

Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar

*Innovative Research in
Geotechnical Engineering*

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur



Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar

Editör:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur



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

Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar

Innovative Research in Geotechnical Engineering

Editor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur

Language: Turkish-English

Publication Date: 2023

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): 978-975-447-834-1

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub391>



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:

Onur, M. İ. (ed) (2023). *Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub391>. 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/>



Ön Söz

Geoteknik mühendisliği inşaat mühendisliğinin alt disiplinidir. Zemin mekaniği ve kaya mekaniği prensiplerinin temeller, istinat yapıları ve diğer zemin yapılarının tasarım ve saha uygulamalarında kullanımını içerir. Günümüz benzeri geoteknik mühendisliği anlayışının 18. yüzyılda başladığı bilinmektedir. Süreç boyunca alan ile ilgili önemli gelişmeler ortaya konmuştur. Çağdaş geoteknik mühendisliğinde ise birçok probleme çözüm üretilebilmektedir.

Bu bölüm; yer hareketi tahmin denklemleri, sahaya özel analizlerde farklı periyot değerlerindeki zemin büyütme faktörleri, zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi, kentsel dönüşüm alanının jeoteknik incelenmesi, ince daneli zeminlerde içsel erozyon test ekipmanlarının gelişim süreci, dolgu barajların deprem kaynaklı kret oturma tahmini için kullanılan denklemler, rezonant kolon deney sistemi, zeminlerde kimyasal stabilizasyon uygulamaları, doğal ve sentetik lifler kullanılarak zeminlerin iyileştirmesi ve mikrobölgeleme ve mikrotremor ölçümü üzerine çalışmalar içermektedir.

Preface

Geotechnical engineering is a sub-discipline of civil engineering. It involves the use of soil mechanics and rock mechanics principles in the design and field applications of foundations, retaining structures and other soil structures. It is known that today's understanding of geotechnical engineering began in the 18th century. It is known that today's geotechnical engineering approach began in the 18th century. Throughout the process, important developments in the field have been revealed. In contemporary geotechnical engineering, solutions can be produced to many problems.

This section involves ground motion prediction equations, soil amplification factors at different period values in site-specific analyzes, determination of dynamic parameters of soils, geotechnical study of urban transformation area, development process of internal erosion testing equipment in fine grained soils, equations used for prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams, resonant column testing system, chemical stabilization applications, soil improvement with using natural and synthetic fibers and microzonation and microtremor measurement.

İçindekiler

| | |
|---------|-----|
| Ön Söz | iii |
| Preface | iv |

Bölüm 1

| | |
|---|---|
| Türkiye ve Çevresi İçin Geliştirilmiş Yer Hareketi Tahmin Denklemlerine Genel Bir Bakış | 1 |
|---|---|

Emre Gürel

Evren Seyrek

Bölüm 2

| | |
|---|----|
| Rezonant Kolon Deney Sistemi ve Deneyin Teorisi | 17 |
|---|----|

Seyfettin Umut Umu

Bölüm 3

| | |
|---|----|
| İnce Daneli Zeminlerde İçsel Erozyon Test Ekipmanlarının Gelişim Sürecine Genel Bakış | 37 |
|---|----|

Sadettin Topçu

Hasan Tosun

Bölüm 4

| | |
|---|----|
| Dolgu Barajların Deprem Kaynaklı Kret Oturma Tahmini İçin Kullanılan Denklemler ve Karşılaştırmalı Analiz | 63 |
|---|----|

Sadettin Topçu

Evren Seyrek

Bölüm 5

- Isparta İli Anadolu Mahallesi Kentsel Dönüşüm Alanının Jeoteknik İncelenmesi 77
Onur Tuncel
Mehmet Özçelik

Bölüm 6

- Sahaya Özel Analizlerde Farklı Periyot Değerlerindeki Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması 99
Ersin Güler
Kamil Bekir Afacan

Bölüm 7

- Dinamik Üç Eksenli Test Sistemi ile Zeminlerin Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi 111
Ersin Güler

Bölüm 8

- Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Uygulamaları ve Kullanılan Malzemeler 121
Tayfun Şengül
Yaşar Vitoşoğlu

Bölüm 9

- Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin Doğal ve Sentetik Lifler Kullanılarak İyileştirilmesi 167
Yaşar Vitoşoğlu
Tayfun Şengül

Bölüm 10

- Mikrobölgeleme ve Mikrotremor Ölçümü 227
Muammer Tün

Türkiye ve Çevresi İçin Geliştirilmiş Yer Hareketi Tahmin Denklemlerine Genel Bir Bakış¹

Emre Gürel²

Evren Seyrek³

Özet

Bir yapıya gelecek olan deprem kuvvetlerinin belirlenmesi için deprem yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım spektrumları veya sahaya özgü sismik tehlike analizleri ile elde edilmiş spektrum kullanılmaktadır. Sismik tehlike analizi ile yer hareketi parametresini belirlemek için yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi önemli bir süreçtir. Proje sahası ile uyum sağlayan tahmin denklemi önceden belirlenebilir ise önemli bir sorun çözülecektir. Türkiye’de son yıllarda kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısındaki ve kayıtların sayı ve kalitesindeki artış sismik tehlike çalışmalarına önemli kaynak oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye için geliştirilmiş yerel yer hareketi tahmin denklemleri incelenmiş ve formları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde farklı lokasyonlarda meydana gelmiş ve verdiği hasarlar sebebiyle ülke ekonomilerini büyük zararlara uğratan çok sayıda deprem yaşanmıştır. Özellikle zeminlerin deprem hasarının büyüklüğü ve dağılımı üzerinde son derece etkili olduğunu gösteren 1964 Alaska, 1994 Niiagata ve 1995 Kobe depremleri gibi önemli depremler meydana gelmiştir (Kramer, 1996). Ülkemiz de dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden biri olan

- 1 Bu bölüm, Doç.Dr. Evren SEYREK’in danışmanlığında İnş. Yük. Müh. Emre Gürel tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nde hazırlanan “Yerel Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin Performansının Ege Bölgesi için İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.
- 2 İnş. Yük. Müh. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Kütahya, Türkiye, gurel.emre@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0114-23643
- 3 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

Alp-Himalaya deprem kuşağında yer almakta olup hasar yapıcı çok sayıda da deprem yaşanmıştır. Kadırioğlu vd. (2018); 1900 ile 2012 yılları arasında 6.0 veya daha büyük magnitüde sahip 203 adet depremin kaydedildiğini ifade etmiştir. Bu depremler arasındaki en yıkıcı özellikte olan 72 deprem sonucu 90 000'den fazla can kaybına neden olmuştur. Türkiye ekonomisi üzerinde tahmini 50 Milyar dolardan daha fazla ekonomik kayba sebep olan bu depremlerin psiko-sosyolojik etkileri de çok büyük olmuştur (Emre vd., 2018).

Türkiye'nin dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden biri olması, deprem sonrası can ve mal kayıplarını azaltmak için depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunun daha da önemli hale gelmesine neden olmaktadır. Bu kuvvetler maksimum yer ivmesi ve tasarım spektrumu değerlerine dayalı olarak deprem yönetmeliklerinde belirtilen çerçevede ve deprem tehlike veya deprem bölgeleri haritasına göre hesaplanmaktadır. Bu gibi haritalar, depremden etkilenecek yapıların projelendirilmesi aşamasında mühendislere tehlikenin seviyesini belirlemek ve yapıların emniyetli şekilde dizayn edilmesini sağlamak için veriler sunmaktadır. Bu haritaların oluşturulmasında yaygın olarak olasılıksal sismik tehlike analizleri kullanılmaktadır (Seyrek, 2018).

Sismik tehlike analizi ile yer hareketi parametresini belirlemek için yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi önemli bir süreçtir. Ülkemizde de son yıllarda kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısındaki ve kayıtların sayı ve kalitesindeki artış yer hareketi tahmin denklemlerine çalışmalarına önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Kale (2017); yer hareketi kaydı sırasındaki artışın deprem tehlikesini tahmin edebilmeye yönelik çalışmalara büyük faydası olduğunu, sayısal veri artışıyla birlikte zemin koşulu, sismik kaynak-istasyon arası mesafe ve fay türü gibi bilgilerin de güvenilirliğinin artırıldığını ve bu çalışmalara paralel olarak yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısının da arttığını ifade etmiştir.

Yer hareketi tahmin denklemleri, deprem tehlike haritası dışında, zemin sıvılaşma analizleri, zemin büyütme analizleri ve mikro bölgeleme gibi uygulama alanlarına girdi sağlamak üzere sıklıkla kullanılmaktadır. 1970'li yılların başından itibaren dünyanın çeşitli bölgeleri için geliştirilen çok sayıda tahmin denklemleri yer almaktadır. Bu denklemlerin oluşturulmasında kullanılan veri setinin genel olarak Avrupa, Uzakdoğu ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki kayıtlı deprem verileri olduğu görülmektedir (Douglas, 2001; Douglas, 2020).

Bir yer hareketi tahmin denkleminin tektonik rejim özelliklerinin yanı sıra deprem büyüklüğü açısından da kullanıldığı veri setine bağlı sınırlamalara

sahip olması, bu ilişkilerin kullanımında daha dikkatli olmayı gerekli kılmaktadır. Kullanılacak tahmin denklemlerinin bölgeye ait kaydedilmiş deprem verilerine bağlı olması tercih edilmektedir. Ülkemizdeki yetersiz yer hareketi kayıt istasyonu sonucu elimizde bulunan yer hareketi kayıtlarının da yeterli sayıda olmaması neticesinde yapılan çalışmalarda yabancı yazarların geliştirdikleri tahmin denklemleri kullanılmıştır (Çeken, 2007). 1996 yılında yürürlüğe girmiş Deprem Bölgeleri Haritası, Gülkan vd. (1993) tarafından gerçekleştirilen proje sonuçları referans alınarak elde edilmiş ve söz konusu çalışmada Joyner ve Boore (1981) yer hareketi tahmin denklemi kullanılmıştır. Bu denklemin seçiminde Türkiye ve Kaliforniya'daki tektonik benzerliklerin büyük rol oynadığı ifade edilmiştir.

Ülkemizde de ivme ölçer istasyonlarının ve kayıt sayılarının artması ile birlikte yerel yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısında da artış olmuştur (Gülkan ve Kalkan 2002; Kalkan ve Gülkan 2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akyol ve Karagöz 2009; Ulutaş ve Özer 2010; Akkar ve Çağnan, 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018).

Türkiye ve çevresi için geliştirilmiş yerel yer hareketi tahmin denklemleri içerisinde altı adedi dikkate alınarak çalışmamızda incelemeye tabii tutulmuştur (Kalkan ve Gülkan, 2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akkar ve Çağnan, 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018). İnceleme sırasında uzaklık, fay tipi ve yerel zemin koşullarının etkisi de ayrıca dikkate alınmış ve sonuçlar istatistiksel olarak tartışılmıştır.

2. YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

Proje sahası ve çevresinde kuvvetli yer hareketi kaydının bulunmaması halinde öngörülen depremin oluşturacağı yer hareketi parametrelerinin tahmini ampirik denklemlerle yapılabilmektedir (Boore vd. 1997). Azalım ilişkisi, azalım denklemi veya yer hareketi tahmin denklemi olarak da isimlendirilen bu denklemlerin oluşturulması için çok sayıda kaydedilmiş yer hareketine ihtiyaç vardır. Kalkan (2001); söz konusu denklemlerin, bir deprem sırasında oluşan yer titreşimlerinin deprem odağından uzaklaştıkça azalması prensibine dayanarak geliştirdiğini ve kaydedilmiş kuvvetli yer hareketleri veri tabanının değerlendirilmesi sonucu ortaya konulduğunu ifade etmiştir. Bu denklemler deprem büyüklüğü ve kaynak-saha mesafesi gibi bağımsız ve en büyük yer ivmesi veya spektral ivme gibi bağımlı değişken parametreleri içermektedir ve denklemdaki katsayılar çoğunlukla regresyon analizleri ile elde edilmektedir. Söz konusu denklemler yer hareketinin uzaklıkla nasıl değiştiğinden daha fazlasını gösterirler ve hem probabilistik hem de deterministik sismik tehlike analizleri için hayati öneme sahiptirler

(Douglas, 2003). Bu sebeple yer hareketi tahmini ile ilgili bu zamana kadar yapılmış çok sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmaların farklı versiyonlarının yayınlanması dikkati çekmektedir.

Literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmının maksimum yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini tahmin etmek için geliştirilen denklemlerden oluştuğu dikkati çekmektedir. Douglas (2003); sadece kısa periyotlu ($T \leq 0.3$ s) yapıların analizi için kullanışlı olmasına rağmen kuvvetli yer hareketini tanımlamak için en büyük yer ivmesi değerinin hala sıklıkla kullanıldığını ifade etmiştir. Douglas (2020), dünyanın farklı bölgelerinde en büyük yer ivmesinin tahmini için geliştirilen 468 adet çalışmayı ve spektral ordinatların tahmini için geliştirilen 302 adet çalışmayı özetlemiştir. İlgili çalışmada sunulan tahmin denklemlerinin sayısı, ilk önerilen tahmin denkleminin üzerinden geçen yaklaşık 45 yıl içerisinde konunun hala önemini ve güncelliğini göstermesi bakımından son derece önemlidir.

Pek çok farklı araştırmacı tarafından 1970’li yıllardan beri ABD, Avrupa ve Uzakdoğu’daki kaydedilen deprem verilerinin kullanılmasıyla yer hareketi tahmin denklemleri günümüze kadar geliştirilmiştir (Douglas, 2020). ABD’de meydana gelen depremler sonucu elde edilen kuvvetli yer hareketi kayıtlarına bağlı olarak oluşturulan azalım ilişkileri (Campbell, 1981; Joyner ve Boore 1981; Boore vd., 1993; Boore vd., 1997) bulunmaktadır. ABD’nin yanı sıra Avrupa’daki ve/veya tüm dünya depremlerinden elde etmiş olduğu verileri göz önüne alarak geliştirilen tahmin denklemleri (Campbell ve Bozorgnia, 1994; Ambraseys, 1995; Ambraseys vd., 2005) de bulunmaktadır.

Sismik tehlike analiz çalışmalarına, sınılaşma analizlerine, depreme dayanıklı yapı tasarımına ve şev stabilitesi analizlerine girdi sağlayan yer hareketi tahmin denklemlerinin en yaygın kullanılan formlarından biri denklem 2.1’de sunulmaktadır.

$$\ln Y = C_1 + C_2 - C_3 \ln R - C_4 R + C_5 F + C_6 S + \sigma_{\ln Y} \quad (2.1)$$

Bu denklem Campbell (2003) tarafından önerilmiş olup “Y” değişkeni, yer hareketi parametresini; “M” değişkeni, deprem magnitudünü; “R” değişkeni, deprem kaynağından sahaya olan uzaklığı; “F” değişkeni, faylanma tipini; “S” değişkeni, yerel zemin koşullarını; “ $\sigma_{\ln Y}$ ” değişkeni ise hesap edilen yer hareketi parametresinin değerindeki belirsizliği belirtmektedir. Bu belirsizlik tahmin denklemlerinin ilk kez geliştirildiği yıllarda sabit alınmasına rağmen günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarda bu terimin, deprem büyüklüğü ile ilişkilendirildiği görülmektedir (Campbell ve Bozorgnia 1994; Ambraseys vd., 2005).

Tahmin denklemlerindeki yer hareketi parametresi ivme, hız, yerdeğiştirme veya spektral ivme olabilmektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde en sık yatay yer ivmesini belirlemeye yönelik çalışmalara ağırlık verildiği anlaşılmaktadır (Douglas, 2020).

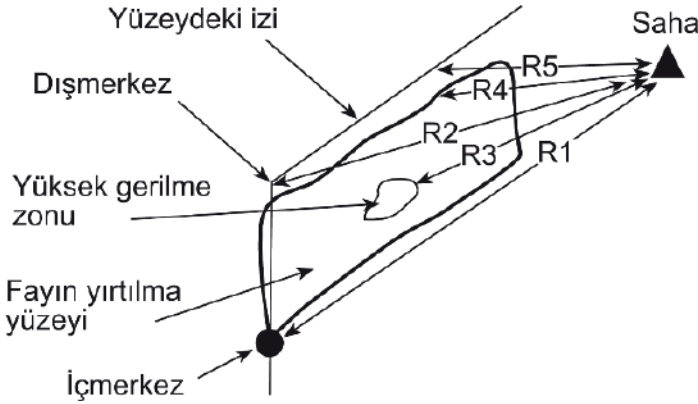
Yer hareketi tahmin denklemlerine ait veri tabanı oluştururken yer ivmesi değerinin genellikle iki farklı şekilde kullanıldığı görülmektedir. Birinci yaklaşımda ilgili istasyonda yer hareketine ait yatay bileşenlerin en büyüğü dikkate alınırken, ikinci yaklaşımda ise yatay bileşen değerlerinin geometrik ortalaması dikkate alınmaktadır. Söz konusu iki farklı yaklaşımı dikkate alarak elde edilmiş gerek yerel gerekse global yer hareketi denklemlerinin literatürde yer aldığı ifade edilmelidir.

Yer hareketi tahmin denklemlerinin değişkenlerinden biri olan deprem magnitudü için farklı ölçüm tekniklerine dayanan yerel magnitud (M_L), yüzey dalgası magnitudü (M_s) ve moment magnitudü (M_w) gibi ölçekler kullanılmaktadır. Kuvvetli depremlerde ölçülen yer sarsıntısı özellikleri küçük depremlere göre kıyasladığında deprem büyüklüğüne daha az duyarlıdır. Bu özellik doygunluk olarak adı verilir. Doygunluk problemi olmayan tek magnitud türünün moment magnitudü olması son yıllarda geliştirilen tahmin denklemlerinde en sık kullanılan magnitud türü olmasına neden olmaktadır.

Tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık parametresi hakkında yapılan farklı tanımlamalar vardır. Şekil 2.1'de gösterilen R_1 'in iç merkez uzaklığı (R_{HYP}), R_2 'nin dış merkez uzaklığı (R_{EPI}), R_3 'ün enerji boşalım zonuna uzaklık (R_{SEIS}), R_4 'ün yırtılma alanına olan en kısa uzaklık (R_{RUP}) ve R_5 'in fay yırtılmasının yeryüzündeki izine en kısa uzaklık olan (R_{JB}) olarak tanımlanmaktadır.

Yer hareketi tahmin denklemlerinde yerel zemin koşullarının etkisi farklı şekillerde dikkate alınmaktadır. Yerel zemin koşullarının etkisinin üst 30 m'deki kayma dalga hızı parametresi kullanılarak dikkate alındığı görülmektedir (Boore vd., 1997; Abrahamson ve Silva 2008; Boore ve Atkinson 2008). Bu yaklaşımın dışında zemin etkisinin regresyon katsayısı olarak da hesaba katıldığı çalışmalar mevcuttur (Ambraseys vd., 2005; Akkar ve Bommer 2010).

Özellikle 2000'li yıllardan sonra geliştirilen yer hareketi tahmin denklemlerinde faylanma türünün de kullanıldığı dikkati çekmektedir (Ambraseys vd., 2005; PEER, 2007). Bommer vd. (2003); gelecekteki depremlerin kaynak mekanizmalarının çoğu bölgede oldukça iyi tahmin edilebileceği için bu etkinin denklemlere dâhil edilmesinin kaliteyi artıracaklarını ifade etmiştir.



Şekil 2.1. Tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık ölçütleri (Kramer, 1996)

3. YEREL YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

Bir yer hareketi tahmin denkleminin; bölgenin tektonik özellikleri, deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi açısından da kullanılan veri setine bağlı sınırlamalara sahiptir. Bu sebeple bu denklemlerin kullanımında daha dikkatli olunması gerekmektedir. Özellikle kullanılacak tahmin denklemlerinin bölgeye ait kaydedilmiş deprem verilerine bağlı olması tercih edilmektedir.

Proje sahasına sismik tehlike düzeyinin belirlenmesi için uygun yer hareketi tahmin denkleminin seçimi son derece önemlidir. Ülkemizde de olasılıksal sismik tehlike çalışmalarının başlarında, dünyanın farklı bölgeleri için geliştirilmiş yer hareketi tahmin denklemleri kullanılmıştır (Erdik vd., 1985; Gülkan vd., 1993). Güncellenen deprem katalogları ve diri faylara ait bilgilerin artması ile Türkiye ve çevresi için sismik tehlike çalışmaları artarak devam etmiş ve bu çalışmalarda da farklı bölgeler için geliştirilmiş tahmin denklemlerinin kullanıldığı dikkati çekmektedir (Kayabalı, 2002; Kayabalı ve Akın, 2003).

Türkiye’de 2000’li yıllardan önce sınırlı sayıda yer hareketi kaydı olmasından dolayı çok az sayıda yerel yer hareketi tahmin denkleminin bulunmaktaydı (Aydan vd., 1996; İnan vd., 1996). Farklı araştırmacılar söz konusu bu denklemleri kullanarak elde ettiği tehlike analiz sonuçlarının yakın kaynak etkisi olan alanlarda çok büyük anomaliler yaptığını ifade etmiştir (Kayabalı, 2002; Kayabalı ve Akın, 2003; Ulusay vd., 2004).

1999 yılında meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra bu depremlere ait ivme kayıtları da yer hareketi veri tabanına eklendikten sonra birçok araştırmacı tarafından yerel yer hareketi tahmin denklemleri geliştirilmeye başlanmıştır (Gülkan ve Kalkan 2002; Kalkan ve Gülkan

2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akyol ve Karagöz 2009; Ulutaş ve Özer 2010; Akkar ve Çağnan 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018). Oluşturulan bu denklemlerde ise kuvvetli yer hareketi parametresi olarak; maksimum yatay ve düşey yer ivmesi (PGA). Spektral ivme (S_a) ve maksimum hız (PGV) parametreleri üzerinde çalışıldığı görülmektedir (Seyrek, 2009).

Ülkemizdeki yer hareketi kayıtları kullanılarak 1996 yılında geliştirilen Aydan vd. (1996) ile İnan vd. (1996) yer hareketi tahmin denklemlerinde yerel zemin etkilerinin ve fay tipi etkisinin dikkate alınmadığı görülmektedir. Özellikle zemin etkisinin dikkate alınmaması önemli bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır. Bu iki denklemin yanı sıra Bindi vd. (2007) ile Ulutaş ve Özer (2010) tarafından önerilen modellerde de zemin etkisinin dikkate alınmadığı görülmektedir.

Sismik tehlike analizlerine girdi sağlayan yer hareketi tahmin denklemlerinin hangisinin kullanılacağı ile alakalı farklı çalışmalar literatürde yer almaktadır (Cotton vd., 2006; Bommer vd., 2010). Dikkate alınan alanın tektonik özelliklerine uymayan, veri tabanı ve dokümantasyonu yetersiz olan, zaman içerisinde güncellenen, regresyon metodu güncel olmayan, hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir kaynaktan yayımlanan tahmin denklemlerinin kullanımı önerilmemektedir (Cotton, 2006; Kale ve Akkar, 2011).

Bu kriterler birlikte değerlendirildiğinde Ulusay vd. (2004); Özbey vd. (2004); Kalkan ve Gülkan (2004); Akkar ve Çağnan (2010); Kale vd. (2015) ve Erken vd. (2018) tahmin denklemlerinin herhangi bir saha için aday tahmin denklemi olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür.

Bu bölümde söz konusu altı yerel yer hareketi denkleminin genel formları verilmiştir. İncelenen denklemler için kronolojik sıra takip edilmiştir.

3.1. Ulusay vd. (2004)

Söz konusu tahmin denklemi Türkiye’de 1976-2003 yılları arasında meydana gelen ve büyüklükleri (M_w) 4.1 ile 7.5 arasında değişen 122 depreme ait 221 kayıt kullanılarak oluşturulmuştur. Denklem için uzaklık ölçütü olarak depremin dış merkezine olan uzaklık (R_{epi}) kullanılmış olup 5.1 km ile 99.7 km arasında değişmektedir.

$$PGA = 2.18xe^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + S_B)} \quad (3.1)$$

PGA: En büyük yatay yer ivmesi (gal)

R_e : Dış merkez uzaklığı, R_{epi} (km).

