

# Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği

Editör: Doç. Dr. Hasan SAVAŞ



 ÖZGÜR  
YAYINLARI

# Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği

**Editör:**

Doç.Dr.Hasan SAVAŞ



Published by

**Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.**

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgurayinlari.com

✉ info@ozgurayinlari.com

---

## Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği

Editor: Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

---

Language: Turkish

Publication Date: 2024

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

**ISBN (PDF):** 978-625-95529-0-3

**DOI:** <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub601>

---



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>  
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

---

Suggested citation:

Savaş, H. (ed) (2024). *Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub601>. License: CC-BY-NC 4.0

---

*The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgurayinlari.com/>*

---



## Önsöz

Geoteknik mühendisliği, inşaat mühendisliği projelerinde teknik ve finansman riskinin en yüksek elemanı olan zeminin davranışını yapı ile etkileşimli olarak inceleyen bir bilim dalıdır. Temel İnşaatı ve Zemin Mekaniği alanlarını içine alan Geoteknik Anabilim Dalı 1900'lü yılların başında oluşmaya başlamıştır. Klasik zemin mekaniğinin temel prensiplerinin geoteknik alanında çalışan profesyonellerin yıllar içerisinde artan saha deneyimleri ile birleştirilmesi ile zemin davranışındaki belirsizliklerin en aza indirgenmesi m¼mk¼n hale gelmiştir. Bu yaklaşım hem emniyetli hem de optimum maliyetli yapıların tasarımına olanak sağlamıştır. Özellikle 1964 Niigata depremi, 1995 Kobe depremi ve 1999 Adapazarı depremi sonrasında gözlenen hasarlar yerel zemin koşullarının etkilerini göz önüne sermiş ve araştırmacıların Geoteknik Deprem M¼hendisliđi alanı üzerine yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

Teoriden Uygulamaya Geoteknik M¼hendisliđi isimli bu kitap, geoteknik alanındaki farklı çalışma konularına ilişkin değerli bilgiler içeren beş b¼l¼mden oluşmaktadır. Ele alınan başlıklar arasında; baraj enjeksiyon perde tasarımı, sismik şev stabilitesi, zemin büy¼tme analizi, sahaya özel sismik tehlike analizi ve atık lastik ürünlerinin İnşaat M¼hendisliđi alanında kullanımı konuları yer almaktadır. Bu kitabın, Geoteknik M¼hendisliđine hem teori hem de uygulama açısından kapsamlı bir bakış açısı sunacağına inaniyor, kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm b¼l¼m yazarlarına ve kitabı okuyucuları ile buluşturma fırsatı sunan Özg¼r Yayınları'na teřekk¼r ederim.

Doç.Dr.Hasan SAVAş



# İçindekiler

Önsöz iii

## Bölüm 1

---

Baraj Enjeksiyon Perdesinin Tasarımı için Gerçekleştirilen Tahkikler 1  
*Sadettin Topçu*  
*Evren Seyrek*

## Bölüm 2

---

Sismik Şev Stabilite Analizlerine Genel Bir Bakış 17  
*Seyfettin Umut Umu*

## Bölüm 3

---

Afyonkarahisar-UyduKent Bölgesinde Zemin Büyütme Etkisinin TBDY 2018'e Göre İncelenmesi 45  
*Süleyman Gücek*  
*İsmail Zorluer*

## Bölüm 4

---

İstanbul Başakşehir İçin Sahaya Özel Deprem Tehlike Analizi ve Tbdy (2018) ile Karşılaştırma 67  
*Evren Seyrek*

## Bölüm 5

---

Atık Lastik Ürünlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı Üzerine Bir Derleme Çalışması 81  
*Yaşar Vitoşoğlu*  
*Tayfun Şengül*



# Baraj Enjeksiyon Perdesinin Tasarımı için Gerçekleştirilen Tahkikler

Sadettin Topçu<sup>1</sup>

Evren Seyrek<sup>2</sup>

## Özet

Baraj yapılarının temelindeki kaya birimlerin kırıklı olmasından dolayı rezervuar kaynaklı memba-mansap doğrultusunda gelişecek sızma kapasitesi yapının stabilite güvenliği ve rezervuarda biriken suyun miktarı açısından değerlendirilmesi gereken bir husustur. Bu gibi durumlarda inşa edilen baraj enjeksiyon perdeleri, geçirimsizlik zonu oluşturarak sızma kapasitesinin ve baraj gövdesine etki eden kaldırma basınçlarının düşürülmesini sağlar. Baraj enjeksiyon perdelerinin tasarımında ve inşasında uzun süre deneme-yanılma ve tecrübeden kaynaklı pratik uygulama esaslarının kullanıldığı bilinmektedir. Son yıllarda bu konuda gerçekleştirilen araştırmaların sonuçlarıyla birlikte analitik yöntemlerle yapısal, işlevsel ve dayanıklılık esasında baraj enjeksiyon perde tasarımı ve inşaatı mümkün olmaktadır. Bu analitik yöntem kapsamında baraj enjeksiyon perdesinin tasarımında mutlak surette dikkate alınması gerekli tahkikler: Geçirimsizlik kriteri, Kaldırma basıncı kriteri ve İçsel erozyon kriteridir. Bu kitap bölümü kapsamında da bu gerekli tahkikler detaylandırılarak anlatılmaktadır.

## 1. Giriş

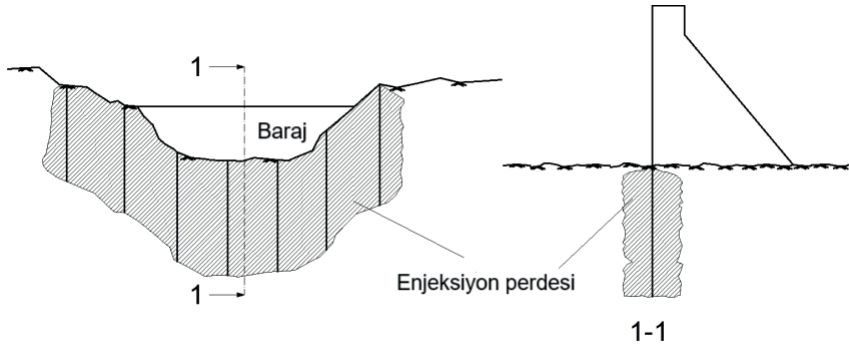
Dolgu barajlarda göçmenin en dikkat çeken sebepleri; üstten aşma, sızma-basınçlı boru akımı nedeniyle gövde ve temelde meydana gelen içsel erozyon ve baraj temelindeki kusurlardır (ICOLD, 1993). Bilinmeyen özelliklere sahip süreksizliklerin varlığı nedeniyle, temeldeki kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin ve su geçirimsizliğinin iyileştirilmesine ihtiyaç

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502

2 Doç. Dr, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723



olabilir. Enjeksiyon, genellikle yer yapısının iyileştirilmesine yönelik bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır (Şekil 1). Enjeksiyon, akışkan malzemelerin basınç altında yer yapısına enjekte edilmesi ve zeminin mühendislik özelliklerini, davranışını değiştirme ve/veya iyileştirme olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Baraj Enjeksiyon Perdesi

Genelde çimento esaslı inşa edilen geçirimsiz enjeksiyon perdeleri (EP), farklı baraj tiplerinin temelinde yer alan kaya kütesinin hidrolik iletkenliğini azaltmak ve böylece içindeki sızma akımını kontrol etmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir (USBR, 1976; Houlsby 1990; ICOLD, 1993; FERC, 2016). Özellikle de rijit-beton barajlar için geçirimsiz enjeksiyon perdesi drenaj sistemiyle birlikte barajın stabilitesini bozacak temel altında gelişen kaldırma basınçlarını azaltır (Casagrande, 1961; Ruggeri, 2004; Chai ve Cui, 2012). Dolgu barajlar için, kaya temelindeki yetersiz enjeksiyon işleminden kaynaklanan aşırı sızıntı veya kaçak, geçirimsiz baraj çekirdeğinin içsel erozyonuna yol açabilir.

Enjeksiyon işleminde kullanılan malzemenin etkinliği ve kalitesi çok sayıda faktör tarafından kontrol edilir (Bruce and Dreese, 2010). Bölgedeki jeolojik oluşumlar, anakayanın durumu ve konumu, zemin ve kayanın mühendislik özellikleri, süreksizlikler, geçirgenlik vb. gibi jeolojik faktörler enjeksiyon perdesinin başarılı bir şekilde inşa edilmesinde önemli rol oynarlar. Bunlar arasında, özellikle yeraltı suyunun transferine neden olan süreksizliklerin ve bunların sayısı, durumu özel bir öneme sahiptir (Ewert, 2012).

Barajların kaya birimlerinden oluşan temellerindeki enjeksiyon perdeleri, Houlsby (1990), Weaver (1991) ve Weaver ve Bruce (2007) dahil olmak üzere ilgili çeşitli ders kitaplarında anlatıldığı gibi, tecrübe ve deneysel yöntemlere dayanarak tasarlanabilmektedir. Son yıllarda enjeksiyon işlemiyle

ilgili teorik bilgi, esas olarak İsveç'teki KTH (Kraliyet Teknoloji Enstitüsü) ve Chalmers Teknik Üniversitesi'nde yürütülen araştırmalarla elde edilmiştir. Bu çalışmalarla birlikte artık çatlaklara basılan enjeksiyon malzemesinin yaklaşık yayılımını hesaplamak ve hangi çatlakların kapatılabileceğini tahmin etmek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte temeldeki sızma basınçlarından kaynaklanan kaldırma etkisini önlemek için hangi enjeksiyon basıncının yeterli olabileceği tahmin edilebilmektedir.

Uzun yıllar boyunca deneme-yanılma ve pratik kurallar çerçevesinde tasarlanarak inşa edilen enjeksiyon perdeleri, son yıllarda yapılan araştırmalarla birlikte analitik hesaplama yöntemleri kullanılarak projelendirilebilmektedir. Bu kitap bölümünde analitik hesap yöntemi kapsamında ön tasarım aşamasındaki baraj enjeksiyon perdesi için gerekli tahkikler anlatılacaktır.

## 2. Enjeksiyon Uygulamasının Tarihçesi

Boşlukları ve çatlakları enjeksiyon malzemesiyle doldurarak yer yapısının özelliklerinin değiştirildiği enjeksiyon yöntemi, iki asır öncesinden beri uygulanmaktadır (Weaver ve Bruce 2007). Enjeksiyon uygulaması Avrupa'da doğmuş bir iyileştirme uygulamasıdır. Glossop'a (1960) göre, Charles Bérigny adlı Fransız bir mühendis, 1802'de Fransa'nın Dieppe kentinde bir su yolunun temelini iyileştirmek için enjeksiyon benzeri işlemi uygulayan ilk kişiydi. Enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan şerbette puzolanik özelliğe sahip bağlayıcı malzeme kullanılmış ve daha sonra bu uygulamanın boşlukları kapatma açısından tatmin edici olduğu kanıtlanmıştır. Sonraki yıllarda, enjeksiyon işlemi Fransa'daki birkaç limanın inşasında ve onarımında kullanılmıştır. Su kaçaklarının enjeksiyon işlemiyle durdurma girişimleri Fransa'da 1818 yılında Rochefort'ta (tamamlanmadı) ve 1831 yılında ise Rhone-Ren kanalında da gerçekleştirildi. İkinci uygulama başarıyla tamamlanmış bir işlem olarak tarihe geçmiştir ancak küçük bir sızıntının da devam ettiği görülmüştür.

Enjeksiyon işleminde zamanla bağlayıcı malzeme kullanımında çimentoya yönelindi. Çimento enjeksiyonunun ilk defa kimin tarafından uygulandığına dair tartışmalar hala devam etmektedir. 1876 yılında Thomas Hawksley, İngiltere'deki Tunstall rezervuarındaki bir dolgu barajın temelindeki kayaya çimento enjeksiyonunu ilk uygulayan kişi olarak bilinmektedir. Bu uygulamada portland çimeno kullanıldı. Fakat uygulama sonrası kaçak 1886 yılında tekrar ortaya çıktı ve bu sorunda tekrar gerçekleştirilen iyileştici enjeksiyon uygulamalarıyla çözüldü. Boşluklu kaya kütlelerine enjeksiyon işlemi, kaya mühendisliği pratiğinde önemli bir adımdı ve kuzey Fransa'daki kömür yataklarının keşfinden sonra hızla gelişti (Glossop 1961). Çimento

enjeksiyonunun sistematik olarak uygulandığı ilk proje, ABD'nin New York şehrinde 1983'de inşa edilen New Croton Barajı'nın kireçtaşından oluşan temelindeki uygulamadır. Glossop (1961) bu projedeki amacın su kaçağını engellemek yerine kaldırma basınçlarının azaltılması olduğunu bildirmiştir.

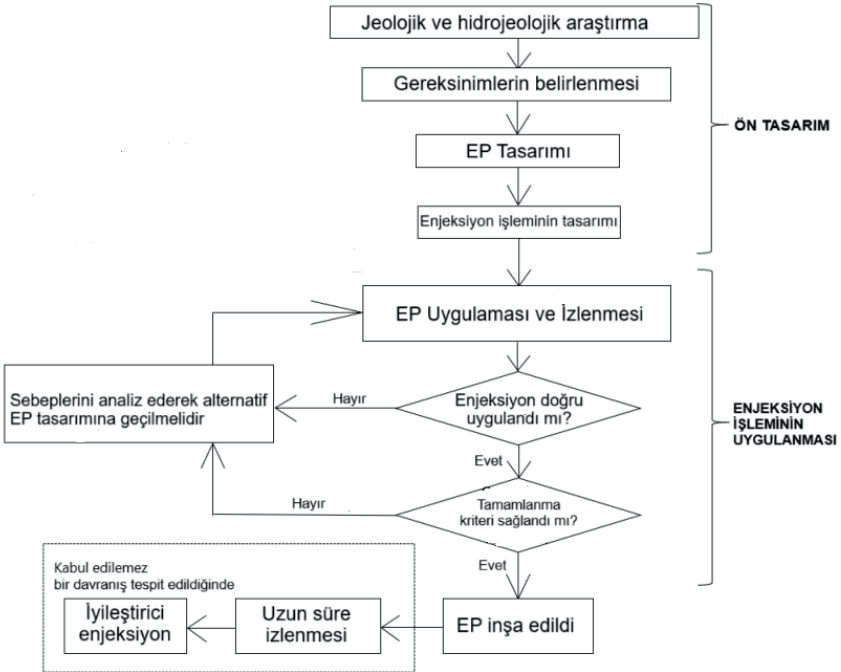
Küçük ölçekte birkaç katof tipinde enjeksiyon uygulamasından sonra, 1912 yılında Oregon, Portland'daki Estacada Barajı'nda enjeksiyon perdesi inşa edildi. Bu eneksiyon perdesi, ABD'de çimentolu enjeksiyon perdesinin ilk büyük uygulamasıydı (Weaver ve Bruce, 2007). Estacada Barajı'ndaki enjeksiyon işleminin ayrıntılarını anlatan teknik bir makale yayınlandı (Rands, 1914). Bu teknik makalenin baraj temellerindeki enjeksiyon perde uygulamasına dair ilk çalışma olduğuna inanılmaktadır. Glossop (1961), Hoover Barajı'nın (1932-1935 yılları arasında inşa edilmiştir) enjeksiyon perdesi için sistematik bir tasarım yaklaşımının kullanıldığı ilk barajlardan biri olduğunu bildirmiştir. 1933 yılında Maurice Lugeon, kendisinin adını taşıyan önemli bir hidrolik iletkenlik birimiyle kaya birimlerin hidrolik iletkenlik kriterlerini belirlemiştir. Lugeon'un çalışmaları, kaya kütlelerinin hidrolik iletkenliğini değerlendiren hidrojeolojik araştırma yöntemlerine büyük katkıda bulunmuştur ve belirlenen Lugeon değerleri, baraj temellerindeki enjeksiyon uygulamalarının gerekliliği konusunda kullanılmaya başlanan bir kriter olarak kısa sürede kabul görmüştür.

Lombardi ve Deere (1993) enjeksiyon şiddeti sayısı yöntemini (GIN yöntemi) geliştirdi. Bu yöntemde enjeksiyon perdesi uygulamasında enjeksiyon işlemi için harcanan özgül enerji hesaba katılarak, gerekli enjeksiyon basıncı belirlenebilmektedir. GIN yöntemi birçok ülkede barajlar için kullanılmıştır. Ancak, GIN yönteminin bazı koşullar altında uygulanabilirliğini sorgulayan tartışmalar devam etmektedir (Weaver ve Bruce, 2007; Rafi ve Stille 2015).

### 3. Enjeksiyon Perdesinin Tasarım Aşamaları

Bir enjeksiyon perdesinin (EP) doğru bir şekilde gereksinimleri karşılayan ve gerçekçi bir tasarımı için Şekil 2'de verilen akış şeması izlenebilir. Kaya birimlerindeki karşılaşılması muhtemel öngörülemez durumlardan dolayı EP'nin kesin ve mutlak bir tasarımı olmadığı için ön tasarım esasında değerlendirmeler yapılabilmektedir. Bu ön tasarım esnasında kaya kütlelerinin kalitesinin ve süreksizliklerinin belirlenebilmesi için gerekli ve yeterli jeolojik araştırmaların yapılması gerekir. Bununla birlikte kaya kütlelerinin geçirimsizliğinin belirlenebilmesi için Basıncılı Su Testi (Lugeon Testi) gerçekleştirilmelidir. EP tasarımındaki gerekli tahkikler, üç başlıkta incelenmektedir: i) Kaya kütlelerindeki çatlakların, boşlukların enjeksiyon

malzemesiyle doldurularak geçirimsizliğin sağlanması ve işlem sonunda kabul edilebilir rezidüel hidrolik iletkenliğin sağlanması. ii) Baraj temelinde sızmaya bağlı olarak gerçekleşecek kaldırma kuvvetlerinin minimize edilmesi. iii) Kaya birimlerindeki çatlakların arasını dolduran ve enjeksiyon malzemesinin nüfuz edip kapatamadığı kum ve kil benzeri dolgu malzemelerinin gelişecek sızma akımıyla içsel erozyona uğramasının engellenmesi. Kabul edilebilir rezidüel hidrolik iletkenlik gerekliliği ve çatlaklardaki dolgu malzemelerinin erozyona uğramasına ilişkin gereklilik her zaman birlikte yerine getirilmelidir. Ancak kaldırma kuvvetlerini en aza indirme gerekliliği, isteğe bağlı olarak yalnızca optimizasyon durumunda yerine getirilmelidir ve diğer iki kriter yerine getirilip barajın stabilite hesaplamalarında varsayılan kaldırma basınçları aşılmadığı sürece olası tüm tasarım alternatifleri için zorunluluk olmaktan çıkabilmektedir. Bu gereksinimlere ek olarak, kullanılan enjeksiyon malzemesinin tipi, jeokimyasal yönü ve yeraltı suyuyla etkileşimi de EP'nin durabilitesini etkiler ve belirli koşullar altında dikkate alınması gereken önemli bir sorun olabilir.



Şekil 2. EP Tasarımı ve Uygulamasının Akış Şeması

EP tasarımında imalatın pozisyonu belirlenerek, perde kalınlığı ve gerekli uygulama derinliği hesaplanmalıdır. Enjeksiyon işleminde ise kaya birimlerin yerinden oynamasına neden olacak hidrolik kaldırma basıncına dikkat edilerek enjeksiyon basıncı, enjeksiyonun yayılma çapı ve enjeksiyon delikleri arasındaki mesafe belirlenebilmektedir. Enjeksiyon işlemi sonrasında kontrol kuyularında Lugeon testi yapılarak rezidüel hidrolik iletkenlik kriterinin sağlanmasıyla EP inşaatı tamamlanmış oluyor. Fakat inşa edilen EP uzun süre izlenerek, baraj stabilitesini bozarak güvenliğini tehlikeye atacak bir durumla karşılaşılması durumunda iyileştirici enjeksiyon işlemleriyle bu durum ortadan kaldırılmalıdır. Eğer enjeksiyon işlemi doğru bir şekilde gerçekleştirilemiyor (kaya kütlesi hidrolik kaldırma kuvvetine maruz kalıyor vs.) veya tamamlanma kriteri sağlanamıyorsa buna sebep olan etkiler analiz edilerek alternatif EP ve/veya enjeksiyon işlemi tasarımına geçilmelidir.

### 3.1. Jeolojik Araştırmalar

Enjeksiyon perdesinin ön tasarım aşamasında saha araştırmaları kapsamında değerlendirilen jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar mutlak surette yapılmalıdır (Houlsby, 1990; Weaver ve Bruce 2007; Stille, 2015). Araştırma sonuçları, EP'nin gerekliliğini değerlendirmek, gerekli tahkiklerin yapılabilmesi için veri toplamak ve bunlara bağlı olarak doğru bir EP tasarımı belirlemek için kullanılmaktadır. Jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar sonucunda elde edilen bilgiler, saha koşulları da dikkate alınıp yorumlanarak belirsizliklerin ortadan kaldırılmasını sağlayabilmektedir.

Sahada gerçekleştirilen jeolojik araştırmalar; EP'nin uygulanacağı kaya kütlesindeki çatlak/kırık deseninin bilgisini sağlamaktadır. Böylece kırıkları düzgün bir şekilde kesecek ve onları etkili bir şekilde kapatacak enjeksiyon delikleri tasarlanarak enjeksiyon işleminin optimize edilmesine yardımcı olunur. Sadece EP'nin tasarımı amacıyla kapsamlı bir jeolojik araştırma yapmak ne gereklidir ne de maliyet açısından uygundur. Enjeksiyon işleminin temel amacının kırıkları enjeksiyon malzemesiyle doldurarak kapatmak olduğu göz önüne alındığında kırık deseni ve özellikleri genellikle kaya kütlesinin diğer özelliklerine kıyasla daha kritik bir öneme sahiptir.

Jeolojik araştırma tüm sahalarda özellikle de potansiyel olarak çok çeşitli kaya oluşumlarına sahip olabilecek büyük alanlar için çok önemlidir. Enjeksiyon işleminin farklı tasarım esaslarını ilgilendiren konularında kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır. Baraj sahalalarında yamaç ve rezervuar sahalalarının sızma kapasitelerine bağlı tehditler de araştırma kapsamında incelenmelidir. Jeolojik araştırmalar yüzey incelemesi ve sondaj işlemleriyle gerçekleştirilebilmektedir (Palmström ve Stille, 2014). Houlsby (1990),

tarafından enjeksiyon perdesi tasarımını etkileyebilecek jeolojik özellikler aşağıda ifade edilmektedir:

- Kırık aralıkları: Kırık deseni ne kadar yoğun ise başarılı bir enjeksiyon yapmak o kadar zor olur.
- Kırık açıklığı ve sürekliliği: Kırık açıklıklarının boyutlarının büyük olması enjeksiyon malzemesinin daha kolay yayılmasını sağlar. Ancak bu durum kaya kütleindeki enjeksiyon işleminin başarılı bir şekilde tamamlanmasını zorlaştırabilmektedir.
- Kırık oryantasyonu: Eğim açısı  $0^\circ$  ile yaklaşık  $60^\circ$  arasında değişen kırıklar için dikey enjeksiyon delikleri en uygunu olabilir, aksi takdirde enjeksiyon deliği ile kırıkların kesişimi belirli düşey eğime sahip enjeksiyon delikleriyle sağlanabilir. Kırık deseninin karakterizasyonu ile ilgili en yaygın uygulama, BIPS kayıdır. Bu uygulamada sondaj kuyularının duvarları ve sondaj karotlarının kırık doğrultuları ve açıklıkları haritalanabilmektedir.
- Sahanın üniformluğu: Enjeksiyon deliklerinin düzenli yerleşim planı, üniform kırık desenleri için yeterli olabilir. Ancak daha karmaşık kırık desenlerinin olması veya sahanın farklı jeolojik birimlere bölünmesi durumunda farklı düşey eğimlerde ve düzensiz yerleşim planına sahip enjeksiyon perdeleri inşa edilebilmektedir.
- Kaya kütleinin kalitesi: Enjeksiyon deliklerinin duvarındaki düşük kaya kalitesi, enjeksiyon işlemini zorlaştırabilmektedir.
- Kaya kütleinin mukavemeti: Enjeksiyon işlemi genellikle güçlü, masif ve kendini iyi tutabilen kayalarda daha kolaydır.
- Kaya kütleindeki gerilme koşulları: Kaya kütlei için yüksek tektonik gerilmeler belirlenmiş ise enjeksiyon işlemi için özel iyileştirmeler ve işlemler gerekebilir.
- Erozyon: Enjeksiyon işleminden sonra gelişen sızma akımı enjeksiyon malzemesiyle kapatılan bölgedeki zayıf kırık duvarlarını veya kırıklardaki dolgu malzemelerini aşındırabilir. Bu erozyonu önlemek için enjeksiyon işlemi çok yüksek standartlarda gerçekleştirilmelidir.
- Kimyasal reaksiyonlar: Kaya kütlei veya enjeksiyon malzemesi, zararlı kimyasal etkileşime eğilimliyse daha yüksek standartta enjeksiyon işlemi gerekebilir.
- Karstik ve diğer boşluklar: Büyük boşlukların enjeksiyon işlemiyle doldurulabilmesi için özel yöntemler uygulanabilir.

Houlsby (1990) tarafından belirtilen öneriler dışında kırıklardaki dolgu malzemelerinin tanımlanması da jeolojik araştırmalar için önemli bir aşamadır (Palmström ve Stille, 2014). Sondaj deliğine yakın dolgu malzemelerinin çoğu sondaj sırasında yıkanıp gitti için BIPS kayıtlarında ve sondaj çekirdeklerinin haritalanmasında gözlemlenmeleri zorlaşmaktadır.

### 3.2. Hidrojeolojik Araştırmalar

Hidrojeolojik inceleme kapsamında gerçekleştirilen geçirimsizlik araştırmaları EP tasarım parametrelerinin ortaya konulmasında gerekli bir etüt çalışmasıdır. Çünkü EP uygulamasındaki amaç nihai sızma akımının minimize edilmesidir. Bu araştırma kapsamında en çok tercih edilen test yöntemi Basıncılı Su Testi olarak da bilinen Lugeon Testidir. Bu testin sonuçları, kuyuda kaya kütlelerinin belirli bir kademesine sabit basınç altında suyun enjekte edilmesiyle gerçekleşen su kaybının ölçülmesiyle değerlendirilmektedir.

1 Lugeon değeri, 10 atmosfer ( $\approx 10 \text{ kg/cm}^2$ ) basınç altında 1 dakika içerisinde kuyuda 1 metre uzunluğundaki kaya kütlelerine (1 metre kademeye boyuna) 1 litre su basılması sonucu elde edilmektedir. Birimi ise litre/metre/dakika'dır. Burada dikkate alınması gerekli olan husus enjekte edilen suyun basıncının, efektif basınç olarak dikkate alınması gerektiğidir. Efektif basınç ise manometre basıncı ve statik su çizgisi yüksekliği toplamından boru, tij ve vana gibi elemanlarda oluşan yersel ve sürtünme yük kayıplarının çıkartılmasıyla hesaplanmaktadır. Bunun yanında Lugeon testinin gerçekleştirileceği kademe boyunun 5-6 m olması yeterlidir. Kademe boyu, kaya biriminin durumuna göre 1 m'ye kadar düşebilir. Çeşitli nedenler ile 10 atmosfer basınç altında deneylerin gerçekleştirilememesi durumunda Lugeon değeri Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Bu denklemde, Q: Kuyuya basılan su miktarı (litre/dakika), P: Su enjeksiyon basıncı ( $\text{kg/cm}^2$ ), L: Kademe boyu (m) değeridir.

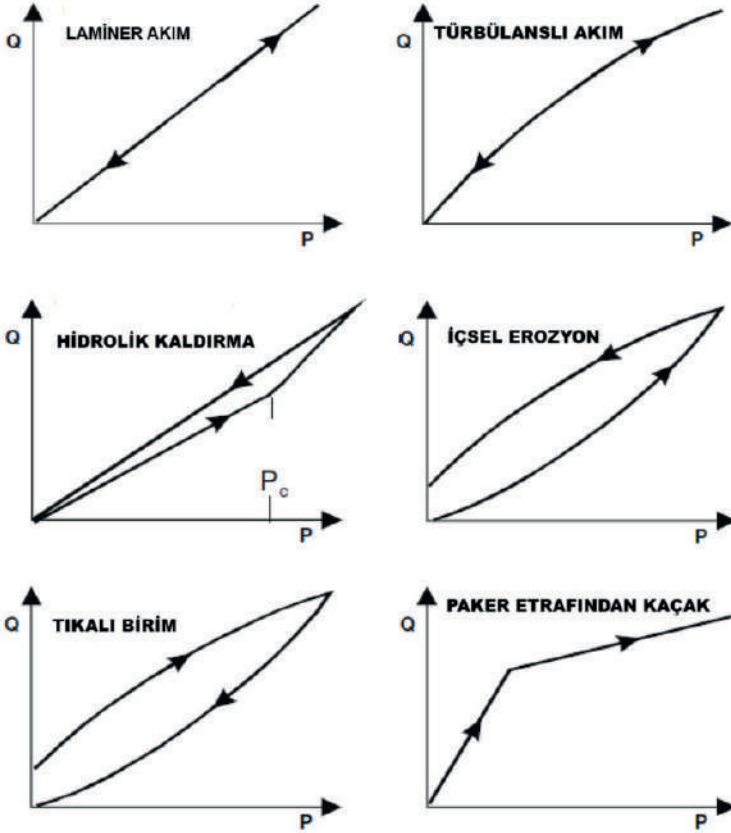
$$\text{Lugeon} = \frac{Q \times 10}{P \times L} \quad (1)$$

Lugeon testinde, paker test edilen kademe bölümünü kuyunun geri kalanından izole edecek şekilde yerleştirilmektedir. Çift paker genelde pekişmiş ve sağlam kayalarda uygulanmaktadır. Tek paker ise pekişmemiş zayıf kayalarda kullanılmaktadır. Lugeon değerleri kırık deseninden bağımsız bir şekilde belirlenmemelidir. Aynı Lugeon değerlerine tek bir büyük çatlak veya birçok ince kırıkla da ulaşılabileceği gerçeği göz önüne alındığında



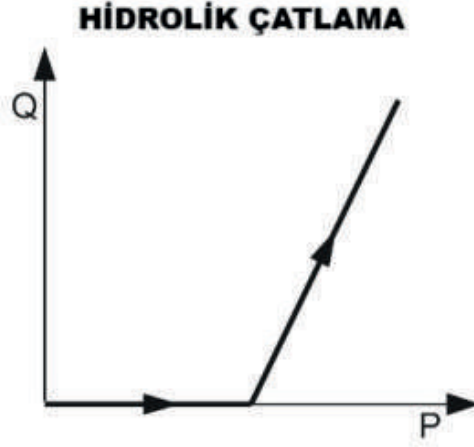
Lugeon değerlerinin yorumlanmasında jeolojik araştırma sonuçlarının da dikkate alınması gerekir.

