mühendisliği açısından yapay puzolan özelliği taşır (Erdoğan, 2021). Ancak bu malzemenin çimento ve beton üretiminde kullanılabilmesi için belirli kimyasal ve fiziksel kriterleri karşılaması gerekir. Özellikle SO_3 , serbest CaO, MgO ve alkali oksit içerikleri yüksek olan küller, çimento ikamesi veya kompoze çimento üretimi için uygun değildir. Bu nedenle, özellikle Afşin-Elbistan Termik Santrali gibi tesislerde ortaya çıkan yüksek kireçli küllerin büyük bir kısmı depolama sahalarına dökülmektedir. Bu durum, uzun vadede hava, su ve toprak kirliliği oluşturarak çevresel riskler doğurur.

Bu çalışmada, Afşin-Elbistan uçucu külü ve yan ürünlerinin oluşumu, özellikleri ve inşaat mühendisliği uygulamalarındaki potansiyel kullanım alanları literatür temelli olarak incelenmiştir.

Termik Santrallerde Uçucu Kül Oluşumu

Uçucu kül, kömür yakıtlı termik santrallerde pulverize (toz haline getirilmiş) kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu baca gazlarıyla birlikte taşınarak elektrostatik veya torbalı filtrelerde (ESP) toplanan önemli bir yan üründür. Yanma sırasında kömürün organik bileşenleri (karbon ve hidrojen) enerji üretimi için tamamen yanarken, yanmayan mineral maddeler (silika, alümina, demir oksit, kireç vb.) ergiyerek gaz akışı içerisinde taşınır. Bu ergimiş parçacıklar soğuma süreciyle küresel veya camsı mikro tanelere dönüşür ve baca gazı içinde sürüklenmeleri nedeniyle “uçucu kül” olarak adlandırılır (Görhan vd., 2008). Şekil 1’de uç külün oluşum süreci gösterilmiştir.



Şekil 1. Uçucu Külün Oluşum Süreci

Afşin-Elbistan Termik Santralinden elde edilen uçucu kül, yüksek kireç (CaO) ve sülfat (SO₃) içerikleriyle tipik olarak “yüksek kalsiyumlu” sınıfta yer alır. Bu özellik, çimento üretiminde kullanılabilirliğini sınırlandırsa da geoteknik ve inşaat mühendisliği uygulamaları açısından avantaj sağlayabilir. Yüksek CaO içeriği, zemin iyileştirme ve puzolanik reaksiyonlarda bağlayıcılık özelliği kazandırırken, aşırı sülfat içeriği betonarme yapılarda genişleme ve çatlama riskini artırmaktadır (Şahin ve Eker, 2024; Sevinç ve Durgun, 2024).

Toplama sistemlerinden kaçan küçük bir kısmın atmosfere karışması hava kirliliğine ve uzun vadede asitte zengin çökeltilerin oluşmasına neden olur. Bu durum, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de mühendislik malzemesi geri kazanımı açısından uçucu külün etkin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Özellikleri

Termik santrallerde kullanılan kömür, ağırlıkça %80'i No:200 (0.075 mm) elekten geçecek kadar ince öğütülerek pulverize kömür formuna getirilir. Bu toz halindeki kömür, sıcak hava yardımıyla kazanlara gönderilir ve yüksek sıcaklık ortamında yanma işlemi gerçekleştirilir. Yanma sırasında kömürün organik bileşenleri (karbon, hidrojen ve azot) enerji üretmek için tamamen oksitlenirken, inorganik mineraller (silika, alümina, demir oksit, kireç, magnezyum oksit vb.) geriye kalır. Bu mineraller, yanma sıcaklığında ergiyerek gaz akımı içinde taşınan ve daha sonra soğuyarak katılaştıran ince taneli kül partiküllerini oluşturur (Erdoğan, 1993).

Yanma sırasında açığa çıkan bu ince partiküller baca gazlarıyla birlikte yukarı yönlü hareket eder. Gazın soğuma sürecinde ergimiş malzeme hızlı bir şekilde katılaşarak küresel veya camsı yapılı tanecikler haline gelir. Bu tanecikler, elektrostatik filtreler (ESP) veya torbalı filtre sistemleri aracılığıyla tutulur. Yaklaşık %99 oranında verimle yakalanan bu toz, uçucu kül (fly ash) olarak adlandırılır (Öksüz, 2006). Filtre sisteminden kaçan küçük miktardaki partiküller ise atmosfere karışarak hava kirliliğine yol açar.

Uçucu kül, süngerimsi yapıdaki boşluklu mikrokürelerden ve yanmamış kömür partiküllerinden oluşan, amorf yapıda bir malzemedir. Kimyasal bileşiminin yaklaşık %85'i SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO oksitlerinden meydana gelir. Bu bileşim oranı, kömürün türüne, yanma sıcaklığına ve santral teknolojisine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Dünya genelinde yılda yaklaşık 1 milyar tonun üzerinde uçucu kül üretilmektedir. Türkiye'de ise yıllık uçucu kül üretimi 20–24 milyon ton civarındadır (Çimen ve Keleş, 2020). Bu miktarın çok az bir kısmı değerlendirilebilmekte, büyük bölümü depolama sahalarına bırakılarak çevresel risk oluşturmaktadır.