M: Depremin moment büyüklüğü, M_w

Eşitlik 3.1'de verilen S_A ve S_B terimleri zemin koşulunu modellemek için kullanılmıştır. Kaya ortam için $S_A = S_B = 0$; zemin ortamı için $S_A = 1$ ve $S_B = 0$; yumuşak zemin için $S_A = 0$ ve $S_B = 1$ olarak dikkate alınmaktadır.

3.2. Özbey vd. (2004)

2004 yılında sunulan ve Türkiye'nin kuzeybatısı için geliştirilen bu çalışmada 1999 – 2000 yılları arasında meydana gelen büyüklükleri (M_w) 5.0 ile 7.4 arasında değişen 17 depreme ait 195 ivme kaydı kullanılmıştır. Denklem genel olarak; 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri ve bu iki depremin artçı depremlerinin kuvvetli yer hareketi kayıtlarından oluşmaktadır. Mesafe ölçütü olarak, kırığın düşey projeksiyonuna en yakın yatay uzaklık olan R_{jb} kullanılmıştır. Veri tabanına dâhil edilen kayıtlar için uzaklık ölçütü 5.0 km ile 300.0 km arasındadır.

$$\log(Y) = 3.287 + 0.503(M - 6) - 0.079(M - 6)^2 - 1.1177 \log \sqrt{R^2 + 14.82^2} + 0.141G_1 + 0.331G_2 \quad (3.2)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesinin iki bileşeninin geometrik ortalaması, PGA (cm/sn²)

M: Depremin moment magnitudü, M_w

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{JB} (km)

Eşitlik 3.2'de verilen G_1 ve G_2 katsayıları zemin koşulunu ifade etmek için kullanılmış olup. üst 30.0 m'deki kayda dalga hızı esasında değerlendirme yapılmıştır. $V_s \geq 360$ m/s ise $G_1 = 0$ ve $G_2 = 0$; $180 < V_s < 360$ m/s ise $G_1 = 1$ ve $G_2 = 0$; $V_s < 180$ m/s ise $G_1 = 0$ ve $G_2 = 1$ olarak dikkate alınmıştır.

3.3. Kalkan ve Gülkan (2004)

Türkiye'de 1976-2003 yılları arasında meydana gelen büyüklükleri (M_w) 4.0 ile 7.4 arasında değişen 57 depreme ait 112 ivme kaydı dikkate alınarak geliştirilmiştir. Geliştirilen bu denklemde aynı araştırmacıların 2002 yılında yaptıkları çalışmadaki denklemin aynı formunu kullandıkları görülmektedir (Eşitlik 3.3).

$$\ln Y = 0.393 + 0.576(M - 6) - 0.107(M - 6)^2 - 0.899 \ln r - 0.200 \ln \left(\frac{V_s}{1112} \right) \quad (3.3)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesi (g)

$r = (r_{cl}^2 + h^2)^{1/2}$ (km) ve $h = 6.91$ km

r_{cl} : Yüzey kırığına en yakın yatay mesafe (km)

M: Moment esasında deprem büyüklüğü, M_w

V_s : Üst 30.0 m'deki ortalama kayma-dalgası hızı (m/sn)

3.4. Akkar ve Çağnan (2010)

2010 yılında geliştirilen bu tahmin denkleminde Türkiye'de meydana gelen 137 depreme ait 433 kayıt kullanılmıştır. Deprem büyüklüğü olarak moment magnitudü (M_w) kullanılmış olmakla birlikte, büyüklükleri $5.0 \leq M_w \leq 7.6$ arasındaki veriler kullanılmıştır. Mesafe ölçütü olarak R_{JB} kullanılmış olmakla birlikte değerleri $0 \leq R_{JB} \leq 200$ km sınırları arasındadır. Geliştirilen bu denklem gerek nonlinear zemin davranışının etkisini gerekse faylanma tipini dikkate almaktadır. Bu yönleriyle diğer tahmin denklemlerinden ayrılmaktadır. Kayıtların %70'i doğrultu atımlı faylanma, % 28'i normal faylanma geri kalan ise ters/bindirme faylanma olaylarını içermektedir. Geliştirilen tahmin denklemini $M \leq 6.5$ ve $M > 6.5$ için sırasıyla Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'de verilmektedir.

$$\ln Y = 8.92418 - 0.513(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (3.4)$$

$$\ln Y = 8.92418 - 0.695(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (3.5)$$

Y: En büyük yer ivmesi değeri (cm/s^2)

R_{JB} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M: Moment magnitudü (M_w)

İlgili denklemlerde verilen F_N ve F_R faylanma ile ilgili katsayılar olup normal ve ters faylanma için "1" diğer durumlar için "0" değerini almaktadır. Tahmin denklemindeki bir diğer terim olan ve yer büyüme etkisini modellemede kullanılan F_S terimi linear (F_{LIN}) ve nonlinear (F_{NL}) terimlerden oluşmaktadır (Eşitlik 3.6).

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad (3.6)$$

F_{LIN} terimi Eşitlik 3.7 ile hesaplanmakta ve ilgili eşitlikteki referans kayma dalga hızı (V_{REF}); 760 m/s olarak dikkate alınmaktadır. İlgili eşitlikte $b_{lin} = -0.36$ olarak alınmaktadır.

$$F_{LIN} = b_{lin} \ln \left(\frac{V_{S,so}}{V_{ref}} \right) \quad (3.7)$$

F_{NL} terimi ise üç farklı durum için Eşitlik 3.8, 3.9 ve 3.10 ile belirlenmektedir. Eşitliklerdeki pga_{4nl} terimi $V_{s,30}=760$ m/s için hesaplanan PGA değeri olup $pgalow=0.06g$ olarak hesaba katılmaktadır. İlgili eşitliklerde yer alan b_{nl} , c ve d terimlerinin hesabı için Boore ve Atkinson (2008) çalışması esas alınmaktadır.

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pgalow}{0.1} \right) \triangleright pga_{4nl} \leq 0.03g \quad (3.7)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pgalow}{0.1} \right) + c[\ln \left(\frac{pga_{4nl}}{0.03} \right)]^2 + d[\left(\frac{pga_{4nl}}{0.03} \right)]^3 \triangleright 0.03 \leq pga_{4nl} \leq 0.09g \quad (3.8)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{pgalow}{0.1} \right) \triangleright pga_{4nl} \geq 0.09g \quad (3.9)$$

3.5. Kale vd. (2015)

Türkiye ve İran için oluşturulan tahmin denkleminin geliştirilmesinde kullanılan Türkiye'deki ve İran'daki kayıtlar EMME kuvvetli yer hareketi veri tabanından elde edilmiştir. 2015 yılında yayınlanan bu çalışmada Türkiye'de meydana gelen 175, İran'da meydana gelen 138 deprem dikkate alınmıştır. Toplam yer hareketi kayıt sayısı 1198 olup, bu kayıtların 670 adedi Türkiye'ye geri kalan 528 adedi ise İran'a aittir. Dikkate alınan veri tabanı $4.0 \leq M_w \leq 7.6$ arasındaki verileri dikkate almaktadır. Mesafe tanımı olarak ise R_{jb} kullanılmıştır ve maksimum R_{jb} değeri 200 km'dir. Veri tabanındaki İran kayıtları küçük deprem büyüklüklerinde ($M_w \leq 5.0$) eksiktir. İran ve Türkiye kayıtlarının uzaklık dağılımı ise benzer patern göstermektedir. Veri tabanı büyüklük ve uzaklık açısından birlikte değerlendirildiğinde İran'a ait veriler $M_w < 5.0$ ve $R_{jb} > 80$ km için Türkiye'ye oranla daha kısıtlıdır.

Eşitlik 3.10'da verilen tahmin denkleminin genel formu incelendiğinde deprem büyüklüğü, uzaklık, faylanma türü, anelastik azalım ve saha etkisini modellemek için kullanılan beş ayrı değişken dikkate çekmektedir. İlgili değişkenleri belirlemek için sırasıyla Eşitlik 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15 kullanılmaktadır.

$$\ln \bar{Y} = f_{mag} + f_{dis} + f_{sof} + f_{aat} + f_{site} \quad (3.10)$$

$$f_{mag} = \begin{cases} (b_1 + \Delta b_1) + (b_2 + \Delta b_2)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \triangleright M_w \leq (c_1 + \Delta c_1) \\ (b_1 + \Delta b_1) + (b_7 + \Delta b_7)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \triangleright M_w > (c_1 + \Delta c_1) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$f_{dis} = (b_4 + \Delta b_4) + (b_5 + \Delta b_5)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + (b_6 + \Delta b_6)^2} \quad (3.12)$$

$$f_{sof} = (b_8 + \Delta b_8)F_{NM} + (b_9 + \Delta b_9)F_{RV} \quad (3.13)$$

$$f_{\text{aat}} = \begin{cases} 0; R_{\text{JB}} \leq 80\text{km} \\ (b_{10} + \Delta b_{10})(R_{\text{JB}} - 80); R_{\text{JB}} > 80\text{km} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$f_{\text{site}} = \begin{cases} sb_1 \ln \left(\frac{V_{S,30}}{V_{\text{REF}}} \right) + sb_2 \ln \left[\frac{\text{PGA}_{\text{REF}+c} (V_{S,30}/V_{\text{REF}})^n}{(\text{PGA}_{\text{REF}+c}) (V_{S,30}/V_{\text{REF}})^n} \right]; V_{S,30} < V_{\text{REF}} \\ sb_1 \ln \left(\frac{\min(V_{S,30}, V_{\text{REF}})}{V_{\text{REF}}} \right); V_{S,30} \geq V_{\text{REF}} \end{cases} \quad (3.15)$$

\bar{Y} : En büyük yer ivmesi (g).

R_{jb} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M_w : Moment magnitudü

Yukarıdaki eşitliklerde ifade edilen Δ terimleri Türkiye ve İran arasındaki farkı tanımlamaktadır. Eşitliklerdeki terimleri kullanıldığında İran için tahmin modeli elde edilmektedir. İlgili eşitliklerdeki katsayılar aşağıda verilmektedir.

Zemin koşullarını modellemek için kullanılan Eşitlik 3.15'deki referans kayma dalga hızı (V_{REF}) değeri 750 m/s, V_{CON} değeri ise 1000 m/s olarak dikkate alınmaktadır. PGA_{REF} terimi referans kayma dalga hızı için tahmin edilen yer ivmesi değeridir. Eşitlik 3.15'de ifade edilen sb_1 ve sb_2 katsayıları sırasıyla 0.41997 ve -0.28846 değerlerini almaktadır. Yine aynı eşitlikte yer alan diğer sabitler $c=2.5$ ve $n=3.2$ olarak dikkate alınmaktadır.