Lugeon testi her bir kademede aşama aşama artış ve azalış gösteren toplamda beş su enjeksiyon basıncında gerçekleştirilmektedir. Düşük-Orta-Yüksek-Orta-Düşük su enjeksiyon basınçlarında gerçekleştirilen testlerde her bir enjeksiyon basıncında Lugeon değerleri hesaplanmalıdır. Lugeon testinde kuyuya basılan su miktarının, su enjeksiyon basıncına göre çizildiği grafikler için altı farklı senaryo gelişebilir (Stille vd., 2012) (Şekil 3). Bunun yanında kaya birimlerin su enjeksiyon basıncı etkisiyle çatlatılması olarak tanımlanan hidrolik çatlama senaryosunun değerlendirildiği Q-P eğrisi Şekil 4'de verilmektedir. Hidrolik çatlama senaryosunda, su enjeksiyon basıncı artmasına rağmen kuyuya basılan su miktarı belli bir noktadan (hidrolik çatlama basıncı) sonra artarak test gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Farklı Lugeon test sonuçlarının yorumlanması





*Şekil 4. Hidrolik çatlama senaryosu*

Weaver ve Bruce (2007) Lugeon testinde su enjeksiyon basınçlarının belirlenmesinde hidrolik çatlama basıncına ve kaya birimleri yerinden oynatan kaldırma basınçlarına dikkat edilerek kaya kütlelerinin dayanımının esas alınmasını önermiştir. Buna göre, zayıf kaya kütleleri için su enjeksiyon basınçları 2, 4, 6, 4, 2 kg/cm<sup>2</sup> ve sağlam kaya kütleleri için 10, 20, 40, 20, 10 kg/cm<sup>2</sup> değerlerinin uygun olabileceği ifade edilmiştir (Littlejohn, 1992).

### 3.3. Gerekli Tahkikler

#### 3.3.1. Geçirimsizlik Kriteri

Lugeon testi sonucunda hidrolik iletkenlik değeri (K) Moye formülü yardımıyla hesaplanabilir (Denklemler 2). Kademe boyu için basılan su miktarı (m<sup>3</sup>/s), L: Kademe boyu (m), ΔH: Su enjeksiyon basıncının su sütunu yüksekliği (m).

$$K = \frac{Q}{L \cdot H} \quad (2)$$

Lugeon değeri (Lu) ve hidrolik iletkenlik (K) esasta aynı anlama gelse de aralarındaki birim dönüşümü Denklem 3'de gösterildiği gibi yapılmaktadır.

$$K = Lu \times 1.3 \times 10^{-7} \quad (3)$$

Kademe derinliği boyunca kesitin transmisivitesi ( $T_s$ ) Denklem 4'de verildiği gibi hidrolik iletkenlik ve kademe boyuna bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$T_s = K.L \quad (4)$$

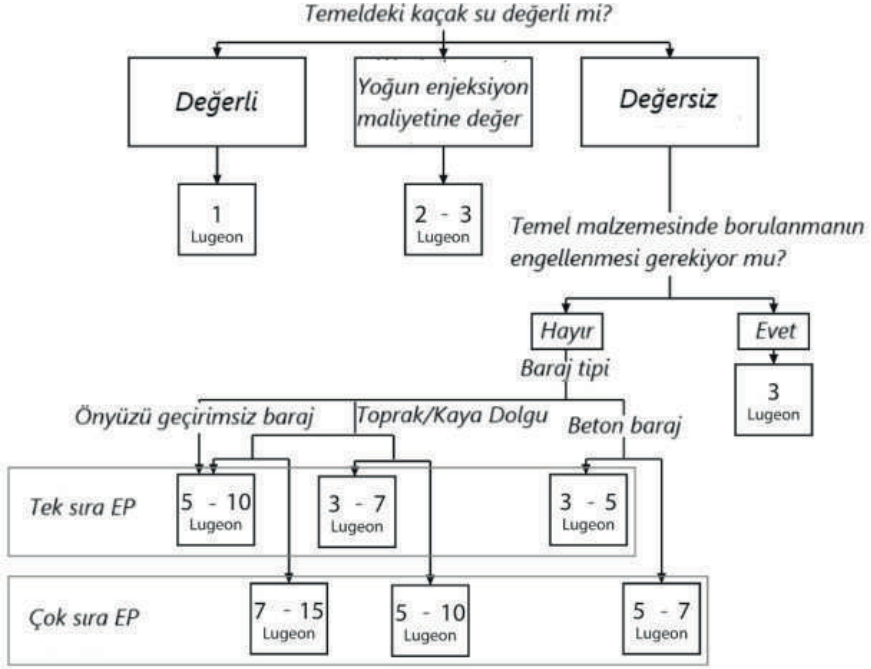
Kesit içerisindeki su geçirgenliğinin en büyük açıklığa sahip kırık tarafından kontrol edildiği kabulü yapılarak kesit içerisindeki maksimum hidrolik açıklık ( $b_{mh}$ ) Denklem 5'de gösterildiği gibi hesaplanabilir (Stille, 2015).  $\mu$ : Suyun 10 °C'deki dinamik viskozitesi ( $1.3 \times 10^{-3}$  Pa.s),  $k_2$ : 1.1~2.0 arasında değerler alabilen katsayı,  $\rho_w$ : Suyun yoğunluğu ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$ : Yerçekimi ivmesi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) değerini ifade etmektedir.

$$b_{mh} = \sqrt[3]{\frac{T_s \times 12 \mu}{k_2 \times \rho_w \times g}} \quad (5)$$

Gerçek kaya kütlesi ortamında enjeksiyon malzemesinin alımını kırığın fiziksel açıklığı ( $b_h$ ) belirlemekte olup, kırığın fiziksel açıklığı hidrolik açıklığın kabaca 1.5~2 katı olarak alınabilmektedir. Ve aynı zamanda  $k_3$  katsayısı olarak da tanımlanabilmektedir (Zimmerman ve Bodvarsson, 1996).

Baraj temelinde bulunan kaya kütlelerinin hidrolik iletkenliğinin düşürülmesiyle ilgili gereksinim ön tasarım esnasında karşılanmalıdır. Lugeon değerlerinin Denklem 3'de gösterildiği gibi birim dönüşümleri yapılarak Denklem 6'daki hidrolik iletkenlik kriteri sağlanmalıdır. Bu denklemde,  $K_g$ : Hesaplanan rezidüel hidrolik iletkenlik değeri,  $K_{exp}$ : Gerekli rezidüel hidrolik iletkenlik değerini göstermektedir. Gerekli rezidüel iletkenlik değeri Şekil 5'den projenin niteliğine bağlı olarak seçilebilir (Houlsby, 1990).

$$K_g \leq K_{exp} \quad (6)$$



Şekil 5. Gerekli rezidüel lugeon değerleri

Baraj enjeksiyon perdesi uygulamasından sonra beklenen rezidüel iletkenlik değeri ( $K_g$ ) Denklem 7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Stille, 2015). Denklemdaki değişkenlerden biri olan  $k_1$ , Lugeon test derinliğinde kesitlerin ortalama transmisivite değerinin maksimum transmisivite değerine oranı olarak tarif edilmekte ve genellikle 0.2~0.6 arasında değişen değerler almaktadır.  $b_{crit}$  değeri ise enjeksiyon malzemesinin serbestçe akabileceği en büyük kırık açıklığıdır ve laboratuvar testleri sonucu belirlenebilmektedir (Stille, 2015). Aynı zamanda seçilen enjeksiyon malzemesinin kontrolü de Denklem 7'de  $K_g$ 'nin hesaplanmasıyla yapılabilmektedir.  $k_4$ ,  $b_{crit}$  değerinin, enjeksiyon malzemesiyle tamamen kapatılabilecek kırık açıklığına oranı olarak dikkate alınmaktadır.

$$K_g = \frac{k_1 k_2}{k_3^3 k_4^3} \frac{1}{L} \frac{\rho g}{12\mu} b_{crit}^3 \quad (7)$$

### 3.3.2. Kaldırma Basıncı Kriteri

Enjeksiyon perdesi uygulaması, baraj gövdesinde etkili olan temeldeki boşluk suyu basınçlarından kaynaklanacak kaldırma basıncı potansiyelini

azaltmaktadır. Özellikle beton barajlar için bu kritere çok dikkat edilmelidir. Kaldırma basınçlarındaki düşme etkisi baraj gövdesinde kullanılan malzemelerin metrajını azaltmaya ve dolayısıyla maliyetini düşürmeye yardımcı olabilmektedir. Ancak baraj güvenliği için birçok rehber ve şartname EP uygulamasıyla kaldırma basınçlarındaki azalmanın baraj tasarım hesaplarında dikkate alınmasını önermemektedir. Buna rağmen hidrolik iletkenliği düşürmek ve barajın uzun vadede güvenliğinden ödün vermeden enjeksiyon perdesi tarafından sağlanan düşük kaldırma basınçlarına ulaşmak yine de faydalıdır.

### 3.3.3. İçsel Erozyon Kriteri

Kaya kütlelerinde kırıklardaki daneli zemin olarak yer alan dolgu malzemelerinin içsel erozyonunun ön tasarım aşamasında önlenmesine dair gerekli tahkikler yapılmalıdır. Yüksek hidrolik eğim sonucu gelişen büyük sızma hızları enjeksiyonlu bölgelerdeki dolgu malzemelerini erozyona uğratarak yeni akış yollarının oluşmasına neden olurlar. Bu durum EP'nin durabilitesini tehdit eder ve barajın stabilitesini de tehlikeye atar. Bu gereksinimin karşılanması için EP uygulaması sonrası hesaplanan hidrolik eğim ( $i_g$ ), Denklem 8'de ifade edildiği dolgu malzemesinin taşınmasına neden olan kritik hidrolik eğimle ( $i_{crit}$ ) mukayese edilmelidir.

$$i_g < i_{crit} \quad (8)$$

Kırıklardaki dolgu malzemeleri kil ve kum zeminler olabilir. Buradaki en önemli tartışmalardan bir tanesi de kohezyonlu (kil) zeminlerin sızma akımıyla taşınıp taşınmayacağıdır. Dispersif olmayan zeminler için kritik hidrolik eğimlerin, dispersif zeminlere göre daha büyük olacağı kuşkusuz bir gerçektir. Bunun yanında taşınmayı başlatan sızma akımı hızlarının kohezyonsuz (kum) zeminler için görece kohezyonlu zeminlere göre daha düşük olacağı da bir gerçektir.

## 4. Sonuç

Bu kitap bölümü kapsamında baraj enjeksiyon perdesinin tasarımındaki gerekli tahkiklerden olan geçirimsizlik, kaldırma basıncı ve içsel erozyon kriterleri detaylandırılarak anlatılmıştır. Özellikle bu tahkiklerin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için doğru ve etkin jeolojik-hidrojeolojik saha araştırmalarının yapılması kesinlikle tavsiye edilmektedir. Jeolojik araştırmalar kapsamında kaya kütleindeki kırık deseni, kırık açıklık boyutu, kırık doğrultu-eğimi ve kırık içerisindeki dolgu malzemesinin varlığı hakkında verilerin toplanması; baraj enjeksiyon perdesinin imalatını kolaylaştıran ve imalat sonrasındaki durabilitesini koruyan en kritik işlemdir. Bu sebeple, baraj

sahalarındaki kaya formasyonların tabakalanma, kıvrımlanma, eklemleme, faylanma ve diskordans-konkordans gibi yapısal jeolojik araştırmalarının mutlak surette en etkili bir şekilde yapılması önerilmektedir. Yapısal jeolojik araştırmalar kapsamında da kırık doğrultu-eğimlerinin, açıklık miktarının ve kırık açıklığındaki dolgu malzemesinin gözlemlenebildiği hat etütü çalışmalarının da yapılmasının faydalı olacağı düşünölmektedir.

## Kaynakça

- Bruce, D. A., & Dreese, T. L. (2010). Specifications for Rock Mass Grouting. In Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Conference on Dam Safety.
- Casagrande A (1961) Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams *Geotechnique* 11:161–182.
- Chai J, Cui W (2012) Optimum thickness of curtain grouting on dam foundation with minimum seepage pressure resultant Structural and Multidisciplinary Optimization. 45:303–308
- Ewert, F. K. (2012). Rock grouting: with emphasis on dam sites. Springer Science & Business Media.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (2016) Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects: 3 revised chapter 3—gravity dams. Federal Energy Regulatory Commission, Washington
- Glossop, R. (1960). The invention and development of injection processes. Part I, 1802-1850. *Geotechnique*, Vol. 10(No. 3), 91-100.
- Glossop, R. (1961). The Invention and Development of Injection Processes Part II: 1850–1960. *Geotechnique*, Vol. 11(No. 4), 255-279
- Houlsby AC (1990) Construction and design of cement grouting. John Wiley and Sons, New York
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1993) Bulletin 88: rock foundation for dams. International Commission on Large Dams, Paris
- Littlejohn, G. S. (1992). Report on Session 2: Consolidation Grouting. Paper presented at the Grouting in the ground, London.
- Lombardi, G., Deere, D. (1993). Grouting Design and Control Using the GIN Principle. *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 45(No. 6), 15-22.
- Palmström, A., Stille, H. (2014). Rock Engineering, second edition: ICE Publishing
- Rafi, J. Y., Stille, H. (2015). Applicability of Using GIN Method, by Considering Theoretical Approach of Grouting Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 33, 1431–1448.
- Rands, H. A. (1914). Grouted Cut-Off for the Estacada Dam. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 40(No. 1), 3-38
- Ruggeri G (2004) Uplift pressures under concrete dams: final report. ICOLD European Club
- Stille, H. (2015). Rock Grouting - Theories and Applications. Stockholm: BeFo-Rock Engineering Research Foundation

- Stille, H., Gustafson, G., Hässler, L. (2012). Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 30, 603-624
- United States Bureau of Reclamation (USBR) (1976) Design of Gravity Dams—Design Manual for Concrete Gravity Dams. Denver
- Weaver, K. D. (1991). *Dam Foundation Grouting*. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Weaver, K. D., Bruce, D.A. (2007). *Dam Foundation Grouting, Revised and Expanded Edition*. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Zimmerman, R. W., Bodvarsson, G.S. (1996). Hydraulic Conductivity of Rock Fractures. *Transport in Porous Media*, Vol. 23, 1-30.

## Sismik Şev Stabilite Analizlerine Genel Bir Bakış

Seyfettin Umut Umu<sup>1</sup>

### Özet

Şevler, altyapı projelerinde eğimli yüzeylerin güvenliğini ve stabilitesini sağlamak amacıyla tasarlanır. Şev stabilitesini etkileyen faktörler arasında eğim, yükseklik, malzeme özellikleri, drenaj sistemleri ve çevresel koşullar yer alır. Şev stabilitesini sağlamak için istinat duvarları, beton ve kaya dolgular, ankraj sistemleri gibi çeşitli teknikler kullanılır. Bunun yanında, sismik etkilerden kaynaklanan dinamik gerilmelerin şev stabilitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, özellikle deprem bölgelerinde büyük önem taşır. Sismik şev stabilitesi analizlerinde, dinamik gerilmelerin şev üzerindeki etkileri kütleli mukavemet kaybı ve zemin mukavemeti kaybı olmak üzere iki ana başlık altında ele alınır. Kütleli mukavemet kaybında, deprem sırasında meydana gelen dinamik gerilmeler zeminin mukavemetini geçici olarak aşarak kalıcı deformasyonlara yol açar. Zemin mukavemeti kaybında ise, dinamik yükler zeminin kayma mukavemetini ciddi ölçüde azaltır ve sıvılaşma gibi daha ciddi stabilite sorunlarına neden olabilir. Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi ve kritik kayma yüzeyinin tespiti, stabilite analizi için öncelikli adımlardır. Bu çalışmada sismik şev stabilite analizlerinde kullanılan teknikler ele alınmıştır. Psödo-statik analiz, Newmark analizi, kütleli ve zemin mukavemeti kaybına odaklanan yöntemler detaylı şekilde incelenmiştir.

### 1. Giriş

Sismik şev stabilitesi, özellikle deprem bölgelerinde, altyapı projelerinde güvenlik ve dayanıklılık açısından kritik bir konudur. Şevler, eğimli yüzeylerin stabilitesini sağlamak ve çevresel koşullara karşı dayanıklılık göstermek üzere tasarlanır. Ancak, eğim, yükseklik, malzeme özellikleri, drenaj sistemleri gibi statik faktörlerin yanı sıra, dinamik yüklerin etkileri de şev stabilitesi üzerinde önemli bir rol oynar. Dinamik etkilerin, özellikle deprem sırasında, zemin

1 Doktor Öğretim Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, suumu@eskischir.edu.tr, 0000-0002-5901-2626



mukavemetini ve şev güvenliğini nasıl etkilediğini anlamak, etkin tasarım ve mühendislik çözümleri geliştirmek açısından hayati önemdedir.

Sismik şev stabilite analizleri, deprem sırasında meydana gelen kütleli mukavemet kaybı ve zemin mukavemeti kaybı olmak üzere iki temel başlık altında ele alınır. Dinamik gerilmeler, zeminde geçici veya kalıcı deformasyonlara yol açabilir ve sıvılaşma gibi ciddi stabilite sorunlarını tetikleyebilir. Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, kritik kayma yüzeylerinin belirlenmesi ve şev deformasyonlarının öngörülmesi, analiz süreçlerinin temel adımlarıdır. Analizlerde, psödo-statik yaklaşımlar, Newmark kayan blok analizi ve deformasyon yumuşaması gibi yöntemler sıklıkla kullanılır.

Bu çalışmada, sismik şev stabilitesi analizlerinde kullanılan tekniklere genel bir bakış sunulmuştur. Psödo-statik analizlerin basit ve etkili yönlerinden başlayarak, Newmark analizi ile şev deformasyonlarının tahmini ve zemin özelliklerinin dinamik etkiler altındaki davranışı detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışma, mühendislik uygulamaları için temel bilgiler sağlamayı ve şev stabilitesinin sismik etkiler altında nasıl değerlendirileceğine dair kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır.

## 2. Sismik Şev Stabilite Analizi

Sismik şev stabilite analizi, gerek deprem hareketinden kaynaklanan dinamik gerilmelerin, gerekse bu dinamik gerilmelerin şevi teşkil eden zeminlerin mukavemeti ve gerilme – deformasyon davranışı üzerindeki etkilerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Şevlerde sismik orijinli stabilite kaybı, söz konusu bir şev için hangi faktörün daha etkili olacağı göz önüne alınarak aşağıdaki iki sınıf altında değerlendirilebilir (Kramer, 1996)

- Kütleli mukavemet kaybı (Ataletsel şev stabilite analizi)
- Zemin mukavemeti kaybı (Zayıflayan şev stabilite analizi)

Kütleli mukavemet kaybı durumunda zemin kayma mukavemetinde dinamik yüklemelere bağlı düşüşler ihmal edilebilir düzeylerde kalırken, kritik bir kayma yüzeyi üzerinde deprem hareketinden kaynaklanan yatay ve düşey ivmeler sebebiyle oluşan dinamik gerilmelerin geçici süreler için zemin mukavemetini aşması sonucunda şevde kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Şevin ağırlığına ek olarak, ivmelerle bağlantılı atalet kuvvetleri zemini kayma yüzeyine doğru iter.

Zemin mukavemeti kaybına bağlı stabilite bozulması ise, şevi oluşturan zeminlerin kayma mukavemetinin dinamik yüklemeler altında büyük ölçüde azalması sonucunda meydana gelir. Dinamik yükler, kayma yüzeyindeki

zemin partikülleri arasında sürtünme kuvvetini zayıflatır. Bu durum, zemin malzemesinin içsel sürtünme açısını ( $\phi$ ) ve kohezyonunu ( $c$ ) etkiler. Doygun zeminlerde deprem sırasında kayma yüzeyi boyunca boşluk suyu basıncı hızla artar. Bu artış, zeminin efektif gerilmesini ( $\sigma' = \sigma - u$ ) azaltır. Bu durumda, kayma mukavemetindeki kayıp miktarına bağlı olarak zeminin sıvılaşarak şev üzerinde akması söz konusu olabileceği gibi, deprem hareketi sırasındaki dinamik yüklemelere bağlı olarak geçici süreler için akma da söz konusu olabilir. İlgili göçme mekanizmalarına bağlı olarak öncelikle düşünülmesi gereken kritik durum şevi oluşturan zeminde sıvılaşma meydana gelip gelmediğinin kontrol edilmesi gerektiğidir.

### 2.1. Ataletsel Şev Stabilite Analizi

Atalet temelli şev stabilite analizi, deprem yüklerinin etkisini basitleştirilmiş bir şekilde modele dahil etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, dinamik yükleri yatay ve dikey doğrultuda sabit atalet kuvvetleri olarak ele alır ve statik bir analiz çerçevesinde değerlendirme yapılmasını sağlar. Yöntemin uygulanabilirliği, zemin türü, şev geometrisi ve deprem koşulları gibi faktörlere bağlıdır. En yaygın kullanılan ataletsel şev stabilite analizleri “*Psödo-Statik Analiz*” ve “*Newmark Analizi (Kayan Blok Analizi)*” yöntemleridir.

Atalet temelli analiz, zemin türüne bağlı olarak farklı doğruluk seviyelerinde sonuçlar verir.

#### a) Gevşek ve Doygun Zeminler:

- Yöntem, gevşek veya doymuş kumlu zeminlerde sıvılaşma etkilerini hesaba katmaz.
- Boşluk suyu basıncında hızlı bir artışa neden olan bu zeminler için atalet temelli analiz eksik kalabilir.

#### b) Kohezyonlu Zeminler (Kil):

- Kısmen drenajsız koşullara sahip kil zeminlerde daha güvenilir sonuçlar verir. Ancak, dinamik yükler altında kohezyonun zamanla azalabileceği dikkate alınmalıdır.

#### c) Kaya Zeminler:

- Atalet temelli analiz, dayanıklı kaya zeminlerde genellikle güvenilir sonuçlar sunar. Kayaların çatlaklı ya da zayıf olduğu durumlarda kayma yüzeyinin detaylı modellenmesi gerekebilir.

Ataletsel şev stabilite analizi, tekrarlı sismik yüklemeler sırasında kayma direncine sahip zeminler için daha uygun olan bir yöntemdir (Day, 2004).

- Sismik yükleme ile kayma direncinde belirgin bir düşüş göstermeyen zeminler. Bu tip sahalarda sismik yükleme kaynaklı şev hareketi genellikle zemin yığılmaları veya zemin bloğu kaymaları şeklinde meydana gelir.
- Yumuşama eğilimine girmeyen, şişme potansiyeli düşük, kararlı killer.
- Yeraltı su seviyesinin üstündeki zeminlerde, kılcal etki nedeniyle genellikle negatif boşluk suyu bulunur, bu sebeple ilgili yöntem ile analize uygundur.
- Kırılma yüzeyleri belirgin olan ve kırılma yüzeyi boyunca kayma direnci drenajlı rezidüel kayma direncine eşit olan heyelanlar.
- Ataletsel şev stabilite analizlerinin pek çok farklı tipi bulunmaktadır; bu analizler arasında en çok kullanılanlar: a) psödo – statik yaklaşım, b) Newmark (1965) yöntemleridir.

Ataletsel şev stabilite analizinde dikkat edilmesi gereken uygulama alanları ve ortam koşulları söz konusudur.

#### a) Yüksek Şevler:

- Yöntem, yüksek şevlerin stabilitesini değerlendirirken kullanılabilir. Ancak büyük deformasyon riskini değerlendirmek için daha karmaşık yöntemlere ihtiyaç duyulabilir.

#### b) Sığ Yeraltı Suyu Seviyesi:

- Yeraltı su seviyesi yüksek olan zeminlerde boşluk suyu basıncı artışını göz ardı ettiği için atalet temelli analiz eksik sonuçlar verebilir.

#### c) Homojen Zeminler:

- Farklı tabaka özelliklerine sahip heterojen zeminlerde kayma yüzeyi farklı davranışlar gösterebilir. Atalet temelli analiz, genellikle homojen zeminler için daha uygundur.

#### d) Düşük İvme Bölgeleri:

- Deprem ivmesinin düşük olduğu bölgelerde kullanılabilir. Yüksek ivmeli bölgelerde dinamik analizler tercih edilir.

### 2.1.1. Psödo – Statik Analiz

Psödo-statik analiz, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde yaygın ve eskiden beri kullanılan basitleştirilmiş bir yöntemdir. Bu analiz, zemin üzerinde uygulanan dinamik yüklerin etkisini, statik bir kuvvet olarak ele alır

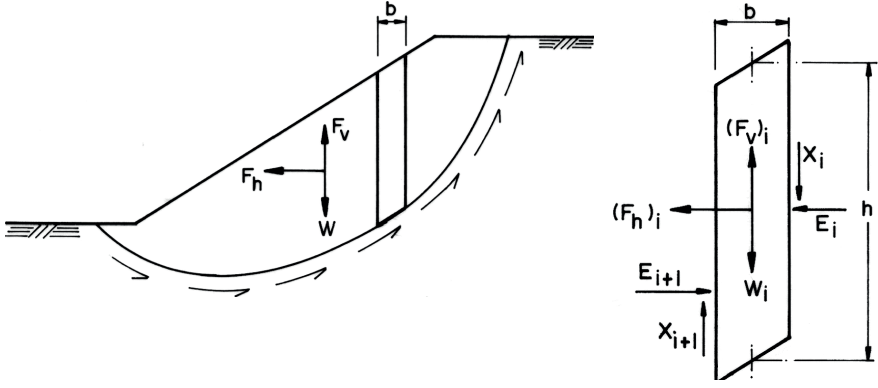
ve özellikle deprem gibi sismik yüklerin etkisini hesaplamak için kullanılır. Psödo-statik analiz, sıvılaşma gibi zemin zayıflama mekanizmalarını dikkate alarak, şevde meydana gelebilecek deformasyonları ve potansiyel kaymaları tahmin eder. Bu yaklaşım, genellikle daha karmaşık dinamik analizlerin yerine, pratik ve hızlı çözüm elde etmek amacıyla tercih edilir. Kayan şevin ağırlık merkezine etkileyen ve şev ağırlığı ile doğrudan ilişkili olan psödo – statik kuvvetlerin büyüklükleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (1)$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (2)$$

- Burada  $a_h$  ve  $a_v$ , yatay ve düşey yönlerdeki psödo – statik deprem ivmesi değerleri ( $m/sn^2$ ).
- $k_h$  ve  $k_v$  ise kayan şev kütesine etkileyen ve deprem sebebiyle oluşan ivmelerin simüle edilmesini sağlayan boyutsuz sismik yük katsayılarıdır ve analizlere dahil edilirler. Yatay bileşen şevin kaymaya eğilimli hale gelmesinde daha baskın etkindir. Düşey bileşenin etkisi daha az olmakla birlikte, şev içindeki gerilme dağılımlarını etkileyerek kayma direncini artırabilir veya azaltabilir.
- $W$  ise kayan zemin kütesinin ağırlığıdır.
- Psödo – Statik ivmelerin büyüklükleri bölgede oluşabilecek sismik aktivitenin karakteristikleri ile ilişkili olmalıdır. Sismik hareket, kayan bir şeve hem düşey yönde hem de yatay yönde Psödo – Statik kuvvetler uygulamaktadır.
- Psödo – Statik analizde düşey yöndeki hareketin şev stabilitesi üstündeki etkisi yatay yöndeki kuvvetlere göre çok az olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir.
- Sismik aktivitelerde genellikle yatay ivme değerleri düşey ivme değerlerinden de büyüktür dolayısıyla  $k_v$ ,  $k_h$  'dan daha küçüktür.

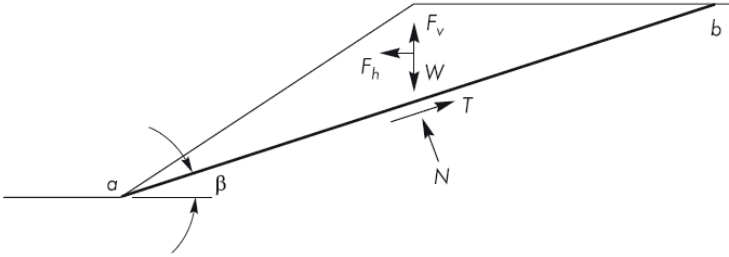
Psödo – Statik yaklaşımda boyutsuz sismik yük katsayılarının belirlenmesiyle şev stabilitesi için kullanılan bütün limit denge yöntemlerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir ve bu da yöntemi oldukça esnek hale getirmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Psödo - Statik yaklaşımın limit denge yöntemlerine entegre edilmesi

Kayma ihtimali yüksek şevin kütesine etkileyen kuvvetleri (Şekil 2) kayma yüzeyine paralel yönde bileşenlerine ayırılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$F = \frac{c \cdot l_{ab} [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta} \quad (3)$$



Şekil 2. Psödo-statik şev stabilite analizinde düzlemsel yenilme yüzeyinin üzerindeki üçgen zemin kaması üzerine etkileyen kuvvetler (Kramer, 1996).

Yatay psödo - statik kuvvet formülünden de anlaşılacağı üzere emniyet katsayısını azaltmaktadır.  $\phi > 0$  durumunda kaydırmaya direnen kuvvetleri azaltırken kaydıran kuvveti arttırmaktadır. Gerek kaydıran kuvvetleri gerekse kaydırmaya direnen kuvvetleri azalttığı için (duruma ve yöne bağlı olarak yükseltebildiği için) dikey psödo - statik kuvvetin kayma emniyet faktörüne etkisi azdır.

### 2.1.1.1. $k_h$ Değerinin Seçilmesi

Yatay Sismik Katsayısı ( $k_h$ ) seçimi, şev stabilite analizi sırasında önemli bir adımdır ve birçok faktöre bağlıdır. Şevi oluşturan zeminin rijit olması durumunda, kayma ihtimali yüksek şev kütleline etkiyen atalet kuvveti, deprem nedeniyle oluşan yatay ivmenin ( $a_{\max}$ ), stabilitesi düşük zeminin kütlesi ile çarpımına eşit olur. Deprem sırasında oluşan bu ivme en büyük değerine eriştiğinde ilgili atalet kuvveti de en büyük değerini alır. Buna karşın doğada karşılaşılan şevlerin rijit bir yapıya sahip olmadığı ve deprem nedeniyle oluşan en büyük ivmenin etkin olduğu sürenin çok kısa olduğu bilindiği için, hesaplamalarda kullanılan psödo – statik katsayılar genellikle  $a_{\max}$ 'ın çok altında değerler olacaktır (Kramer, 1996). Katsayının doğru belirlenmesi için dikkate alınması gereken aşamalar ve etkileyen faktörler şunlardır:

#### a) Deprem Tehlikesi Değerlendirmesi:

- Bölgenin deprem riskine göre belirlenir.
- PGA (Peak Ground Acceleration), yani maksimum yer ivmesi, seçim için temel parametredir.
- Yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde  $k_h$  değeri daha yüksek alınır.
- Maksimum  $k_h$  değeri  $a_{\max}/g$  değerinden yüksek değildir.