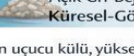

Tablo 1. Afşin-Elbistan uçucu külü ve F tipi Uçucu Külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Sembol / Ölçü Birimi	Afşin-Elbistan Uçucu Külü (AE-UK)	Tipik Düşük Kalsiyumlu (F Tipi) Kül ile Karşılaştırma
Yoğunluk	g/cm^3	2.3 – 2.5	2.1 – 2.4
Özgül Yüzey Alanı	m^2/kg	300 – 450	250 – 400
Ortalama Partikül Çapı	μm	10 – 40	15 – 60
SiO_2 (Silisyum Dioksit)	%	25 – 35	50 – 60

Özellik	Sembol / Ölçü Birimi	Afşin-Elbistan Uçucu Külü (AE-UK)	Tipik Düşük Kalsiyumlu (F Tipi) Kül ile Karşılaştırma
Al ₂ O ₃ (Alüminyum Oksit)	%	10 – 20	20 – 30
Fe ₂ O ₃ (Demir Oksit)	%	4 – 8	5 – 10
CaO (Kalsiyum Oksit)	%	25 – 35	1 – 10
MgO (Magnezyum Oksit)	%	2 – 4	1 – 3
SO ₃ (Sülfür Trioksit)	%	4 – 8	< 3
Kayıp (Yanma Kaybı - LOI)	%	1 – 2	0.5 – 3
Renk / Görünüm	-	Açık gri – bej, camsı, küresel	Koyu gri, camsı
Özgül Ağırlık	-	2.2 – 2.4	2.1 – 2.3

Tablo 1, Afşin-Elbistan Termik Santralinden elde edilen uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini göstermekte ve F tipi uçucu kül ile karşılaştırılmaktadır. Afşin-Elbistan uçucu külü, yüksek kalsiyum oksit (CaO, %25–35) içeriği nedeniyle ASTM C618 standardına göre C tipi (yüksek kalsiyumlu) kül sınıfına girmektedir. Buna karşılık, F tipi külde CaO oranı %10'un altındadır. Bu durum AE külüne bağlayıcılık özelliği kazandırır da, hacim genişmesi (ettringit oluşumu) ve çatlama riski oluşturur.

Silisyum (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) oranlarının düşük olması, AE külünün çimento katkısı olarak kullanımını sınırlandırmaktadır. Ancak yüksek kireç içeriği, külün zemin iyileştirme, dolgu malzemesi, geopolimer beton ve çimentosuz bağlayıcı sistemlerde değerlendirilmesini mümkün kılar. Mikro yapısal olarak AE külü; küresel, camsı ve gözenekli taneciklerden oluşur. Bu yapı malzemeye düşük yoğunluk, yüksek reaktivite ve iyi puzolanik özellik kazandırır. Şekil 2’te görsel olarak gösterilmiştir.

C Tipi Uçucu Kül vs F Tipi Uçucu Kül Özellik Karşılaştırması	
C Tipi Uçucu Kül	F Tipi Uçucu Kül
 Kalsiyum Oksit (CaO) Yüksek (%25–35)	 Düşük (%10, Düşük (%10'un altı))
 Silisyum ve Alüminyum Oranı (%)	 Yüksek (≥ 770)
 Kullanım Alanları ✓ Yol Dolgusu, Zemin iyileştirme	 <ul style="list-style-type: none"> • Beton Katkısı, • Çimento İkamesi
Sülfat Zemini ⚠ Sülfat Sızma Riski	 <ul style="list-style-type: none"> • Düşük Sülfat Tehlike
Renk / Yapı  Açık Gri-Bej, Küresel-Gözenekli	 <ul style="list-style-type: none"> • Koyu Gri, Camsı

Afşin-Elbistan uçucu külü, yüksek CaO (%25–35) nedeniyleyle ASTM C618 standardına göre C tipi (yüksek kalsiyumlu) kül sınıfına girmektedir. Afşin-Elbistan uçucu külü ile karşılaştırılmıdır (APP).

Şekil 2. AE Uçucu Kül ve F Tipi Uçucu Kül Özelliklerinin Karşılaştırılması

Afşin-Elbistan uçucu külü, yüksek CaO içeriğiyle puzolanik ve bağlayıcı potansiyele sahip, ancak çevresel olarak daha reaktif bir malzemedir. Doğru şekilde işlendiğinde, bu kül hafif yapı elemanları, yol alt temel tabakaları ve maden dolgusu gibi sürdürülebilir inşaat mühendisliği uygulamaları için alternatif bir yapı malzemesi oluşturma potansiyeline sahiptir.

Kömür yakıtlı termik santrallerde açığa çıkan başlıca yan ürünler

Kömür yakıtlı termik santrallerde enerji üretimi sırasında, kömürün yanmasıyla birlikte hem gaz hem de katı fazda çeşitli yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Bu yan ürünlerin bileşimi ve miktarı, kömürün türüne, kazan teknolojisine, yanma sıcaklığına ve baca gazı arıtma sistemlerinin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kömür yakma ürünleri genel olarak uçucu kül, taban külü, kazan cürufu, senosfer, nemli kül ve baca gazı desülfürizasyon (BGD) alçısı olarak sınıflandırılmaktadır. Bu malzemeler, uygun şekilde işlendiğinde hem ekonomik değere sahip ikincil hammaddelere dönüşebilmekte hem de çevreye olan etkileri azaltılabilmektedir.

Uçucu kül, kömür yakıtlı termik santrallerde elektrostatik filtrelerde (ESP) toplanan çok ince tanecikli bir yan üründür. Yanma sonucu baca gazı içinde taşınan bu kül, toplam kül miktarının yaklaşık %80–85'ini oluşturur. Kimyasal olarak silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) bileşenlerinden oluşur. Uçucu küller, ASTM C618 standardına göre F tipi (düşük kalsiyumlu) ve C tipi (yüksek kalsiyumlu) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. F tipi küller çimento katkısı

olarak kullanıma daha uygunken, Afşin-Elbistan Termik Santralinde elde edilen yüksek kireçli C tipi küller, doğrudan beton üretiminde kullanılamamaktadır. Buna rağmen, bu kül türü yüksek fırın cürufu (YFC) veya alkali aktivatörlerle karıştırılarak çimentosuz bağlayıcı (geopolimer) üretiminde ve zemin iyileştirme gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında başarıyla değerlendirilebilmektedir.

Taban külü, kuru tabanlı kazanların dibinde biriken iri taneli, granüler yapılı kül türüdür ve toplam külün yaklaşık %10–20'sini oluşturur. Renk olarak koyu gri veya siyah tonlarındadır ve yüksek yoğunluğu sayesinde inşaat sektöründe dolgu malzemesi, asfalt agregası veya alt temel tabakası olarak kullanılmaktadır. Taban külünün mekanik özellikleri, özellikle yüksek taneli yapısı ve düşük plastisite değeri nedeniyle geoteknik mühendisliği açısından oldukça elverişlidir. Yol altyapılarında drenaj tabakası olarak, baraj dolgu alanlarında ise geçirimsiz tabaka altında destekleyici malzeme olarak değerlendirilebilir.