3.6. Erken vd. 2018

Kuzeybatı Anadolu'da 1999-2006 yılları arasında meydana gelen, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ($M_w=7.4$) ve 12 Kasım 1999 Düzce depremine ($M_w=7.1$) ait ana şok ve artçı şokları da içeren 369 yer hareketi kaydı ile dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş 7 adet büyük depreme ait 33 kayıt birlikte kullanılarak bu tahmin denklemi oluşturulmuştur. Regresyon analizlerinde kullanılan 110 kuvvetli yer hareketi istasyonunda ölçülen 4.1 ile 7.6 (M_w) arasındaki büyüklüğe sahip depremler dikkate alınmıştır. Toplam 402 kaydın NEHRP (FEMA 450, 2004)'e göre 1 adedi A grubu olarak tanımlanan sert kaya ($V_{s,30} > 1500$ m/s), 38 adedi B grubu olarak tanımlanan kaya ($760 < V_{s,30} \leq 1500$ m/s), 188 adedi C grubu olarak tanımlanan çok sert zemin veya yumuşak kaya ($360 < V_{s,30} \leq 760$ m/s), 173 adedi D grubu olarak tanımlanan sert zemin ($180 < V_{s,30} \leq 360$ m/s) ve 2 adedi E grubu olarak tanımlanan yumuşak zemin ($V_{s,30} < 180$ m/s) üzerinde yer alan istasyonlardan elde edilmiştir. A ve E grubundaki veri eksikliğinden dolayı model B-C grubu ve D grubu için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Kaynak-saha mesafesi R_{JB} olarak dikkate alınmış olup 0.1 ile 344.4 km arasında değişmektedir. İlgili tahmin denklemi iki ayrı zemin koşulu (B-C ve D grubu) için Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17'de verilmektedir.

$$\ln \text{PGA} = 1.835 + 1.034(M - 6) - 0.252(M - 6)^2 - 1.397 \ln r - 0.069 \ln \frac{V_{s,30}}{V_{\text{ref}}} + F_{\text{NL}} \quad (3.16)$$

$$\ln \text{PGA} = 2.135 + 1.008(M - 6) - 0.163(M - 6)^2 - 1.380 \ln r - 0.133 \ln \frac{V_{s,30}}{V_{\text{ref}}} + F_{\text{NL}} \quad (3.17)$$

PGA: En büyük yatay yer ivmesi (g)

$$r = (R_{\text{JB}}^2 + h^2)^{1/2} \text{ (km) (kaya için } h = 9.718; \text{ kum için } h = 10.510)$$

R_{JB} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M: Moment esasında deprem büyüklüğü, M_w

$V_{s,30}$: Üst 30.0 m'deki ortalama kayma-dalgası hızı (m/sn)

V_{REF} : Referans kayma dalga hızı (750 m/s)

Eşitlik 3.16 ve 3.17'de ifade edilen F_{NL} terimi $V_{s,30}$ ve referans kaya ortamındaki yer hareketinin genliğine bağlı olarak nonlinear zemin büyütme etkisi modellemede kullanılmaktadır. Boore ve Atkinson (2008) tarafından tanımlanan bu terim Bölüm 3.4'de açıklandığı için bu bölümde yer verilmemiştir.

4. SONUÇLAR

İncelenen altı yerel yer hareketi tahmin denklemi birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Ulusay vd. (2004) denklemi uzaklık ölçütü olarak R_{epi} kullanırken, Kalkan ve Gülkan (2004) denklemi R_{epi} ve R_{JB} kullanmaktadır. Diğer üç denklem ise R_{JB} ölçütünü tercih etmiştir.
- Ulusay vd. (2004) tarafından oluşturulan denkleme girdi sağlayan kayıtlardaki uzaklık ölçütünün en büyük değeri (r_{maks}) 99.7 km'dir. Bu değer, dikkate alınan tahmin denklemleri içerisindeki r_{maks} değerlerinin en küçüğüdür. Diğer denklemlerde bu mesafe 200-300 km aralığındadır.
- Ulusay vd. (2004) ve Özbey vd. (2004) denklemleri zemin koşullarını regresyon katsayıları ile modellerken, diğer dört yer hareketi tahmin denklemi $V_{s,30}$ parametresini kullanıldığı anlaşılmaktadır.
- Ulusay vd. (2004) ile Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından önerilen tahmin denklemleri yer hareketi parametresi olarak PGA_{maks} kullanırken, Erken vd. (2018) tahmin denklemi hariç diğer üç denklem PGA_{geo} parametresini kullanmıştır. Erken vd. (2018)'de ise yer hareketi parametresinin hangi esasa göre modellendiği belirlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- Abrahamson N.A. & Silva W., (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations. *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97.
- Akkar S. & Bommer J.J., (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV ve spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region ve the Middle East, *Seismological Research Letters*, 81(2),195-206.
- Akkar S. & Çağnan Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, ve its comparison with other regional ve global ground-motion models, *Bulletin Of the Seismological Society of America*, 100(6), 2978-2995.
- Akyol N. & Karagöz Ö., (2009). empirical attenuation relationships for Western Anatolia, Turkey, *Turkish Journal Of Earth Sciences*, 18, 351-382
- Ambraseys N. N., (1995). The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 24(4), 467-490.
- Ambraseys, N.N., et. al., (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe ve the Middle East: horizontal peak ground acceleration ve spectral acceleration, *Bulletin Of Earthquake Engineering*, 3(1), 1-53.
- Aydan, Ö., Sadaki, M. ve Yazar, R., (1996). The seismic characteristics of Turkish earthquakes, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico. Paper no 1278.
- Bindi, D., v.d., (2007). Empirical ground-motion prediction equations for northwestern Turkey using the aftershocks of the 1999 Kocaeli earthquake. *Geophysical Research Letters*, 34(L08305), 1-5.
- Bommer J.J., Douglas J. ve Strasser F.O., (2003). *Bulletin of earthquake engineering 1, Style-of-Faulting in Ground-Motion Prediction Equations*, 1, 171-203.
- Bommer J. J., et. al.,(2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis, *Seismological Research Letters*, 81(5), 783-793.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. ve Fumal, T.E., (1997). Equations for estimating horizontal response spectra ve peak acceleration from Western North American earthquakes. *A Summary of Recent Work, Seis. Res. Let.*, 68(1), 128-153.
- Boore D. M. & Atkinson G. M., (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, ve 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s ve 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.

- Boore, D.M., Joyner, W.B., Ve Fumal, T.E. (1993). Estimation of response spectra ve peak accelerations from western North America earthquakes, an Interim Report, open-file-report 93-509, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Campbell, K.W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(6), 2039-2070.
- Campbell K. W. & Bozorgnia. Y. (1994). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993. In proceedings of the fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 3, 283-292.
- Campbell K.W. (2003). Strong-motion attenuation relations. in International Hvebook of Earthquake ve Engineering Seismology, San Diego, Academic Press.
- Çeken U. (2007). Marmara bölgesinin kuvvetli yer hareketi azalım ilişkisi modeli, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Cotton, F, et. al. (2006). Criteria for selecting ve adjusting ground-motion models for spesific target regions: Application to Central Europe ve rock sites, Journal of Seismology, 10(2), 137-156.
- Douglas, J., (2001). A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration ve spectral ordinates (1969 to 2000), Engineering Seismology ve Earthquake Engineering Report No. 01-1, Imperial College of Science, Technology ve Medicine Civil Engineering Department, London.
- Douglas J., (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records. A review of equations for the estimation of peak ground acceleration ve response spectral ordinates, Earth-Science Reviews, 61, 43-104.
- Douglas, J., (2020). Ground motion prediction equations (1964-2020). Department of civil ve environmental engineering university of strathclyde, James Weir Building, Glasgow, United Kingdom.
- Emre Ö., v.d., (2018). Active fault database of Turkey. Bull Earthquake Eng, 16, 3229-3275.
- Erdik, M., v.d., (1985). Türkiye’de deprem tehlikesinin istatistiki açıdan değerlendirilmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara 117, 295-344.
- Erken A., Nomaler G. Ş. ve Gündüz Z. (2018). The development of attenuation relationship for Northwest Anatolia region, Arabian Journal of Geosciences, 11(21), 1-6.
- Gülkan, P. vd. (1993). En son verilere göre hazırlanan Türkiye deprem bölgeleri haritası, rapor no: 93(01), ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara.

- Gülkan, P. & Kalkan, E., (2002), Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey, *Journal of Seismology*, 6(3), 397-409.
- İnan, E., v.d. (1996). 1976-1996 yılları arası ivme kayıtları olan deprem kataloğu, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Joyner, W.B. & Boore, D.M., (1981). Peak horizontal acceleration ve velocity from strong-motion records including records from the 1978 Imperial Valley, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(6), 2011-2038.
- Kadirioğlu F.T. vd. (2018). An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey ve its near vicinity (1900–2012). *Bull Earthquake Engineering* 16, 3317–3338.
- Kale, Ö. v.d. (2015). A ground-motion predictive model for Iran ve Turkey for horizontal PGA, PGV, ve 5% damped response spectrum: investigation of possible regional effects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.
- Kale, Ö., (2017). Tasarım spektrumu parametreleri için olasılıksal sismik tehlike analizlerine bağlı bir çalışma. *İMO Teknik Dergi*, 2017(488), 8077-8103.
- Kale Ö. & Akkar S. (2011). Yerel ve global yer hareketi tahmin denklemlerinin türkiye için uygulanabilecek sismik tehlike analizlerinde kullanılabilirliklerinin test edilmesi: 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ODTÜ, Ankara.
- Kalkan E., (2001). Attenuation relationship based on strong motion data recorded in Turkey, The Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural Ve Applied Sciences, Ankara.
- Kalkan E. & Gülkan P., (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20(4), 1111-1138.
- Kayabalı, K., (2002). Modeling of seismic hazard for Turkey using the recent neotectonic data, *Engineering Geology*, 63(3-4), 221-232.
- Kayabalı, K. & Akın, M., (2003). Seismic hazard map of Turkey using the deterministic approach, *Engineering Geology*, 69(1-2), 127-137.
- Kramer S.L., (1996). *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- Özbey vd. (2004). An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a rveom effects approach, *Soil Dynamics ve Earthquake Engineering*, 24, 115-125.
- PEER, (2007). Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak ve spectral ground motion parameters by David M. Boore ve Gail M. Atkinson, 01, 110 p.

- Seyrek E., (2018, 14-16 Kasım). Mevcut ve revize edilmiş sismik tehlike haritasının Kütahya ve çevresi için mukayese edilmesi: International Congress on Engineering ve Architecture, Alanya.
- Seyrek E., (2009). Baraj yeri sismik tehlike analizlerinde sayısal çözümleme modelleri ve bir uygulama (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ulusay v.d., (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data ve iso-acceleration map of Turkey, *Engineering Geology*, 74, 265-291.
- Ulutaş E. & Özer M.F (2010). Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for Eastern Marmara Region in Turkey, *The Arabian Journal for Science ve Engineering*, 35, 187-203.

Rezonant Kolon Deney Sistemi ve Deneyin Teorisi

Seyfettin Umut Umu¹

Özet

Depremler gibi hareketler zemin ve yapılara gelen tekrarlı dinamik yüklemelerdir. Dolayısıyla bu hareketlerin zeminlerde ve yapılarda oluşturduğu etkileri ölçmek zeminlerin davranışını bilmek açısından önemlidir. Zeminlerin dinamik parametrelerinin saptanması dinamik yüklemeler altındaki davranışını belirlemede önemli bir aşamadır. Dinamik zemin parametrelerini belirlemek amacıyla gerek sahada gerekse laboratuvar ortamında kullanılan çok sayıda deney sistemi geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları çeşitli ampirik ilişkiler ile sonuca ulaşırken bazıları ise zeminin dinamik etkiler altındaki davranışını modelleyerek doğrudan sonuca ulaşmamızı sağlar. Düşük ve orta seviye birim kayma deformasyon genliği ($\gamma = \%0,0001 - \%0,1$) arasındaki seviyelerde zemin davranışını belirlemede laboratuvar ortamında kullanılan test sistemlerinden birisi Rezonant Kolon deneyidir. Bu testte, katı veya içi boş silindirik bir zemin örneği üç eksenli bir hücreye yerleştirilir ve örneğe burulma veya boyuna yükleme uygulanır. Elektrik motoru veya elektromanyetik yükleme sistemi aracılığıyla zemin örneğine rezonans frekans değerine ulaşana kadar tekrarlı dinamik yük uygulanır ve hem zemin geometrisine bağlı hem de test sistemi sınır koşullarına bağlı olarak zeminin kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerleri belirlenir. Sonrasında zemin kolonundan yük kaldırılarak serbest titreşime bırakılır ve sönüm oranı değeri de belirlenmiş olur. Zemin örneğinin alt veya üst ucundaki deformasyonlarını kısıtlayan farklı Rezonant Kolon deney sistemleri mevcuttur. Literatürde en fazla kullanılan Rezonant Kolon modelleri, için dolu örneklere üst kısımdan yük uygulayan, alt kısmı tutulu olan ve zemine burulma yükü uygulayan modellerdir. Bu çalışmada Rezonant kolon deney sisteminin çalışma prensibi ve teorisi aktarılmıştır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, suumu@eskisehir.edu.tr, 0000-0002-5901-2626