#### b) Bölgesel Sismik Haritaların Kullanımı:

- Yerel ve uluslararası sismik tehlike haritaları incelenir. Haritalar, tasarım ivmeleri hakkında yol gösterir.

#### c) Deprem İvmesiyle İlişkilendirme:

- $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$  veya  $0.3 \times \text{PGA}$  bağıntısı yaygın olarak kullanılır.
- Depremin şiddetine ve yatay ivme etkisine göre  $k_h$  değeri hesaplanır.

#### d) Zemin Koşullarının Belirlenmesi:

- Zemin türü ve özellikleri  $k_h$  seçiminde etkilidir.
- Kaya zeminlerde daha düşük katsayılar tercih edilirken ( $\approx 0.05 - 0.1$ ), depremin etkilerini büyüten yumuşak ve zayıf zeminlerde ( $\approx 0.15 - 0.3$ ) daha yüksek katsayılar kullanılabilir.

#### e) Şevin Geometrisi ve Yüksekliği:

- Yüksek ve dik şevlerde  $k_h$  değeri artırılabilir.
- Düşük ve geniş şevlerde katsayılar daha küçük olabilir.

### f) Kayan Kütlenin Boyutu:

Nispeten düşük bir sismik katsayı değeri şev kütlesi arttıkça tercih edilir. Sismik yükleme sırasında şevin yenilme kütlelerinin büyük olması durumunda bütün şev kütlesi şevin içinden dışa doğru stabiliteyi bozan kuvvete düşük olasılıkla maruz kalacaktır (Day, 2004).

- **Küçük kayma kütlesi:** Yüzeysel stabilite veya küçük kaya düşmeleri gibi analizlerde  $k_h = a_{\max}/g$  formülünden elde edilen değer kullanılabilir.
- **Orta büyüklükte kayma kütlesi:** Orta boyutlu şevlerde  $k_h = 0.65a_{\max}/g$  formülünden elde edilen değer kullanılabilir (Krinitzsky vd., 1993; Taniguchi ve Sasaki 1986).
- **Büyük kayma kütlesi:** Kayan kütlelerin nispeten büyük olduğu yenilme kütleleri için en düşük  $k_h$  değerleri kullanılır (baraj ve dolgu heyelanları vb.). Bu konuda Seed (1979)'nin çalışması:
  - ❖ *6.5 büyüklüğünde depremler üretebilen faylara yakın sahalar için  $k_b = 0.10$ . Kabul edilebilir psödo – statik emniyet faktörü 1.15 veya daha büyük.*
  - ❖ *8.5 büyüklüğünde depremler üretebilen faylara yakın sahalar için  $k_b = 0.15$ . Kabul edilebilir psödo – statik emniyet faktörü 1.15 veya daha büyük.*

### g) Projenin Kritikliği:

- Barajlar, enerji altyapısı gibi kritik yapılar için daha muhafazakâr  $k_h$  değerleri seçilir.
- Daha düşük güvenlik gereksinimi olan projelerde  $k_h$  daha düşük alınabilir.

### h) Analiz Türü ve Hedef Güvenlik Seviyesi:

- Psödo-statik analiz mi yoksa detaylı dinamik analiz mi yapılacağına bağlıdır.
- Dinamik analizlerde katsayılar daha detaylı ayarlanırken, psödo-statik analizde standart aralıklar tercih edilebilir.

### i) Düşey Sismik Katsayının Etkisi ( $k_v$ ):

- Düşey katsayı ( $k_v$ ) dikkate alınarak  $k_h$  ayarlanabilir.
- Genellikle  $k_v = 0.5 \times k_h$  veya  $0.7 \times k_h$  alınabilğr.

#### j) Ulusal ve Uluslararası Standartlar:

- Seçim, Eurocode 8 veya yerel mühendislik standartlarına uygun olarak yapılmalıdır. Birçok standart  $k_h$  değerinin 0.15'ten küçük alınmaması gerektiğini ifade eder.

#### k) Tasarımcı ve Uzman Görüşü:

- Projenin özel durumları ve tasarım gereksinimleri doğrultusunda mühendislik kararıyla  $k_h$  değerinde revizyon yapılabilir.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda sunulan  $k_h$  verileri aşağıdaki gibidir.

- Seed (1979), psödo – statik analizlerde  $k_h$  değerinin PGA'nın bir oranı olarak alınmasını önerir. Basit şevler için  $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$ , kritik yapılar için  $k_h = 0.3 \times \text{PGA}$  olarak sınırlandırılabilirliğini ifade eder. Ayrıca; Seed & Martin (1966); Dakoulas & Gazetas (1986) toprak barajlar için  $k_h$  değerinin baraj kayma kütlelerinin boyutuna bağlı olduğunu vurgulamıştır (Day, 2004).
- Kramer (1996), yatay sismik katsayının genellikle PGA'nın %10 ila %30'u arasında seçilmesini önerir. Bu oran, zeminin deformasyon kapasitesine ve yapının önemine göre değişir.
- Terzaghi vd. (1996)  $k_h$  seçiminin, PGA'nın bir kısmı olarak düşünülmesi gerektiğini ve genellikle  $k_h = 0.1 \times \text{PGA}$ 'nın başlangıç noktası olduğunu belirtir. Terzaghi 1950'de büyük yer hareketleri için  $k_h = 0.10$ , yıkıcı sismik yer hareketleri için  $k_h = 0.20$  ve felaket olarak tanımlanabilecek düzeydeki sismik yer hareketleri için  $k_h = 0.50$  değerini önermiştir (Day, 2004).
- Marcuson (1981) barajlar için,  $k_h = 0.33.a_{\max}/g$  ile  $k_h = 0.50.a_{\max}/g$  değerlerini önermiştir. Buna ek olarak barajın şeklinin de sismik yer hareketini büyütüp küçültebileceğini vurgulamış ve önemsenmesi gerektiğini söylemiştir.
- Eurocode 8'de,  $k_h$  değerinin PGA'ya bağlı olarak seçilmesi gerektiği ve genelde  $0.1 - 0.2 \times \text{PGA}$  aralığında olduğu belirtilmiştir (Eurocode 8, 2013)
- Hynes – Griffin ve Franklin (1984) 350'den daha fazla sismik yer hareketlerinin ivme kaydını inceledikleri araştırmalarında toprak barajlarda  $k_h = 0.50.a_{\max}/g$  eşitliğini önermiştir. İlgili katsayının kullanıldığı ve psödo – statik güvenlik katsayısı 1'den büyük bu tip yapılarda sismik yer hareketleri sonucunda oluşabilecek aşırı yer



değiştirmelerin ortaya çıkmayacağını araştırmalarında göstermişlerdir (Day, 2004).

### 2.1.1.2. Psödo – Statik Yaklaşımın Değerlendirilmesi

Psödo-statik analiz, özellikle düşük sismik ivme bölgelerinde ve ilk değerlendirme çalışmaları için faydalı olsa da karmaşık deprem hareketlerini ve uzun süreli deformasyonları modellemek için yetersizdir. Bu nedenle, kritik yapıların tasarımında dinamik analizlerle desteklenmesi gereklidir. Analize yönelik olumlu ve olumsuz sonuçlar aşağıda sıralanmıştır (Kramer, 1996; Terzaghi vd., 1996; Chopra, 2001; Seed & Whitman, 1970).

#### Olumlu yanları;

- Psödo-statik analiz, limit denge yöntemlerine küçük bir modifikasyon ekleyerek gerçekleştirilir. Küçük ölçekli projelerde veya düşük sismik risk taşıyan bölgelerde tercih edilebilir.
- Karmaşık dinamik analizlere ihtiyaç duyulmadan, sismik etkiler bir katsayı ( $k_h$ ) ile ifade edilebilir.
- Analiz, mevcut statik denge denklemlerine sismik kuvvetlerin eklenmesiyle yapılır ve zamandan tasarruf sağlar.
- Sismik etkilerin şev stabilitesine genel etkisi hakkında hızlı bir ilk değerlendirme sunar.
- Geleneksel limit denge yöntemleriyle uyumludur bu yöntemlere hızlıca entegre edilebilir.

#### Olumsuz yanları;

- Deprem hareketlerinin dinamik doğasını (frekans içeriği, süre ve dalga tipi) göz ardı eder. Uzun süreli yer hareketleri veya tekrarlı yüklemeler altında oluşabilecek kalıcı deformasyonları hesaba katmaz.
- Yatay ( $k_h$ ) ve düşey ( $k_v$ ) sismik katsayıların seçiminde standart bir yöntem bulunmaması, analiz sonuçlarını belirsiz hale getirebilir. Benzer projeler için farklı katsayıların kullanılması tutarsız sonuçlara neden olabilir.
- Şevde oluşacak kalıcı deformasyonlar psödo-statik analizle tahmin edilemez. Ürettiği ivme değeri yüksek olan depremler sonrasında şevlerin hareket miktarı tahmin edilemediği için yapısal güvenlik riske atılabilir.
- PGA değeri yüksek olduğu düşünülen bölgelerde psödo – statik analizler genellikle gerçekçi olmayan sonuçlar verir. Dinamik analizler

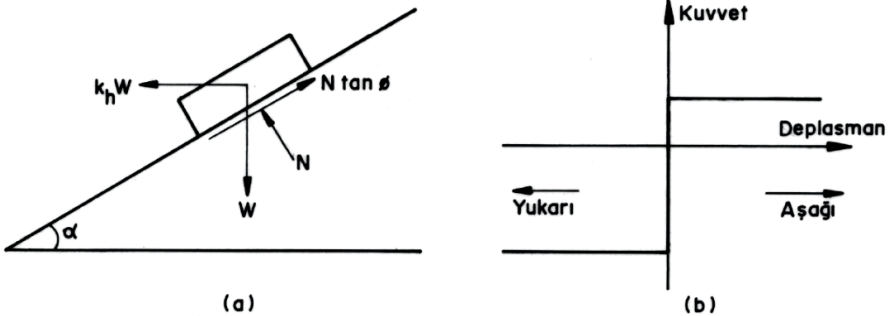
bu durumlarda tercih edilmelidir.  $PGA > 0.3g$  olan bölgelerde, psödo – statik analizlerin emniyet katsayılarını fazla iyimser şekilde hesaplayabileceği bilinmektedir.

- Psödo – statik analiz, yatay ve düşey titreşimlerin yönleri arasındaki etkileşimleri hesaba katmaz. Dik yamacın üzerinde etkili olan düşey ivmenin ( $k_v$ ) zemin mukavemetini artırıcı veya azaltıcı etkisi doğru şekilde modellenemez.

### 2.1.2. Newmark Kayan Blok Analizi

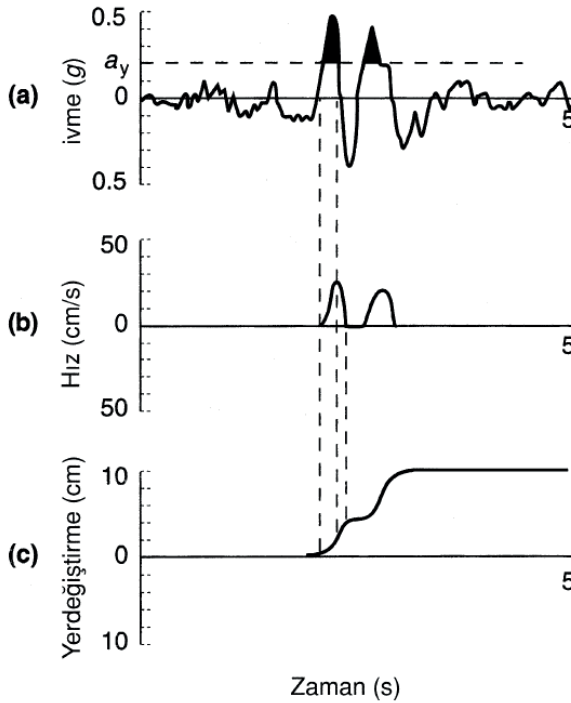
Newmark kayan blok analizi, şev stabilitesi değerlendirmelerinde kullanılan, deprem etkilerinin neden olduğu yamaç kayma potansiyelini tahmin etmeye yönelik bir yöntemdir. Bu analiz, psödo-statik analizden farklı olarak, deprem hareketlerinin dinamik doğasını dikkate alır ve zamanla biriken yer değiştirmeleri hesaplar. Psödo-statik analiz, deprem etkilerini sabit bir yatay sismik kuvvet olarak idealize ederken, Newmark analizi, bu kuvvetlerin zamana bağlı değişimini ve hareket süresince meydana gelen deformasyonları simüle eder. Bu nedenle, Newmark yöntemi, özellikle sismik yükleme altındaki şevlerin gerçekçi bir değerlendirilmesini sağlayarak, kalıcı deformasyonlar ve güvenlik açısından daha ayrıntılı bir öngörü sunar.

Newmark analizi, şevin kritik kayma yüzeyini bir rijit blok olarak modelleyerek (Şekil 3), bu bloğun yerçekimi ve deprem kaynaklı ivmeler altında hareket edip etmeyeceğini ve hareket ederse toplam yer değiştirme miktarını belirler. Newmark, şevlerde meydana gelen deplasmanların, yer hareketinin özelliklerine ve kaymanın başlaması için gereken minimum ivmenin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmesi için gerekli formülleri geliştirmiştir. Dinamik hareket sırasında, ivmenin toplam kayma direncini aşarak kütle üzerinde kayma yaratmasıyla şev kayması başlar ve ivmenin yön değiştirmesiyle durur. Bu süreçte, kaymayı tetikleyecek ivme seviyesinin belirlenmesi ve bu seviyeyi aşan ivmelerin (Şekil 4) iki kez entegrasyonu ile toplam kütle deformasyonu hesaplanabilir.



Şekil 3. Newmark analizinde kayan kütlelerin modellenmesi (Day, 2004)

Şekil 4'te sismik yer hareketi sırasında bir şevin yatay ivmesi görülmektedir. Sıfır çizgisinin altındaki ivmeler, şev içine doğru etki eden, üzerindeki ivmeler ise şev dışına doğru etki eden ivmeler olarak ele alınır. Şevin aşağı yönde hareketine yalnızca dışa doğru ivmeler neden olduğundan, analizde sadece sıfır çizgisinin üzerindeki ivmeler değerlendirilir. Şekilde  $a_y$  ile belirtilen yenilme ivmesi, psödo-statik yöntemle  $\Gamma$ 'e eşit bir emniyet faktörü yaratan yatay deprem ivmesini temsil eder. Bu ivme üzerine çıkan değerler gölgeli olarak gösterilmiştir. Newmark (1965) yöntemine göre, şevin kümülatif yer değiştirmesi, yenilme ivmesini aşan gölgeli ivme alanlarından hesaplanır ve bu artışlı deformasyon yalnızca bu durumlarda gerçekleşir.



Şekil 4. Newmark yöntemini gösteren diyagram. (a) İvme - zaman ilişkisi; (b) ivme palplarının siyah renkle taranmış kısımlarının hız - zaman ilişkisi; (c) hız palplarına karşılık gelen yamaç aşağı deformasyon - zaman ilişkisi (Day, 2004; Wilson ve Kiefer, 1985).

Newmark kayan blok analizinde şev deformasyonları çeşitli faktörlere bağlıdır. İlgili etkiler aşağıda sıralanmıştır.

- **Pik deprem ivmesi ( $a_{max}$ ):** Deprem sırasında zemine uygulanan zamana bağlı en büyük ivme değeri ve profili yer değiştirme üzerinde doğrudan etkili olur. Pik yer ivmesi ve kritik ivme(yenilme ivmesi) arasındaki fark ne kadar büyük ise şev deformasyonları o kadar büyük olacaktır.
- **Kritik (yenilme) ivme ( $a_y$ ):** Blok kaymasını başlatmak için gereken minimum ivme değeri. Daha düşük kritik ivme, daha büyük yer değiştirmelere yol açar.
- **Deprem büyüklüğü ve süresi:** Sismik hareketin süresi uzadıkça ve büyüklüğü arttıkça, toplam yer değiştirme miktarı artar. Şekil 4a'da verilen taralı alan ne kadar büyükse şevin deformasyonları da büyük olacaktır.
- **Sismik ivme profili:** İvmenin genlik, frekans ve dalga formu, yer değiştirme büyüklüğünü etkiler. Ayrıca kritik ivme değerini aşan ivme değerleri ne kadar fazlaysa deprem sırasında şevin deformasyonları yüksek olacaktır.
- **Blok ve zemin özellikleri:**
  - **Zemin kayma direnci:** Zemin sürtünme açısı ve kohezyonu gibi mekanik özellikler yer değiştirme miktarını belirler.
  - **Blok ağırlığı:** Blok kütesinin büyüklüğü, kaymanın başlaması için gereken kuvveti etkiler.
- **Yamaç eğimi:** Şevin geometrik eğimi (yamaç açısı), blok üzerinde etkili olan bileşen kuvvetleri değiştirir.
- **Başlangıç güvenlik faktörü (FS):** Şevin statik analizle belirlenen güvenlik faktörü, sismik yük altında davranışı etkiler. Düşük FS, daha büyük yer değiştirme potansiyeline işaret eder.

Newmark (1965) tarafından önerilen yöntemle ilgili kalınarak çok sayıda farklı eşitlik geliştirilmiştir. Şev deformasyonlarının bağlı olduğu ana etkilerden ikisinin dahil edildiği basit bir eşitlik aşağıdaki gibidir (Day, 2004; Ambraseys ve Menu, 1988):

$$\log d = 0.90 + \left[ \left( 1 - \frac{a_y}{a_{max}} \right)^{2.53} \left( \frac{a_y}{a_{max}} \right)^{-1.09} \right] \quad (4)$$

$d =$  Şev deformasyonu (cm)

$a_y$  = Kritik ivme değeri (psödo – statik emniyet değerinin 1'e eşit olduğu ivme değeri)

$a_{\max}$  = Pik yer ivmesi değeri

Yukarıda verilen deformasyon hesabı psödo – statik emniyet faktörünün 1'den küçük olduğu durumlarda geçerlidir. Dolayısıyla deprem pik ivmesinin kritik ivmeden büyük olduğu durumdur. Ayrıca verilen denklemin kullanılabilmesi ilk adım, psödo – statik emniyet faktörünün belirlenmesidir. Psödo – statik emniyet değerinin 1'den küçük olması koşuluyla, bir sonraki adım, emniyet faktörünün 1'e eşit olana kadar sismik katsayı  $k_h$ 'ı azaltmaktır. Newmark(1965) analizinin çeşitli kısıtlamaları aşağıda belirtilmiştir (Day, 2004).

➤ **Katmanlı ve Karmaşık Zeminler İçin Yetersizlik:**

- Analiz, şevdeki zemin katmanlarının farklı özelliklerini ve içsel karmaşıklıklarını dikkate almaz. Homojen bir kayma yüzeyi varsayar. Kuru ve gevşek dağılımlı kum ve çakıl zeminlerin yenilmesi blok şeklinde değildir. Bu tip zeminlerin psödo – statik emniyet değerleri Newmark(1965)'e göre 1'den büyük çıkmış olsa da hem şev kayması hem de oturmalar meydana gelebilir.

➤ **Dinamik Etkilerin İdealizasyonu:**

- Deprem hareketini sadece kaymaya yol açan ivme bileşeni ( $a_y$ ) ile sınırlandırır. Diğer dinamik etkileri, özellikle titreşim frekansı ve süresini tam olarak dikkate almaz. Uzun süreli sarsıntılarla zemin özelliklerindeki değişim modelleme dışında kalır.

➤ **Yalnızca Rijit Kayma Blokları:**

- Model, rijit bir blok hareketine dayanır ve kayma sırasında zemin deformasyonlarını veya içsel gerilme dağılımlarını dikkate almaz. Yumuşak zeminlerde modelin uygulanması eksik sonuçlara yol açabilir.

➤ **Harekete Başlama Eşiği ( $a_y$ ):**

- Harekete başlama eşiği ( $a_y$ ) belirlenirken mühendislik yaklaşımına ve güvenlik katsayısına göre değişiklik gösterebilir. Bu belirsizlik, analiz sonucunu etkileyebilir.

➤ **Deprem Verilerine Bağımlılık:**

- Analiz, yerel deprem kayıtlarının kullanılmasını gerektirir. Uygun kayıtların olmaması durumunda simülasyonlar yapılması gerekir.

## 2.2. Zayıflayan Şev Stabilite Analizi

Zayıflayan şev stabilite analizi, şevin zamanla veya belirli koşullara bağlı olarak mukavemet kaybetmesini inceleyen bir analiz türüdür. Bu yaklaşım, özellikle zemin veya kaya malzemesinin mekanik dayanımının çevresel etkiler (örneğin, su basıncı, kimyasal ayrışma, sıcaklık değişimi) veya dış kuvvetler (deprem, yükleme, titreşim) nedeniyle azalmasını ele alır. Analiz, malzemenin başlangıç dayanımından son dayanımına kadar geçirdiği değişiklikleri modelleyerek, şevin güvenlik faktörünün nasıl etkileneceğini tahmin etmeyi amaçlar. Bu yöntem, zamana bağlı deformasyonların ve uzun vadeli stabilite sorunlarının anlaşılmasında kritik bir rol oynar (Day, 2004). Zayıflayan şev stabilite analizi akma kaymaları, yanal yayılma ve deformasyon yumuşamalı zeminlerin analizinde kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Akma Kaymaları

Akma kaymaları, zemin kütlelerinin akışkan davranış sergileyerek kayması ile gerçekleşen bir şev duraysızlık türüdür. Bu tür kaymalar genellikle su içeriği yüksek, düşük mukavemetli ve kohezyonu zayıf zeminlerde meydana gelir. Akma kaymalarının genel üç çeşidi bulunmaktadır (Day, 2004). Akma kayma analizi yaklaşık bir yöntemdir. Buradaki en büyük belirsizlik, eğimli yer için sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün belirlenmesinde yatmaktadır.

- a) **Kütle sıvılaşması:** Şevi oluşturan zemin malzemesinin tüm kütlelerinin suya doymun hale gelmesiyle taşıma kapasitesini kaybettiği ve sıvı gibi davrandığı durumdur. Genellikle doymun, düşük geçirgenlikli, gevşek yerleşimli kum ve plastik olmayan siltlerde yüksek sismik yükler veya ani yüklemeler sonucu meydana gelir. Bu tip şevlerin duraysızlık analizindeki ilk adım sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörünün belirlenmesidir (Day, 2004).
- b) **Yerel sıvılaşma:** Sıvılaşma, zeminin belirli bir bölgesinde meydana gelir. Yüzey deformasyonları, yerel oturmalar veya küçük çaplı heyelanlarla kendini gösterebilir. Bu tip şevlerin incelenmesinde ilk adım, tasarım depremde sıvılaşması beklenen zemin alanının belirlenmesidir. Sonrasında bu bölgenin içinde yer alan çeşitli dairesel kayma yüzeyleri kullanarak bir şevin güvenlik analizinin yapılmasıdır. Şevin emniyet faktörünün 1'den küçük olduğu durumlarda sismik yer hareketi sırasında şevde akma kaymasının meydana gelme olasılığı yüksektir (Day, 2004).
- c) **Zemin Tabakaları veya İnce Katmanların Neden Olduğu Heyelan Hareketi:** Zemin içindeki zayıf katmanların, kaymaya karşı direncin azaldığı kayma yüzeyleri oluşturması sonucu oluşur. Bu tür

kaymalar genellikle şevlerin derinliklerinde bulunan gevşek yerleşimli ve suya doygun ince kum veya plastik olmayan silt tabakalarının drenajsız koşullar altında davranışından kaynaklanır ve şevin genel stabilitesini tehlikeye atar. Sıvılaşma kaynaklı heyelan hareketlerinin değerlendirilmesi, özellikle ince zemin tabakalarının tespit zorluğu nedeniyle tasarım koşullarında karmaşık bir süreçtir. Potansiyel sıvılaşabilir katmanlar genellikle çok incedir ve saha etütlerinde fark edilmesi güç olabilir. Şev stabilite analizleri, bu katmanların yer aldığı kayma yüzeylerini dikkate almalı ve genellikle dairesel kayma yerine blok tipi yenilme modelleri kullanılarak yapılır. Bu yaklaşım, sıvılaşan ince tabakaların etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmek için tercih edilmektedir (Day, 2004).

Şevlerde sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde sıvılaşma analizleri düz yüzeyli sahalar için yapılmaktadır. Şevler gibi eğimli yüzeyler için düz yüzeyli sahalardan elde edilen sıvılaşma emniyet faktörü değerlerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 5’de eğimli yer koşulları için emniyet faktörünü ayarlamak amacıyla kullanılan bir grafik verilmiştir (Kramer, 1996).

$$\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma'_{v0}} \quad (5)$$

$$\tau_{h,statik} =$$

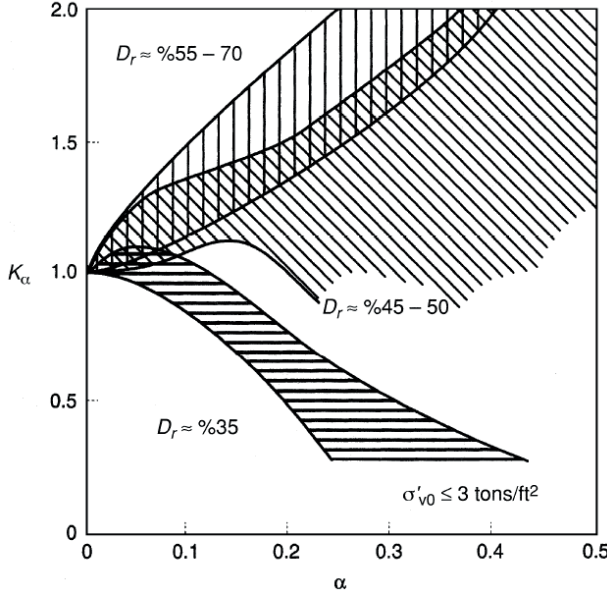
Yatav bir düzlem üzerinde etkiyen statik kayma gerilmesi

$$\sigma'_{v0} = \text{Düşey efektif gerilme}$$

10 yatay :1 düşey bir şevde  $\alpha = 1/10 = 0.10$  olur

Düz arazilerde  $\tau_{h,statik} = 0$  durumu söz konusudur. Üzerinde ağır bir yapı olan düz araziler ile eğimli arazilerde  $\tau_{h,statik}$  değeri 0’dan farklıdır. Dolayısıyla statik kayma gerilmesi varlığı bu tip arazilerdeki gevşek ve doygun zeminleri sıvılaşmaya elverişli hale getirir.  $K_\alpha$  değeri eğimli zemin sahaları için, zeminin sıvılaşma direncindeki artışı (1’den büyük değerler) veya azalmayı (1’den küçük değerler) temsil eder. Eğimli arazilerde sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü belirlenirken  $CRR / CSR$  oranından bulunan güvenlik katsayısı diyagramdan elde edilen  $K_\alpha$  değeri ile çarpılır. Sonuç olarak eğimli bir arazide akma kaymalarının sismik analizinde zemin sıvılaşma direnci(CRR) ve sismik hareketin varlığından dolayı oluşan çevrimli

yükleme(CSR) değerlerinin belirlenmesi ve oranlanması gerekmektedir. Bilindiği üzere  $CSR \leq CRR$  durumunda sıvılaşma riski oldukça düşüktür ya da olmayacaktır. Diyagramda sadece %35'lik bir rölatif yoğunluk için  $K_\alpha$  değer aralıkları verildiğinden, farklı zemin yoğunlukları ve eğimli yer koşulları için  $K_\alpha$  değerinin seçiminde tecrübe ve yargı gereklidir (Day, 2004).



Şekil 5. Eğimli zeminde sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünü ayarlama diyagramı (Day, 2004; Seed ve Harder, 1990; Kramer, 1996).

### 2.2.1.1. CSR'nin Belirlenmesi

Zemin sıvılaşması analizlerinde kritik bir parametredir ve zemine etki eden deprem kaynaklı devirsel kayma gerilmelerinin, zeminin dayanma kapasitesine oranını ifade eder. Farklı depremler için devir sayıları Şekil 6'da verilmiştir. CSR, genellikle aşağıdaki formülle hesaplanır (Day, 2004).

$$CSR = 0.65 r_d \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \quad (6)$$

$a_{max}$  = Deprem pik yer ivmesi

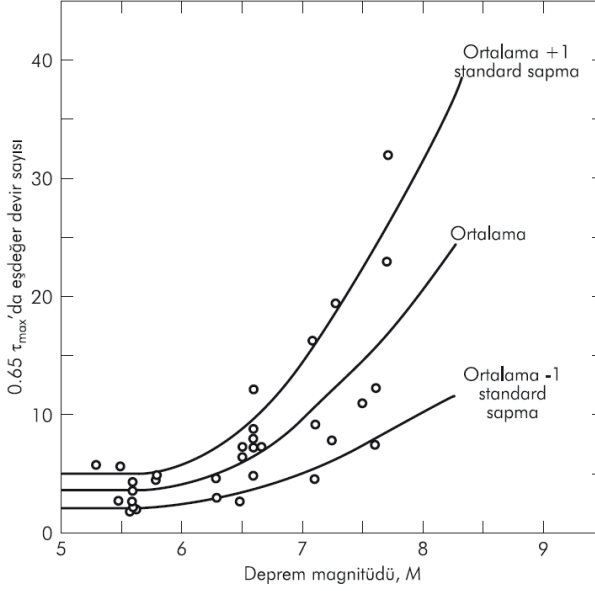
$g$  = Yerçekimi ivmesi



$\sigma_{v0}$  = Sıvılaştırma analizinin yapıldığı belirli bir derinlikteki toplam düşey gerilme

$\sigma'_{v0}$  = Sıvılaştırma analizinin yapıldığı derinlikteki toplam düşey efektif gerilme

$r_d$  = Deprem esnasında zemin kolonu rijit olarak davranmayıp da deforme olduğundan dolayı eklenen derinlik azaltma faktörü (Seed ve Idriss, 1971).