Kazan cürufu, cüruf akıtmalı kazanların alt kısmında toplanan ve yanma sonucu eriyen mineral fazların su ile ani soğutulmasıyla elde edilen camsı bir malzemedir. Bu cüruf, siyah renkli, pürüzsüz yüzeyli ve granüler yapıda olup taban külüne göre daha yoğun ve serttir. Fiziksel özellikleri nedeniyle beton üretiminde agregası, asfalt karışımlarında katkı maddesi ve aşındırıcı yüzey kaplaması olarak kullanılabilir. Ayrıca, düşük su geçirgenliği ve yüksek dayanımı sayesinde hidrolik yapıların dolgu tabakalarında da tercih edilmektedir.

Senosferler, uçucu kül içerisindeki içi boş, küresel ve düşük yoğunluklu mikropartiküllerdir. Kül-su karışımının lagünlerde çökmesi sırasında su yüzeyine çıkarak toplanırlar. Üretilen toplam külün yalnızca %1–2'si senosferlerden oluşur. Bu tanecikler düşük yoğunlukları (yaklaşık $0.7-0.8 \text{ g/cm}^3$) ve yüksek silis-alümina içerikleri nedeniyle ileri malzeme teknolojilerinde değerlidir. Senosferler, hafif kompozit malzemelerin, ısı yalıtım malzemelerinin, denizcilik ekipmanlarının ve yüksek sıcaklığa dayanıklı seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır.

Nemli kül, uçucu külün taşınması ve depolanması sırasında tozuma problemini azaltmak amacıyla belirli bir oranda (%10–20) su ile karıştırılmasıyla elde edilir. Bu işlem, malzemenin kompaktlanabilirliğini artırır ve nakliye sırasında çevreye yayılmasını engeller. Nemli kül, özellikle yol tabanı dolgularında, sızdırmazlık tabakalarında ve atık depolama sahalarında ekonomik bir mühendislik malzemesi olarak değerlendirilmektedir.

Baca gazı desülfürizasyon (BGD) alçısı ise baca gazı arıtım sürecinde sülfür dioksit (SO_2) gazının tutulması sonucu oluşan kalsiyum sülfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) formundaki yan üründür. Bu malzeme, doğal

alçıtaşına benzer özellikler gösterir ve çimento üretiminde, yapı alçısı imalatında, zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılabilir. Afşin-Elbistan B Termik Santralinde yer alan ıslak gaz yıkayıcı sistemleri, bu tür BGD alçısının üretimini mümkün kılmaktadır.

Kömür yakma ürünleri, uygun şekilde işlendiğinde yalnızca birer atık olmaktan çıkıp inşaat mühendisliği açısından değerli ikincil hammadde kaynaklarına dönüşebilmektedir. Özellikle Afşin-Elbistan Termik Santralinde üretilen uçucu kül, taban külü ve BGD alçısı gibi yan ürünlerin, zemin iyileştirme, yol dolgu malzemesi, jeopolimer bağlayıcı ve yapı elemanı üretimi gibi uygulamalarda değerlendirilmesi; hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de ekonomik kaynak verimliliğini artırmaktadır.

Afşin-Elbistan Termik Santralinde ortaya çıkan başlıca yan ürünler

Afşin-Elbistan Termik Santrali, Türkiye'nin en büyük linyit rezervine sahip olması ve düşük kalorili kömürleri yüksek miktarda yakması nedeniyle, ülkemizde en fazla yan ürün oluşturan enerji üretim tesisidir. Bu santralde kömürün yakılması sırasında hem baca gazı içinde taşınan hem de kazan diplerinde biriken çeşitli katı yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Yan ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kömürün mineral içeriği, yanma sıcaklığı, kullanılan yakma teknolojisi ve baca gazı arıtma sistemlerinin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Afşin-Elbistan Termik Santralinde üretilen başlıca yan ürünler; uçucu kül, alt kül veya cüruf, baca gazı arıtma artığı (FGD jipsi) ve cüruf-kireçli şlam karışımlarıdır.

Uçucu kül, Afşin-Elbistan Termik Santralinde en büyük hacme sahip yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan çok ince taneli mineral partiküller, baca gazı akımıyla taşınır ve elektrostatik filtreler (ESP), torbalı filtreler veya siklon sistemleri yardımıyla tutulur. Uçucu kül, toplam yan ürünlerin yaklaşık %80-85'ini oluşturur. Tane boyutu silt-kil aralığında (0.001-0.1 mm) olup oldukça incedir. Rengi gri veya açık kahverengi, özgül ağırlığı ise 2.1-2.5 g/cm³ arasındadır. Düşük yoğunluklu ve hafif yapısı nedeniyle, uçucu külün birim hacim ağırlığı düşüktür. Kimyasal olarak silis (SiO₂), alümina (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi bileşenleri içerir. Afşin-Elbistan külü, yüksek CaO içeriği nedeniyle C tipi uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu tür kül, puzolanik ve hidrolik bağlayıcılık özellikleri nedeniyle zemin iyileştirme, dolgu malzemesi, hafif beton, jeopolimer üretimi ve çimentosuz bağlayıcı sistemlerde değerlendirilebilmektedir.