1. Giriş

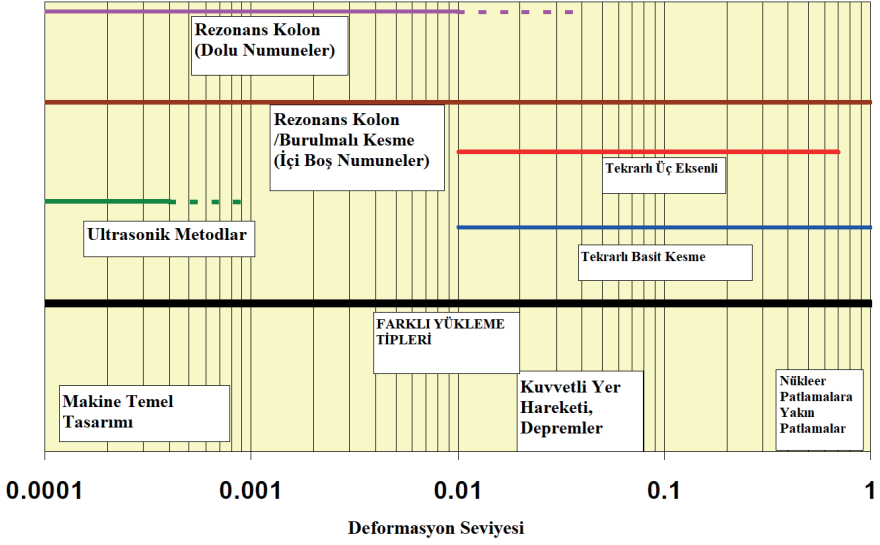
Dinamik zemin özellikleri, deprem sarsıntısı, makine titreşimi, trafik yüklemesi gibi dinamik yüklere karşı koyması gereken yapıların analizi ve tasarımı için önemli parametrelerdir. Dinamik zorlama ve yüklemelere sebebiyet veren bu olayların her biri zemin-yapı sistemini çok farklı genlik ve frekanslara maruz bırakır.

Zeminlerin mekanik davranışı efektif gerilme, boşluk oranı, su içeriği, gerilme seviyesi ve gerilme veya şekil değiştirme yolu gibi diğer bazı faktörler tarafından belirlenir. Tüm bu faktörler hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında eşit derecede önemlidir ve bu nedenle normalde statik davranıştan farklı olarak dinamik davranışı karakterize eden unsurlar olarak değerlendirilmez. Bu durumda bu parametrelere ek olarak dinamik davranışı statik davranıştan ayıran özellikler ise dinamik yüklemenin hızı ve yüklemenin çevrimidir (tekrarıdır).

Zemin-yapı tasarımında tipik olarak dikkate alınan yükleme hızı veya yükleme süresi, sismik yükleme için 0,1 ila 3,0 saniye arasında ve 10 ila 100 tekrar için değişmektedir. Demiryolları ve karayolu kaplamalarının altındaki zeminler genellikle yaklaşık 0,1 ila 1,0 saniye arasında bir hızda ancak çok fazla sayıda tekrarla yüklenir. Kazık çakma ve makine temeli, 0,1 ila 0,01 saniye arasında çok yüksek hızlarda yük uygulayabilir. Patlatma, 0,001 saniyeye varan hızlarda şok veya darbe yükleri uygulayabilir.

Dinamik zemin özelliklerini araştırmak için laboratuvar ortamında çok sayıda teknik kullanılmaktadır. En yaygın olanlarından bazıları dinamik üç eksenli deney, dinamik basit kesme deneyi, rezonant kolon deneyi, burulmalı kesme deneyi ve ultrasonik hız deneyidir. Her biri, sahadaki zemin sınır koşullarının yanı sıra gerilme yolları, yük genlikleri ve farklı olay türlerinin yük frekanslarına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1'de, gerilme genliğine göre en yaygın dinamik cihazların tipik gerilme aralıkları görülmektedir.

Maksimum kayma modülü, zeminin elastik davranışını değerlendirmek için önemli bir parametre olan G_{maks} ile ifade edilir. Bu parametre, lineer ve lineer olmayan elastik zemin davranışının karakterizasyonunda kullanılır ve genellikle arazi veya laboratuvar ortamında kayma dalgası hızından hesaplanır (Richart, et al., 1970; Vigianni, 1991; De Alba and Baldwin, 1991; Youn, et al., 2008; Umu, 2013). Rezonant kolon deney sistemi de zeminlerin dinamik parametrelerinin bulunmasını sağlayan laboratuvar deneylerinden birisidir. Deney sistemi, prizmatik çubuklarda dalga yayılım teorisine dayalıdır ve dinamik zemin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılır.



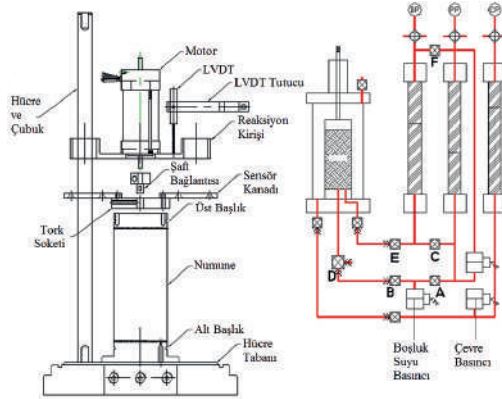
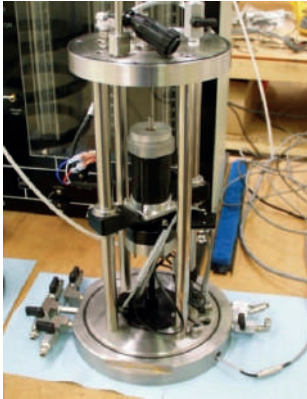
Şekil 1. Farklı laboratuvar testleri ve saba etkinlikleri ile ilişkili tipik gerilme seviyesi. (Ishihara, 1996, GCTS CATS, 2007)

RC deney sisteminde genellikle birim kayma genliği $\gamma = \%0,0001 - \%0,1$ arasında değişmektedir ve ilgili aralıkta dinamik zemin parametrelerinin ölçümünde kullanılır. Deney sistemine eklenebilecek farklı deformasyon ölçüm aparatları ile kayma deformasyon seviyeleri genişletilebilir. Rezonant kolon deney sistemi öncelikle Japonya'da geliştirilmiş ve 1930'lu yıllardan itibaren zeminlerin ve kayaların dinamik davranışını analiz etmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (Ishimoto and Iida, 1937; Iida, 1938,1940). Rezonant kolon testinde zemin kolonuna boyuna veya burulma tipinde titreşim uygulanır ve zemine ait kayma (v_s) ve basınç dalga (v_c) hızları belirlenmektedir (Wilson and Dietrich, 1960; Hardin and Richart, 1963; Hall and Richart, 1963).

Deney sistemi öncelikle granüler zeminlerde (özellikle kumlarda) kullanılmaya başlanmış ve kuru kum örnekler kullanılarak geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, zeminlerin dinamik tepkilerinin efektif gerilme, birim kayma deformasyon genliği, boşluk oranı ve dinamik yükün çevrim sayısı gibi özelliklerden etkilendiği bulunmuştur. Yükleme frekansının, dinamik yükün çevrim sayısının ve uygulanan deformasyonun genliğinin sabit olduğu durumlarda, zeminin dinamik özellikleri üzerinde etkili olmadığı görülmüştür (Hardin and Drnevich, 1972).

Rezonant kolon test cihazında (Şekil 2) zemin numunesi alt tarafta sabit, üst tarafta ise serbesttir. Farklı tipte olan deney sistemleri de mevcuttur. Serbest olan üst tarafta başlık bulunur ve bu başlık sayesinde dinamik yük zemin örneğine aktarılır. Öncelikle zemin örneği test cihazı içinde belirlenen gerilme altında konsolidasyon sürecine bırakılır. Sonrasında üst başlık ve dinamik yükleme sistemi yardımıyla burulma yükü uygulanır. Deney sırasında yüksek frekansta uygulanan dinamik yüklemelerle birim kayma deformasyon genliği maksimum değerine ulaşmaya kadar frekans kademeli olarak artırılır. Zemin örneğinin frekans değeri birim kayma deformasyon genliğinin en büyük durumundaki en düşük frekans değeridir. Bu noktada aynı zamanda deformasyonlar sonsuza uzar. Zemin örneğinin frekans değeri aynı zamanda zeminin rezonans frekansı olarak da adlandırılır. Rezonans frekans değeri öncelikle zemin örneğinin dayanımına, örneğin çap ve yükseklik değerlerine ve kullanılan RC test sistemine bağlıdır. Zemin örneğinin sönüm oranı, serbest titreşimden (free vibration decay) ve yarı güç bant genişliğinden (half power bandwidth) hesaplanabilmektedir.

Rezonant kolon test sisteminden elde edilen sonuçlar, test sisteminin ve zemin örneğinin birlikte bulunduğu deneysel sistemin davranışına bağlıdır ve bu davranışın geri analizinin sonucudur. Bu nedenle hem deney sisteminin sınır şartları hem de zemin örneğinin davranış sonuçları üzerinde etkilidir. Bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanması için deney sisteminin özellikleri göz önüne alınmalı ve zemin-cihaz etkileşimi dikkate alınarak analiz yapılmalıdır.



Şekil 2. Rezonant kolon deney sistemi ve deney sistemi kesiti (Fixed-Free System) (GCST CATS, 2007)

2. Deney Sisteminin Teorisi

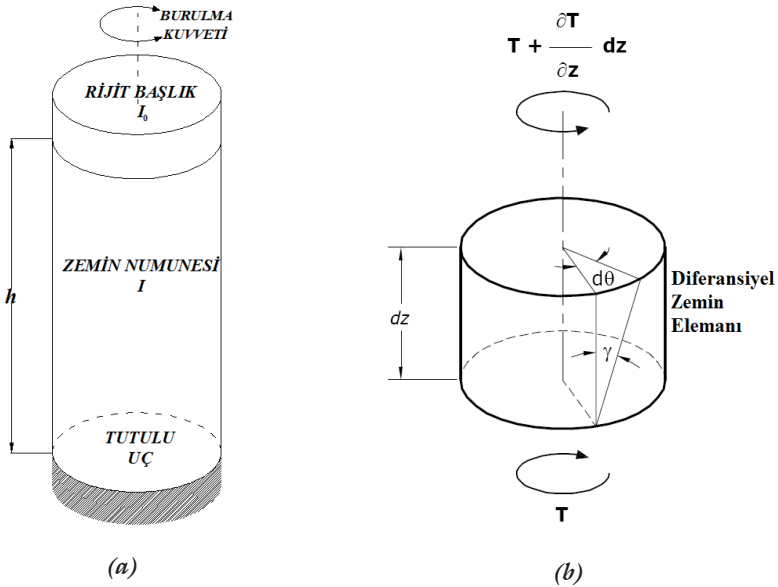
Rezonant Kolon deneyinde öncelikle, boşluk oranı, doygunluk durumu, efektif gerilme vb. arazi koşulları belirlenen bir silindirik (içi boş ya da dolu) zemin numunesi, test hücreesine yerleştirilerek arazideki koşullarına bağlı olarak konsolide edilir. Deney sisteminde dinamik yükün frekans ve frekans genliği kontrol edilebilmektedir. Rezonant Kolon test sisteminde, elektromanyetik bir yükleme sistemi veya motor tarafından numunenin üst kısmına harmonik bir burulma uyarımı uygulanır. Sabit genlikli bir burulma harmonik yükü, bir dizi frekans üzerinden uygulanır ve birim kayma deformasyon genliğinin yanıtı ölçülür. Sonrasında, dalga yayılım teorisine bağlı olarak öncelikle zeminin rezonans frekans değeri test sisteminden ölçülür. Bu frekansa ve deney sisteminin sınır şartlarına, zemin numunesinin boyutlarına ve deney sisteminin polar atalet moment değerlerine bağlı olarak zemin numunesinin kayma dalgası hızı hesaplanır. Titreşimin frekansından titreşim sırasındaki birim kayma deformasyon ivme genliği hesaplanır. Rezonant kolon testlerinde (alttan sabit üstten serbest olanlarda) zemin kolonunun üst tarafında elektrik veya manyetik güç ile çalışan yükleme sistemi mevcuttur ve zemine istenen frekans ve genlikte dinamik tork uygulanmaktadır. Rezonant kolon deneyinde düşük ve orta birim kayma deformasyon genliklerinde ölçümler yapılabilmektedir ve genellikle deformasyon miktarı $\gamma = \%0,0001 - \%0,1$ arasında değişkenlik gösterir (ASTM D4015-87, 2000).