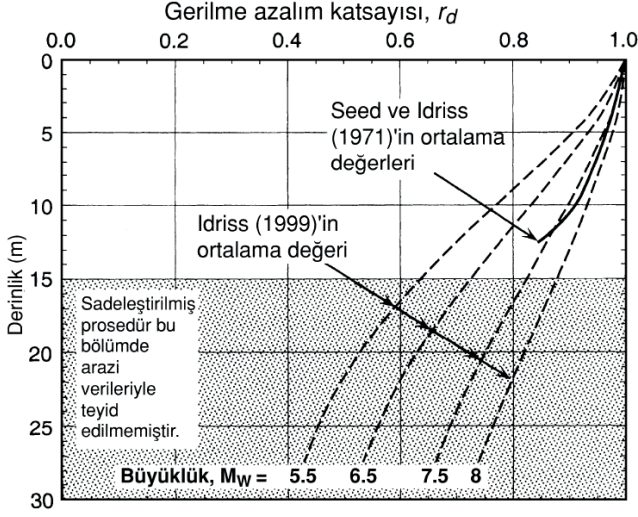


Şekil 6. Farklı büyüklüklerdeki depremler için eşdeğer üniform gerilme devir sayıları, Neq (Seed vd., 1975, Day, 2004).

Derinlik arttıkça, zemin tabakalarında deprem kaynaklı gerilme azalır (Şekil 7). Bu durum, gerilme azaltma faktörüyle ( $r_d$ ) ifade edilir ve yaklaşık olarak yüzeyden derinliğe göre şu bağıntılarla hesaplanabilir (Seed ve Idriss, 1971; Idriss ve Boulanger, 2008)

$$r_d = 1 - 0.015z; \quad z < 9m \quad (7)$$

$$r_d = 1.54 - 0.123z; \quad z > 9m \quad (8)$$



şekil 7. Düz veya hafif eğimli zeminler için derinliğe bağlı gerilme azalım faktörü  
(Andrus ve Stokoe, 2000, Day, 2004)

### 2.2.1.2. CRR'nin Belirlenmesi

CRR, bir zemin tabakasının sıvılaşmayı önleyecek şekilde döngüsel kayma gerilmelerine zeminin dayanma kapasitesidir. Basitleştirilmiş sıvılaşma analizinde, CRR değeri zeminin kritik dayanım kapasitesini belirler ve CSR (Cyclic Stress Ratio) ile karşılaştırılarak sıvılaşma potansiyeli hesaplanır. CRR genellikle deneysel veya ampirik yöntemlerle belirlenir.

#### a) SPT (Standard Penetration Test) Tabanlı Yöntemler:

- o Youd ve Idriss (2001) alışmasında, standart penetrasyon testinden elde edilen  $N_{60}$  değerine bağlı olarak CRR aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - \frac{N_{60}}{1.2}} \quad (9)$$

- o SPT( $N_{60}$ ) değerine bağlı olarak değerlendirme yapıldığında, 0 – 20 değerleri arasında yüksek hasarlar, 20 – 30 arasında orta ve 30 değeri üstündeki SPT değerlerinde önemsiz hasarlar ile karşılaşılma ihtimali söz konusudur.

**b) CPT (Cone Penetration Test) Tabanlı Yöntemler:**

- Idriss ve Boulanger (2008) tarafından önerilen yöntem, zemin sıvılaşma potansiyelini konik penetrasyon testinden ( $q_c$ ) elde edilen uç direnç ile ilişkilendirir (a ve b deneysel katsayılar).

$$CRR_{7,5} = a \cdot \log_{10}(q_c) + b \quad (10)$$

**c) Deneysel Yöntemler:**

- Zemin örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri doğrudan CRR değerini verir.

**d) Ampirik Diyagramlar:**

- CRR, genellikle SPT, CPT veya  $V_s$  (Shear Wave Velocity) gibi saha verilerine bağlı olarak literatürde sunulan ampirik diyagramlarla tahmin edilir.
  - Youd et al. (2001) diyagramları.
  - Seed ve Idriss (1971) tablosu.

CRR'nin belirlenmesinde arazi koşullarının ve şevi oluşturan zeminin etkisi büyüktür.

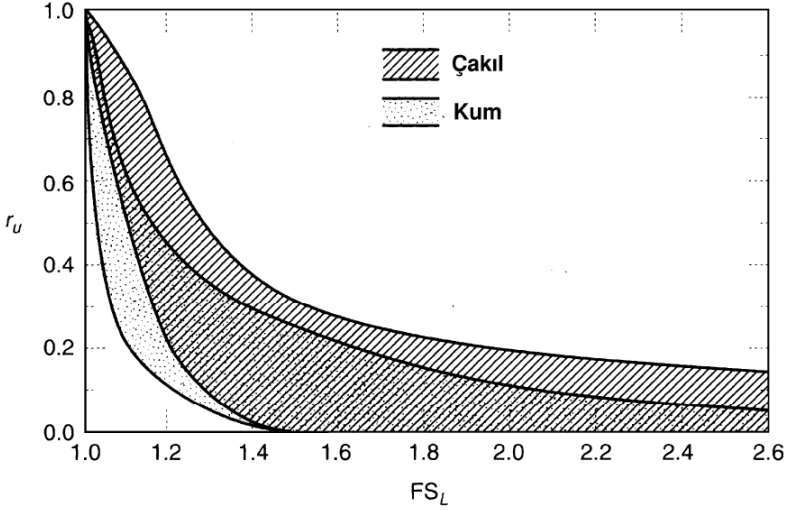
- Kumlu ve gevşek malzemelerde CRR genellikle düşüktür.
- Siltli ve kil içeriği yüksek zeminlerde sıvılaşma riski daha karmaşık olduğundan CRR'nin tespiti daha zordur.
- Yeraltı suyu seviyesi yüksek olan bölgelerde CRR düşer çünkü efektif gerilmeler azalır.
- Daha önce yüksek gerilmeye maruz kalmış (ön konsolide olmuş) zeminlerde CRR daha yüksektir.
- Drenajı kısıtlı veya siltli zeminlerde CRR düşebilir.

Bölgesel sıvılaşma durumları veya zemin tabakalarının ya da ince katmanların sıvılaşması için bir şev stabilite analizi gereklidir. Depremde sıvılaşması beklenen zemin için bir şev stabilite analizi yapmak için iki farklı yaklaşım vardır.

**a) Boşluk suyu basınç oranı = 1.0'i kullanarak**

- Sıvılaşan zeminin boşluk suyu basınç oranının 1.0'e eşit olduğunu varsaymaktır.

- Boşluk suyu basıncı oranı  $r_u = u / (\gamma_t h)$  olarak tanımlanır. Burada  $u$ =boşluk suyu basıncı,  $\gamma_t$  = zeminin toplam birim hacim ağırlığı ve  $h$  = zemin yüzeyinden derinliktir.
- Sıvılaşabilir zeminde boşluk suyu basınç oranı  $r_u = 1$ , sadece kum ve çakıl gibi zeminlerin efektif kohezyonunun ( $c'$ ) sıfır olduğu zaman kullanılmalıdır (Şekil 8).



Şekil 8. Sıvılaşmaya karşı emniyet katsayısı ( $FS_L$ ).  $r_u$  = çakıl ve kum için boşluk suyu basınç oranı (Marcuson ve Hynes, 1990; Kramer, 1996; Day, 2004)

#### b) Sıvılaşabilir zemin için sıfır kayma direnci kullanarak

- Sıvılaşan zeminin kayma direncinin sıfır olduğunu kabul etmektir. Toplam gerilme analizi kullanıldığında, sıvılaşan zemin tabakalarının drenajlı kayma direncinin sıfır olduğu ( $s_u = 0$ ) varsayılır.
- Efektif gerilme analizi kullanıldığında ise, efektif kayma direnci parametrelerinin sıfır olduğu varsayılır ( $c' = 0$ ;  $\varphi' = 0$ ).

#### 2.2.2. Yanal Yayılma

Yanal yayılma, sıvılaşma nedeniyle zemin tabakalarının yatay düzlemde yer değiştirmesiyle oluşan bir deformasyon türüdür. Bu olay genellikle zemin sıvılaşmasının etkili olduğu deprem koşullarında, altta yer alan kumlu ve gevşek malzemelerin kayma dayanımını kaybetmesi sonucu meydana gelir. Yanal hareket, yüzeyde ciddi altyapı hasarlarına neden olabilir.

- Hafif eğimli sahalarda ( $<6^\circ$ ) görülür.

- Akarsular, nehir kenarları ve deniz kıyısı gibi alanlar ve bu alanlara komşu olan düzlükler yanal yayılmaya yatkındır.
- Yeraltı su seviyesi yüksek olan bölgelerde, doymuş kumlu tabakaların sıvılaşmasıyla tetiklenir.
- Çoğunlukla gevşek kumlar, plastik olmayan silt içeren kumlar ve gevşek zemin tabakalarında oluşur.
- Köprü ayakları, yollar ve boru hatları gibi mühendislik yapılarının çevresinde hasara neden olabilir.
- Yanal yer değiştirme genellikle metreler düzeyindedir ve deformasyonun büyüklüğü sıvılaşmış tabakanın kalınlığına, zeminin eğimine ve deprem ivmesine bağlıdır.
- Sıvılaşan tabaka kayma dayanımını kaybederek üstteki zemin kütlelerinin yatay hareketine yol açar.
- Depremin ivmesi ve süresi, yanal yayılmanın büyüklüğünü ve hızını belirleyen kritik faktörlerdir.

### 2.2.2.1. Ampirik Yöntemler

Bartlett ve Youd (1992) Modeli, sıvılaşma sonrası serbest yüzeye doğru yanal yayılma ve hafif eğimli şevin yanal yayılımı tahmini için geliştirilmiş bir empirik modeldir. Model, yanal yer değiştirme miktarını ( $D$ ) tahmin etmek için zemin özellikleri, serbest yüzeye uzaklık, sıvılaşma koşulları ve deprem parametreleri gibi faktörlere dayanır (Day, 2004).

a) Serbest yüzeye doğru yanal yayılma

$$\log D_H = -16.36 + 1.178M - 0.927 \log R - 0.013R + 0.657 \log W + 0.348 \log T + 4.527 \log(100 - F) - 0.922D_{50} \quad (11)$$

b) Hafif eğimli yanal yayılma

$\log_{DH} = -15.787 + 1.178M - 0.927 \log R - 0.013R + 0.429 \log S + 0.348 \log T + 4.527 \log(100 - F) - 0.922D_{50}$	(11)
--	------

$D_H$  = Yatay deformasyon (yanal yayılma) (m)

$M$  = Tasarımda kullanılan depremin büyüklüğü

$R$  = Serbest yüzeye olan mesafe veya tasarım depremin fay yırılmasına en yakın mesafe (km)

$W$  = Serbest yüz oranı (%);  $100H/L$  ( $H$  = serbest yüzün yüksekliği;  $L$  = serbest yüzün tabanından sahaya kadarki yatay mesafe)

$T = (N_v)_{60} < 15$  olan sıvılaştan kum tabakalarının artan kalınlığı ( $m$ ). Genellikle bu tabakanın deprem sırasında sıvılaşması beklenir. Verilen denklemler şev eğiminin ( $< 6^\circ$ ) olduğu sahalarda (eşit veya küçük) geçerlidir ve dolayısıyla  $K_\alpha = 1$  alınır.

$F =$  Sıvılaştan tabakayı oluşturan ( $T$ ) ince dane içeriği (%).

$D_{50} =$  Sıvılaştan tabakayı ( $T$ ) oluşturan zeminin ortalama dane boyutu ( $mm$ )

$S =$  Şev eğimi (%)

- Serbest yüzeye daha yakın olan bölgelerde  $R$  küçük olduğundan yanal yer değiştirme miktarı artar.
- Moment büyüklüğü  $M$  arttıkça sıvılaşma ve deformasyon potansiyeli de artar.
- Eğimli yüzeylerde ( $S$ ) yanal hareket genellikle daha büyüktür.
- Sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde ( $T$ ) ve yer altı suyunun yüzeye yakın olduğu sahalarda yanal yer değiştirme artar.

Bartlett ve Youd (1992) Modeli, belirli koşullarda geçerli olan ampirik bir model olduğu için çeşitli sınırlamaları ve kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar modelin geliştirilme aşamasındaki veri setine ve varsayımlarına dayanmaktadır.

- Deprem büyüklüğü  $M = 6.4 - 8.5$  arasında olmalıdır. Model, 6.4'ten küçük depremler için yeterli veri içermediği için güvenilir değildir. Büyüklüğü ilgili değerden düşük depremler için farklı modeller kullanılmalıdır.
- Model, sıvılaşma tabakasının zemin yüzeyinden itibaren maksimum derinliğini 10 metre olarak kabul eder. Daha derin sıvılaşma tabakaları için modelin tahmin doğruluğu azalabilir.
- Yanal yayılmanın tahmin edilebilmesi için zemin eğiminin  $0.1^\circ$  ile  $6^\circ$  arasında olması gereklidir. Daha dik eğimler için model kullanılmaz; çünkü bu durumlarda kayma mekaniği farklı bir yapıya sahiptir.
- Serbest yüzeye olan uzaklık ( $R$ ) parametresi için model, genellikle 0 ile 1000 metre arasında geçerlidir. Daha uzak mesafelerde yanal yayılmanın etkisi minimal olduğundan model güvenilirliğini kaybedebilir.
- Modelin güvenilirliği  $PGA = 0.05g - 0.5g$  arasında olan yer hareketleri için test edilmiştir. Daha yüksek ivmeli depremler için tahmin doğruluğu azalabilir.

- Model, genellikle kumlu ve gevşek zeminler için geliştirilmiştir. Kil, silt veya yüksek plastisiteli zeminlerde sıvılaşma davranışı farklı olduğundan, model bu zeminlerde uygulanamaz. Ayrıca verilen eşitlikler, sıvılaşan çakılların yanal yayılım davranışı kumlardan farklı olduğundan dolayı deformasyonu gerçek değerlerden fazla vermektedir. İnce dane içeriği:  $F \leq \%50$ ; Ortalama dane boyutu:  $D_{50} \leq 1 \text{ mm}$ ;  $(N1)_{60} < 15$  olan katmanın kalınlığı:  $1 \text{ m} \leq T \leq 15 \text{ m}$

### 3. Sonuçlar ve Özet

Deprem sırasında zemin sıvılaşması, şev stabilitesini önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktördür. Sıvılaşma, yalnızca akma yenilmelerine veya yanal yayılmaya neden olmakla kalmaz, aynı zamanda emniyet faktörünün ( $FS_L$ ) 1'den büyük olduğu durumlarda bile zemin zayıflaması ve şev deformasyonlarına yol açabilir. Bu nedenle, sıvılaşma etkilerini anlamak ve zeminlerin davranışını doğru analiz etmek, şev stabilitesi değerlendirmelerinde hayati öneme sahiptir. Aşağıdaki özet, sıvılaşmaya bağlı emniyet faktörüne ( $FS_L$ ) bağlı analiz yöntemlerini ve şev deformasyonu türlerini teknik bir çerçevede ele almaktadır.

#### ➤ Zemin Sıvılaşmasının Sonuçları:

- Sıvılaşma, akma yenilmelerine veya yanal yayılmaya neden olabilir.
- Hatta sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü ( $FS_L$ ) 1'den büyük olsa bile, zemin zayıflaması ve şev deformasyonu gözlenebilir.

#### ➤ Sıvılaşmaya Karşı Emniyet Faktörüne ( $FS_L$ ) Dayalı Durumlar:

- $FS_L \leq 1.0$ :
  - Tasarım depreminde zeminin sıvılaşması beklenir.
  - Bu durumda, akma kayması ve/veya yanal yayılma analizleri gereklidir.
- $FS_L > 2.0$ :
  - Sıvılaşma riski ihmal edilebilir düzeydedir.
  - Zemin depremle zayıflamayacağı varsayılır ve ataletsel şev stabilite analizleri yapılabilir.
- $1.0 < FS_L \leq 2.0$ :
  - Sıvılaşma beklenmez, ancak boşluk suyu basıncı artışı zemin zayıflamasına yol açabilir.

- Boşluk suyu basıncı oranını belirlemek için grafikler kullanılabilir ve ardından efektif gerilme şev stabilite analizi yapılabilir.
  - Şev stabilite analizi sonuçlarına göre, 1'den küçük bir emniyet faktörü, şev yenilmesi olasılığını gösterir; 1'den büyük bir emniyet faktörü olsa bile önemli deformasyonlar meydana gelebilir.
- Şev Deformasyonu Türleri:
- Boşluk Suyu Basıncı Sönümlemesi ile Deformasyon:
    - Deprem sonrası boşluk suyu basıncının azalması ve zeminin sıkışması sırasında oluşur.
  - Ataletsel Kuvvetlerden Kaynaklanan Deformasyon:
    - Deprem sırasında kaydırıcı kuvvetlerin tutucu kuvvetleri aşması nedeniyle meydana gelir.
    - Her bir deprem çevriminde şev kademeli ve artışlı yanal harekete uğrar.
- Yanal Deformasyon Tahmini:
- Şev stabilitesi analizinde emniyet faktörü 1'in biraz üzerindeyse, şevin yanal deformasyonu yanal yayılma modelleriyle tahmin edilebilir.



## Referanslar

- Ambraseys, N. N., Menu, J. M. (1988). "Earthquake-Induced Ground Displacements", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 16, pp. 985-1006.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H. (2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear Wave Velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 11, pp. 1015-1025.
- Bartlett, S.F., Youd, T.L. (1992). "Empirical analysis of horizontal ground displacement caused by liquefaction-induced lateral spreading", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 8, pp. 1175-1194.
- Chopra, A.K. (2001). "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- Dakoulas, P., Gazetas, G. (1986). "Seismic Shear Strains and Seismic Coefficients in Dams and Embankments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 75-83.
- Day, R.W. (2004). "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook", Springer, New York.
- Duncan, J. M., Chang, C. Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.
- Eurocode 8 (2005). "Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 5 (EN 1998-5)", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- Hynes-Griffin, M. E., Franklin, A.G. (1984). "Rationalizing the seismic coefficient method", *Miscellaneous Paper GL-84-13, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi*.
- Idriss, I. M., Boulanger, R.W. (2008). "Soil Liquefaction During Earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Monograph MNO-12*.
- Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, K. Kayabalı çevirisi(2003).
- Krinitzsky, E. L., Gould, J. P., Edinger, P. H. (1993). "Fundamentals of Earthquake-Resistant Construction". Wiley, New York.
- Marcuson, W. F. (1981). "Moderator's Report for Session on Earth Dams and Stability of Slopes under Dynamic Loads", *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol. 3*.
- Newmark, N. M. (1965) "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160*.

- Seed, H. B., Martin, G. R. (1966). "The Seismic Coefficient in Earth Dam Design", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 92, no. SM3, pp. 25-58.
- Seed H.B., Whitman R.V., (1970). "Design of earth retaining structures for dynamic loads", *Proceedings of the Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, 1970, 103-147, Ithaca, New York.*
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273.*
- Seed, H. B., Mori, K., Chan, C. K. (1975). "Influence of Seismic History on the Liquefaction Characteristics of Sands", Report EERC 75-25. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B. (1979). "Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth and Rockfill Dams", *Geotechnique, Vol. 29(3), pp. 215-263.*
- Seed, R. B., Harder, L. F. (1990). "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength", in J.M. Duncan ed., *Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, Vol. 2, pp. 351-376.*
- Taniguchi, E., Sasaki, Y. (1986). "Back Analysis of Landslide due to Nagano-ken Seibu Earthquake of September 14, 1984", *Proceedings, XI ISSMFE Conference, Session 7B, San Francisco, California. University of Missouri, Rolla.*
- Terzaghi, K. (1950). "Mechanisms of landslides", *Engineering Geology, Geological Society of America, Volume 1, pp. 83-123.*
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996). "Soil Mechanics in Engineering Practice", 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Wilson, R. C., Keefer, D. K. (1985). "Predicting Areal Limits of Earthquake-Induced Landsliding in Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region", J. I. Ziony, ed. Professional Paper 1360. U.S. Geological Survey, Reston, VA, pp. 317-345.
- Youd, T. L., Idriss, I. M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 2nd International Symposium on Liquefaction Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 815-825.*



## Afyonkarahisar-UyduKent Bölgesinde Zemin Büyütme Etkisinin TBDY 2018'e Göre İncelenmesi<sup>1</sup>

Süleyman Gücek<sup>2</sup>

İsmail Zorluer<sup>3</sup>

### Özet

Dinamik yükler altındaki yapılarda hasara neden olan önemli faktörlerden bir tanesi yerel zemin özellikleridir. Taşıma gücü kaybı, zemin büyütme, sıvılaşma, oturma gibi zemin problemlerinin temel nedeni deprem sırasında bu özelliklerinin değişimidir. Özellikle zemin büyütmesi; ana kaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı ve cinsi, zeminin dinamik özellikleri, tabakaların süreksizliği ve bölgenin topoğrafik yapısı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak meydana gelen yapısal hasarların önlenmesi veya olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi için zeminlerin, yerel zemin koşullarına bağlı olarak bu yükler altında nasıl bir davranış sergileyeceğinin araştırılması, sahaya özel dinamik analizler kapsamında zemin büyütme analizlerinin önceden yapılması ve değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisini incelemek amacıyla, Ana kaya mostrasındaki yer hareketi olarak 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun olarak seçilmiş olan 11 farklı deprem verisi kullanılarak bir boyutlu dinamik analizler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle bölgede yapılmış olan 124 farklı sondaj verisi değerlendirilerek yerel zemin özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen yerel zemin özelliklerinin dinamik davranışa etkisini incelemek için bir boyutlu DeepSoil analiz programı kullanılmıştır. Bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler

- 1 Bu bölüm, Doç. Dr. İsmail Zorluer'in danışmanlığında Süleyman GÜCEK tarafından Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde hazırlanan "Arazi Deneçlerine Dayalı Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Analizleri: Afyonkarahisar-UyduKent Yerleşim Alanı Örneği" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.
- 2 Dr. Öğr. Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, sgucek@aku.edu.tr, 0000-0002-4839-1851
- 3 Prof. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, izorluer@aku.edu.tr, 0000-0001-5017-084X

yapılarak her sondaj için farklı büyütme değerleri elde edilmiştir. Bir boyutlu analizlere göre elde edilmiş olan sonuçlar Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanarak haritalandırılmıştır. Doğrusal olmayan analiz yönteminin kullanılması; deprem etkisi altında bina temellerinin tasarımı, yerel zemin sınıflarının tanımlanması ve istinat yapıları ile şevlerin tasarımında kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesindeki maliyeti azaltacağı düşünülmektedir. Deprem hasarlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar kapsamında, şehirleşmenin ve nüfusun çalışma bölgesinde yoğunlaştığı dikkate alınarak Afyonkarahisar UyduKent bölgesi için güvenli yerleşim alanlarının belirlenmesi planlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

İnsan Depremler sırasında oluşan kuvvetli yer hareketinin mühendislik yapılarında meydana getirdiği hasarının büyüklüğünü etkileyen faktörler, deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve üstyapı özellikleridir. Yerel zemin koşulları ve deprem kaynak özellikleri, zemin yüzeyinde oluşan kuvvetli yer hareketinin özelliklerini, bu özelliklerin yerel değişimi ise yapısal hasar dağılımını etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı depreme dayanıklı yapıların tasarımında; deprem kaynak özellikleri, yerel zemin koşulları ve yapıların mühendislik özellikleri birlikte dikkate alınmalıdır (Saita vd. 2012).

Deprem yer hareketi süresince yapıların davranışlarını incelenmesi, depreme dayanıklı yapılar tasarlamak, deprem sırasında zeminlerin nasıl bir davranış sergileyeceğini tahmin edilmesi ve depremin ölümcül sonuçlarını engellemek için birçok mühendislik disiplini ortak çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalarla oluşabilecek depremin parametrelerinin önceden kestirilmesi ve zeminin buna göre davranışının analizi öncelik kazanmaktadır. Deprem ve zemin hareketinin modellenmesi ve buna göre yapı tasarlanması durumunda can ve mal kayıplarının minimum düzeyde tutulması sağlanabilir. Depremler meydana gelmeden önce deprem sonrası yapılacak işlerin ve alınacak önlemlerin planlanması gerekir. Bu planlama çalışmalarının iyi bir şekilde yapılabilmesi için gelecekte ne kadar büyüklükte bir depremin oluşabileceği ve yerleşim merkezlerinin bu depremden nasıl etkilenebileceği sağlıklı bir şekilde analiz edilmelidir (Tunçel vd. 2019).

Deprem hareketi nedeniyle yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelen kayma deformasyonlarının seviyesi, yapılarda oluşan hasar dağılımının sahadaki değişiminde etkili olmaktadır. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında oluşacak kayma birim şekil değiştirmesinin sismik anakayadaki tasarım hareketinin şiddetine bağlı olarak doğru biçimde öngörülebilmesi, zemin yapılarında ve üstyapılarda deprem sırasında oluşacak olumsuz etkileri en aza indirecek mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde önemli katkı sağlayacaktır (Saita vd. 2012).

Tasarım yer hareketi karşısında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma deformasyonu değerlerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi amacıyla, farklı malzeme modellerinin ve hesap yöntemlerinin kullanıldığı bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sayısal dinamik analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bir boyutlu analiz yöntemlerinde, zemin kesitindeki tabakaların dinamik özellikleri, kalınlıkları, sismik anakaya derinliği yeterli olmakta, iki ve üç boyutlu analiz yöntemlerinde ise tabakaların iki veya üç boyutlu geometrisi ve sınır şartlarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca analizlerde kullanılan sismik anakaya hareketinin karakteristiklerinin depremin kaynak özelliklerini doğru biçimde yansıtması gerekmektedir. Kuvvetli yer hareketi sırasında yüzeye yakın zemin tabakalarında meydana gelecek kayma şekil değiştirmesi değerlerinin; basit ve uygulama kolaylığına sahip yöntemlerle yaklaşık olarak elde edilmesi, deprem hareketinin yüzeyde oluşturacağı etkilerin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır (Subaşı vd. 2019).

Son yıllarda hızla artan nüfus ve göç artışı sebebiyle gelişmekte olan ülkelerde yeni yerleşim bölgelerine olan talebin hızla arttığını görmekteyiz. Fakat bu talebi karşılamak için gerekli önlemlerin alınmadığı yerleşim yerlerinin seçilmiş olması bugüne kadar büyük felakete yol açtığı görülmektedir. Özellikle de ülkemizde yaşanmış olan 1999 Marmara depremi, 2011 Van depremi, 2020 İzmir depremi ve son olarak 6 Şubat 2023 depremleri gibi büyük ölçekli depremler maddi zararlara ve kayıplara sebebiyet vermiştir. Deprem sonrası yapılan araştırmalara göre hasarın boyutları üst yapı özelliklerine, bölgedeki sismik aktiviteye ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır (Aydoner ve Maktav 2013). Dünyadaki birçok şehir taşıma gücü düşük olan zeminler üzerine inşa edildiğini görmekteyiz (Değerliyurt 2014). Ülkemiz sismik aktivitesi yüksek bir bölgede olup, depremlerin sebep olduğu dinamik yüklerin oluşturduğu ilave gerilimler, taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde büyük yıkıcı hasarlara neden olmaktadır (Ulusay 2000).

Üst yapıları inşaa ederken yapı yüklerini ve çevresel etkileri dikkate alarak en güvenli şekilde zemine aktaran temel tipinin seçimi için, inşa bölgesindeki zemin davranışlarının ve özelliklerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Kurnaz ve Ramazanoğlu 2014). Gelinek noktada depremlerin neden olduğu hasarlar ve yıkımlar zemin davranışlarının ve özelliklerinin yeterince dikkate alınmadığını göstermektedir. Güvenli yerleşim alanlarının seçilmesi ve bu bölgelerin doğal afetlerden korunması noktasında titiz bir çalışma isteyen zor ve karmaşık bir süreçtir. Zemin mühendis özelliklerinin yanı sıra yerleşim bölgesinin hidrojeolojik ve jeomorfolojik özellikleri de zemin

davranışını olumlu ya da olumsuz etkileyen önemli faktörlerdir (Kavurmacı 2017).

Ulaşım kolaylığından ve ekonomik sebeplerden dolayı Dünyanın birçok yerinde ve ülkemizde yerleşim alanı olarak alüvyon zeminler sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte afetler açısından bakıldığında, Türkiye gibi sismik aktivitesi yüksek bir tektonik kuşakta bulunan ülkelerde, depremlerden en çok etkilenen bölgelerin zeminler üzerindeki yerleşim bölgelerinin olduğu açıkça görülmektedir. Örneğin, onbinlerce insanın yaşamını yitirdiği sırasıyla 1939 Erzincan (Mw: 7.9), 1942 Niksar-Erbaa (Mw: 7.0), 1976 Çaldıran (Mw: 7.2), 1999 Adapazarı (Mw: 7.4) ve Düzce (Mw: 7.1) depremleri gösterilebilir (Akın vd. 2013). Mikrobölgeleme çalışması için haritalar oluştururken, doğal afetlerin ve çevresel etkilerin dikkate alınarak değerlendirme yapılması bunun yanı sıra mikrobölgeleme çalışmalarının disiplinler arası koordinasyonu önem arz etmektedir. Bu etkenlerin de ötesinde, geoteknik ve jeolojik araştırmalara başvurularak bölgedeki zeminlerin sismik hareketine bağlı olarak davranışlarının mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Kısacası, geoteknik ve jeolojik veriler dikkate alınarak doğal afetlerin tespit edilmesi, kontrolünün sağlanması veya oluşabilecek tehlikelerin önlenmesi de mikrobölgeleme çalışmaları açısından çok önemlidir (Akın vd. 2015).