Alt kül veya kazan cürufu, yanma süreci sonrasında kazan diplerinde biriken iri taneli, camsı yapıda bir malzemedir. Toplam kül miktarının

yaklaşık %10–20'sini oluşturur. Bu kül türü, kömürün inorganik bileşenlerinin yüksek sıcaklıkta erimesi ve ardından suyla ani soğutulması sonucunda cam benzeri granüler bir yapı kazanır. Parçacık boyutu kum–çakıl aralığında olup düşük plastisiteye ve yüksek drenaj kapasitesine sahiptir. Özgül ağırlığı $2.2\text{--}2.6\text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Bu özellikleri, alt külün beton agregası, yol dolgusu, altyapı drenaj tabakası ve baraj dolgu malzemesi olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Baca gazı arıtma artığı (FGD jipsi veya sentetik alçı), baca gazı desülfürizasyon ünitelerinde (kireçtaşı yıkama sistemi) oluşan bir yan üründür. Afşin–Elbistan A Santralinde eski tip elektrostatik filtre sistemleri kullanıldığından jips üretimi sınırlıdır. Buna karşın, Afşin–Elbistan B Santrali, baca gazı desülfürizasyon (BGD) sistemleriyle donatılmıştır ve burada kalsiyum sülfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) formunda sentetik alçı üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu malzeme, doğal alçıtaşına benzer fiziksel özelliklere sahiptir. Zemin iyileştirme çalışmalarında şişen killerin kontrolü için etkili bir katkı maddesidir ve kireçle birlikte bağlayıcı sistemlerde yüksek performans sağlar. Ayrıca, çimento ve yapı alçısı üretiminde ikincil hammadde olarak değerlendirilmektedir.

Cüruf ve kireçli şlam karışımları, baca gazı arıtma sistemlerinde kullanılan kireçtaşı çamurunun, uçucu kül ve suyla birleşmesi sonucunda oluşur. Bu karışımlar, yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) içerir ve bu sayede stabilizasyon için potansiyel bağlayıcı malzeme niteliğindedir. Zemin mühendisliğinde özellikle plastik özellik gösteren zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir. Kireç ve kül kombinasyonu, zeminlerin şişme potansiyelini azaltır, kesme dayanımını artırır ve su geçirgenliğini düşürür.

Afşin–Elbistan uçucu külünde ayrıca ağır metal iz elementleri (örneğin As, Pb, Cr, Zn) ve bazı organik kalıntılar da raporlanmıştır (Şahin vd., 2015). Bu nedenle, bu tür yan ürünlerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmadan önce çevresel uygunluk ve sızma testlerinden geçirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Afşin–Elbistan Termik Santralinde ortaya çıkan uçucu kül, alt kül, baca gazı jipsi ve kireçli şlam karışımları; uygun şekilde işlendiğinde yalnızca bir atık değil, aynı zamanda ekonomik değere sahip çevre dostu mühendislik malzemeleri haline gelebilmektedir. Bu malzemelerin zemin stabilizasyonu, dolgu yapıları, yol altyapıları ve çimentosuz bağlayıcı sistemlerde kullanımı, hem atık bertaraf sorunlarını azaltmakta hem de sürdürülebilir inşaat mühendisliği anlayışına katkı sağlamaktadır. Termik santralden çıkan yan ürünlerin özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Termik Santralden Çıkan Yan Ürünlerin Özellikleri

Yan Ürün	Tane Boyutu	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Başlıca Mühendislik Kullanım Alanları	Potansiyel Çevresel Riskler
Uçucu Kül	0.001 – 0.1 mm (silt–kil arası)	2.1 – 2.5	Zemin stabilizasyonu, jeopolimer bağlayıcı, hafif beton, dolgu malzemesi	Yüksek CaO ve SO ₃ içeriği nedeniyle sızma ve genleşme riski; ağır metal içeriği (As, Pb, Cr, Zn)
Taban Altı Külü / Cüruf	0.1 – 10 mm (kum–çakıl arası)	2.2 – 2.6	Yol dolgusu, altyapı drenaj tabakası, beton agregası	Düşük sızma riski, ancak metal oksitlerin yüzeyde birikme olasılığı
Baca Gazı Arıtma Artığı (FGD Jipsi / Sentetik Alçı)	0.01 – 0.2 mm (ince taneli)	2.3 – 2.4	Zemin iyileştirme, kireçle karışık bağlayıcı sistemler, alçı levha üretimi	Nemli ortamlarda çözünme; suya karışan sülfat artışı riski
Cüruf + Kireçli Şlam Karışımı	0.05 – 2 mm	2.3 – 2.5	Zemin stabilizasyonu, dolgu, çimentosuz bağlayıcı sistemler	Yüksek pH, CaO ve ağır metal sızıntısı potansiyeli
Senosfer	0.02 – 0.3 mm (mikroküre)	0.6 – 0.8	Hafif yapı malzemesi, ısı yalıtımı, kompozit üretimi	Çok düşük; inert yapı nedeniyle çevreye etkisi azdır.

Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu kül ve Yan Ürünlerinin Kullanım Alanları

Afşin–Elbistan Termik Santralleri, Türkiye'nin en büyük enerji üretim tesislerinden biri olup, yılda yaklaşık iki milyon tonun üzerinde uçucu kül ve diğer yan ürünleri üretmektedir. Bu yan ürünlerin büyük kısmı yüksek serbest kireç (CaO) ve kükürt (SO₃) içeriğine sahiptir. Bu özellikler, uçucu külün doğrudan çimento veya beton üretiminde kullanılmasını güçleştirir de, uygun işlemler ve katkılarla külün inşaat mühendisliği ve çevre teknolojileri alanlarında geniş bir kullanım potansiyeli bulunmaktadır.

1. İnşaat ve Yapı Malzemeleri Sektörü

Afşin–Elbistan uçucu külü, özellikle inşaat sektöründe önemli bir değerlendirme potansiyeline sahiptir. Ancak TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarında belirtilen kimyasal sınırlamalara — özellikle serbest CaO ve SO₃ oranlarının yüksekliği nedeniyle — doğrudan uymadığı için genellikle

“katkı malzemesi” veya “özel bağlayıcı” formunda değerlendirilmektedir. Yapılan araştırmalar, bu külün granüle yüksek fırın cürufu ile birlikte veya kimyasal aktivatörler (örneğin NaOH, Na₂SiO₃) kullanılarak jeopolimer beton üretiminde başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur (Sevinç ve Durgun, 2024). Ayrıca, külün incelik derecesinin artırılmasıyla betonun geçirimsizliği ve dayanımı üzerinde olumlu etkiler sağlandığı da belirlenmiştir (Şahin vd., 2020). Bu bulgular, Afşin–Elbistan uçucu külünün doğrudan çimento yerine kullanılmasa bile, alternatif bağlayıcı sistemlerde çevresel ve mühendislik açıdan yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Çimento ve Beton Katkısı

Afşin–Elbistan uçucu külü, yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği (%25–35) sayesinde belirgin puzolanik reaksiyon kabiliyetine sahiptir. Ancak bu yüksek serbest kireç oranı, beton içinde ettringit oluşumuna yol açarak hacim genleşmesine ve mikro çatlaklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, külün doğrudan çimento üretiminde kullanımı sınırlıdır (Şahin vd., 2020).