Kayma Modülü

Kelvin-Voigt zemin modelinden türetilmiş alt tarafı tutulu ve üst tarafı serbest (fixed-free) olarak idealize edilmiş silindirik ve diferansiyel örnek Şekil 3'de verilmiştir ve hareket denklemi aşağıda verilen Denklem 1'deki gibi yazılabilir (Ishihara, 1996). Tork T , elastik zemin örneğine uygulanır. İlgili eşitlikte dz boyunca artan dönme açısı $d\theta$ ile gösterilir ve aynı zamanda örnek doğrultusunda değişen açı fazladan tork üretir.

$$T = GJ \frac{d\theta}{dz} \quad (1)$$

Burada T , torku, J ise kesit alanın polar momentini, G , kayma modülünü ifade etmektedir. Şekil 3b'de ise her iki yüzüne tork uygulanmış zemin örneğinin diferansiyel diyagramı verilmiştir T ve $T + \frac{\partial T}{\partial z} dz$



Şekil 3. a) Tutulu (alt) ve serbest uç (üst) zemin örneğinin idealize edilmiş durumu, b) zemin örneğinin diferansiyel diyagramı (Umu, 2013)

Eşitlik 2, diferansiyel eleman için denklem 1'den elde edilir ve aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial T}{\partial z} dz = GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dz \quad (2)$$

Newton'un ikinci yasasının örnek zemin kolonunun hareketine uygulanması ve bu net torkun kütle polar atalet momenti ve açısal ivmenin çarpımına eşitlenmesi sonucunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial T}{\partial z} dz = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \rho J dz \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (3)$$

İlgili eşitlikte I , kütle atalet momentini ve $\rho J dz$ ile ρ ise zemin örneğinin yoğunluğunu göstermektedir.

Sonrasında, $\frac{\partial T}{\partial z}$ 'yi denklem 1'de yerine koyarak ve kayma dalgası hızı V_s , kayma modülü ve kütle yoğunluğu $G = \rho v_s^2$ arasındaki ilişkiyi kullanarak, burulma altındaki elastik bir çubuktaki dalga eşitliği elde edilir (Denklem 4).

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (4)$$

Değişkenler denklem 4'de ayrılırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\theta(z,t) = \left[A \sin\left(\frac{\omega}{v_s} z\right) + B \cos\left(\frac{\omega}{v_s} z\right) \right] e^{i\omega t} \quad (5)$$

İlgili eşitlikte, doğal açısal frekans ω ile gösterilir. Zemin numunesine bağlı sınır koşulları ise A ve B olarak gösterilir.

Aşağıda, alt tarafı tutulu üst tarafı serbest (fixed-free) Rezonant kolon deney testinin sınır koşulları verilmiştir.

➤ Numune alt kısımda tutuludur. Bu sebeple zemin örneğinin alt kısmında açısal yer değiştirme 0 (sıfır)'dır.

➤ Zemin örneği üst tarafta serbesttir. Dolayısıyla bu kısımda oluşan tork üst başlık ve motor (drive system) sistemin atalet torkuna eşittir. Fakat ters yönlüdür.

Birinci sınır koşula bağlı olarak; $\theta = 0$, $z = 0$ olduğundan dolayı $B = 0$ değerini alır ve zamana göre ikinci türevi alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 [A \sin(\omega z / v_s) e^{i\omega t}]}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (6)$$

İkinci sınır koşula bağlı olarak, serbest uçtaki tork aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{z=h} = -I_0 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) \quad (7)$$

Burada, I_0 ; sürücü sistemin kütle atalet momentini (mass moment of inertial of drive system) ve h ; zemin numunesinin yüksekliğini göstermektedir.

Denklemin 6'daki $\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}\right)$ ifadesi denklemin 7'de ilgili yere konulduğundan denklemin 8 elde edilir.

$$T_{z=h} = I_0 \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (8)$$

Denklemin 1 ve 8 birleştirildiği takdirde Denklemin 9'da verilen eşitlik elde edilir.

$$GJ \frac{\partial \theta}{\partial z} = I_0 \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} ; z=h \quad (9)$$

θ , değeri $z = h$ koşuluna bağlı olarak denklemin 5'den türevi alınırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=h} = \frac{A \omega}{v_s} \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (10)$$

Denklemin 9 ile 10 birleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$GJ \frac{\omega}{v_s} \cos\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (11)$$

Kayma dalgası hızı ile kayma modülü $G = \rho v_s^2$ ilişkisi Denklem 11'de yerine konulursa Denklem 12'deki eşitlik elde edilir.

$$\rho v_s J \omega \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (12)$$

Denklem 12 $I = \rho J h$ ilişkisi bağlı olarak yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\frac{I}{h} v_s \omega \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (13)$$

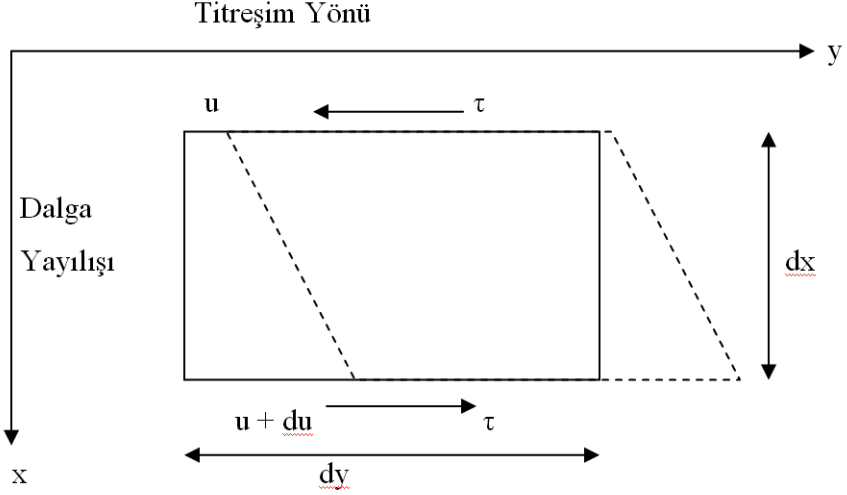
Denklem 14, denklem 13'ün düzenlenmesi ile elde edilir ve aşağıdaki gibidir.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{v_s} \tan\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (14)$$

İlgili denklemde zemin örneğinin kütle atalet momenti I , üst başlık ve dinamik yükleme sisteminin kütle atalet momenti I_0 , ile gösterilmektedir. Kayma dalgası hızı rezonant kolon testinden elde edilebilir. Buradan $G = \rho v_s^2$ bağıntısı kullanılarak zeminin önemli dinamik parametrelerinden biri olan kayma modülü de bulunmaktadır.

Kayma Dalgası Hızı

Kayma modülünün hesaplanmasında kullanılan Kelvin-Voight modeli kayma dalgası hızını belirlemek için de kullanılabilir. Rezonant kolon deneyinden bulunan zeminin rezonans frekansı kullanılarak kayma dalgası hızı hesaplanabilir (Ishihara K., 1996). Şekil 4'de diferansiyel zemin örneğinde kayma dalgası ilerleme yönü gösterilmiştir.



Şekil 4. Kayma dalgası ilerleme yönü (Umu, 2013)

Sırasıyla, du , kayma deformasyonu ve $d\tau$, kayma gerilmesi değişimleri aşağıdaki denklemlerde verildiği şekilde yazılabilir.

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx \quad (15)$$

$$d\tau = \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right) dx \quad (16)$$

$$d\tau = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \rho dx \quad (17)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}} = \frac{\text{Kütle} \times \text{ivme}}{\text{Alan}} = \frac{\rho dx \partial^2 u}{dx \partial t^2} \quad (18)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \rho \quad (19)$$

Yukarıda verilen diferansiyel eşitlikler ile Hooke yasası birleştirilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial x} \quad (20)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

Kayma dalgası hızının zemin yoğunluğu ve kayma modülü ile tanımlandığı eşitlik 23; eşitlik 20, 21 ve 22'den elde edilmiştir.

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (23)$$

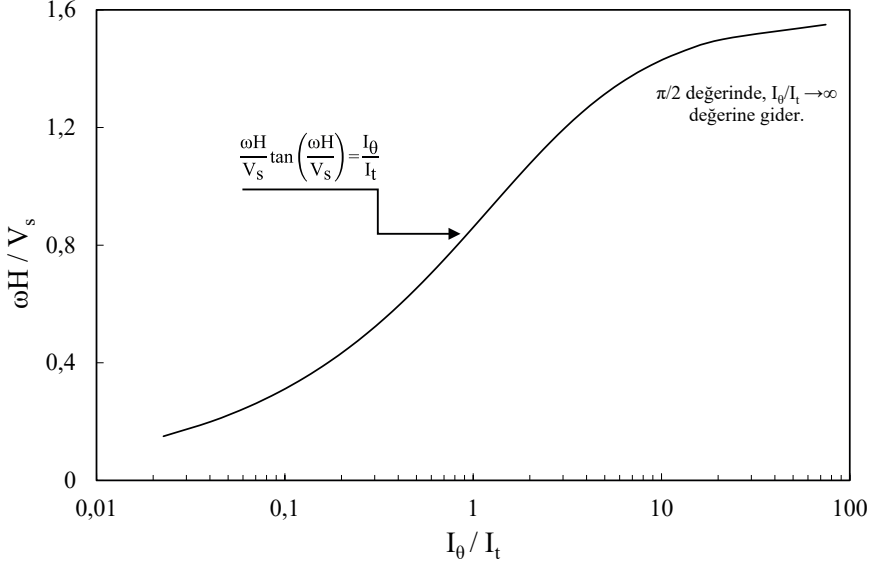
Kayma dalgası hızı (v_s) aynı zamanda Rezonant kolon deney sisteminden bulunan zemin rezonans frekans değeri (f) ile de aşağıda verilen şekilde hesaplanabilir. Verilen denklemlerde I , zeminin kütle atalet momenti, I_0 sürücü sistemin kütle atalet momenti ve L ise zemin kolonunun yüksekliğidir.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{2\pi f L}{v_s} \tan\left(\frac{2\pi f L}{v_s}\right) \quad (24)$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{v_s} \tan\left(\frac{\omega h}{v_s}\right), \quad \frac{\omega h}{v_s} = \beta \quad (25)$$

Zemin numunesinin polar atalet momenti ile deney sisteminin polar atalet momenti ve β değeri arasında eşitlik 26 da verilen ilişki yazılabilir. Ayrıca Şekil 5'de I/I_0 arasındaki ampirik ilişki verilmiştir.

$$\beta = 0,9548 \times \left[\left(\frac{I}{I_0} \right)^{0,4892} \right] \quad (26)$$



Şekil 5. I/I_0 atalet momentlerinin deneysel ilişkisi (Richart, et al., 1970; Ishihara,1996, Umu, 2013)

Kayma Deformasyon Genliği

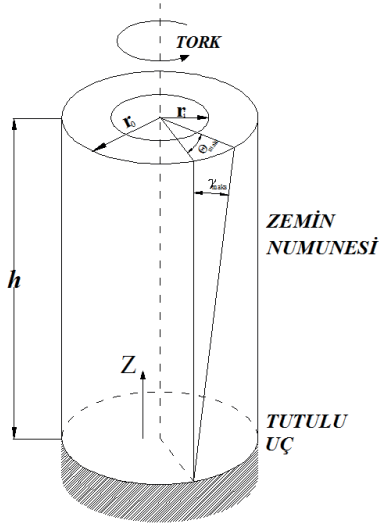
Şekil 6'da burulma yüküne maruz kalmış katı zemin kolonunun üzerindeki kayma deformasyon durumu verilmiştir. Kayma deformasyon genliği numunelerin merkez noktasında içi dolu numunelerde sıfır(0) ve boş numunelerde ise minimum değerdedir. Diğer taraftan kayma deformasyon genliği zemin dış yüzeyinde ise maksimum büyüktükdür (Şekil 6). Eşitlik 27'de birim kayma deformasyon genliğine ait eşitlik verilmiştir.

$$\gamma = \frac{r\theta_{maks}}{h} \quad (27)$$

İlgili eşitlikte, r ; zemin numunesinin ekseninden olan uzaklığı, θ_{maks} ; maksimum dönme açısını ve h ; örnek yüksekliğini ifade etmektedir.