Afyonkarahisar'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre yüksek riskli bölgede olması, zemin dağılımının genel olarak siltli, killi ve kumlu zeminlerden oluşması, yer altı su seviyesinin genel olarak yüksek olması gibi nedenlerden dolayı, deprem anında meydana gelen sıvılaşma ve zemin büyütme, Afyon için önemli bir risk faktörü olarak görülmektedir (Bayrakçı vd. 2013). Deprem esnasında meydana gelen sismik tehlikelerin en önemli sonuçlarından biri zemin büyütmedir. Deprem esnasında ana kayadan yayılan dalgalar geçtikleri zemin tabakalarının mekanik özelliklerinden etkilenirler. Farklı zemin tabakaları deprem dalgalarını bir sonraki tabakaya aktarırken yatay ve düşey yöndeki deplasman genliklerini değiştirirler. Düşük değere sahip anakaya ivmeleri, yerel zemin koşullarının etkisi ile ivmenin bazı bölgelerde birkaç kat büyüyerek yüzeye çıkması sonucu ağır hasarlara neden olabilmektedir (Kramer 1996). Sismik tehlikeden kaynaklı bu olaya zemin büyütmesi adı verilmektedir (Özyağcıoğlu vd. 2019). Depremler sırasında oluşan ve her yöne hareket eden cisim dalgaları, tabaka sınırlarında gelme açısından daha küçük bir açıya kırılarak (dalga yayılma hızı yüzeye yaklaştıkça genel olarak küçüldüğü için) ilerlemekte ve zemin yüzeyine ulaştıklarında ise, yayılma doğrultuları hemen hemen yüzeye dik duruma gelmektedir. Bu nedenle incelenen bir bölgede yerel koşullara bağlı olarak deprem dalgalarının özelliklerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde en basit yaklaşım,

düşey yönde ilerleyen kayma dalgası yayılımına dayanan bir boyutlu dinamik analizdir. Bu yöntemde ana kaya ve ana kaya üzerindeki bütün zemin tabakalarının yatay yönde sonsuza uzandığı kabul edilmekte ve her tabakaya ait transfer fonksiyonu belirlenerek yüzeydeki hareketin genliği dolayısıyla zemin büyütmesi hesaplanmaktadır (Kramer 1996, Özkan 2017).

Anakayadan gelen depremin zemin tabakası tarafından ne kadar büyütüleceğini tahmin etmek için ise dinamik büyütme faktörü (DBF) gerekli bir parametredir. Dinamik büyütme faktörü değerleri ölçü alınan yere göre ve meydana gelebilecek deprem özelliklerine göre değişim gösterebilir, yani sabit değil değişken (dinamik) bir parametredir (Özdağ vd. 2015). Zemin büyütme parametresi, hesaplanan zemin yüzeyi PSA (g) değerlerinin, temel kaya mostrasındaki harekete ait PSA (g) değerlerine bölünmesi yoluyla elde edilmektedir (Özyağcıoğlu vd. 2019). Büyütme temel kaya üzerinde yer alan üst zemin katmanları içerisinde gerçekleşir, bu nedenle Afyonkarahisar gibi alüvyon birikintinin 100 metreyi bulduğu bir jeolojik profilde (DSİ sondajlarına göre), zemin yapısının makul bir derinliğe kadar bilinmesi, büyütme analizleri açısından önemlidir.

Bu çalışmada inceleme sahasında yapmış olduğumuz zemin sondaj verileri, daha önce yapılan zemin etüdü sondajı verileri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında yapılmış olan deney sonuçları ve daha önceden yaptırılmış olan laboratuvar deneyi sonuçları birlikte değerlendirilerek; bu veriler çerçevesinde çalışma alanının zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri üzerinde de elde edilen tüm verilerle birlikte yönetmeliğe uygun olarak seçilen ve çalışma alanına göre ivmesi ölçeklendirilmiş olan 11 farklı anakaya mostrası ivme zaman geçmişi kullanılarak, bir boyutlu (1D) eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sahaya özel dinamik analizleri yapılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada Afyonkarahisar Uydükent bölgesi çalışma alanının arazi deneylerine dayalı olarak zemin dinamik davranışı değerlendirilmiştir. Çalışma alanının zemin büyütme analizleri için bir boyutlu DeepSoil programı kullanılmıştır. Analizler; arazi deneylerinden elde edilen veriler ile laboratuvar çalışmaları birlikte kullanılarak yapılmıştır.

### 2.1. Saha Çalışmaları

Çalışma alanında bugüne kadar yapılmış olan sismik tehlike ve zemin davranışı analizleri ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Arazi deneyleri kapsamında bölgede yaptırmış olduğumuz sondajlar ve özel firmalardan

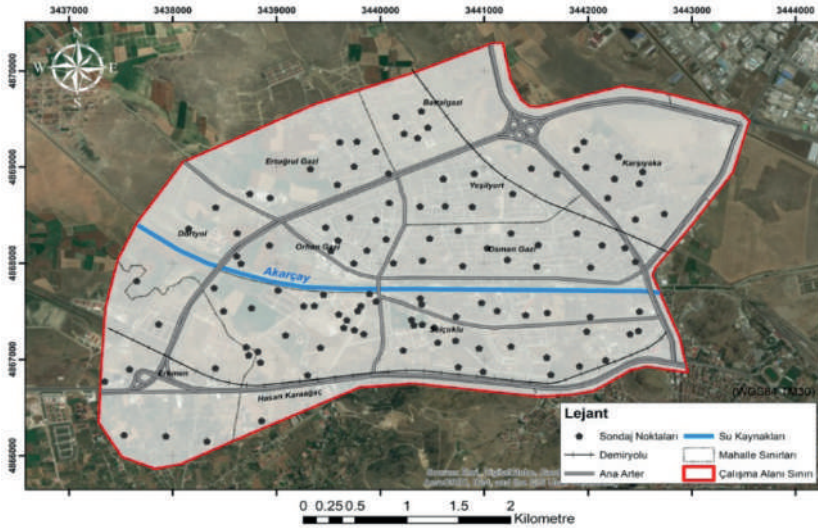


alınmış uygun olan sondaj raporları dikkate alınarak çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda çalışma alanı için, derinliği 15-30 m arasında olan toplamda 124 adet sondaj kuyusu dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Sondajlar, Standart Penetrasyon Testlerinin (SPT), ASTM D 1586-99 standardına göre her 1,5 m'de bir yapılmış ve çalışma alanının ortalama yeraltı su seviyesi ise 3-6 m arası olarak tespit edilmiştir. Sondaj kuyuları tek tek kayda alınarak gerekli hesaplamalar sonucunda kayıtlar oluşturulmuştur. Çalışma alanının için kullanılan tüm sondaj kuyularının standart penetrasyon deneyine ait genel sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma alanına ait standart penetrasyon deneyi genel  $N_{30}$  değerleri.

Zemin Tabakaları (m)	$N_{30}$			Standart Sapma
	Minimum	Maksimum	Ortalama	
Kil Tabakası (0-7.5m)	9	20	15	5.5
Kum Tabakası (7.50-18.00m)	16	24	20	5.6
Kil Tabakası (18.00-19.95m)	11	19	15	5.6

Çalışma alanında analizler için kullanılmış olan toplam 124 adet sondaj kuyusu koordinatlarını gösteren bölgenin haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanındaki sondaj kuyularının genel dağılımı.

## 2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Afyonkarahisar merkezinde bulunan Uydukent bölgesinin geoteknik özellikleri, sahada yapılmış olan sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deney sonuçlarına göre çalışma alanının CH-CL zemin tabakaları için ince oranı %61,36-97,96 arasında, iri oranı %11,78-33,36 arasında, likit limit değeri %26,00-72,50 arasında, plastik limit değeri %12,00-34,60 arasında, su muhtevası değeri %6,58-34,20 arasında, birim ağırlık değeri ise 15,27-19,93 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. SM-SC zemin tabakası için ince oranı %4,95-31,15 arasında, iri oranı %58,42-95,81 arasında, likit limit değeri %0,00-36,47 arasında, plastik limit değeri %0,00-23,70 arasında, su muhtevası değeri %19,60-40,43 arasında, birim ağırlık değeri ise 16,89-18,56 kN/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Çalışma alanında Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılmış olan 5 adet derin su sondajları birlikte değerlendirilerek Şekil 3.2'de bir zemin profili verilmiştir. 100 m derinliğindeki sondajların zemin tabakaları görüldüğü üzere az çakıllı, kum, kumlu siltli kil ve killi birimlerden oluştuğu görülmektedir. Genel sondaj profilinde 100 m'den sonra 251 m'ye kadar Traki Andezit gibi sert birimlerin olduğu görülmüştür.

Laboratuvar test sonuçlarına dayalı olarak her bir tabakanın zemin sınıflandırması yapılarak derinliğe bağlı çalışma bölgesinin geoteknik verileri oluşturulmuştur. Çalışma alanı zemin profili 0-7,50 m arası yüksek plastisiteli kil (CH) ve düşük plastisiteli kil (CL), 7,50-18,00 m arası siltli kum (SM) ve killi kum (SC), 18,00-19,95 m arası da yüksek plastisiteli kil (CH) ve düşük plastisiteli kil (CL) formasyonlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Devlet Su İşlerinin bölgede yapmış olduğu derin sondaj laboratuvar sonuçlarına göre 25 m'ye kadar tespit etmiş olduğu genel zemin profili ile çalışma alanında yapılmış olan arazi deneylerine dayalı laboratuvar sonuçlarına göre belirlemiş olduğumuz zemin profilinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

## 2.3. Kayma Dalgası Hızının Belirlenmesi ( $V_s$ )

Kayma dalgası hızının ( $V_s$ ) jeofizik yöntemlerle belirlenmesi esastır. Bununla birlikte, standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi arazi deney sonuçları ve genel kabul gören bağıntılar kullanılarak dolaylı yoldan da hesaplanabilir. Yerel zemin sınıflarının belirlenmesinde kayma dalgası hızı  $V_s$ , SPT darbe sayısı  $N$  ve kohezyonlu zeminler için  $c_u$  değeri kullanılabilir (TBDY 2018). Çalışma alanında yapılmış olan sondaj çalışmalarındaki SPT- $N_{30}$  değerlerine bağlı olarak her bir kuyu tabakasının kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) değerleri belirlenmiştir. Yaygın olarak literatürde

SPT'ye bağlı  $V_s$  arasındaki ilişkiler kullanılmaktadır. Sondaj kuyuları için SPT-N değerlerine bağlı kayma dalgası hızı İyisan (1996) denklemi kullanılmıştır. Tüm bu veriler çerçevesinde standart penetrasyon deneyi sonuçları İyisan (1996) ampirik yöntemi ile birlikte değerlendirilmiştir.

## 2.4. Deprem Kayıtlarının Seçimi

Olası bir depremin mevcut yapı ve bina stoğu üzerinde etkilerinin gerçekleştiği yakın bir biçimde belirlenmesinde zemin yüzeyindeki deprem özelliklerinin ve olası zemin davranışlarının hesaba katılması gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için zemin kesitinde yer alan zemin tabakaları kapsamlı bir şekilde belirlenmeli, incelenen bölgede sismik tehlike analizleri ile uyumlu ivme zaman kayıtları seçilmeli ve dinamik davranış analizleri yapılmalıdır. Anakaya mostrasındaki yer hareketi olarak TBDY 2018'in önerdiği şekilde 11 farklı gerçek deprem kaydı (1999 Chichi, 1995 Kobe, 1976 Denizli, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1998 Ceyhan, 1999 Düzce, 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl, 2011 Van ve 2019 Denizli) seçilmiştir. Deprem kayıtlarına ait karakteristikler Çizelge 2'de verilmiştir.

*Çizelge 2. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları (www.deprem.afad.gov.tr).*

Deprem Adı	İstasyon	Derinlik (km)	PGA (g)	Büyüklik ( $M_w$ )
19/08/1976 Denizli	2001	20	0.35	5.0
13/03/1992 Erzincan	2402	23	0.41	6.6
17/01/1995 Kobe	Takarazuka	17.6	0.82	6.9
01/10/1995 Afyon/Dinar	0302	5	0.28	6.1
27/06/1998 Adana/Ceyhan	0105	23	0.22	6.2
17/08/1999 Kocaeli	4106	15.9	0.21	7.4
21/09/1999 Tayvan/Chi Chi	TCU	8	0.18	7.3
12/11/1999 Düzce	8101	11	0.41	7.2
01/05/2003 Bingöl	1201	6	0.55	6.1
23/10/2011 Van	6503	19.02	0.18	6.7
20/03/2019 Denizli	2017	10.76	0.36	5.5

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre deprem yer hareketi düzeyleri, Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3), Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4) olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan dört farklı yer hareketi düzeyi için deprem verileri, 22.01.2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları ile tanımlanmıştır. Sahaya özel olarak hazırlanan bu ivme haritalarına T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

resmi internet sitesinden erişilmiştir (<https://tdth.afad.gov.tr/>). Çalışma alanı analizlerinde kullanmak için her bir deprem yer hareketi düzeyine göre sistem üzerinden elde edilen noktasal ivme değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Bu ivme değerleri çalışma yapılan alandaki birçok noktanın ivme değerleri göz önüne alınarak çalışma alanını temsil edecek şekilde belirlenmiştir.

*Çizelge 3. Çalışma alanının deprem yer hareketi düzeyine göre belirlenen ivme değerleri (<https://deprem.afad.gov.tr/>).*

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	PGA (g)
DD-1 (Tekrarlanma periyodu 2475 Yıl)	0.644
DD-2 (Tekrarlanma periyodu 475 Yıl)	0.333
DD-3 (Tekrarlanma periyodu 72 Yıl)	0.122
DD-4 (Tekrarlanma periyodu 43 Yıl)	0.086

Gerçek deprem kayıtları, verilen bir tasarım ivme spektrumuna uyumlu olarak zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçeklenebilmektedir. Yönetmeliğe uygun olarak seçilmiş olan 11 farklı gerçek deprem kaydı, çalışma alanı için sistem üzerinden elde edilen en büyük ivme değerlerine göre (Çizelge 3) DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 yer hareketi düzeyine göre DeepSoil analiz programına tanımlanarak bire bir ölçeklendirilmiş ve analizler için her bir kuyu tabanında tanımlanmıştır.

### **2.5. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Program ve Parametrelerin Tanıtımı**

Bu çalışmada, bir boyutlu kayma dalgası hızı modeline dayanan, eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri tercih edilmiştir. İnceleme alanında sahaya özel yüzey deprem özellikleri, sondaj verileri kullanılarak zemin profilleri için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri için DeepSoil v6.1 programı kullanılarak belirlenmiştir. DeepSoil programı frekans ve zaman alanında çözüm yapabilen bir programdır. Frekans alanında lineer ve eşdeğer doğrusal analizler, zaman alanında ise lineer ve doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir. Çalışma alanına özel sönümlenme ve azalım eğrileri oluşturulurken, her derinlik laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin parametre değerleri kullanılarak efektif gerilme değerleri tek tek hesaplanarak zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Ancak, çalışma bölgesi taban kayasının alt sınıra oranla çok daha derinlerde olmasından dolayı tabakalı zemin modelinde TBDY 2018'e göre yerel zemin sınıfı ZD ve ZE olan zeminlerde, son tabakanın zemin parametreleri anakayaya tanımlanarak analizler yapılmıştır. Bu durumda

deprem etkisi, taban kayası yerine bu tabakanın üstünde tanımlanacak ve yönetmeliğe göre tasarım deprem yer hareketini tanımlayan spektral büyüklükler ZD ve ZE yerel sınıfı için verilen yerel zemin etki katsayıları gözönüne alınarak büyütülmüştür. Bu tabaka ve altındaki zemin ortamı, tek boyutlu zemin profili modelinde uygun geçirgen sınır koşulu kullanılarak idealleştirilmiştir. Analizin hassasiyeti bakımından zemin tabakaları her 1,5 m için alt tabakalara ayrılarak analizler yapılmıştır.

Çalışma bölgesinden elde edilen test sonuçlarına bağlı olarak hedef spektrumla ölçeklenmiş deprem kayıtları kullanılarak örnek bir sondajın doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analizleri yapılmıştır. Seçilen bu deprem kayıtları tüm sondaj kuyusunda doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analizleri yapılarak zemin profilleri üzerinde DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 yer hareketlerinin anakaya ivme spektrumları ile birlikte analizler sonucunda belirlenmiş olan yüzey ivme spektrumları oranlanarak zemin büyütme oranları belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR

Çalışma alanının gerek zemin özellikleri gerekse de Akşehir-Simav Fay Sistemine yakın bir mesafede bulunması sebebiyle bölgede mevcut halde bulunan yapılar ve sürekli artan yapılaşmadan dolayı detaylı analizlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla çalışma bölgesinde 124 sondaj noktasında SPT testlerine ait sonuçlar kullanılarak yapılan zemin davranış analizleri sonucunda çalışma alanının zemin büyütmesi ve pik yer ivmesi değerleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre de çalışma alanının değerlendirmesi yapılmıştır. Zemin büyütme analizi için doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal yöntemler kullanılarak her bir deprem yer hareketine göre analizleri yapılmıştır. Bu analiz yöntemlerine göre de çalışma alanının pik yer ivmesi değerleri hesaplanmıştır.

#### 3.1. Zemin Davranış Analizleri İle Belirlenen PGA Değerleri

Yerel zemin şartlarıyla uyumlu bir deprem ivme spektrumu yani belirlenen en büyük pik ivme değeri ve periyodu dinamik yapı analizi için en yaygın kullanılan giriş parametresidir. Pik ivme değeri (PGA) jeolojik veriler yetersiz olduğu zaman yalnız başına zemin tanımlaması için yararlıdır. Bu amaçla çalışma bölgesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile elde edilmiş olan PGA değerleri verilmiştir.

Elde edilen analizlerin sonucuna göre, toplam gerilmeye bağlı olarak eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılan zemin yer tepki analizinde DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketlerinde maksimum PGA değerleri sırasıyla 1.20

ve 0.86 g tespit edilirken, efektif gerilmeye bağlı olarak doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanan zemin yer tepki analizinde ise PGA değerleri 0.76 ve 0.60 g olarak tespit edilmiştir.

Eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılan zemin yer tepki analizinde DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketlerinde maksimum PGA değişimi sırasıyla 0.28 ve 0.15 g tespit edilirken, doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanan zemin yer tepki analizinde ise 0.56 ve 0.50 g olarak tespit edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlara göre, kayma modülü sonuçlarına ve sönümlenme oranına göre hesap yapabilmek için efektif gerilmenin esas alındığı doğrusal olmayan analiz yönteminin; özellikle de sert kıvamda olmayan veya yumuşak zeminlerde kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

### 3.2. Zemin Büyütme Analizi

Bir boyutlu analiz yöntemlerinden olan eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak çalışma alanının zemin büyütme değerleri, deprem yer hareketlerine göre analizleri yapılmıştır.

#### 3.2.1. DD-1'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

DD-1 eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre ise en küçük zemin büyütme oranı 1.22 ile Erkmn ve Yeşilyurt mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.63 ile Selçuklu mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı Erkmn mahallesinde 0.85 olarak belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.45 ile Karşıyaka, Battal Gazi, Ertuğrul Gazi ve Dört Yol mahallelerinde belirlenmiştir.

*Çizelge 4. Deprem yer hareketi DD-1'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

Mahalle Adı	Eşdeğer Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz
Erkmn	1.22	0.85
Hasan Karaağaç	1.32	1.30
Selçuklu	2.63	1.30
Osman Gazi	1.57	1.30
Karşıyaka	1.57	1.45
Yeşilyurt	1.22	1.15
Battal Gazi	1.57	1.45
Ertuğrul Gazi	1.57	1.45
Orhan Gazi	1.92	1.30
Dört Yol	1.92	1.45

### 3.2.2. DD-2'ye Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 1.11 ile Yeşilyurt mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.15 ile Orhan Gazi ve Ertuğrul Gazi mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı Erkmen, Hasan Karaağaç, Osman Gazi ve Yeşilyurt mahallelerinde 1.00 olarak belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 2.00 ile Ertuğrul Gazi mahallesinde belirlenmiştir.

*Çizelge 5. Deprem yer hareketi DD-2'ye göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

Mahalle Adı	Eşdeğer Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz
Erkmen	1.34	1.00
Hasan Karaağaç	1.34	1.00
Selçuklu	1.56	1.50
Osman Gazi	1.34	1.00
Karşıyaka	1.34	1.75
Yeşilyurt	1.11	1.00
Battal Gazi	1.34	1.50
Ertuğrul Gazi	2.15	2.00
Orhan Gazi	2.15	1.50
Dört Yol	1.56	1.50

### 3.2.2. DD-3'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 0.89 ile Osman Gazi mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.37 ile Orhan Gazi mahallesinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı 0.91 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallesinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.33 ile Karşıyaka ve Orhan Gazi mahallelerinde belirlenmiştir.



*Çizelge 6. Deprem yer hareketi DD-3'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

Mahalle Adı	Eşdeğer Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz
Erkmen	1.10	1.22
Hasan Karaağaç	1.10	0.91
Selçuklu	1.10	1.12
Osman Gazi	0.89	0.91
Karşıyaka	1.10	1.33
Yeşilyurt	1.10	1.12
Battal Gazi	0.99	1.01
Ertuğrul Gazi	1.10	1.12
Orhan Gazi	1.37	1.33
Dört Yol	1.10	1.12

### 3.2.2. DD-4'e Göre Zemin Büyütme Analiz Sonuçları

Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre en küçük zemin büyütme oranı 0.88 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.29 ile Selçuklu ve Orhan Gazi mahallelerinde belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucuna göre de en küçük büyütme oranı 0.89 ile Osman Gazi ve Hasan Karaağaç mahallelerinde belirlenirken, en büyük zemin büyütme oranı ise 1.25 ile Karşıyaka ve Selçuklu mahallelerinde belirlenmiştir.

*Çizelge 7. Deprem yer hareketi DD-4'e göre eşdeğer doğrusal analiz sonuçları.*

Mahalle Adı	Eşdeğer Doğrusal Analiz	Doğrusal Olmayan Analiz
Erkmen	1.17	1.16
Hasan Karaağaç	0.88	0.89
Selçuklu	1.29	1.25
Osman Gazi	0.88	0.89
Karşıyaka	1.07	1.25
Yeşilyurt	1.07	1.07
Battal Gazi	0.98	0.98
Ertuğrul Gazi	1.07	1.07
Orhan Gazi	1.29	1.16
Dört Yol	1.07	1.16



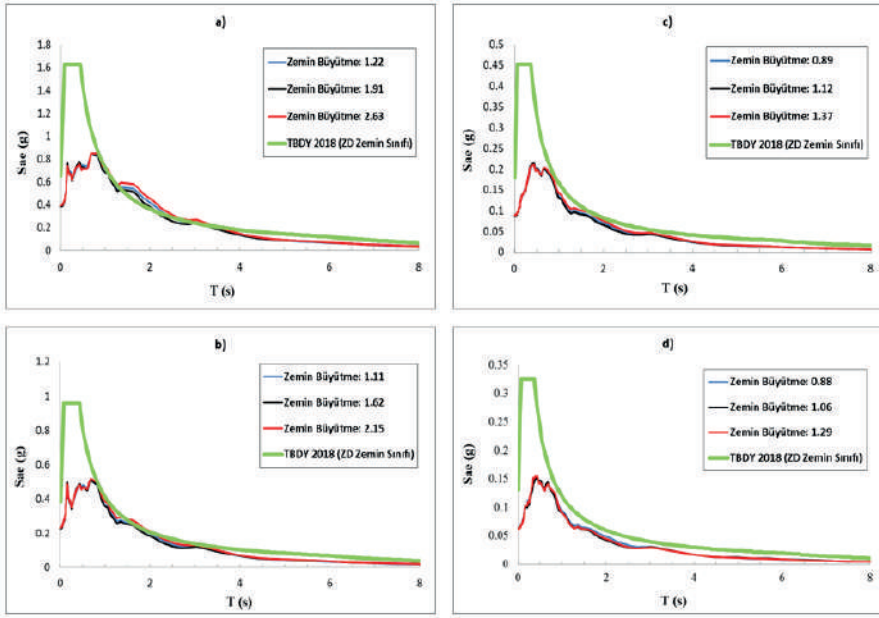
### 3.3. Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde çalışma alanı için tarif edilen zeminle ilgili değerlendirmeler dikkate alınarak elde edilen spektrum grafiği ile büyütme analizleri sonrası elde etmiş olduğumuz spektrum grafikleri karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma alanının yerel zemin sınıfı  $V_s$ 'ye bağlı olarak ZD olarak tespit edilmiştir. ZD yerel zemin sınıfına göre Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması üzerinden DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketlerine göre ayrı ayrı yatay elastik tasarım spektrumları alınmıştır. Sonuçlar DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri düzeyine göre 11 ayrı deprem kaydının ortalaması şeklinde verilmiştir. Analizler sonucunda deprem yer hareketine göre elde edilmiş olan küçük, orta ve büyük zemin büyütmenin olduğu sondaj kuyularındaki spektrumlar seçilerek ilgili deprem yer hareketinin yatay elastik spektrumu ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Analizlerin, yönetmeliğe göre karşılaştırılması eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kendi içerisinde deprem yer hareketleri değerlendirmeye alınmıştır.

#### 3.3.1. Eşdeğer Doğrusal Yöntemi Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

Eşdeğer doğrusal analizler sonuçlarından Şekil 2-a grafiğine bakıldığında DD-1 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analizler; 1.2 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 1.2-2.7 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 2.7 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 2-b,c,d grafiğine bakıldığında sırasıyla DD-2, DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri için yapmış olduğumuz analiz sonuçları ile yönetmeliğin ön görmüş olduğu spektral ivme değerlerinin uyduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Eşdeğer doğrusal yöntem zemin büyütme analiz sonuçlarının TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi a)DD-1 deprem yer hareketine göre b)DD-2 deprem yer hareketine göre c)DD-3 deprem yer hareketine göre d)DD-4 deprem yer hareketine göre.

TBDY 2018'e göre binanın hakim doğal titreşim periyodu farklı denklemlerle belirlenmektedir. Çalışma alanı için yapının tahmini periyodu yönetmelikte belirtilen (Denklem 1) ampirik yöntemiyle hesaplanmaktadır.

$$T_{pA} = C_t \cdot H_N^{3/4} \quad (1)$$

$T_{pA}$ : Binaın hakim doğal titreşim periyodu(s)

$H_N$  = Binaın bodrum katlarının üstündeki üst bölümünün toplam yüksekliği(m)

Yönetmeliğe göre, taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan binalarda  $C_t:0.1$  olarak, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda  $C_t:0.08$  alınırken diğer tüm binalarda  $C_t:0.07$  alınacaktır. Çalışma alanı içerisindeki yapılar betonarme çerçevelerden oluştuğu için  $C_t$  değeri 0.1 alınmıştır. Çalışma alanı için 2, 5, 10, 15, 20 ve 25 katlı yapılar için tahmini doğal titreşim periyodu hesaplanarak deprem yer hareketlerine

göre, hem eşdeğer analiz sonucu için hem de yönetmelik için değerler hesaplanarak Çizelge 8'de verilmiştir.

Örneğin çalışma alanında bulunan 5 katlı bir bina için yapının hakim doğal titreşim periyodu yönetmelikteki denkleme göre 0.76 sn hesaplanmıştır. Bu yapı için; deprem yer hareketi DD-2 için yönetmeliğin ön gördüğü spektral ivme değeri 0.55 g, eşdeğer doğrusal analiz sonucunda spektral ivme değerinin 0.50 g olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 8).

*Çizelge 8. Kat adedine göre yapı titreşim periyodunun yönetmeliğe ve eşdeğer doğrusal analiz yöntemine göre karşılaştırılması.*

Kat Sayısı	Tahmini Yapı Periyodu (T)	TBDY 2018 $S_a(g)$				DeepSoil Eşdeğer Doğrusal Analiz $S_a(g)$			
		DD-1	DD-2	DD-3	DD-4	DD-1	DD-2	DD-3	DD-4
2	0.38	1.63	0.95	0.41	0.30	0.74	0.46	0.20	0.15
5	0.76	0.96	0.55	0.22	0.16	0.84	0.50	0.19	0.13
10	1.28	0.55	0.32	0.12	0.09	0.57	0.28	0.10	0.06
15	1.73	0.41	0.23	0.09	0.06	0.54	0.25	0.09	0.05
20	2.15	0.33	0.19	0.07	0.05	0.40	0.18	0.06	0.04
25	2.54	0.28	0.16	0.06	0.04	0.30	0.14	0.05	0.03

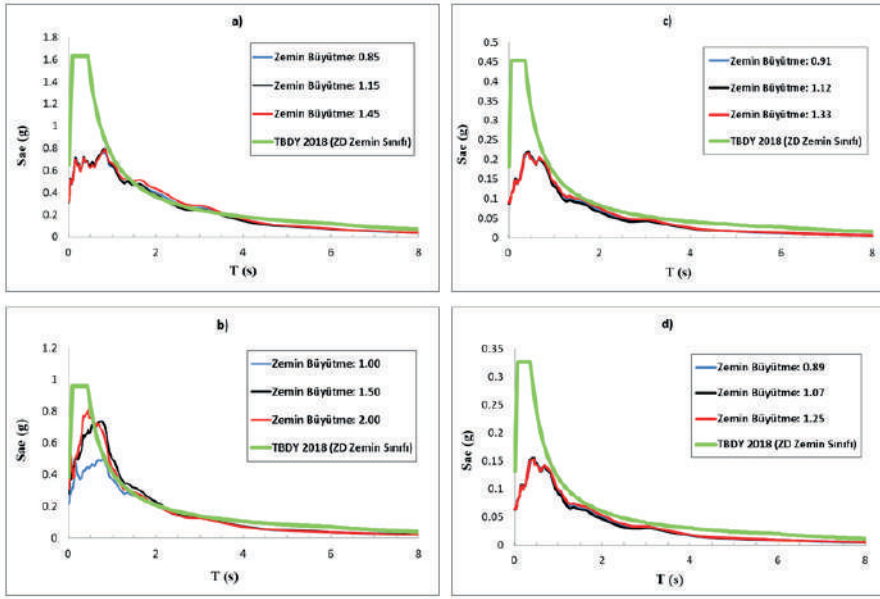
### 3.3.2. Doğrusal Olmayan Yöntemi Zemin Büyütme Analiz Sonuçlarının TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

Doğrusal olmayan analiz sonuçlarından Şekil 3-a grafiğine bakıldığında DD-1 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analiz sonuçları; 1.3 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 1.3-3.1 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 3.1 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3-b grafiğine bakıldığında DD-2 yer hareketi için çalışma bölgesinde yapmış olduğumuz analiz sonuçları; 0.6 sn'ye kadar olan spektral ivme değerleri öngörülen yönetmeliğin altında kaldığı, 0.6-2.1 sn arasındaki spektral ivme değerleri yönetmeliğin ön gördüğü değerlerden yüksek olduğu, 2.1 sn sonrasındaki spektral ivme değerleri ise yönetmeliğin altında kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 3-c,d grafiğine bakıldığında sırasıyla DD-3 ve DD-4 deprem yer hareketleri için yapmış olduğumuz analiz sonuçları ile yönetmeliğin ön

görmüş olduğu spektral ivme değerlerinin altında kaldığı, belirli zaman aralıklarında ise uyduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 3. Doğrusal olmayan yöntem zemin büyütme analiz sonuçlarının TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi a)DD-1 deprem yer hareketine göre b)DD-2 deprem yer hareketine göre c)DD-3 deprem yer hareketine göre d)DD-4 deprem yer hareketine göre.**

TBDY 2018'e göre çalışma alanı için yapının hakim doğal titreşim periyodu denklem 1'e göre hesaplanmıştır. Çalışma alanının için 2, 5, 10, 15, 20 ve 25 katlı yapılar için tahmini doğal titreşim periyodu hesaplanarak deprem yer hareketlerine göre, hem eşdeğer analiz sonucu için hem de yönetmelik için değerler hesaplanarak Çizelge 9'da verilmiştir.