Yapılan araştırmalar, Afşin–Elbistan uçucu külünün %10–20 oranlarında çimento ile ikame edilmesi veya öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) gibi endüstriyel yan ürünlerle karıştırılması durumunda çimentosuz bağlayıcı sistemler (jeopolimerler) içerisinde değerlendirilebileceğini göstermektedir (Şahin vd., 2015). Bu yaklaşım, çevresel açıdan zararsız ve düşük karbon ayak izine sahip alternatif bağlayıcıların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Sevinç ve Durgun (2024) tarafından yapılan son çalışmada, düşük kaliteli Afşin–Elbistan külünün, NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörleri kullanılarak jeopolimerleşme sürecinde yüksek dayanım gösterdiği, dolayısıyla geleneksel çimentoya çevre dostu bir alternatif olabileceği vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Şahin vd., (2020), külün incelik derecesinin artırılmasıyla betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerinde önemli iyileşmeler elde edildiğini belirtmiştir.

Tuğla ve Briket Üretimi

Afşin–Elbistan uçucu külü, hafif yapı elemanları üretiminde de önemli bir değerlendirme potansiyeline sahiptir. Yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği, düşük sıcaklıklarda bile hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlayarak sertleşmeye yardımcı olur. Bu nedenle, külün tuğla, briket, blok ve panel üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilmesi mümkündür (Argunhan vd., 2012).

Üretilen bu elemanlar, düşük birim hacim ağırlıkları sayesinde ısı yalıtımına katkı sağlamakta ve aynı zamanda enerji tasarrufu açısından avantaj yaratmaktadır. Nitekim, Afşin–Elbistan uçucu külü ile üretilen

hafif yapı malzemelerinin, geleneksel pişirilmiş tuğlalara göre daha düşük üretim sıcaklıklarında (yaklaşık 700–900 °C) benzer mekanik dayanım gösterdiği belirlenmiştir (Şahin vd., 2015).

Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar, bu külün yüksek kireç içeriği ve puzolanik yapısı sayesinde bağlayıcı olarak kullanılabilirliğini ve ilave çimento kullanımına gerek kalmadan dayanımı yüksek çevre dostu yapı elemanları elde edilebileceğini göstermektedir (Sevinç ve Durgun, 2024). Bu bulgular, Afşin–Elbistan uçucu külünün sürdürülebilir yapı malzemeleri üretiminde yerli ve ekonomik bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

2. Zemin İyileştirme (Geoteknik Uygulamalar)

Afşin–Elbistan uçucu külü, geoteknik mühendisliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği sayesinde puzolanik reaksiyonlar oluşturarak zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmekte ve çevresel olarak sürdürülebilir bir stabilize edici malzeme olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Afşin ve Elbistan havzasındaki yüksek plastisiteli ve suyla temas ettiğinde şişen kil zeminlerin iyileştirilmesinde etkin bir katkı sağlamaktadır (Güneyli, 2010; Söğüt ve Saltalı, 2022).

Kil Zemin Stabilizasyonu

Uçucu kül, killi zeminlerle karıştırıldığında puzolanik reaksiyon oluşturarak zeminin dayanımını artırır ve şişme potansiyelini azaltır. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan kalsiyum-silikat-hidrat (C–S–H) fazları, zeminin kayma direncini artırarak taşıma kapasitesini yükseltir. Yapılan laboratuvar deneyleri, Afşin–Elbistan uçucu külünün %10–30 oranlarında zemine karıştırılmasıyla zeminin dayanımında belirgin artış sağlandığını ve şişme yüzdesinin %50’den fazla azaldığını göstermektedir (Söğüt ve Saltalı, 2022). Bu nedenle uçucu kül, yol tabanları, baraj dolguları ve zemin iyileştirme projelerinde kireç yerine ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Güneyli, 2010).

Yol Dolgusu ve Altyapı Malzemesi

Afşin–Elbistan uçucu külü, yol inşaatlarında temel altı malzemesi olarak da kullanılabilir. Yüksek kalsiyum içeriği ve düşük birim hacim ağırlığı, yük azaltılması gereken dolgu alanlarında önemli bir mühendislik avantajı sağlar. 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra yapılan güncel araştırmalar, bu külün deprem yıkıntı atıkları ile karıştırılarak yol dolgusu ve temel stabilizasyonunda başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir (Çınar, 2024). Bu tür uygulamalar, hem atık geri kazanımı hem de zemin iyileştirme açısından sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Maden Dolgusu

Santral sahasındaki kömür üretim faaliyetleri sonrasında oluşan büyük hacimli boşluklar, uçucu külün su ile karıştırılarak macun kıvamında doldurulmasıyla yeniden kullanılabilir. Bu yöntem, hem atık bertarafını kolaylaştırmakta hem de zemin oturmalarını önlemektedir. Ayrıca, uçucu külün maden dolgularında kullanılması, uzun vadede çevresel kirlenme riskini azaltmakta ve ekonomik bir geri kazanım yöntemi oluşturmaktadır (Güneyli, 2010).

Geçirimsiz Tabaka

Uçucu kül, uygun su muhtevasında sıkıştırıldığında düşük hidrolik iletkenlik göstermektedir. Bu özelliği sayesinde katı atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka (liner) olarak değerlendirilebilir. Söğüt ve Saltalı (2022) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, Afşin-Elbistan uçucu külüyle hazırlanan kompaktlanmış karışımların hidrolik iletkenlik katsayısının 10^{-7} - 10^{-8} cm/s aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, mühendislik açısından geçirimsiz zemin gereksinimlerini karşılamakta ve Afşin-Elbistan külünün çevresel altyapı projelerinde kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.