Kayma gerilmesi radyal (çap) mesafe boyunca sabit olmadığından, ortalama kayma gerilmesini temsil etmek için eşdeğer bir kayma gerilmesinin tanımlanması γ gereklidir. Kayma gerimindeki bu değişim, katı numuneler yerine içi boş numunelerin test edilmesinin daha avantajlı olduğunu göstermektedir. İçi boş numunelerde, numune boyunca kayma gerinimi genliğindeki değişim daha küçüktür ve hata payı daha azdır. Lakin içi boş

numunelerin deneye hazırlanma süreci dolu olanlara göre daha uzun ve zordur.



Şekil 6. Zemin numunesindeki birim kayma deformasyon genliği (Umu, 2103)

Numunenin dolu ya da boş olmasına bakılmaksızın hesaplanan kayma modülü ile ilişkin tek veya benzersiz birim kayma deformasyon genliği gereklidir. Aşağıdaki tabloda katı ve silindirik örneklerin eşdeğer yarıçap değerleri verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Eşdeğer yarıçap değerleri

| Numune tipi | Eşdeğer yarıçap |
|-------------|-------------------------------------|
| İçi dolu | $r_{eşdeğer} = \frac{2r_0}{3}$ |
| İçi boş | $r_{eşdeğer} = \frac{r_0 + r_i}{2}$ |

Chen ve Stokoe (1979) tarafından yapılan çalışmalarda eşdeğer yarıçapın birim kayma deformasyon genliğine bağlı olduğu düşünülerek farklı eşdeğer yarıçap eşitlikleri önerilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Chen ve Stokoe (1979) tarafından önerilen eşdeğer yarıçap değerleri

| Kayma deformasyon genliği | Eşdeğer yarıçap |
|---------------------------|-----------------|
| $\gamma < \%10^{-3}$ | $0,82r_0$ |
| $\gamma = \%10^{-1}$ | $0,79r_0$ |

Fixed-free deney sistemleri, zemin kolonunun üst bölümündeki dönme açısı olan θ_{maks} 'ı, gerek akselerometre (ivmeölçer) gerekse $r_{sensör}$ yarıçapında monte edilmiş proksimetre (proximeter) ile ölçülebilmektedir. Kayma deformasyonu ölçülürken deney sisteminde akselerometre kullanılıyorsa, burulma deformasyonu (x) ölçülür ve ivmenin zamana göre iki kat integrali alınır. Burulma deformasyonuna ait eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$x = -\frac{\ddot{x}}{\omega^2} = -\frac{\ddot{x}}{4\pi^2f^2} \quad (28)$$

İlgili eşitlikte,

ω ; dairesel frekansı,

f ; lineer frekans değerini ifade etmektedir.

Alıcıların ölçümlediği deplasman değeri ve $r_{sensör}$ arasındaki eşitlikten üst başlıgım dönme açısı aşağıda verildiği şekliyle hesaplanabilir.

$$\theta_{maks} = \frac{x}{r_{sensör}} \quad (29)$$

$$\gamma = \frac{r_{eşdeğer} \theta_{maks}}{h} \quad (30)$$

Sönüm Oranı

Zemin numunesinin elastik parametrelerinden olan sönüm oranı da Rezonant Kolon deney sisteminden hesaplanabilen diğer malzeme özelliğidir. Malzemelerin sönümünü tanımlamak oldukça zordur ve bu sebeple yaklaşımlarda eşdeğer viskoz sönüm oranı hesaplanır ve böylelikle zeminin sönümü tanımlanır. Tek serbestlik dereceli sistemin serbest davranışının matematiksel ifadesi eşitlik 31 de verilmiştir.

$$0 = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (31)$$

Eşitlik 31'de; \ddot{x} , \dot{x} , x sırasıyla *ivme*, *hız ve yer değiştirmeyi* ifade etmektedir, *kütle*, *viskoz sönüm ve yay sabiti* ise sırasıyla m , c ve k harfleri ile gösterilmiştir.

D , c_c ve ω_n ifadeleri sırasıyla *viskoz sönüm oranı*, *kritik sönüm katsayısı*, *sönümlenmemiş doğal frekans* olarak tanımlanır.

$$D = \frac{c}{c_c} \quad (32)$$

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (33)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (34)$$

İlgili ilişkiler eşitlik 31'de verilen tek serbestlik dereceli sistemin serbest davranış denkleminde yerine konulursa eşitlik 35 elde edilir.

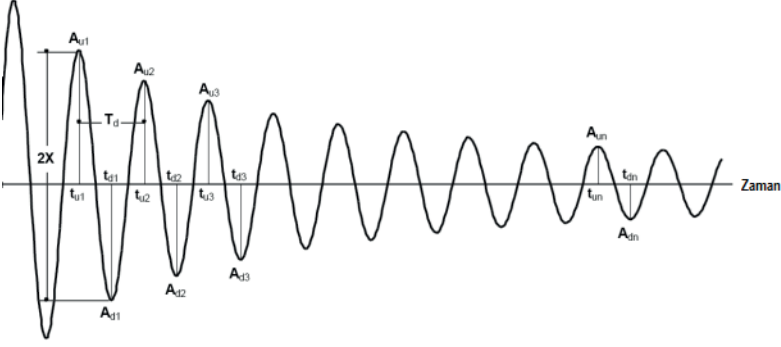
$$0 = \ddot{x} + 2D\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x \quad (35)$$

Eşitlik 35 için tek serbestlik dereceli sistemin az sönümlü, kritik sönümlü veya aşırı sönümlü olmasına bağlı olan üç genel çözümü vardır. Rezonant kolon testinde zemin numunelerinin serbest titreşimi normalde sönümsüz bir davranış sergiler ve bu durum için genel çözümde serbest titreşimin $D < 1$ olduğu durum göz önüne alınır ve bu durum eksik sönüm olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak denklem 35'in çözümü eşitlik 36'da verilmiştir. İlgili eşitlikte C sabit ve ω_d : *sönümlenmiş rezonans frekansı* göstermektedir.

$$x = Ce^{-\omega_n D t} \sin \omega_d t + \varphi \sin \left(\frac{\omega_n h}{v_s} \right) \quad (36)$$

Tipik bir serbest sönüm eğrisi Şekil 7'de verilmiştir. Bu egride herhangi iki tepe noktasının oranı aşağıdaki şekildedir.

$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{-\omega_n D (t_n - t_{n+1})} = e^{\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}}, t_{n+1} = t_n + 2\pi/\omega_n \quad (37)$$



Şekil 7. $D < 1$ durumu için logaritmik azalım eğrisi (GCTS CATS, 2007)

10 ile 50 çevrim arasında serbest sönüm eğrisi kullanılarak ve eşitlik 37'nin doğal logaritması alınarak **Logaritmik azalım**, δ , değeri hesaplanabilir.

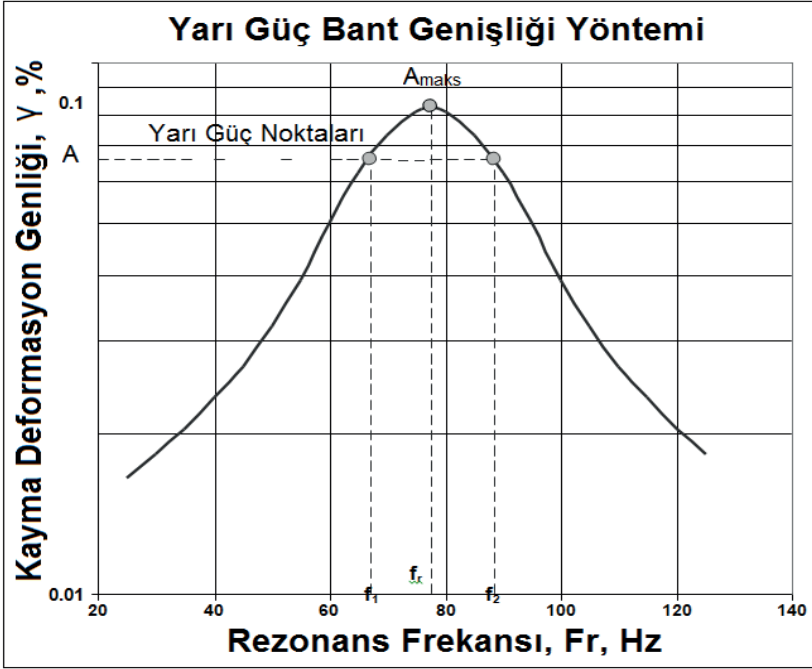
Zemin numunesine ait viskoz sönüm oranı eşitlik 38'de verilen bağıntıdan hesaplanabilir.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (38)$$

Rezonant kolon testinde zeminlerin sönüm oranını ölçmek için kullanılan ikinci bir yöntem “*yarı güç bant genişliği*” hesabıdır. Logaritmik azalım değeri, zorlanmış titreşim sonucu rezonans yakınındaki frekans tepki eğrisinin genişliği ölçülerek hesaplanır (Denklemler 39). Öncelikle A (*birim kayma deformasyon genişliği*) değeri $A = \frac{A_{maks}}{\sqrt{2}}$ eşitliği kullanılarak hesaplanır. Sonrasında, Şekil 8'de görülen f_1 , A deformasyon seviyesine karşılık gelen ve rezonans frekans değeri altındaki frekans değeri ve sonrasında f_2 değeri yani A deformasyon seviyesine karşılık gelen ve rezonans frekans değeri üstündeki frekans değeri hesaplanır. Zeminin rezonans frekans değeri f_r ise doğrudan rezonant kolon testinden elde edilir. Zemin örneğine ait ve yarı güç bant genişliği yaklaşımı kullanılarak hesaplanan D ise malzemenin sönüm oranıdır. Eşitlik 40'da zeminin sönüm oranı hesabı verilmiştir.

$$\delta = \frac{\pi(f_2^2 - f_1^2)}{2f_r^2} \sqrt{\frac{x^2}{x_{\text{maks}}^2 - x^2}} \frac{\sqrt{1 - 2D^2}}{1 - D^2} \quad (39)$$

$$D = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (40)$$



Şekil 8. Yarı güç bant genişliği yöntemi (HPBW) (GCTS CATS, 2007)

3. Sonuç

Sonuç olarak, depremler gibi sismik olaylar tekrarlayan dinamik yükler oluşturarak hem zeminlere hem de yapılara kuvvet uygulamaktadır. Zemin davranışlarının derinlemesine anlaşılması için bu tekrarlı yüklemelerin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu noktadaki en önemli adım, tekrarlı dinamik yükleme koşullarının etkisi altındaki zemin tepkilerinin karmaşık özelliklerini anlamada vazgeçilmez bir aşama olan dinamik zemin parametrelerinin titizlikle belirlenmesini içerir. Hem geniş saha araştırmaları hem de titizlikle kontrol edilen laboratuvar ortamlarını kapsayan sayısız deneysel sistem, zemin davranışının zor dinamiklerini çözme hedefiyle tasarlanmıştır. Bu metodolojilerden bazıları ampirik ilişkilere dayanırken,

diğerleri dinamik yükler altındaki zeminin karmaşık hareketini simüle ederek hızlı ve somut sonuçlar verir. Bu çalışmada Rezonant kolon deney sistemi ve sistemin teorik altyapısı aktarılmıştır.