Örneğin çalışma alanında bulunan 5 katlı bir bina için yapının hakim doğal titreşim periyodu yönetmelikteki denkleme göre 0.76 sn hesaplanmıştır. Bu yapıda; deprem yer hareketi DD-2 için yönetmeliğin ön gördüğü spektral ivme değeri 0.55 g, doğrusal olmayan analiz sonucunda spektral ivme değerinin 0.67 g olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 9).

**Çizelge 9. Kat adedine göre yapı titreşim periyodunun yönetmeliğe ve doğrusal olmayan analiz yöntemine göre karşılaştırılması.**

Kat Sayısı	Tahmini Yapı Periyodu (T)	TBDY 2018 $S_a(g)$				DeepSoil Doğrusal Olmayan Analiz $S_a(g)$			
		DD-1	DD-2	DD-3	DD-4	DD-1	DD-2	DD-3	DD-4
2	0.38	1.63	0.95	0.41	0.30	0.67	0.77	0.21	0.15
5	0.76	0.96	0.55	0.22	0.16	0.76	0.67	0.19	0.13
10	1.28	0.55	0.32	0.12	0.09	0.55	0.34	0.10	0.07
15	1.73	0.41	0.23	0.09	0.06	0.42	0.27	0.09	0.06
20	2.15	0.33	0.19	0.07	0.05	0.38	0.19	0.06	0.04
25	2.54	0.28	0.16	0.06	0.04	0.32	0.16	0.05	0.03

Elde edilen sonuçlar her bir sondaj kuyusu için olup genel bir yaklaşımı anlatmamaktadır. Farklı sondaj kuyuları incelendiğinde kat sayısı ve deprem yer hareketine göre farklılık gösterdiği, elde edilen analiz sonuçlarının yönetmeliğin önerdiği spektral ivmenin üstünde veya altında kaldığı durumlar tespit edilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde her iki analiz yönteminde de zemin büyütme oranı arttıkça spektral ivme değerleri, yönetmeliğin önermiş olduğu spektral ivme değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Çalışma alanında yapılacak olan yapıların tasarımı noktasında proje danışmanlarına veya mühendislere yol gösterecek rehber niteliğinde sonuçlar doğuracağı anlaşılmaktadır. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar, çalışma alanının genel yapısını ortaya koyduğundan, bu konuda çalışan araştırmacılara bölgenin sismitesi hakkında bilginin yanında zaman ve maliyet kazandırmaktadır. Bu nedenle bu çalışma sonucu elde edilen büyütme değerleri ve karşılaştırmalı analizler, afet öncesi risk belirleme ve azaltma çalışmaları kapsamında, güvenli yapıların inşası için kullanılabilir veri sağlamaktadır.

#### 4. DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinin merkez UyduKent bölgesinin zemin özellikleri, jeofizik, geoteknik ve jeolojik verilerin birlikte değerlendirilmesi esasına göre detaylandırılmış ve inceleme alanı geoteknik açıdan değerlendirilmiştir. Çalışma alanı ve çevresinin deprem riski araştırılarak, olası depremlerde çalışma alanında meydana gelebilecek yer hareketlerine göre analizleri yapılmıştır. Çalışma alanında yer alan ve sondaj verileri üzerinde doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Depremlerin meydana gelmesi beklenen yerlere yakın yerleşimlerde, zemin büyütmesinin yapılara zararlarının tahmin edilmesi can kayıplarını azaltması bakımından önemlidir. Bunun ekonomik yönü de göz ardı edilmemelidir. Zemin büyütmelerinin olduğu geldiği yerlerde çok ciddi alt ve üst yapı hasarlarının olduğu geçmişte meydana gelen depremlerde açıkça görülmüştür. Yeni yerleşim yerlerinin belirlenmesinde veya mevcut yerleşim yerlerinde önlem amaçlı yapılacak zemin dinamik davranışının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Çalışma alanında eşdeğer doğrusal zemin davranış analizi için PGA değişimi deprem yer hareketlerine göre 0.45-1.20g (DD-1), 0.26-0.86g (DD-2), 0.10-0.28g (DD-3) ve 0.06-0.15g (DD-4) olarak belirlenmiştir. Doğrusal olmayan zemin davranış analizi için PGA değişimi deprem yer hareketlerine göre 0.33-0.76 (DD-1), 0.23-0.60 (DD-2), 0.09-0.56 (DD-3) ve 0.07-0.50 (DD-4) olarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlara göre, kayma modülü sonuçlarına ve sönümleme oranına göre hesap yapabilmek için efektif gerilmenin esas alındığı doğrusal olmayan analiz yönteminin; özellikle de sert kıvamda olmayan veya yumuşak zeminlerde kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Zemin büyütme analizi sonuçları incelendiğinde, bazı mikrobölgelerde doğrusal olmayan analizlerde iki kat, eşdeğer doğrusal analizlerde ise üç kata varan oranlarda zemin büyütme olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu büyütme, yerel zemin koşullarının deprem yer hareketleri üzerindeki etkilerinin varlığını doğrulamaktadır. Sondaj kuyularına göre zemin büyütme değerlerinin hesaplanması için doğrusal olmayan analiz yönteminin uygun olduğunu göstermektedir. Doğrusal olmayan analiz yönteminin kullanılması, deprem etkisi altında yapı temelini tasarımı, yerel zemin sınıflarının tanımlanması, istinat yapıları ve yamaçların (şevlerin) tasarımında kullanılacak zemin parametrelerinin belirlenmesindeki maliyeti azaltacağı düşünülmektedir.

Çalışma alanının alüvyon yapısı ve yeraltı su seviyesinin yüksek olması, deprem etkisiyle birlikte yer hareketlerini önemli ölçüde etkileyebileceği gözlenmiştir. Bu nedenle önemli yapılar için sahaya özel bir tasarım yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Çalışma alanında yapılan zemin büyütme analizleri bina kat sayısı ve deprem yer hareketine göre farklılık gösterdiği, elde edilen analiz sonuçlarının yönetmeliğin önerdiği spektral ivme değerinin üstünde veya altında kaldığı durumlar tespit edilmiştir. Her iki analiz yönteminde de zemin büyütme oranı arttıkça spektral ivme değerleri, yönetmeliğin önermiş olduğu spektral ivme değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Özellikle zemin büyütme değerlerinin yüksek olduğu

Ertuğrul Gazi, Orhan Gazi ve Selçuklu mahallelerinde inşa edilecek 5, 10 ve 15 katlı yapılarda mevcut yönetmeliğin ön gördüğü yatay elastik spektrum yerine sahaya özel analizler neticesinde elde edilecek tasarım spektrumunun kullanılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

Zemin büyütmesi sonucu ortaya çıkan diğer bir önemli sonuç da tasarım sağ uç köşe periyodunun sahaya ait sonuçlara göre düşük kalması ve orta-yüksek hakim periyoda sahip binaların sismik tasarımlarının eksik hesaplanması sonucunu doğurmaktadır. Tasarımın spektrumunu oluşturan ana parametreler (SDS, TA ve TB) hesaplanırken parametrik/istatistiksel yaklaşımların yanında sahaya özel analizlerle doğrulanmalıdır. TBDY 2018'e göre sahaya özel zemin davranış analizleri sadece ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerde değil diğer zemin sınıflarında da yapılması önem arz etmektedir. Yönetmelikte bahsedildiği gibi bu tür analizler, proje mühendisinin tercihine bırakılmamalıdır. Çalışma alanında yapılacak olan yeni yapıların tasarımı noktasında proje danışmanlarına veya mühendislere yol gösterecek rehber niteliğinde sonuçlar doğuracağı anlaşılmaktadır.

## Kaynaklar

- Akın, M., Ozvan, A., Akın, K. M., Topal, T., 2013, Evaluation of Liquefaction in Karasu River Floodplain After the October 23, 2011, Van (Turkey) Earthquake, *Natural Hazards*, 69, 1551-1575.
- Akın, M.K., Akın, M., Akkaya, İ., Özvan, A., Üner, S., Selçuk, L., vd., 2015, Mikrobölgeleme Çalışmasına Altlık Oluşturmak Üzere Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüs Zemininin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 39, 1-26.
- ASTM D1586-99, 1999, Standart Penetrasyon Testi, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aydoner, C., Maktav, D., 2013, Settlement Suitability Analysis In Terms of Earthquake, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 6, 53-62.
- Bayrakçı, E., Pekkan, E., Avdan, U., Güneç, Y., 2013, Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Sondaj Derinliğinin Sıvılaşma Analizine Etkisinin Belirlenmesi (Eskişehir Örneği), *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 50-60.
- Değerliyurt, M., 2014, Settlement Suitability Analysis of Local Ground Characteristics In Iskenderun: A Case Study, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 637-644.
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., 2016, DeepSoil v6.1, User Manual.
- Iswanto, E.R., Yee, E., 2016, Comparison of Equivalent Linear and Non Linear Methods on Ground Response Analysis: Case Study at West Bangka Site, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18, 23-29.
- İyisan, R., 1996, Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Deney Sonuçları Arasındaki Bağlılıklar, *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 1187-1199.
- Kavurmacı, M., 2017, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Kullanılarak Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi: Aksaray Örneği, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 23, 303-311.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, PrenticeHall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kurnaz, T.F., Ramazanoğlu, S., 2014, The Interrogation of Settlement Suitability by Using GIS, A Case Study In Esenler (Istanbul), *Sakarya University Journal of Science*, 18, 171-182.
- Özdağ C., Gönenç T., Akgün M., 2015, Dynamic Amplification Factor Concept of Soil Layers: A Case Study in İzmir (Western Anatolia), *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 10093-10104.
- Özkan M.Y., 2017, *Zemin Dinamiğine Giriş*, Nobel Yayın Dağıtım, 316, Ankara.



- Özyazıcıoğlu, M., Dönmezçelik, K., Orhan, S.N., Özkan, M.Y., 2019, Erzincan İli Zemin Büyütme Etkilerine Dayalı Mikrobölgeleme Çalışması, Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5, 247-256.
- Saita, J., Nakamura, Y. and Sato, T., 2012, Liquefaction Caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and the Result of the Prior Microtremor Measurement, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- Subaşı, O., Haşal, M., Özaslan, B., İyisan, R., Yamanaka, H., Chimoto, K., (2019), Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması, Teknik Dergi, 552, 9459-9481.
- Tunçel, A., Özdağ, Ö.C., Pamuk, E., Akgün, M., 2019, Mikrotremor Verisi Kullanılarak Zeminlerin Dinamik Büyütme Faktörü Değerlerinin Hesaplanması: İzmir (Kuzey) Örneği, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34, 43-52.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, 30364.
- Ulusay, R., 2000, Zemin Sıvılaşması, Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi, 2, 47-54.

### İnternet Kaynakları:

- 1) AFAD, 2018, <https://deprem.afad.gov.tr>

# İstanbul Başakşehir İçin Sahaya Özel Deprem Tehlike Analizi ve TBDY (2018) ile Karşılaştırma

Evren Seyrek<sup>1</sup>

## Özet

Depreme dayanıklı yapı tasarımının başarısı, yapı üzerine gelecek deprem yüklerinin doğru tahmini ile son derece ilişkilidir. Bu amaçla kullanılan deprem tehlike haritaları zaman içerisinde güncelliğini yitirebilmekte veya meydana gelen yeni depremler bu haritaların yeterliliğini tartışılabilir hale getirmektedir. Bu amaçla proje sahasına özel deprem tehlike analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında İstanbul ili, Başakşehir ilçesinde sahaya özel deprem tehlike analizi yapılarak farklı deprem seviyeleri için eş-tehlike spektrumu oluşturulmuş ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) önerilen spektrum ile mukayese edilmiştir.

## 1. GİRİŞ

Bir proje sahasında beklenen yer hareketinin belirlenmesi, depreme dayanıklı tasarımda son derece önemli bir aşamadır. Bu yer hareketinin belirlenmesi, tek başına beklenen senaryo deprem büyüklüğü ile ilgili olmayıp ortaya çıkacak olan sarsıntının şiddeti yani ivmesi ile de ilgilidir. Bu yüzden güvenilir parametrelerin seçimi, projeden beklenen performans ve güvenlik hedeflerinin sağlanmasında fayda sağlayacaktır. Sarsıntının şiddeti sayısal olarak kaydedilen yer hareketi karakteristikleri ile tarif edilmektedir (Kramer, 1996). Herhangi bir senaryo depremde proje sahasında beklenen yer hareketi karakteristiğini belirlemek için deprem tehlike analizleri kullanılmaktadır. Bu analizler sadece yapı ve sismoloji alanları ile sınırlı olmayıp, jeofizik, jeoloji, geoteknik gibi farklı alanlardan elde edilen bilgilerin doğru şekilde birleştirilip kullanılması ile mümkün olmaktadır.

Deprem tehlike analizi, olasılıksal ve/veya deterministik yöntemler ile yapılabilmekte ve bu analizler neticesinde tasarım için gerekli sismik

1 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Geoteknik ABD, Kütahya, TÜRKİYE, cvren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

parametrelere ulaşılabilmektedir. Deterministik analiz uygulamada en kötü durum senaryosunu dikkate alan bir yöntem olarak kabul edilmekte olup içerdiği belirsizliklerin mertebesi düşünüldüğünde bu görüşün her zaman geçerli olduğunu söylemek mümkün değildir. Olasılıksal analiz ise yer hareketi parametrelerini ve bu parametrelerin belli bir zaman dilimi için aşılma ihtimalinin elde edilmesini içerir. Cornel (1968) tarafından ortaya konan olasılıksal modelin, farklı araştırmacılar tarafından güncellense (farklı belirsizlik parametrelerini de dikkate alarak) ana çerçevesini koruduğu görülmektedir (Abrahamson 2000; Gupta, 2002).

Seyrek (2009), her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajlara sahip olduğunu ve yıllar içerisinde geliştirilmesine yönelik çalışma sayısının artarak devam ettiğini vurgulamıştır. McGuire (2001)'e göre, her iki yöntemin birlikte kullanılması ve yorumlanması daha doğru bir yaklaşım olmaktadır. Proje sahasının konumu, sismisitesi ve projeden beklentiler iki yaklaşımdan hangisinin kullanılacağı noktasında anahtar unsurlardır.

Farklı ve kritik yapıların tasarımı, acil eylem planlarının hazırlanması ve afet dirençli şehirler gibi önemli alanlara girdi sağlayan sismik tehlike modelleri kullanılarak Türkiye'nin farklı bölgeleri için çalışmaların yapıldığı görülmektedir (Erdik vd., 1999; Tosun vd., 2007; Seyrek ve Tosun, 2011; Şeşetyan vd., 2019). Barajların deprem kaynaklı oturma tahmini için proje sahasında yer hareketi kaydı yok ise sismik tehlike analizleri önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Seyrek ve Topçu, 2022).

Bu çalışma kapsamında İstanbul ill Başakşehir ilçesi için olasılıksal sismik tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için çalışma alanı kapsamındaki sismotektonik güncel veriler derlenmiş ve deprem kataloğu tehlike analizleri için kullanıma uygun hale getirilmiştir. Boore vd. (1997), Campbell (1997) ve Sadigh vd. (1997) azalım denklemleri kullanılarak 50 yılda %10 ve 50 yılda %2 deprem seviyelerine ait eş-tehlike spektrumları elde edilmiş ve mevcut Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ile mukayese edilmiştir.

## 2. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR

İnceleme alanında temel zemin özelliklerini belirlemek amacıyla 24 adet 8 m ve 1 adet 10 m derinliğinde sondaj kuyusu açılmıştır. Zemin profili incelendiğinde, saha genelinde yüzeyde 0.5m kalınlığında bitkisel toprak yer almaktadır. Bitkisel toprak altında araştırma derinliği boyunca kireçtaşı kaya birimi yer almaktadır. Kireçtaşı olarak tariflenen birimlerden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen Nokta Yükleme deney sonuçlarına göre Nokta Yük Dayanım İndeksi ( $I_{s(50)}$ ) değerlerinin 1.07 MPa ile 3.98 MPa arasında

değiştirdiği görülmüştür. Arazide yapılan sondaj çalışmaları esnasında yeraltı su seviyesine rastlanılmamıştır. İlgili veriler Avrasyam Mühendislik Mimarlık İnşaat San. Ve Tic. Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır.

Proje sahasında 13 adet MASW ve sismik kırılma deneyleri ile 4 adet mikrotremör çalışması yapılmıştır. Üst 30 m için ortalama kayma dalga hızı değerleri ( $V_{s,30}$ ) 824-1297 m/sn aralığında değişmektedir. TBDY (2018)'e göre yerel zemin sınıfının olarak ZB olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. TBDY (2018)'e Göre Yerel Zemin Sınıfları

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		( $V_s$ ) <sub>30</sub> [m/s]	( $N_{60}$ ) <sub>30</sub> [darbe/30 cm]	( $c_u$ ) <sub>30</sub> [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
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	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir 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.			

### 3. ÇALIŞMA SAHASININ SİSMO-TEKTONİK ÖZELLİKLERİ

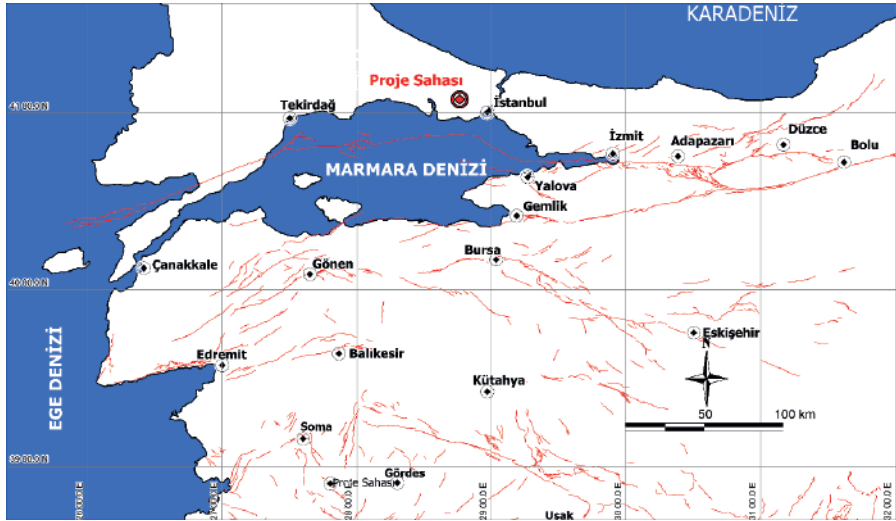
#### 3.1 Proje Sahası ve Çevresindeki Sismik Kaynaklar

Şekil 1’de proje sahasını tehdit eden güncel tektonik yapılar verilmektedir (Emre vd., 2018). Söz konusu tektonik yapılar içerisinde gerek deprem aktivitesi yönünden gerekse proje sahasına olan mesafe açısından en önemli tektonik yapının Kuzey Anadolu Fay Zonu segmentleri olduğu anlaşılmaktadır. Türkiye’nin kuzey bölümünde yer alan, toplam uzunluğu yaklaşık 1500 km olan Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAF) farklı segmentlerinin etki alanı içerisinde olduğu görülmektedir. Bozkurt (2001), bu fay zonunun Türkiye’nin doğusundan batıdaki Yunanistan’a kadar devam ettiğini, genişliğinin ise birkaç yüz metreden 40 km’ye kadar ulaştığını ifade

etmektedir. Kendi doğrultusuna paralel uzanmış çok sayıda fay segmentinden oluştuğu bilinmektedir.

Marmara'nın doğusunda güney ve kuzey olmak üzere iki kola ayrılmaktadır. Kuzey kol D-B yönünde Marmara Denizi'ni katederek Gelibolu Yarımadası üzerinden Saros Körfezi'ne ulaşır. Güney kol ise Pamukova Havzası, İznik Gölü, Gemlik ve Bandırma körfezlerinin oluşturduğu morfolojik koridoru izleyerek Biga yarımadasındaki fay sistemlerine dahil olmaktadır. Bu segment Geyve'nin güneybatısında tekrar bir kola daha ayrılmakta, Yenişehir, Bursa, Mustafa Kemalpaşa, Manyas, Gönen, Pazarköy'den geçerek Edremit kuzeyinde Ege Denizi'ne girerek kaybolmaktadır. İzmit Körfezi ile Ganos Dağı arasında fay segmenti D-B genel doğrultusunda boydan boya Marmara Denizi'ni kat eder. İzmit Körfezi'nde KAF toplam 60 km uzunluğundadır. Bu körfezde fay D-B genel doğrultusunda uzanır ve uzunlukları 12-15 km arasında değişen Gölcük, Karamürsel ve Darıca segmentlerinden oluşur. 17 Ağustos 1999 depreminde yüzey faylanmasının gelişmiş olduğu bu üç segment bükümlerle birbirine bağlıdır (MTA, 2011).

Proje sahası çevresini tehdit eden fay segmentleri içerisinde Kumburgaz ve Avcılar faylarının kaynak-saha mesafesi açısından toplam tehlike açısından en çok etkiye sahip olacağı düşünülmektedir. Şekil 1'de verilen fay segmentleri sismik tehlike analizleri için EZ-FRISK yazılımında modellenirken sadeleştirilerek kullanılmıştır.

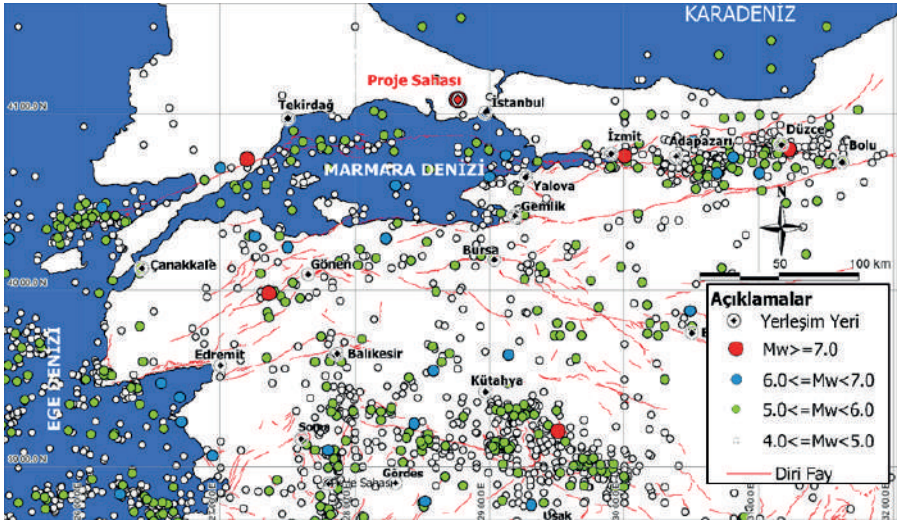


Şekil 1. Proje sahasını çevreleyen fay sistemleri

### 3.2. Proje Sahası ve Çevresinin Sismisitesi

Bu çalışma kapsamında, Ocak 1900-Ekim 2020 yılları arasında magnitüdü 4.0 ve üzerinde olan depremler AFAD'a ait veri tabanından elde edilmiştir. Katalog içerisindeki depremler, Kadirioglu ve Kartal (2016) tarafından önerilen dönüşüm denklemleri ile moment magnitüdüne ( $M_w$ ) çevrilmiş ve homojen bir katalog oluşması sağlanmıştır. Aletsel döneme ait depremlerin dış merkez dağılımları ise Şekil 2'de verilmektedir.

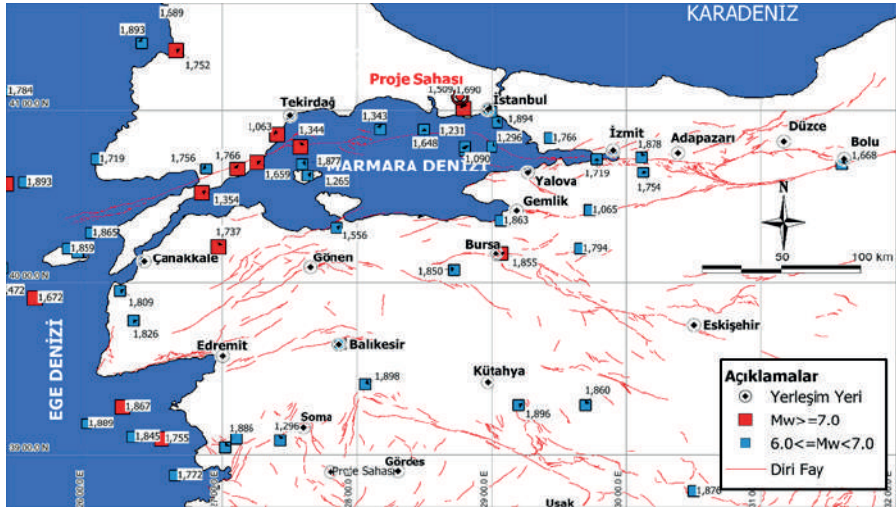
Proje sahası ve yakın çevresindeki depremler incelendiğinde önemli can ve mal kayıplarının yaşandığı Haziran 1943 Hendek Adapazarı depremi ( $M_s=6.6$ ), Eylül 1963 Çınarcık depremi ( $M_s=6.3$ ) ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli Gölçük depreminin ( $M_w=7.6$ ) inceleme alanı içerisinde yer aldığı görülmektedir.



Şekil 2.  $M_w \geq 4.0$  olan depremlerin dış merkez dağılımları

1000-1900 yılları arasına ait tarihsel deprem katalogu literatürden elde edilmiştir (Akkar, vd., 2014) elde edilmiştir. Bu depremlere ait dış merkez dağılımları ise Şekil 3'de aktarılmaktadır.





Şekil 3.  $M_w \geq 6.0$  olan tarihsel depremlerin dış merkez dağılımları

## 4. SAHAYA ÖZEL DEPREM TEHLİKE ANALİZİ

### 4.1 Sismik Kaynak Karakterizasyonu ve Deprem Kaynak Modelleri

Gerçekleştirilen tehlike analizleri için kullanılacak sismik kaynak modeli Şekil 4'de verilmektedir. İlgili şekilde verilen fay segmentleri Emre vd., (2018)'den alınarak sadeleştirilmiştir. Proje sahası merkez olmak üzere 200 km çaplı etki dairesi düşünüldüğünde, proje sahasının iki farklı kaynak zonu etkisi altında olduğu görülmektedir. Bunlar; Kuzey Anadolu Fay zonu'nun kuzey ve güney kollarını içeren 1 numaralı ve 2 numaralı zondur (Şekil 4).

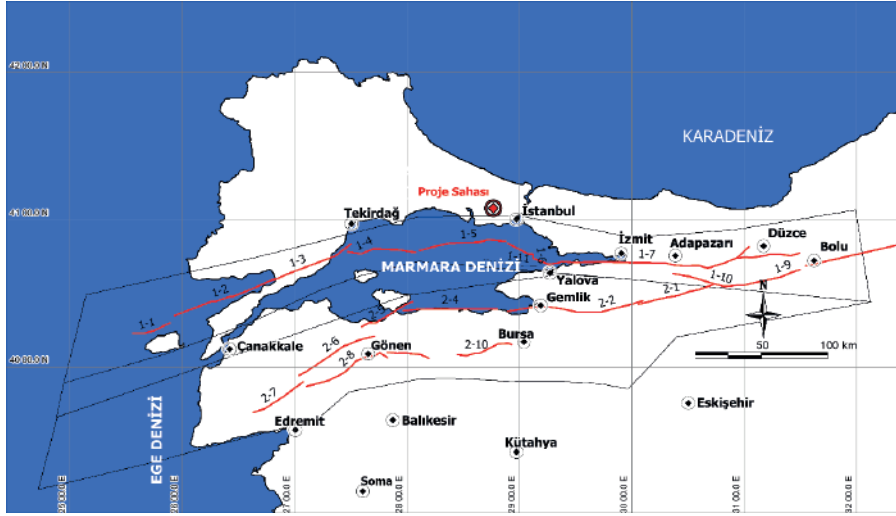
Olasılıksal sismik tehlike analizlerinde sıklıkla kullanılan Poisson modelinin gerektirdiği bağımsızlık koşulunu sağlamak için Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığına ait veri tabanından elde edilen ve Ocak 1900-Ekim 2020 yılları arasını temsil eden katalog, Gardner ve Knopoff (1974) tarafından önerilen zaman ve uzaklık pencereleri kullanılarak kümesizleştirilmiştir. Etkili kaynak zonları içerisinde  $M_w > 6.0$  olan depremlerin çizgisel kaynak üzerinde,  $M_{\min} \leq M_w \leq 6.0$  arasındaki depremlerin ise alan kaynak içinde oluşacağı kabulü ile analizler gerçekleştirilmiştir. Alan kaynaklar üzerinde yer alan depremler kullanılarak sismik aktivitenin bir göstergesi olan  $\square$  ve  $\nu M_{\min}$  hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Alan kaynaklardaki magnitüd-tekerrür ilişkisi oluşturulurken  $M_{\max}$  değeri ile kesilmiş üstel dağılım fonksiyonu kullanılmıştır (McGuire, 2004). Çizgisel (fay segmenti) kaynak modeli için Schwarts ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli kullanılmıştır.

Maksimum magnitüd değerlerinin hesabında söz konusu bölge için geçerli olan deprem kataloğu ve fay uzunlukları dikkate alınmış, fay uzunlukları Wells ve Coppersmith (1994) ampirik denklemleri kullanılarak deprem magnitüdü ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen deprem magnitüdü literatür ile de mukayese edilerek kullanılmıştır. Minimum deprem magnitüdü çizgisel kaynak için  $M_{\min} = 6.0$  olarak kabul edilmiştir.