3. Kimyasal Geri Kazanım ve Çevre Teknolojileri

Afşin-Elbistan uçucu külü, yalnızca bir inşaat malzemesi değil, aynı zamanda kimyasal geri kazanım ve çevre teknolojilerinde değerlendirilebilecek önemli bir hammaddedir. Yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği ve gözenekli mikroyapısı, bu külü hem reaktif hem de adsorban özellikte bir endüstriyel kaynak haline getirmektedir (Dinçyürek, 2006; Öksüz, 2006).

Kalsiyum Karbonat (CaCO₃) Üretimi

Afşin-Elbistan uçucu külü, içerdiği yüksek CaO oranı sayesinde özel karbonatlaşma (carbonation) süreçleriyle saf kalsiyum karbonata (CaCO₃) dönüştürülebilir. Bu dönüşüm, hem CO₂'nin kimyasal olarak tutulmasını sağlayarak karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerine katkı sağlar hem de endüstriyel atık miktarını azaltır (Sevinç ve Durgun, 2024). Elde edilen kalsiyum karbonat, kâğıt, boya, kauçuk ve plastik endüstrilerinde dolgu malzemesi olarak kullanılabilir; böylece dögüsel ekonomi ve sıfır atık yaklaşımı desteklenmektedir.

Yapılan son deneysel çalışmalar, Afşin-Elbistan külünün CaO içeriğinin %30'un üzerinde olması nedeniyle karbon mineralizasyon veriminin %80'e kadar çıkabildiğini göstermektedir (Erdoğan, 2021). Bu durum, külün kimyasal geri kazanım potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Atık Su Arıtımı ve Adsorpsiyon Uygulamaları

Afşin–Elbistan uçucu külünün gözenekli ve camsı mikroyapısı, onu adsorban malzeme olarak kullanıma uygun hale getirmektedir. Bu kül, atık sularında bulunan fenol, renkli organik bileşikler, krom (Cr^{6+}) ve kurşun (Pb^{2+}) gibi ağır metalleri tutma kapasitesine sahiptir (Öksüz, 2006). Yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, uçucu külün aktif karbona kıyasla 10 kata kadar daha düşük maliyetle benzer adsorpsiyon verimi sağladığını göstermiştir (Dinçyürek, 2006).

Bu nedenle Afşin–Elbistan külü, filtrasyon, iyon değişimi ve adsorpsiyon proseslerinde çevre mühendisliği açısından sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca, külün kimyasal olarak modifiye edilmesiyle (örneğin NaOH veya HCl aktivasyonu) adsorpsiyon kapasitesinin artırılabilceği ve endüstriyel atık su arıtma sistemlerinde yeniden kullanılabilceği belirlenmiştir (Çınar, 2024).

Bu bulgular, Afşin–Elbistan uçucu külünün yalnızca enerji üretiminin yan ürünü değil, aynı zamanda çevresel sorunlara çözüm sunabilen stratejik bir mühendislik malzemesi olduğunu göstermektedir.

Karşılaşılan Zorluklar ve Riskler

Afşin–Elbistan uçucu külünün mühendislik ve çevresel açıdan değerlendirilmesinde bazı teknik zorluklar ve potansiyel riskler bulunmaktadır. Bu malzemenin kullanımındaki en büyük engellerden biri, ettringit oluşumu ve buna bağlı hacim genleşmesidir. Külün yüksek sülfat (SO_3) ve serbest kireç (CaO) içeriği, suyla temas ettiğinde genişleme reaksiyonları meydana getirir. Bu durum, özellikle rijit yapılarda (örneğin betonarme elemanlarda) çatlak oluşumuna neden olurken; esnek zemin uygulamaları veya yol dolgularında bu genleşme kısmen tolere edilebilmektedir (Şahin vd., 2015).

Bununla birlikte, Afşin–Elbistan uçucu külü ağır metaller (Pb, Cr, As, Zn, Ni) gibi toksik elementler içerebilmektedir. Bu metaller, kül zemin dolgusu veya atık dolgu malzemesi olarak kullanıldığında yeraltı sularına sızma riski oluşturur. Ancak, yapılan araştırmalar, solidifikasyon (katılaştırma) süreçlerinin bu metalleri stabil fazlarda hapsederek çevresel riski önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Özdemir, 2014).

Dolayısıyla, Afşin–Elbistan uçucu külünün çevre dostu şekilde kullanılabilmesi, hem kimyasal dengeleme (örneğin cüruf veya alçıtaşı ilavesi) hem de uygun mühendislik tasarımlarının (geoteknik dolgu veya geçirimsiz tabaka kullanımı) uygulanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu önlemler, külün çevresel zararlarını azaltırken aynı zamanda sürdürülebilir mühendislik malzemesi olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

Tablo 3. Afşin–Elbistan uçucu külü kullanımında karşılaşılan teknik ve çevresel riskler ve önlemler

Risk Türü	Açıklama / Neden	Etkisi	Alınabilecek Önlemler	Kaynak
Ettringit oluşumu ve hacim genişlemesi	Yüksek CaO ve SO₃ içeriği suyla reaksiyona girerek ettringit oluşturur.	Beton ve rijit yapı elemanlarında çatlama , dayanım kaybı.	Kül oranının sınırlanması (%10–20), YFC veya alçıtaşı katkısı ile sülfat dengeleme.	Şahin, Çullu & Eker (2015)
Ağır metal sızıntısı	Uçucu küldeki Pb, Cr, Zn, As gibi elementler suyla temas ettiğinde çözünür hale gelir.	Yeraltı suyunda ağır metal kirliliği ve ekotoksisite riski.	Solidifikasyon veya geopolimer bağlayıcı kullanımı; geçirimsiz tabaka uygulaması.	Özdemir (2014)
Hacim kararsızlığı (şişme-büzülme)	Külün serbest kireç içeriği hidrasyon sırasında genişleme yaratabilir.	Zemin oturması, çatlak ve yapısal deformasyon riski.	Kontrollü nem içeriği, kompaktlama ve kireç katkısı ile stabilize etme.	Sögüt & Saltalı (2022)
Uzun vadeli dayanım azalması	Aşırı Ca(OH)₂ üretimi nedeniyle bağlayıcı fazların zayıflaması.	Zemin stabilizasyonunda geç dayanım kaybı .	Külün ön yaşlandırılması veya reaktif silis katkısı kullanımı.	Güneyli (2010)
Çevresel düzenleme eksiklikleri	Atık depolama sahalarında standart dışı yönetim.	Toprak ve su kirlenmesi, toz emisyonu .	Çevre mevzuatına uygun izleme ve yönetim planı hazırlanması.	Çınar (2024)