*Tablo 2. Sismik Tehlike analizlerinde kullanılacak deprem kaynak parametreleri*

Kaynak No	Tip		Kayma hızı (mm/yıl)	$V_{M\min}$	$M_{\min}$	$M_{\max}$
1-1	Doğrultu Atımlı	--	20	--	6.0	6.8
1-2	Doğrultu Atımlı	--	20	--	6.0	7.3
1-3	Doğrultu Atımlı	--	19	--	6.0	7.2
1-4	Doğrultu Atımlı	--	18	--	6.0	7.1
1-5	Doğrultu Atımlı	--	18	--	6.0	7.2
1-6	Doğrultu Atımlı	--	14	--	6.0	7.1
1-7	Doğrultu Atımlı	--	20	--	6.0	7.5
1-8	Doğrultu Atımlı	--	15	--	6.0	7.1
1-9	Doğrultu Atımlı	--	10	--	6.0	6.9
1-10	Doğrultu Atımlı	--	10	--	6.0	7.2
1-11	Doğrultu Atımlı	--	3	--	6.0	6.9
2-1	Doğrultu Atımlı	--	5	--	6.0	7.2
2-2	Doğrultu Atımlı	--	4	--	6.0	7.2
2-3	Doğrultu Atımlı	--	4	--	6.0	7.0
2-4	Doğrultu Atımlı	--	3	--	6.0	7.2
2-5	Doğrultu Atımlı	--	3	--	6.0	7.1
2-6	Doğrultu Atımlı	--	2	--	6.0	7.2
2-7	Doğrultu Atımlı	--	2	--	6.0	7.1
2-8	Doğrultu Atımlı	--	2	--	6.0	7.2
2-9	Doğrultu Atımlı	--	3	--	6.0	6.9
2-10	Doğrultu Atımlı	--	3.5	--	6.0	7.1
Zon 1 (Alansal)	Doğrultu Atımlı	1.77	--	1.969	4.0	6.0
Zon 2 (Alansal)	Doğrultu Atımlı	1.98	--	1.772	4.0	6.0

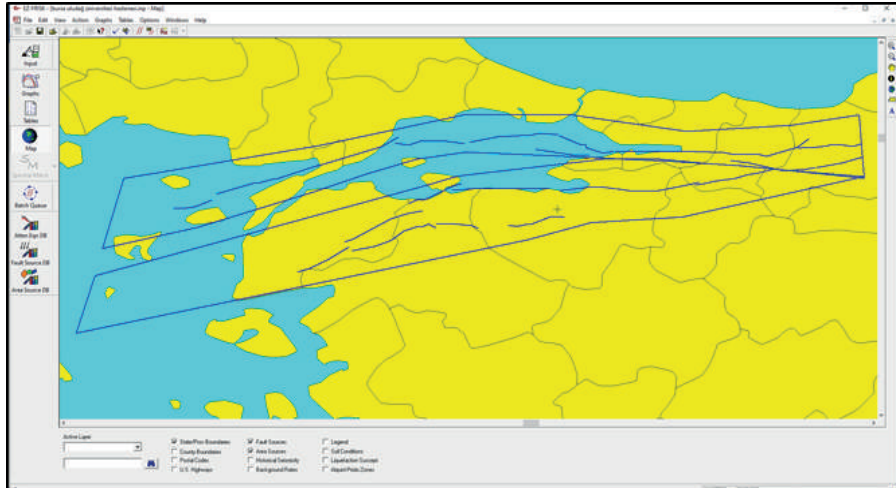




Şekil 4. Sismik Kaynak Bölgelemesi

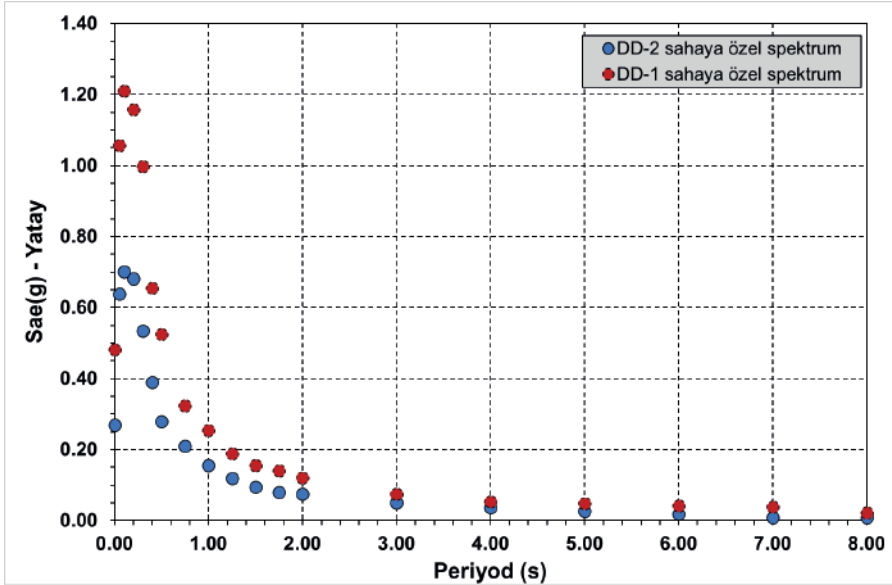
## 4.2 Sismik Tehlike Hesapları

Sismik kaynakların Şekil 4 'de verilen coğrafi konumları ve Tablo 2'de verilen kaynak deprem parametreleri EZ-FRISK yazılımı ile modellenmiştir (Şekil 5). Tehlike hesapları için çizgisel ve alansal sismik kaynaklar eşit ağırlıkta dikkate alınmıştır.

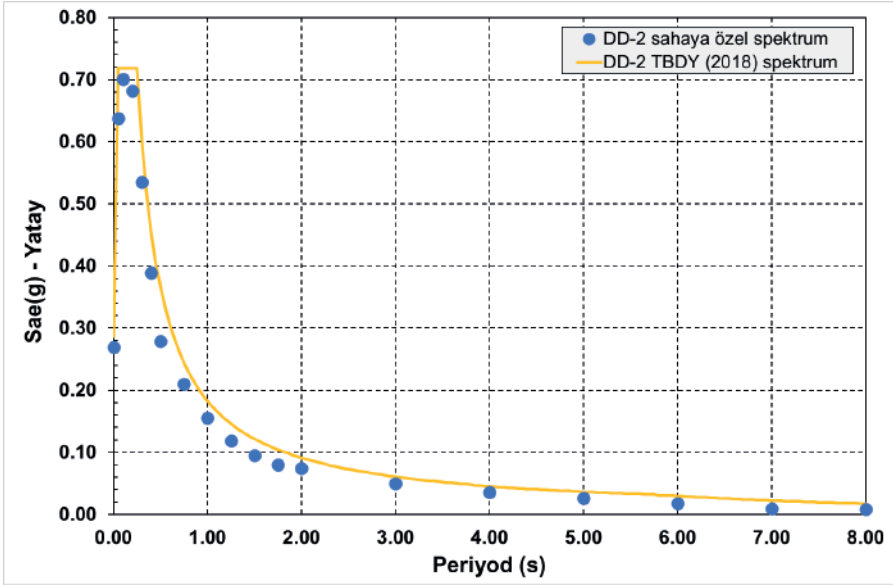


Şekil 5. Sismik kaynakların modellenmesi

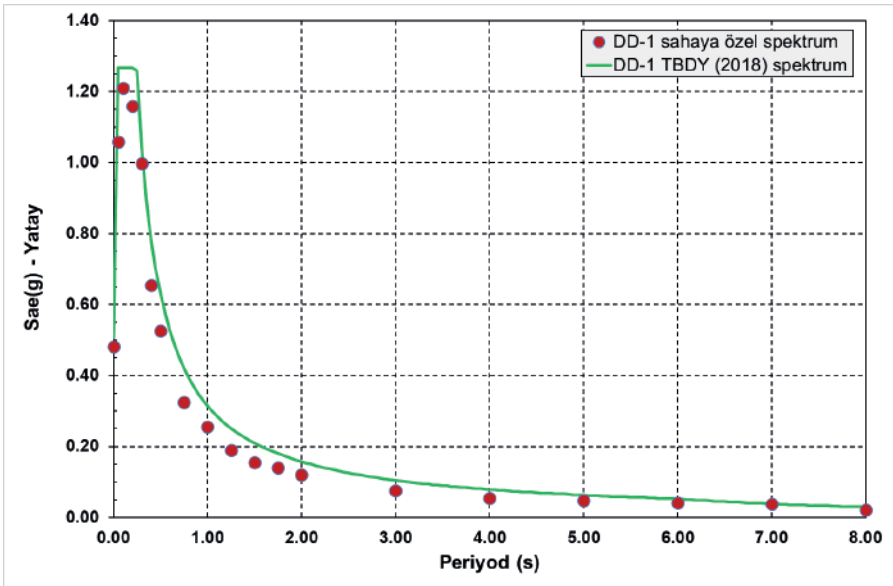
Olasılıksal deprem tehlike analizleri için sismik saha koşulları modellenirken, ortalama  $V_{s,30}$  değeri (1060 m/s) ve Yerel Zemin Sınıfı (ZB) dikkate alınmıştır. Boore vd. (1997), Campbell (1997) ile Sadigh vd. (1997) tarafından önerilen tahmin denklemleri sırasıyla, 0.25, 0.25 ve 0.50 ağırlıkları ile kullanılmıştır. İki farklı yer hareketi seviyesi için eş tehlike spektrumu oluşturulmuştur (Şekil 6). DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyeleri sırasıyla 50 yılda %2 ve 50 yılda %10 olasılıklı seviyeyi ifade etmektedir. Elde edilen spektrumlar, TBDY (2018) tarafından önerilen spektrumlar ile mukayese edilmiştir (Şekil 7-8). Mukayesenin genel değerlendirmesine Sonuçlar ve Tartışma bölümünde yer verilmiştir.



Şekil 6. Sahaya özel deprem tehlike analizine dayalı yatay ivme spektrumları



Şekil 7. DD-2 yer hareketi seviyesi için mukayese



Şekil 8. DD-1 yer hareketi seviyesi için mukayese

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sahaya özel deprem tehlike analizi sonrasında elde sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- DD-2 yer hareketi seviyesi için elde edilen sahaya özel spektrum ordinatları aynı yer hareketi seviyesi için TBDY (2018)'e göre belirlenmiş spektrum ordinatlarından küçüktür. Özellikle 0.40s-2.0s periyod aralığı için ordinatlar arası farklar çok daha büyüktür. Benzer değerlendirmeyi DD-1 yer hareketi seviyesi için de yapmak mümkündür. Doğal periyodu bu aralık içerisine giren yapılar için ivme değerleri arasındaki farklar ihmal edilebilecek düzeyde değildir.
- Elde edilen sonuçlar ve yönetmelik esasları birlikte değerlendirildiğinde tasarım spektrumu olarak TBDY (2018)'e göre belirlenen spektrumun alınması gerektiği anlaşılmaktadır.
- İlgili sahada inşa edilecek bir mühendislik yapısının doğrusal olmayan dinamik analizleri için kullanılacak yer hareketi kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesinde yönetmelik spektrumun kullanılması uygun olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma için geoteknik verileri paylaşan Avrasyam Mühendislik Mimarlık İnşaat San. Ve Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- Abrahamson, Norman A. 2000. State of the practice of seismic hazard evaluation, Paper presented at the ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, November 2000.
- Akkar, S., Azak, T.E., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu, M.B., Duman, T., Ergintav, S., Kadirioglu, F.T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal, R.F., Kılıç, T., Özalp, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakut, A., Yılmaz, M.T., Zülfikar, Ö., 2014. Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi (UDAP – Ç – 13-06). Ankara: Ulusal Deprem Araştırma Programı.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E., 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A summary of recent work, *Seis. Res. Lett.*, 68, 128-153.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey-a synthesis, *Geodinamica Acta*, 14, 3-30.
- Campbell KW., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismologic Res Lett* ,68.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Emre Ö., v.d. (2018). Active fault database of Turkey. *Bull Earthquake Eng*, (2018-16), 3229–3275.
- Erdik, M., Biro, Y.A., Onur, T., Sesetyan, K. and Birgoren, G., 1999. Assessment of earthquake hazard in Turkey and neighboring regions, *Annali Di Geofisica*, Vol. 42, No. 6, 1125-1138.
- Gardner, J.K. ve Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America* 64, 1363–1367.
- Gupta, L. D., 2002. The state of the art in seismic hazard analysis. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 39, 311–346. Paper No. 428.
- Kadirioglu F.T. ve Kartal R.C., 2016. The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900–2012), *Turkish Journal of Earth Sciences (TÜBİTAK)*, 2016(25), 300-310. (doi:10.3906/yer-1511-7)
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 653 p.
- McGuire, R.K., 2001. Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dyn Earthq Eng* 21(5):377–384.

- McGuire, R. K., 2004. Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute Monograph, MNO-10, CA, 221p.
- MTA, 2011. 25 Temmuz 2011 Marmara Denizi Bilgi Notu, Jeoloji Etütleri Dairesi Yer Dinamikleri Araştırma ve Değerlendirme Koordinatörlüğü Aktif Tektonik Araştırma Birimi, 26 Temmuz.
- Sadigh K, Chang CY, Egan JA, Makdisi F, Youngs RR. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seismological Research Letters*. ;68: 180–189.
- Schwartz, D. P., and Coppersmith, K. J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault, *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 5681-5698.
- Seyrek, E., Tosun, H. 2011. Deterministic approach to the seismic hazard of dam sites in Kizilirmak basin, Turkey, *Natural Hazards* 59(2), pp.787-800.
- Seyrek, E., Topcu, S. 2022. Prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams using gene expression programming. *Geomechanics and Engineering*, 31(6), 637-651.
- Şeşetyan, K., Demircioğlu, M.B., Akinci, A., 2019. Evaluation of the seismic hazard in the Marmara Region (Turkey) based on updated databases, *Geosciences*, 9, 489, 35 p.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- Tosun H, Zorluer I, Orhan A, Seyrek E, Savaş H, Türköz M. 2007. Seismic hazard and total risk analyses for large dams in Euphrates basin, Turkey. *Engineering Geology*, 89(1-2):155-170.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, 974-1002.



# Atık Lastik Ürünlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı Üzerine Bir Derleme Çalışması

Yaşar Vitoşoğlu<sup>1</sup>

Tayfun Şengül<sup>2</sup>

## Özet

Biyolojik olarak parçalanmadıklarından dolayı sayısı sürekli olarak artan atık lastikler ve bunların uygunsuz yönetimi küresel anlamda büyük bir çevre sorunudur. Çöplüklerde ve stok alanlarında depolanan atık lastikler, çevreye zehirli kimyasal maddeler sızdırırlar, sivrisinekler ve fareler için üreme alanı oluşturarak çeşitli hastalıklara yol açarlar ve söndürülmesi zor olan yangınların çıkmasını körüklerler. Dolayısıyla, bunların zemin, beton ve asfaltın modifikasyonunda kullanılması, bertarafı için iyi bir seçenek olabilir. Bu çalışma, çeşitli araştırmacılar tarafından granül kauçuk, lastik parlatma ürünleri, lastik parçaları, lastik yongaları ve toz kauçuk gibi farklı atık lastik formlarının çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımını araştırmak için gerçekleştirilen yayınlanmış çalışmaları derlemekte ve incelemektedir. Dolayısıyla, bu atıkların zemin stabilizasyonu, çimento ve asfalt betonlarının üretimi, karayolu ve demiryollarının inşası ve bakımı, akışkan dolgu üretimi ve sismik izolasyon sistemleri gibi farklı alanlarda değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların bazılarında bahsedilmektedir. Çalışma sonuçları, atık lastik ürünlerinin çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmasının ekonomik bir çözüm olabileceğini ve bunların bertaraf edilmesi için de iyi bir seçenek sunabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu konulara ilişkin geçmiş araştırmacılar tarafından yapılan yorumların pekiştirilmesi için daha fazla araştırma ve inceleme ihtiyacı olduğu düşünülmektedir.

- 1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5543-9673.
- 2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3473-7724.



## 1. Giriş

Son yıllarda, otomotiv endüstrisi nüfusun önemli ölçüde artması nedeniyle hızlı bir şekilde büyümüş ve lastik üretimi de o ölçüde artmıştır. Bu durum, dünya çapında büyük miktarlarda atık lastik üretimine sebep olmaktadır. 2010 yılı itibariyle her yıl yaklaşık bir milyar lastiğin kullanım ömrünün sonuna ulaştığı, 2030 yılına kadar ise beş milyar lastiğin düzenli olarak atılacağı tahmin edilmektedir (Pacheco-Torgal ve diğ. 2012). Çöplüklerde ve stok alanlarında depolanan atık lastiklerin sayısı hızla artmaktadır. Atık lastiklerin sayısının artması ve bunların geri dönüşümünde yaşanan zorluklar, bu malzemenin yönetimi konusunda artan bir endişe yaratmaktadır.

Atık lastiklerin artan sayısı ve uygunsuz yönetimi toplum için çeşitli risklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Dünyanın birçok yerinde atık lastik stokları bireyler için sağlık sorunlarına neden olmakta ve çevreye tehditler oluşturmaktadır. Dökülen atık lastikler, %80 oranında boşluk içeren sıkıştırılamaz bir madde olduklarından çöplüklerdeki arazinin önemli bir kısmını işgal etmektedir. Ayrıca, stoklandıkları alanları görsel olarak bozmaktadır. Stoklanmış lastikler, su geçirmez olduklarından büyük hacimdeki suyu uzun süre içerisinde tutabilmektedir. Bu durgun su, çeşitli hastalıklara yol açan sivrisineklerin ve farelerin üremesi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Ayrıca, stoklanmış lastikler kolayca tutuşabildiklerinden çevreye ciddi zararlar veren yangınların çıkmasına sebep olarak havayı kirletmektedir. Sahajwalla (2018) çalışmasında, dünya genelinde her yıl %7-8 oranında lastiğin geri dönüştürüldüğünü, %10-15 oranında lastiğin enerji üretimi için yakıldığını ve kalan %75-80 oranında lastiğin ise stoklandığını veya çöplüklere atıldığını bildirmiştir.

Stoklanmış lastiklerin açık alanda yakılması birçok ciddi sağlık sorununu beraberinde getirmektedir. Azot oksit, kükürt dioksit, karbon monoksit ve diğer hidrokarbonlar gibi tehlikeli gazların açık havaya salınması, gözlerde tahrişe, ciltte kaşıntıya, moral bozukluğuna ve hatta kansere yol açabilmektedir. Lastiklerin yanma sırasında parçalanması, sızarak yer altı sularını kirletebilen arsenik, çinko, krom ve nikel gibi zararlı maddelerin oluşmasına yol açmaktadır. Zararlı etkisi nedeniyle, Kuzey Amerika ve Avrupa'daki birçok ülke, aşırı stokları ve depolama işlemlerini önlemek için bu atık ürünle ilgili katı kurallar ve düzenlemeler koymuş olup geri dönüştürülmesini zorunlu kılmıştır. Bu yaptırımların uygulanmasıyla araştırmacılara atık lastikler için sürdürülebilir önlemleri ve alternatif kullanımları keşfetme fırsatı sunulmuştur. İnşaat mühendisliğinde atık lastiklerin kullanım olanakları 30 yıldan fazla bir süredir araştırılmaktadır (Oikonomou ve Mavridou, 2009). Birtakım doğal kaynakların inşaat sektörü tarafından tüketilerek azaltılması,

yenilenemeyen malzemelere alternatif olarak bu sektörde hurda lastikler gibi geri dönüştürülebilir atık ürünlerin kullanımını teşvik etme yönündeki araştırma çabalarını da hızlandırmıştır (ASTM, 1998).

Atık lastiklerin granül kauçuk, lastik parlatma ürünleri, lastik parçaları, lastik yongaları, toz kauçuk ve karbon ürünleri gibi çeşitli nihai ürünlere dönüştürülmesi, bunların bertaraf edilmesi için başvurulan yollardan bazılarıdır. Hacimlerinin azalmasının bir sonucu olarak, bu nihai ürünler bütün lastiğe kıyasla çok daha az yer kaplamakta ve dolayısıyla taşıma maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. İşleme maliyetlerine rağmen, bu nihai ürünler özellikle geoteknik mühendisliği uygulamaları başta olmak üzere pek çok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak değerlendirilmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri, bu ürünlerin düşük yoğunluk, düşük zemin basıncı, iyi yalıtım özellikleri, iyi drenaj kabiliyeti, uzun vadeli dayanıklılık ve yüksek sıkıştırılabilirlik gibi önemli olan birçok benzersiz özelliği sağlamalarıdır (Mashiri ve diğ., 2015). Ayrıca, bu nihai ürünlerin farklı endüstrilerde enerji üretimi için de kullanılmaları, son yıllarda önemli ölçüde artmıştır.

Bu çalışmanın odak noktası, atık lastik ürünlerinin çok çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması ile ilgili yürütülen güncel araştırmaları inceleyerek çevresel, ekonomik ve teknik faktörleri vurgulamaktır.

## 2. Beton Uygulamaları

Birçok araştırmacı, farklı amaçlar doğrultusunda atık lastiklerin beton üretiminde kullanılabilirliğini incelemiştir (Topcu ve Demir, 2009). Bu çalışmalarda, kauçuk katkılı betonun donma-çözülme ve klorür direnci, betonun basınç dayanımı ile ses bariyeri olarak kullanılabilirliği üzerine odaklanılmıştır.

### 2.1. Betonun Donma/Çözülme Direnci

Donma ve çözülmeye maruz kalan beton periyodik olarak genişleme ve büzülme uğrar. Bu durum, beton karışımı içinde çekme dayanımını aşan içsel gerilmelerin oluşmasına yol açar. Sonuç olarak, kopma, betonun çatlaması veya parçalanması şeklinde meydana gelir. Hurda lastiklerin geri dönüşümü, kauçuk ilave edilmiş beton üretimi için alternatif bir ince agrega kaynağı sağlar. Bu da betonun donma/çözülme direncinde önemli bir artış ile doğal kum ve çakıl kaynaklarını koruyarak çevrenin korunmasına katkıda bulunacaktır (Topcu ve Demir, 2007).

Han ve diğ. (2024), kauçuk ilave edilmiş betonun donma direncini araştırmıştır. Hızlı donma-çözülme döngüleri sırasında %1.0-%5.0 arasında

değişen oranlarda atık lastik kırıntı kauçuğu ilave edilmiş betonun donma-çözülme döngüsüne tabi tutulan numune için kütle kaybı oranı ( $W_n$ ), bağıl dinamik elastik modülü ( $P_n$ ), dinamik elastik modülü ( $E_{dm}$ ) ve dinamik elastik modülünün bağıl değeri ( $XE_{dm}$ ) gibi parametrelerin deneysel olarak belirlenip analiz edilmesi ile kırıntı kauçuğun betonun donma direncini etkilediği mekanizmalar açıklanmıştır. Kauçuk içeriği arttıkça durabilitede artış olduğu, buna karşın %3.0'ı aştığında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. İlave olarak, kırıntı kauçuğunun ön işlenmesi donma direncini daha da artırmıştır. %3.0 kauçuk içeren beton numunelerin dayanım ömrü 275 donma-çözülme çevrimine ulaşmıştır. %2.0-4.0 oranında kırıntı kauçuğu içeren beton, kırıntı kauçuğun ön işlenmesiyle en az 25 çevrimlik bir artış göstermiş olup bu artış işlenmemiş kırıntı kauçuğu içeren betona kıyasla  $P_n$ 'de %5.9-17.9 oranında bir artış anlamına gelmektedir. Kırıntı kauçuğun eklenmesi betonun mezoskopik gözenek yapısını ve beton matris ara yüzünün bağlanma performansını değiştirmiş, dolayısıyla donma direncini ve hasar durumunu etkilemiştir. Ayrıca kauçuk ilave edilmiş betonun donma direncini değerlendirmede kullanılan dayanıklılık faktörünün belirlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

Sun ve diğ. (2024), tarafından yürütülen bir çalışmada, ince agregayı ikame etmek için farklı boyut, içerik ve ön işlem yöntemlerine sahip hurda lastik kauçuk parçacıkları eklenerek toplam 25 grup kauçuk ilave edilmiş beton üretilmiş ve donma/çözülme döngüleri sırasında basınç dayanımları hem makro hem de mezo perspektiflerden incelenmiştir. Sonuçlar, donma/çözülme döngüleri sırasında kauçuk parçacıklarının varlığıyla beton dayanımındaki ve ağırlığındaki azalmanın önemli ölçüde sınırlandığını göstermiştir. Daha küçük parçacık boyutlarına sahip kauçuk ince agregası betonun donma direncini daha önemli ölçüde artırmış ve 1.0-2.0 mm kauçuk parçacıklarına sahip betonun  $F_{100}$  değeri, kauçuk içeriğinin %0.0'dan %5.6'ya çıkarılmasıyla %76.6'dan %86.5'e çıkmıştır. Kauçuk ince agregasının donma/çözülme döngüleri sırasında beton basınç dayanımı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu temelde, donma/çözülme döngülerinde kauçuk ilave edilmiş betonun basınç dayanımı için bir tahmin modeli önerilmiş ve kauçuk parçacıklarının parçacık boyutu, içeriği ve ön işleminin etkileri dikkate alınmıştır. Hesaplanan sonuçlar hem bu çalışmadaki hem de ilgili diğer çalışmalardaki test sonuçlarıyla iyi bir şekilde örtüşmüş ve bu da modelin soğuk ortamlarda kauçuk ilave edilmiş betonun tasarımı ve mühendislik uygulaması için iyi bir referans sağlayabileceğini göstermiştir.

## 2.2. Klorür Dirençli (Asit Dirençli) Beton Karışımı

Beton ve donatı tasarım ömrü boyunca korozyona karşı hassas olduğundan betonun korozyona karşı dirençli olması istenir. Korozyon, periyodik ıslanma ve klorürlere maruz kalma durumunda şiddetlenir. Ayrıca, beton sülfürik asit saldırısı nedeniyle çok ciddi şekilde hasar görebilir. Dolayısıyla, bu faktörlere karşı direnç, bir yapının uzun ömürlü olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Oikonomou ve Mavridou (2009), çimento harçlarında kumun kısmi bir ikamesi olarak lastik kauçuk granüllerinin ilave edilmesini deneysel olarak araştırdıkları çalışmada, kauçuk karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenirken, klorür iyon penetrasyonuna karşı direnç ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, mekanik özelliklerde azalma olurken, klorür iyon penetrasyon direncinde artış olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, kumun kısmi bir ikamesi olarak lastik kauçuk granülleriyle modifiye edilmiş çimento bazlı harç ve beton ürünlerinin, mekanik özelliklerinin birinci derecede öneme sahip olmadığı ancak klorür iyon penetrasyonuna karşı yüksek direncin talep edildiği uygulamalarda kullanılabilceği anlamına gelmektedir.

Azevedo ve diğ. (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, kumun kısmen lastik kauçuğu atıklarıyla ikame edilmesiyle yüksek performanslı betonun özellikleri ve dayanıklılığında meydana gelen değişiklikler hakkında sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışmada, uçucu kül ve metakaolin, kısmi çimento yerine kullanılmış, dayanıklılık performansı, kılcal su emilimi ve sülfürik asit saldırısına karşı direnç yoluyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ve metakaolin arasında kauçuk atığının kullanılmasıyla ilişkili mukavemet kaybını en aza indiren bir etkinin varlığını göstermektedir. Ayrıca %15'e kadar kauçuk atığı kullanmanın ve yine de asit saldırısına karşı yüksek bir direnç sağlamanın mümkün olduğunu göstermektedir. %45 uçucu kül ve %15 metakaolin içeren karışımların, kauçuk atık içeriğinden bağımsız olarak referans karışıma göre sülfürik asit saldırısına karşı çok daha yüksek bir direnç gösterdiği belirlenmiştir.

Onuaguluchi ve Panesar (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, silika dumanı kauçuk kırıntısı içeriğiyle birlikte bağlayıcı madde olarak kullanıldığında beton mukavemet kaybının ve klorür penetrasyonuna karşı direncin en aza indirilmesinde açık bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bu tür beton karışımları, korozyona neden olan klorürler nedeniyle hızlandırılmış bozulmaya daha çok maruz kalan deniz ortamı yapıları için oldukça uygun olmaktadır.

Sinkhonde ve diğ. (2023), kaba agrega yerine lastik kauçuğun ve çimento yerine atık kil tuğla tozunun kullanıldığı, sülfürik aside maruz bırakılmış ve suda kürlenmiş beton karışımlarının özelliklerini karşılaştırmak için bir araştırma yapmıştır. 20, 25 ve 30 MPa beton sınıflarındaki küp ve silindirik numuneler, 27 günlük nemli kürlenmenin ardından 90 güne kadar %5 sülfürik asit çözeltisine daldırılmıştır. Diğer numuneler karşılaştırma amacıyla suda kürlenmiştir. Sülfürik aside maruz bırakılan tüm numunelerin, suda kürlenene ilgili numunelere göre 90 gün sonra basınç dayanımlarının %57'sinden fazlasını kaybettiği belirlenmiştir. Buna karşılık, sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin yarmada çekme dayanımı kayıpları, suda kürlenene kıyasla hiçbir zaman %43.1'den fazla olmamıştır. Tüm koşullarda, %5 atık kil tuğla tozu içeren beton karışımlarının, geleneksel beton karışımlarına kıyasla basınç ve yarmada çekme dayanımlarında hafif iyileşmeler görülmüştür. Numuneler görsel olarak kontrol edildiğinde, suda kürlenene numunelere kıyasla sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin dış katmanlarında pullu veya beyaz maddelerin biriktiği gözlenmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, basınç dayanımlarına kıyasla sülfürik aside maruz bırakılma sonucunda ciddi şekilde etkilenmediği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kauçuk ilave edilmiş betona atık kil tuğla tozunun eklenmesi, kauçuk ilave edilmiş betonun dayanım kayıplarını en aza indirmede etkili bir yöntem olarak sunulmuştur.

Lastik kauçuğu ile diğer beton bileşenleri arasındaki bağın azalması, kauçuk ilave edilmiş betonun ilave edilmemiş betonla karşılaştırıldığında mekanik özelliklerinin kötüleştiğini göstermektedir. Buna karşın kauçuk ilave edilmiş betonun asit direncini artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç asit saldırısını destekleyen durumlarda kauçuk ilave edilmiş betonların dayanım özelliklerinde bir miktar kayıp olmasına karşın tercih edilebileceği anlamına gelmektedir.

### **2.3. Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı**

Köprüler, hidrolik yapılar ve yüksek katlı binalar gibi birçok yapıda yüksek dayanımlı betona talebin her geçen gün artması bu konuda yapılan araştırmalara olan ilgiyi artırmaktadır.

Atık kauçuğun geri dönüştürülmesi ve betonda doğal agrega yerine kullanılması, gelecek vaat eden çevre dostu bir çözümdür. Abdelmonem ve diğ. (2019), geri dönüştürülmüş kauçuğun yüksek dayanımlı betona eklenmesinin etkisine ilişkin yürüttükleri araştırmada, kauçuğun ince agreganın kısmen yerini aldığı yüksek dayanımlı betonun performansını değerlendirmiştir. Kırıntı kauçuğun, hacimce %0, %10, %20 ve %30'u oranlarında ince

agreganın kısmen yerini aldığı dört farklı karışım üretilmiştir. Çökme (slump), basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, aşınma direnci, kauçuk ilave edilmiş beton üzerindeki deniz suyunun etkisi, darbe direnci ve mikroyapı analizi değerlendirilmiştir. Kauçuk ilave edilmiş beton karışımları, kontrol karışımına göre iyi işlenebilirlik ve biraz daha düşük yoğunluk göstermiştir. Kauçuk içeriğinin %30'a kadar artırılmasıyla basınç, çekme ve eğilme dayanımında neredeyse %50'ye varan sistematik bir azalma görülmüştür. Kauçuk içeriğinin artırılmasıyla daha düşük aşınma direnci elde edilmiştir. Ayrıca, kauçuk ilave edilmiş beton karışımları deniz suyuyla iyi performans gösterirken kontrol karışımına kıyasla %83'e kadar daha yüksek darbe direnci sağlamıştır.

Moustafa ve ElGawady (2015), yüksek dayanımlı betonda hurda lastik kullanımının hem mekanik hem de dinamik özellikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, iki farklı kauçuk ilave edilmiş beton karışımı tasarlanmıştır. Çökmenin (slump) değişken olduğu deney grubu kauçuğun kumun yerine kullanılmasının betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini belirlemek, çökmenin sabit olduğu diğer deney grubu ise işlenebilirliği aynı tutmak için tasarlanmıştır. Betonun basınç dayanımı, çökmenin sabit olduğu deney grubu ile karşılaştırıldığında, çökmenin değişken olduğu deneylerde daha yüksek dayanım kaybı meydana gelerek kauçuk kullanımıyla azaltılmıştır. Bu çalışmada viskoz sönümleme oranı, basit mesnetli kirişler üzerinde darbeli çekişle yapılan serbest titreşim testleri kullanılarak ayrıca araştırılmıştır. Kumun %30'a kadar kauçukla değiştirilmesi, çökmenin sabit olduğu durum kirişlerinde daha fazla olmak üzere sönümlemede bir artışa neden olmuştur. Döngüsel yükleme altındaki silindirler için histerezis sönümlemesi de araştırılmış ve ortalama histerezis sönümlemesinin arttığı bulunmuştur.

Sofi (2017), %0-12.5 kauçuk kırıntısı içeren numuneler için 90 günde 60 MPa basınç dayanımına ulaşıldığını rapor etmiştir. Yüksek dayanımlı betonda kauçuk kırıntısının artan oranlarında, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları daha ciddi şekilde etkilenebilmektedir. %12.5 oranında kauçuk kırıntısı eklendiğinde, 7 ve 28 günlük dayanımlar sırasıyla 44.5 MPa ve 54.8 MPa'ya düşmüştür. Bu değerler, %0 katkı ile elde edilen basınç dayanımlarının %67.9'unu ve %77.2'sini temsil etmektedir. Daha ileri deneyler, kontrol karışımlarının gevrek kırılmasını ve kauçuk ilave edilmiş numunelerin gevrek olmayan kırılmasını göstermiş ve kauçuk kırıntısı ince agrega yerine kısmen ikame edildiğinde sünek yapıda bir artış olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımına benzer şekilde, eğilmede çekme dayanımının da kauçuk içeriği arttıkça azaldığı görülmüştür. Kauçuk kırıntısı ikamesinin eğilmede çekme sonuçları üzerindeki etkisi daha az şiddetli olup 7 ve 28 günde %12.5 kauçuk kırıntısı ilave edilmiş numuneler sırasıyla 5.2 MPa ve

6.6 MPa dayanım değeri vermiştir. Bu değerlerin, %0 ikame numunelerine kıyasla eğilme çekme dayanımının %83.9 ve %84.7'sine karşılık geldiği belirtilmiştir.

## **2.4. Ses Bariyerleri / Sönümleyiciler**

Kentsel alanlarda gürültü kirliliğinin azaltılmasını sağlamak için ses bariyerleri kullanılmaktadır. Çok büyük miktarlarda ses bariyerlerine ihtiyaç duyulması bu bariyerlerin yapımına yönelik maliyetleri azaltmak için ses bariyerlerinde atık kauçuk beton karışımlarının kullanılmasına yönelik araştırmaların yapılmasını teşvik etmektedir.

Holmes ve diğ. (2014) tarafından yürütülen bir çalışmada, düşük (63, 125, 250 ve 500 Hz) ve yüksek (1000, 2000, 4000 ve 5000 Hz) frekanslarda ses emilimi ve yalıtımı açısından küçük ölçekli kırıntı kauçuk eklenmiş beton panellerin akustik performansı araştırılmıştır. Donma ve ısıtma işlemlerinden sonra dört farklı derecede kırıntı kauçuğun farklı seviyelerde (%7.5 ve %15) ince agrega yerine ikame edilmesi suretiyle akustik testler gerçekleştirilmiştir.

Kauçuk eklenmiş beton panellerin özellikle daha yüksek oranlarda (%15) ve kırıntı kauçuk sınıflarında ses emilimi açısından iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Donma ve ısıtmanın etkilerinin yalıtım özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, tüm betonlar için yalıtım performansının yüksek frekanslarda iyileştiği belirlenmiştir.

Ayrıca kauçuk eklenmiş beton panellerinin yüksek katlı kentsel yapıların etrafındaki sesi emmek için harici bir bina kaplaması olarak potansiyeli olduğu ancak sahada tam ölçekli testlerin yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu yöntem atık lastiklerin devam eden sorununa çevre dostu bir çözüm olabilir.

## **3. Geoteknik Uygulamalar**

Atık kauçuk gibi hafif malzemeler, birçok arzu edilen özelliğe sahip olduklarından geoteknik uygulamalarda kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

### **3.1. Zemin Stabilizasyonu**

Son yıllarda, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından, çeşitli atık maddelerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İstenilen mühendislik özelliklerine sahip olmayan zeminlerin farklı atıklar kullanılarak iyileştirilmesi ekonomik bir çözüm sunarken depolama maliyetleri çok yüksek ve çevre açısından zararlı etkileri



olan bu atıkların bu yöntemle bertaraf edilmesi de çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça önem arz etmektedir.

Zeminlerde lastik türevi ürünlerin kullanımı son zamanlarda çok sayıda çalışmanın konusu olmuş olup kauçuk-zemin karışımlarının davranışsal özelliklerinin standart zeminlerle karşılaştırılmasına büyük önem verilmektedir (Topçu ve Seyrek, 2022).

Gücek ve diğ. (2024), yol üst yapılarının tasarımı ve inşası için temel parametreleri belirlemek ve taban zeminini hibrit atık malzemelerle iyileştirmenin yol inşaatının sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Mekanik ve fiziksel özellikler, optimum karışımları belirlemek için ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, atık cam tozu ve kauçuk lastik kombinasyonu için en etkili karışımın, zeminin kuru ağırlığına göre %20 cam tozu ve %3 kauçuk lastik içerdiğini göstermiştir. Atık cam tozu ve lignin (odun özü) kombinasyonu için optimum karışım, zeminin kuru ağırlığına göre %15 cam tozu ve %15 ligninden oluşmuştur. Bu sonuçlar, yol inşaatı projelerinde zemin stabilizasyonu için atık malzemelerin sürdürülebilir kullanımına ilişkin değerli bilgiler sağlamıştır.

Al-Neami (2018), zemin stabilizasyonunda kullanılan geleneksel katkıları yerine farklı yüzdelerde atık lastik parçaları kullanarak kumlu zemini iyileştirmek için yürüttüğü çalışmada, zemin ve lastik parçalarından oluşan kompozit numunelerin bazı geoteknik özelliklerini incelemiştir. Kumun kayma mukavemetindeki artış, hurda lastik parçaları kullanılarak kumun etkili bir şekilde stabilize edilebileceğini doğrulamıştır. Düşük birim ağırlığından dolayı kumdaki lastik parçaları içeriğinin artmasıyla, özgül ağırlıkta ve maksimum kuru yoğunlukta önemli bir azalma ve optimum nem içeriğinde küçük bir azalma görülmüştür. CBR testinden elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, lastik parçalarıyla stabilize edilmiş kumun CBR değerinin, saf kuma kıyasla yaklaşık 1.6 kat daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç kum parçacıkları ile lastik parçaları arasındaki fiziksel bağların artması nedeniyle işlenmiş kumun yük taşıma kapasitesinin arttığı anlamına gelmektedir.

Priyadarshee ve diğ. (2014), farklı lastik kırıntısı ve uçucu kül içerikleriyle stabilize edilmiş kaolin kil zeminlerin sıkışma ve mukavemet davranışını belirlemiştir. Lastik kırıntısı ve uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin sıkışma özellikleri, uçucu kül ve lastik kırıntısı içeriğindeki artışın zeminin maksimum kuru yoğunluğunda bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, uçucu kül ve lastik kırıntısı aralığındaki artış, optimum nem içeriğinde bir artışa yol açmaktadır. Çalışmada, maksimum taşıma kapasitesine %20



uçucu kül ve %5 lastik kırıntısı oranı ile ulaşılmışından dolayı kaolin kilinin stabilizasyonu için optimum seviyeler olarak önerilmiştir.

### **3.2. Yol Üst Yapısı Malzemeleri**

Atık lastik kauçuğunun asfalt kaplamada ve yol üst yapısının diğer tabakalarında kullanılmasına yönelik çeşitli araştırmalar yürütülmekte ve başarılı sonuçlar alınmaktadır.

Tahamia ve diğ. (2019), asfalt karışımlarında dolgu maddesi olarak yüksek içerikli kırıntı kauçuk tozu kullanımını araştırmışlardır. Karışımların geleneksel dolgusu, dolgu ağırlığına göre %20, %40 ve %60 oranlarında kırıntı kauçuk tozu ile değiştirilmiş ve nem duyarlılığı, sertlik modülü, tekerlek izi performansı ve yorulma ömrü dahil olmak üzere modifiye karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, asfalt karışımına kütleme işlemi ve çok ince kırıntı kauçuk tozunun aynı anda uygulanmasının, asfalt karışımlarının bozulmalara karşı direncini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. İlave olarak, yüksek kırıntı kauçuk tozu içerikli karışımların performansının zayıflamasının bu kütleme işlemi ile iyileştirilebileceği düşünülmüştür.

Huang ve diğ. (2024), asfaltın modifikasyonu ve ikamesi için atık lastik kauçuğunu, atık yüksek yoğunluklu polietileni ve stiren-bütadien-stireni (SBS) birlikte kullandıkları çalışmalarında, yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük sıcaklık çatlak direnci, su kararlılığı, yorulma direnci ve yaşlanma direnci dahil olmak üzere çeşitli yol kaplama özellikleri üzerinde performans değerlendirmeleri yapmıştır. Sonuçlar, atık lastik kauçuğu ilavesinin karışımın elastik özelliklerini ve yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini, atık yüksek yoğunluklu polietilen ilavesinin ise yüksek sıcaklık kararlılığını ve yaşlanma direncini artırdığını göstermiştir. Uygun oranlarla tasarlanan stiren-bütadien-stiren, atık yüksek yoğunluklu polietilen, atık lastik kauçuğu asfalt karışımları üstün yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük sıcaklık çatlak direnci ve yorulma direnci sergilemiştir. Bu nedenle, bu atık malzemelerin asfalt karışımlarında kullanılmasının inşaat sektörü için sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm olduğu düşünülmektedir.

Arulrajah ve diğ. (2019), üç farklı boyutta ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında lastik türevi agregalarla karıştırılmış geri dönüştürülmüş beton agregalarının, yol üst yapısı alt temellerinin inşasında kullanımı için geoteknik uygunluklarını araştırmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregası-lastik türevi agrega karışımlarının geoteknik özellikleri dane boyutu dağılımı, pH, plastisite indisi, yabancı madde içeriği, modifiye Proctor sıkıştırma oranı, Kaliforniya taşıma oranı ve esnek deformasyonun ölçümü de dahil olmak üzere tekrarlı

yüklemeli üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregası-lastik türevi agrega karışımlarının tekrarlayan yükleme altında gelişmiş deneysel kalıcı esnek deformasyonu ve esneklik modülü, yol üst yapısı alt temel uygulamalarında uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Lastik türevi agregaların küçük bir yüzdesinin bile kullanılmasının, bu atık malzemelerin nispeten büyük bir miktarını çöplüklerden uzaklaştırıp sürdürülebilir yol üst yapısı inşaatına yönlendireceği düşünülmektedir.

### 3.3. Dolgu Malzemesi

İnşaatta kullanılan dolgu malzemesi, boşluklu malzemenin boşluklarını doldurmak ve mevcut zayıf zeminin koşullarını iyileştirmek olmak üzere iki ana amaca hizmet eder. Geleneksel dolgu malzemesi genellikle ticari kum ve çakıl ocaklarından çıkarılır ve granüler haldeki bu malzeme, güvenli zemin koşullarını sağlamak için belirli miktarda sıkıştırılır. Bazı durumlarda, geleneksel granüler dolgu malzemesi çimento, su, uçucu kül ve atık kauçuk gibi katkı maddeleriyle karıştırılarak özellikleri iyileştirilebilir.

Contreras-Marín ve diğ. (2021), atık lastiklerden elde edilen kauçuk granüllerinin istinat duvarlarında hafif dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi üzerine yürüttükleri araştırmada, kauçuk granüllerinin istinat duvarlarının arkasında dolgu malzemesi olarak büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve kum gibi geleneksel bir dolgu malzemesine göre sonuçların daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Çetin ve diğ. (2006), saf ince ve iri taneli lastik parçalarının ve bunların kohezyonlu killi zeminle karışımlarının (%10, 20, 30, 40 ve 50) hafif dolgu malzemesi olarak kullanımı üzerine deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Killi zemin ve ince ve iri lastik parçalarının killi zemin karışımları üzerinde dane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri, geçirgenlik, direkt kesme ve sıkıştırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılmış lastik parçalarının killi zeminlerle karıştırılarak dolgu malzemesi olarak kullanılmasının mümkün olduğu belirlenmiştir. %20'ye kadar iri daneli lastik parçaları ve %30'a kadar ince daneli lastik parçaları karışımlarının düşük ağırlık, düşük geçirgenlik ve yüksek mukavemetin gerekli olduğu, özellikle düşük taşıma kapasiteli ve yüksek oturma sorunları olan zayıf zeminler üzerine inşa edilecekleri otoyol dolguları, köprü ayakları ve istinat yapılarının arkasındaki dolgular gibi dolgularda yer altı su seviyelerinin üstünde kullanılabileceği belirlenmiştir. Doygun koşullar altında dolguların yüklenmesi sırasında boşluk suyu basınçlarının gelişmesini önlemek için drenajın gerekli olduğu yerlerde kullanılmaması gerektiği, ancak bu

durumlarda, kum ve çakıl gibi yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerle karıştırılarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

### **3.4. Sismik İzolasyon Sistemleri**

Sismik aktivite, özellikle tektonik plakaların kenarlarına yakın olan ülkeler için önemli bir sorundur. Depremler çok büyük yıkımlara sebep olduklarından, deprem yüklerine dayanabilen yapı bileşenleri tasarlamak, birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Genellikle kesme duvarları ve çapraz destek elemanlarından oluşan bu bileşenler, ilgili yapı kodları ve standartlarında belirtilmektedir. Bu bileşenleri tamamlayan sistemler ise, sismik izolasyon sistemleri olarak bilinmekte olup zeminde sismik aktiviteden kaynaklanan yatay hareketi stabilize ederek bunun yapı üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Sismik izolasyon sistemlerinin yüksek maliyetli olması araştırmacıları farklı alternatifler üretmeye teşvik etmektedir.

Raj ve Suppiah (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada, hurda lastik kauçuk ped yataklarla temeli izole edilmiş üç katlı bir kesme çerçevesi analiz edilmiştir. Bu yapının tepkisi, izolasyonsuz sabit bir tabanı olan aynı yapının tepkisiyle karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmış, taban izolasyonunun temel titreşim modunda çok etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve Zhang (2023), sismik izolatör olarak 90 hurda lastik pedi tasarlamış ve bir dizi basınç ve kesme deneyi yapmıştır. Deneysel sonuçlar, hurda lastik pedlerinin düşey sertliğinin şekil faktörü ve yüzey basıncının artmasıyla arttığını, lastik tipi, şekil faktörü, yüzey basıncı ve yer değiştirme genliklerinin ise yatay eşdeğer sertlik ve sönümleme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Hurda lastik pedlerinin kullanılmasıyla izole yapının tepe ivmelerinin, katlar arası kaymalarının ve kesme kuvvetinin sabit tabanlı binanın yanıtına kıyasla sırasıyla %56.6, %30.0 ve %26,6 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Ho Tsang ve diğ. (2010), altyapı koruma uygulamalarında hurda lastik parçacıklarının zemin malzemeleriyle karıştırılmasını ve titreşim emilimi için karışımların inşaat mühendisliği sistemlerinin etrafına yerleştirilmesini içeren yeni bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemin ucuz olması, altyapı koruması için pahalı kaynakların ve son teknolojinin kullanımında finansman sorunları yaşayan gelişmekte olan ülkeler için büyük faydalar sağlayabilir. Bu çalışmada enerjiyi dağıtma ve titreşimleri kontrol etme yeteneği açısından kauçuk-zemin karışımlarının etkinliğini ölçmek için geleneksel zemin-yapı etkileşimi analiz tekniklerini kullanarak, önerilen yöntemin depremde düşük ve orta yükseklikteki binaları koruma yöntemi

olarak etkinliğini ve sağlamlığını göstermek için potansiyeli olduğu sayısal modelleme ile gösterilmiştir.

### 3.5. Demiryolu Alt Balast Katmanları

Demiryolu traversleri için yatak teşkil eden balast tabakası, genellikle iri agregadan oluşur. Balast tabakası yükleri taşımak, su drenajını kolaylaştırmak ve alttaki bitki örtüsünün yüzeye çıkmasını önlemek gibi çeşitli işlevlere sahiptir. Bu tabakanın altında ise, daha küçük agregalardan oluşan ve üstteki balast tabakasına destek sağlayan alt balast tabakası yer alır.

Kauçuk lastikler üç boyutlu silindirik bir yapıya sahip olup taşıma kapasitesini artırarak ve çökmeyi azaltarak temelleri stabilize etmek için kullanılabilir. Bu nedenle, demiryolu mühendisliğinde kauçuk lastiklerle güçlendirilmiş bir kaplama tabakasının granüler tabaka formundaki balastın kalınlığını azaltmaya, hat taşıma kapasitesini iyileştirmeye ve bakım sıklığını azaltmaya yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, kauçuk lastikle güçlendirilmiş temellerin mekanizmalarına ilişkin kavramsal teoriler ve gerçek yaşam uygulamaları arasında dikkate değer bir boşluk vardır (Indraratna ve diğ., 2017).

Indraratna ve diğ., (2017), yol mühendisliğinde taşıma kapasitesinin plaka yükleme deneyleriyle yakından ilişkili olduğu düşüncesiyle yürüttükleri bir araştırmada, alt balast malzemesiyle doldurulmuş ve düşey yüke tabi tutulmuş tek bir lastik üzerinde plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu deney, lastik ile granüler ortam arasındaki etkileşimi incelemek ve ölçmek için Sonlu Elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre, kauçuk lastiğin granüler tabakanın modülünü ve nihai taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceği belirlenmiştir.

### 3.6. Tüm Lastik Dolguları

Tüm lastikler, lastik balyaları, parçalar, talaşlar ve kırıntı kauçuklar dahil olmak üzere atık lastiklerden elde edilen ürünler, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Kauçuk lastik parçaları veya kırıntıları yerine, tüm lastiklerin dolgu olarak kullanılması, tüm lastiklerin enerji ve işgücü harcanarak parçalanmasına olan gereksinimi azaltabilir. Bu sonuç inşaat mühendisliği uygulamalarında ekonomikliğin sağlamlasının yanında atık yönetimini daha kolay hale getirebilir.

Sıkıştırılmış zeminle doldurulmuş ömrünü tamamlamış tüm lastikler, önemli yük taşıma kapasitesine sahip segmental lastik kaplı zemin elemanları oluşturabilir. Bu zemin elemanları, alçak binalar, demiryolu temelleri ve

geoteknik yapılar gibi çeşitli yapıların inşasında kullanılabilir (Xu ve diğ. 2022).

Zayıf zemin üzerine inşa edilmiş geri dönüştürülmüş kauçuk lastik takviyeli granüler dolgu üzerine yerleştirilen rijit dairesel temelin gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemek için Geçkil ve diğ. (2022) tarafından yürütülen bir çalışmada, doğal agregalar veya inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş takviyeli/takviyesiz granüler dolgu üzerinde model plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Takviye için kullanılan kauçuk lastik, hizmet ömrünü tamamlayarak atık malzeme haline gelmiş ancak tipik silindirik şeklini korumuştur. Model plaka yükleme deneylerinde, granüler dolguların, dolgu malzemesinin türünün ve granüler dolgulardaki tüm kauçuk lastik ve/veya geotekstilin yerleştirilmesinin etkileri incelenmiştir. Dene sonuçlarına göre, kauçuk lastik ve/veya geotekstil ile takviye edilerek taşıma kapasitesinin artırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, taşıma kapasitesindeki en yüksek artışın granüler dolgunun kauçuk lastiğin yanında geotekstil ile takviye edilmesi durumunda meydana geldiği belirlenmiştir. Geotekstil ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile doğal agrega dolguları kauçuk lastikle birlikte zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini %5 deformasyon oranı için sırasıyla 6.6 ve 8.5 kat artırmıştır. Öte yandan, doğal agregalar ile inşa edilmiş dolgunun taşıma kapasitesinin inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş dolgudan daha yüksek olmasına rağmen, güçlendirilmiş inşaat ve yıkım atığı malzemeleri ile inşa edilmiş dolgunun taşıma kapasitesinin doğal agregalar ile inşa edilmiş dolgununkine yaklaştığı bildirilmiştir.

Xu ve diğ. (2022) tarafından tüm lastik kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma, segmental lastik kaplı zemin elemanlarının yapım şekline kıyasla, kapalı zemin tipinin segmental lastik kaplı zemin elemanlarının katmanları arasındaki arayüz etkileşimleri üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, sürtünme katsayısının, ya kapalı zemin olarak iri ve köşeli agregalar kullanılması ya da kapalı zemin miktarının azaltılarak kompozit ara yüzünde yüksek oranda kauçuk-kauçuk temasının oluşturulması suretiyle artırılacağı bulunmuştur. Ayrıca tüm lastiklerin inşaat malzemesi olarak kullanılmasının düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna ve önemli ekonomik faydalara sebep olduğu belirlenmiştir.

Duda ve Siwowski (2022), yumuşak zemin koşullarında lastik balyası uygulamasının verimliliğini değerlendirmek için kumlu kil ve siltli kil olmak üzere iki taban zeminini dikkate alarak yürüttükleri çalışmada, tüm yapısal durumlar için dolguların stabilite ve oturma analizi ile taban zemininin taşıma kapasitesi kontrolünü yapmıştır. Sonuçlar, lastik balyalarının uygulanmasının genellikle dolgu stabilitesini artırdığını, dolgu oturmasını

etkili bir şekilde azalttığını ve taban zeminindeki normal gerilmeyi azalttığını ortaya koymuştur. Lastik balyalarıyla yapılmış dolgularda, kayma yüzeyinin çoğunlukla dolgu eğimi içinde yer aldığı ve taban zemini koşullarından bağımsız olarak iyi bir devrilme stabilitesi gösterdiği belirlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Atık lastiklerin geri dönüştürülmesi, ilk defa kavramsallaştırılmasından bu yana büyük bir gelişme kaydetmiştir. Çevre bilincinin artması ve sürdürülebilirliğe yönelik zihniyetin değişmesi bu süreci hızlandırmaya devam etmektedir. Geri dönüştürülmüş lastiklerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması ile aşırı stokları azaltmak, faydalı kullanım sağlamak ve doğal kaynakları korumak üzere üç ana hedefe ulaşılabilir. Bu çalışmada, atık lastik ürünlerinin inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarındaki uygulamalarına ilişkin kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Atık lastik ürünlerinin betonda, yol yapım malzemelerinde ve zemin stabilizasyonunda farklı amaçlar için kullanıldığında birçok araştırmacı tarafından olumlu sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir. Atık lastik türevi ürünlerin inşaat mühendisliğinin farklı alanlarındaki projelerde kullanılmasının bertarafı için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yöntem olduğu düşünülmesine karşın, bu atıklarla üretilen ürünlerin uzun dönem performansları hakkında bilgiler oldukça kısıtlıdır. Ayrıca atık lastik türevi veya diğer atık ürünlerin yeniden kullanımı düşünüldüğünde kimyasal bileşimi ve toksisitesi nedeniyle ağır metal sızıntısı birincil endişe kaynağıdır ve daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

## Kaynaklar

- Abdelmonem. A., El-Feky. M.S., Nasr. A.R., Kohail, M., (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber, *Construction and Building Materials*, 227, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>.
- Al-Neami, M.A., (2018). Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips, *International Journal of GEOMATE*, 15, 48, 175-180, <https://doi.org/10.21660/2018.48.180228>
- Arulrajah. A., Mohammadinia. A., Maghool. F., Horpibulsuk. S., (2019). Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications. *Journal of Cleaner Production*, 230, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.084>.
- ASTM, (1998). *Standard Practice for the Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*. West Conshohocken. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J.L., Camões, A.F., (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials* 34 186-191.
- Cetin. H., Fener. M., Gunaydin. O., (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material, *Engineering Geology*, 88, 110-120
- Contreras-Marín, E., Anguita-García, M., Alonso-Guzmán, E. M., Jaramillo-Morilla, A., Mascort-Albea, E. J., Romero-Hernández, R., & Soriano-Cuesta, C. (2021). Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls. *Applied Sciences*, 11(13), 6159. <https://doi.org/10.3390/app11136159>
- Duda, A., Siwowski, T.W., (2022). Stability and Settlement Analysis of a Lightweight Embankment Filled with Waste Tyre Bales over Soft Ground. *Transp. Infrastruct. Geotech.* 9, 467-491. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00184-5>
- Geçkil, T., Sarici, T. Ok, B., (2022). Model studies on recycled whole rubber tyre reinforced granular fillings on weak soil, *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 264-280. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.264>
- Gücek, S., Gürer, C., Zlender, B., Taciroğlu, M.V., Korkmaz, B.E., Gürkan, K., Braňcko, T., Macuh, B., Varga, R., Jelušić, P., (2024). Use of Lignin, Waste Tire Rubber, and Waste Glass for Soil Stabilization, *Appl. Sci.* 14, 7532. <https://doi.org/10.3390/app14177532>
- Han. X., Ding. N., Chen. A., Wang. Z., Xu. Y., Feng. L., Ji. Y., Li. K., Jing. J., Sun. S., Zhang. Q., (2024). Experimental study on freeze-thaw failure of concrete incorporating waste tire crumb rubber and analytical evaluation



- of frost resistance, *Construction and Building Materials*, 439, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137356>.
- Holmes. N., Browne. A., Montague. C., (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement, *Construction and Building Materials*, 73, 195-204.
- Ho Tsang, H., Lam, N.T.K., Sabegh, S.Y., Sheikh, M.N., Indraratna, B., (2010). Geotechnical Seismic Isolation by Scrap Tire-Soil Mixtures, 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Huang. J., Yan. K., Wang. M., Shi. K., Li. Y., Zhang. Y., (2024). Performance evaluation of SBS-modified asphalt mixtures incorporating waste tire rubber and HDPE, *Construction and Building Materials*, 430, 136423
- Indraratna, B., Sun Q., Grant. J., (2017). Behaviour of Subballast Reinforced with Used Tyre and potential application in rail tracks, *Transportation Geotechnics*, 12, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.006>
- Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Sheikh, M.N., Tsang, H.-H., (2015). Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Soils Found.* 55, 517-528.
- Moustafa. A., ElGawady. M.A., (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Construction and Building Materials*, 93, 249-256.
- Oikonomou, N., Mavridou, S., (2009). The use of waste tyre rubber in civil engineering works. *Sustainability of Construction Materials* 9, 213-238.
- Oikonomou, N., Mavridou. S., (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires, *Cement & Concrete Composites* 31 403-407.
- Onuaguluchi, O., Panesar, D.K., (2014). Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production* 82, 125-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068>
- Pacheco-Torgal F, Ding Y, Jalali S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. *Construct Build Mater*,30,714-24.
- Priyadarshree A., Kumar A., Gupta D., Pushkarna P., (2014). *J. Mater. Civ. Eng.* 30(4) 1-9.
- Raj. J.C.J., Suppiah S. (2021). Seismic isolation using scrap tire rubber pads, *Materials Today: Proceedings* 43, 1404-1407.
- Sahajwalla, (2018). Turning waste tyre into 'green steel.'



- Sinkhonde, D., Onchiri, R.O., Oyawa, W.O., Mwero, J.N. (2023). Properties of concrete mixes containing tire rubber and brick powder exposed to sulfuric acid and cured in water: A comparative study. *Heliyon*, 9(6).
- Sofi, A., (2017). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete a review. *Ain Shams Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007>.
- Sun, S., Han, X., Chen, A., Zhang, Q., Wang, Z., Li, K. (2023). Experimental analysis and evaluation of the compressive strength of rubberized concrete during freeze-thaw cycles. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17-28. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00592-6>
- Tahamia S.A., Mirhosseinib. A.F., Dessoukya. S., Morkb. H., Kavussic. A., (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process, *Construction and Building Materials*, 222, 643-653.
- Topcu. İ.B., Demir. A., (2007). Durability of Rubberized Mortar and Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 173-178., Doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(173)
- Topcu. İ.B., Demir. A., (2009). Farklı Çimentolarla Üretilen Lastik Agregalı Harçların Bazı Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 12(3), 201-206., Doi: 10.2339/2009.12.3
- Topçu, S., Seyrek, E., (2022). Evaluation of geotechnical behavior of clay soil with crumb rubber addition, *Journal of Scientific Reports-A*, Number 51, 136-148.
- Xu, Y., Zhuge, Y., Rahman, M.M., Karim, M.R., Hassanli, R., Luo, L., & Freney, M. (2022). Investigation on Civil Engineering Application of Tyre Encased Soil Element: Laboratory Direct Shear Test and Supply Chain Analysis. *Sustainability*, 14(22), 14852. <https://doi.org/10.3390/su142214852>
- Wang, M., Zhang, G., (2023). A low-cost isolator of scrap tire pads in rural construction: Evaluation of the mechanical properties and numerical assessment of the response control effects, *Journal of Building Engineering*, 67. 105996.

# Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği

Editör:

Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

 ÖZGÜR  
YAYINLARI

ISBN 978-625-95529-0-3  
  
9 786259 552903