Tartışma

Afşin–Elbistan Termik Santralinden elde edilen uçucu kül, yüksek kalsiyum oksit (CaO) ve sülfat (SO₃) içeriği nedeniyle klasik F tipi küllerden belirgin biçimde ayrılmaktadır. Bu özellik, külün çimento endüstrisinde doğrudan kullanılabilirliğini sınırlandırırken; jeoteknik, çevresel ve kimyasal geri kazanım uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Yapılan çalışmalar, bu tür yüksek kireçli küllerin puzolanik ve hidrolik reaktivite açısından daha aktif olduğunu, dolayısıyla zemin stabilizasyonu ve dolgu uygulamalarında yüksek performans sergilediğini göstermektedir

(Söğüt ve Saltalı, 2022; Güneşli, 2010). Bu durum, Afşin-Elbistan uçucu külünün alternatif bir bağlayıcı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ancak, yüksek serbest CaO oranı külün hidrasyon sırasında genleşme davranışına yol açmakta ve ettringit oluşumu nedeniyle hacim kararsızlığı yaratabilmektedir (Şahin vd., 2015). Bu durum, özellikle betonarme uygulamalarda çatlama riskini artırmaktadır. Buna karşın, esnek geoteknik yapılarda (örneğin yol dolguları ve zemin iyileştirme uygulamaları) bu genleşme tolere edilebilmekte, hatta zemin sıkışmasını destekleyici bir etki yaratabilmektedir (Çınar, 2024). Bu nedenle, kullanım alanı seçimi mühendislik tasarımı açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Afşin-Elbistan uçucu külünün jeopolimer bağlayıcı olarak kullanımı, literatürde giderek artan bir ilgi görmektedir. Sevinç ve Durgun (2024), bu külün NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatörleriyle birlikte kullanıldığında yüksek dayanım ve düşük karbon salımı sağladığını, dolayısıyla geleneksel Portland çimentosuna çevre dostu bir alternatif oluşturduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Şahin vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda, külün incelik derecesinin artırılmasıyla betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirildiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, Afşin-Elbistan uçucu külünün, uygun kimyasal modifikasyonlar ve aktivasyon süreçleriyle uluslararası standartlara (ASTM C618, TS EN 450-1) yaklaştırılabileceğini göstermektedir.

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, Afşin-Elbistan külü ağır metal içeriği bakımından dikkatle incelenmelidir. Özdemir (2014), bu külün özellikle Pb, Cr, Zn ve Ni gibi metaller içerdiğini, bu elementlerin yeraltı suyuna sızma potansiyeli bulunduğunu vurgulamıştır. Bununla birlikte, solidifikasyon veya jeopolimerizasyon süreçleri, bu metallerin kimyasal olarak immobilize edilmesini sağlayarak sızıntı riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Erdoğan, 2021). Bu bulgular, çevresel risklerin mühendislik kontrolü altında yönetilebileceğini ve külün güvenli kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.

Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal geri kazanım potansiyeli de dikkate değerdir. Yüksek CaO içeriği, külün karbonatlaşma süreçlerinde etkin biçimde kullanılmasını sağlar. Bu özellik, hem CO_2 'nin kimyasal olarak bağlanmasına olanak tanımakta hem de kalsiyum karbonat üretimi yoluyla döngüsel ekonomiye katkı sunmaktadır (Sevinç ve Durgun, 2024). Böylece uçucu kül, yalnızca bir atık değil, aynı zamanda karbon yakalama ve depolama sistemleri açısından da değerlendirilebilir bir hammaddedir. Bu yönüyle, Afşin-Elbistan uçucu külü çevre mühendisliğiyle inşaat mühendisliğini birleştiren disiplinler arası bir potansiyel taşımaktadır.

Bununla birlikte, çalışmanın bulguları bazı sınırlılıklara da işaret etmektedir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri, santralin yakma koşulları, kullanılan kömür türü ve filtre sistemlerinin verimine göre değişkenlik göstermektedir. Bu durum, külün tek tip bir mühendislik malzemesi olarak standartlaştırılmasını güçleştirmektedir. Ayrıca, saha uygulamalarında uzun dönemli performans verilerinin eksikliği, mühendislik tasarımlarında güvenlik katsayılarının yüksek tutulmasını gerektirmektedir.

Afşin-Elbistan uçucu külü, doğru şekilde işlendiğinde hem mühendislik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyelin gerçek anlamda değerlendirilebilmesi için, malzeme karakterizasyonu, saha denemeleri ve çevresel izleme çalışmalarının bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Afşin-Elbistan külü, yalnızca bir enerji üretim atığı değil, döngüsel ekonomiye katkı sağlayan yerli bir mühendislik kaynağı olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç

Afşin-Elbistan Termik Santrali, Türkiye'nin en yüksek enerji üretim kapasitesine sahip tesislerinden biri olarak, her yıl milyonlarca ton uçucu kül ve diğer yan ürünleri üretmektedir. Bu atıkların kimyasal ve mineralojik özellikleri, yüksek kalsiyum oksit (CaO) ve sülfat (SO₃) içerikleri nedeniyle çevresel açıdan önemli riskler barındırmakla birlikte, aynı zamanda mühendislik açısından dikkate değer fırsatlar da sunmaktadır. Çalışma boyunca elde edilen bulgular, Afşin-Elbistan uçucu külünün puzolanik, bağlayıcı ve stabilizasyon özellikleri sayesinde inşaat mühendisliği uygulamalarında değerlendirilme potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Özellikle zemin iyileştirme, dolgu ve yol altyapısı uygulamalarında külün kullanımı, düşük plastisiteli killerin dayanımını artırmakta, şişme potansiyelini azaltmakta ve dolgu stabilitesini geliştirmektedir. Çimentosuz bağlayıcı sistemlerde (jeopolimerler) YFC veya alkali aktivatörlerle birlikte kullanıldığında, yüksek dayanım ve düşük karbon salımı gibi çevresel kazanımlar sağlanabilmektedir. Ayrıca, uçucu külün hafif yapı elemanları (tuğla, blok, briket) üretiminde bağlayıcı olarak kullanılabilmesi, hem enerji tüketimini azaltmakta hem de ekonomik geri kazanım olanağı sunmaktadır.

Kimyasal geri kazanım açısından, Afşin-Elbistan uçucu külü yüksek CaO içeriği sayesinde kalsiyum karbonat (CaCO₃) üretimi ve karbon mineralizasyon süreçlerinde kullanılabilir. Bu yöntem, aynı anda hem karbon yakalama hem de atık azaltımı işlevi göreyerek çevresel

sürdürülebilirliği desteklemektedir. Ayrıca, külün gözenekli yapısı atık su arıtımında adsorban malzeme olarak kullanımına olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte, uygulamalarda karşılaşılan başlıca riskler arasında ettringit oluşumu kaynaklı genleşme, ağır metal sızıntısı ve hacim kararsızlığı bulunmaktadır. Bu nedenle, Afşin–Elbistan uçucu külünün mühendislik projelerinde kullanılmadan önce kimyasal dengeleme (örneğin cüruf veya alçıtaşı ilavesi) ve solidifikasyon yöntemleriyle stabilize edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, çevresel açıdan güvenli kullanımın sağlanabilmesi için yeraltı suyu izleme sistemleri ve sızma testleri zorunlu hale getirilmelidir.

Sonuç olarak, Afşin–Elbistan uçucu külü doğru proseslerle işlendiğinde yalnızca bir atık değil, sürdürülebilir inşaat mühendisliği kapsamında çevresel, ekonomik ve teknik açıdan değerli bir kaynak haline gelebilir. Bu kapsamda öneriler:

Ø Uçucu külün standart dışı özelliklerini iyileştirmeye yönelik ön işleme ve aktivasyon yöntemleri geliştirilmelidir.

Ø Jeopolimer ve zemin stabilizasyonu uygulamaları için yerel pilot projeler desteklenmelidir.

Ø Çevresel izleme ve yönetim standartları, Afşin–Elbistan özelinde güncellenmeli ve düzenli saha denetimleri yapılmalıdır.

Ø Uçucu külün geri kazanımını teşvik etmek amacıyla ekonomik ve yasal teşvik mekanizmaları oluşturulmalıdır.

Bu yaklaşımlar, Afşin–Elbistan Termik Santrali kaynaklı uçucu külün, hem çevresel riskleri azaltan hem de sürdürülebilir malzeme döngüsünü destekleyen bir mühendislik girdisine dönüşmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Argunhan, Z., Yıldız, T., Çakmak, G., ve Yücel, H. L. (2012). Evaluation of type C fly ash in the production of composite material. Proceedings of HEFAT 2012.
- ASTM C618 (2003) Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American society for testing and materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Çimen, Ö., ve Keleş, E. (2020). Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi. İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi, 1(2), 80-90.
- Çınar, M. (2024). Utilization of earthquake demolition wastes and Afşin–Elbistan fly ash for soil improvement after the Kahramanmaraş earthquake (6 February 2023). Sustainability, 16(2), 538.
- Dinçyürek, Y. (2006). Afşin–Elbistan uçucu külünün çevre mühendisliği uygulamalarında değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(2), 45–56.
- Erdoğan, S. (2021). Mineral carbonation of high-lime Afşin–Elbistan fly ash for CO₂ sequestration and calcium carbonate recovery. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(6), 106480.
- Erdoğan, T.Y. (1993). Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanımı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, 1-8s. Ankara.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., & Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4(2), 85-94.
- Güneyli, H. (2010). Influence of Afşin-Elbistan highly limy fly ash on engineering behavior of a cohesive soil. Scientific Research and Essays, 5(17), 2456–2463.
- Öksüz, H. (2006). Afşin–Elbistan uçucu külünün ağır metal adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(3), 99–106.
- Özdemir, M. A. (2014). “Afşin-Elbistan uçucu küllerinin killi zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi”. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Sevinç, A. H., ve Durgun, M. Y. (2024). Effect of various geopolymerization parameters on poor-quality Afşin–Elbistan fly ash-based geopolymer concretes with ground granulated blast furnace slag. Iranian Polymer Journal, 33(2), 455–467.
- Söğüt, A., ve Saltalı, K. (2022). Afşin-Elbistan Termik Santrali Sahasındaki Kazı-Dolgu Alanı Topraklarının Ormancılık ve Tarımsal Üretim Açısından Değerlendirilmesi. MAS Journal of Applied Sciences, 7(4), 940-950.

- Sütçü, E., Demirbaş, A., ve Yıldız, H. (2024). Türkiye linyitlerinin yanma karakteristiği ve kül özelliklerinin mühendislik uygulamalarına etkisi. *Enerji ve Çevre Teknolojileri Dergisi*, 12(2), 145-160.
- Şahin, D. D., Çullu, M., ve Eker, H. (2015). Afşin-Elbistan uçucu külünün yüksek fırın cürufu ile birlikte değerlendirilmesi üzerine araştırmalar. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*.
- Şahin, D. D., Çullu, M., ve Eker, H. (2020). The effect of different fineness values of Afşin-Elbistan fly ash on permeability in concrete. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 6(4), 197-208.
- Şahin, D. D., ve Eker, H. (2024). Effects of Ultrafine Fly Ash Against Sulphate Reaction in Concrete Structures. *Materials*, 17(6), 1442.
- TS EN 197-1 (2012) Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE.
- TS EN 450-1 (2015). Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1:Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Mart, Ankara.