Düşük ve orta kayma gerilmesi genliklerinin ($\gamma = \%0,0001 - \%0,1$) sınırları içindeki zemin davranışını ayırt etmek için tasarlanmış laboratuvar teknikleri arasında, Rezonant Kolon testi önemli bir konuma sahiptir. Rezonant kolon deneyi, katı veya içi boş silindirik bir zemin numunesinin özenle hazırlanarak üç eksenli bir hücreye yerleştirilmesi ile başlar. Numune, kendine has özelliklerine özgü bir frekansta rezonansa girene kadar burulma veya boylamasına yüklemeye maruz bırakılır. Zemin numunesinin geometrik özelliklerinden ve test sisteminin sınır koşullarından etkilenen kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerleri belirlenir. Daha sonra, burulma yükü zemin örneği üzerinden kaldırılarak zemin serbest titreşime bırakılır ve zemine ait bir başka önemli parametre olan sönüm oranı hem serbest titreşim azalmından hem de rezonans frekansa bağlı olarak yarı güç bant genişliği değerinden hesaplanabilir. Literatürde yaygın olarak, katı numunelere üst uçtan burulma yükleri uygularken alt ucu kısıtlayan Rezonant Kolon testleri kullanılmaktadır.

Referanslar

- ASTM D4015-87, 2000, Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method, American National Standards Institute.
- Chen, A.T.F. and Stokoe, K.H., 1979, Interpretation of strain-dependent modulus and damping from torsional soil tests, Report No. USGS-GD-79-001, NTIS No. PB-298479, US. Geological Surves, Menlo Park, CA 94025.
- De-Alba, P. and Baldwin, K.C., 1991, Use of bender elements in soil dynamics experiment, Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics, Geotechnical Special Publication, ASCE, 29, 86-101.
- GCTS Testing Systems (2007), CATS Resonant Column & Torsional Shear Test Mode 1.8, User Guide and Reference, Tempe, Arizona 85285 USA
- Hall, J.R. and Richart, F.E., 1963, Dissipation of elastic wave energy in granular soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 89, SM6, 27-56.
- Hardin, B.O. and Richart, F.E., 1963, Elastic wave velocities in granular soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 89, SM1, 33-65.
- Hardin, B.O. and Drenevich, V.P., 1972, Modulus and damping of soils I: measurements and parameters effects, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98,
- Iida, K., 1938, The velocity of elastic waves in sands, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University, 131-144.
- Iida, K., 1940, On the elastic properties of soil, particularly in relation to its water content, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University, 18, 657-690.
- Ishihara, K., 1996, Soil behaviour in earthquake geotechnics, Clarendon-Oxford University Press, 385 p.
- Ishimoto, M. and Iida, K., 1937, Determination of elastic constants of soils by means of vibration methods. Part 2. Modulus of rigidity and poisson's ratio, Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 15, 67-85.
- Kramer, S.L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall Inc., New Jersey, 653 p.
- Umu, S. U., 2013, Kum – atık lastik karışımlarının lineer olmayan dinamik davranışı, Eskişehir, Doktora Tezi, ESOGÜ.
- Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D., 1970, Vibration of soils and foundations, Prentice Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 414 p.

- Viggiani, G., 1991, Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus, *Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks*, Proceedings of the Workshop in Napoli, 75-97.
- Wilson, S.D. and Dietrich, R.J., 1960, Effect of consolidation pressure on elastic and strength properties of clay, *Proc. ASCE Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, University of Colorado, 419-35, Discussion 1086-92.
- Youn, J., Choo, Y. and Kim, D., 2008, Measurement of small-strain shear modulus G_{\max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column and torsional shear tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1426-1438.

İnce Daneli Zeminlerde İçsel Erozyon Test Ekipmanlarının Gelişim Sürecine Genel Bakış

Sadettin Topçu¹

Hasan Tosun²

Özet

Dolgu barajların dolgu ve temel kısımlarında meydana gelen içsel erozyon bu barajların uzun ve kısa dönemli davranışında güvenliğini tehdit etmektedir. Özellikle çeşitli etkilerle dolguda oluşan memba-mansap doğrultusundaki çatlaklarda meydana gelen içsel erozyon biçimlerinden olan kaçak erozyonunda ince daneli zeminlerin taşınması gerçekleşir. Bu malzeme taşınımıyla birlikte ortaya çıkan su kaçağı bu yapıların stabilitesini bozarak göçmeye kadar varan felaketlere neden olabilmektedir. Kaçak erozyonu, çatlakların derinliği, genişliği ve çatlak içerisindeki gelişen akımın hidrolik eğimi gibi hidrolik parametrelerle kontrol edilebilmektedir. Bunun yanında dolgu barajların geçirimsiz perdesinde kullanılan ince daneli zeminlerin içsel erozyon direnci de bu işlem de kontrol faktörlerindedir. İnce daneli zeminlerin içsel erozyon direnci malzeme taşınımının başladığı akımın hızıyla ilişkili kritik kayma gerilmesi ve malzeme taşınımının hızını gösteren erozyon oranı parametreleri ile belirlenebilmektedir. Şimdiye kadar ince daneli zeminlerin içsel erozyon direnci ve bu kontrol faktörüne etki eden kimyasal, mekanik ve geoteknik özellikler birçok test ekipmanı ile araştırılmıştır. Bu bölümde bu test ekipmanlarının tarihsel gelişimi, test ekipmanı detayları ve yapılan çalışmalar sunulacaktır.

1. Giriş

Erozyon, doğada çeşitli fiziksel etkiler (rüzgâr, su, buzul vs.) ile yer malzemelerinin bir yerden bir yere taşınma işlemidir. Doğal bir süreç olarak bilinen erozyon, özellikle mühendislik yapıları için bir problemdir.

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

2 Prof.Dr., Mudanya Üniversitesi, hasantosun26@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9481-7956

Akarsularda köprü ayaklarının ve liman-iskele yapılarında keson kazıkların diplerinin oyulması, dolgu barajlarda yüzeysel ve içsel malzeme taşınımı vb. neticesinde erozyon direk mühendislik yapılarının stabilitelerini ve işlevlerini tehdit etmektedir. Erozyon, meydana geldiği ortama göre iki kategoride tanımlanmaktadır: Yüzeysel erozyonu ve İçsel erozyon. Bu işlemin, yerin yüzeyinde yağmur, rüzgar, akarsu ve buzul gibi değişik fiziksel etkiler sonucu oluşmasına “**yüzeysel erozyonu**” adı verilir. Yüzeysel erozyonu, aynı zamanda zemin-kaya oluşumunda görülen döngüde doğal bir süreçtir. Yüzeysel erozyonu, insan yapısı toprak yapılarında (karayolu ve demiryolu dolguları ile sulama kanalları toprak kaplamalarında vb.) da meydana gelebilmektedir.

İnşaat mühendisliği toprak işleri uygulamalarında, zemin içinde yer alan ince daneli malzemelerin, sızma ortamında bulunan boşluklardan veya değişik faktörlerin etkisi ile dolgu içinde oluşan çatlaklardan basınçlı boru akımı etkisi altında taşınması ve bu işleme bağlı olarak ortamda su taşınmasına neden boşlukların oluşması, genel olarak “**içsel erozyon**” olarak tanımlanır. İçsel erozyonda yüzeysel erozyonundan farklı olarak malzemelerin taşınması sadece su akımı ile gerçekleşir. Bu su akımı bazen sızma akımı iken bazen de çatlaklarda basınçlı boru akımı şeklinde olabilmektedir. İçsel erozyon, özetele su tutan dolgu yapılarında dolgu ve temellerindeki malzemelerin sızma ve basınçlı boru akımıyla taşınmasıdır. İçsel erozyon, su depolayan yapılarda kendini su kaçağının görülmesiyle belli eder. Bu iki farklı erozyon tipinde de erozyona neden olan suyun kimyasal özellikleri ile erozyona uğrayan zeminlerin fiziko-kimyasal içerikleri erozyonla taşınan malzeme miktarını büyüklüğünü belirlemekte ve işlemin oluşma hızını etkilemektedir.

İçsel erozyon, üstten aşma gibi dolgu baraj göçme modlarından sayılır. Dolgu barajların yaklaşık %30~50'sinin içsel erozyon sonucu göçtüğü bilinmektedir (Foster vd., 2000). İçsel erozyon beş farklı biçimde gerçekleşir. Dolgu barajlarda içsel erozyon biçimlerinin meydana geldikleri yer, zemin türü ve içsel erozyona neden olan akım tipi özet halinde tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. İçsel erozyon biçimleri ve özellikleri

| İçsel erozyon biçimi | Meydana geldiği yer | | Zemin türü | | Akım tipi | |
|-----------------------------|---------------------|-------|------------|-------------|-----------|---------------------|
| | Dolgu | Temel | Kohezyonlu | Kohezyonsuz | Sızma | Basınçlı boru akımı |
| Borulanma | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Toplam geriye doğru erozyon | ✓ | | | ✓ | ✓ | |
| Kaçak erozyonu | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Kontak Erozyonu | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Süfüzyon/Sufozyon | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | |

Tablo 1’de verilen içsel erozyon biçimlerinden kaçak erozyonu, dolgu barajlarda özellikle enine ve yatay çatlakların duvarlarını aşındırarak gelişen içsel erozyon biçimidir. Bunun yanında kondüvi ve dolusavak duvarları boyunca oluşan çatlaklarda, boşluklarda veya zayıf sıkıştırılmış dolgunun muhtemel bölgelerinde meydana gelen erozyon da kaçak erozyonuna girmektedir. Temellerde de meydana gelmektedir.

Bu çalışmada kaçak erozyon mekanizmasıyla gelişen içsel erozyon için ince daneli zeminlerin erozyon dirençlerinin belirlenebilmesi için geliştirilen test ekipmanları ve bu test ekipmanlarıyla yapılan çalışmalar sunulacaktır. Kaçak erozyonunun meydana geldiği kohezyonlu (ince daneli) zeminlerin erozyon direnci, erozyonun başladığı “**kritik kayma gerilmeleri (τ_c)**” ve erozyonla malzeme taşınımının ne kadar hızlı gerçekleştiğini gösteren “**erozyon oranı (ϵ)**” ile belirlenir. Erozyon direnci; kritik kayma gerilmeleri arttıkça ve/veya erozyon oranı azaldıkça; artar.

2. Test Ekipmanları ve Yapılan Çalışmalar

Zeminlerin erozyon davranışının incelenmesinde çok çeşitli deney ekipmanları kullanılmıştır. Bu deney sistemlerinde geçmişten bugüne ciddi oranda bir gelişme kaydedilmiştir. Başlangıçta açık kanallarda gerçekleştirilen araştırmalar, özellikle ölçüm teknolojilerindeki gelişmeler ile dolgu barajlardaki çatlaklarda ve boşluklarda meydana gelen içsel erozyon davranışının benzerinin laboratuvar ortamında oluşturulmasını sağlamıştır. Kaçak erozyonunda zeminlerin erozyon direnci ile ilgili yapılan çalışmalar zemin örneklerinde oluşturulan delik, çatlak ve yarık gibi basınçlı boru akımının geçebileceği malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çatlaklarda

oluşan akım boru hidroliğinin temel prensipleriyle açıklanmıştır. Erozyon direnci parametreleri; akımın debi ölçümlerine ve basınçlı akımın geçtiği çatlağın/boşluğun değişen boyutuna bağlı olarak değerlendirilmiştir. Erozyon test sistemleri iki başlık halinde incelenecektir.

2.1. Yüzey Erozyon Test Ekipmanları

2.1.1. Kanal Erozyon Testi

Bu deneyde, açık bir kanala serilen zeminlerin üzerinden su akımı geçirilerek zeminlerin erozyon davranışı incelenmiştir. Gibbs (1962) tarafından kil zeminlerin hidrolik taşınım kuvvetleri, bu deney ile belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin büyük çoğunluğu, düşük plastisiteli silt ve kil (ML ve CL) türü zeminlerdir. Araştırmacı, 45 farklı zeminin erozyon davranışını inceleyerek erozyon davranışını; plastisite, yoğunluk ve dane çapı dağılımları ile ilişkilendirmiştir. Elde ettiği verilere göre; zeminlerin erozyona karşı direncini gösteren kritik kayma gerilmesi değerleri; 0.72-2.87 Pa arasında değişmiştir. Kil zeminlerin; siltli ve killi kumlara göre erozyona karşı direnci yüksektir. Plastisite indisi, erozyon direncinde başlıca etkenlerden biridir. Kumlu ve çakıllı zeminlerde dane çapı dağılımı; erozyona karşı direncin belirlenmesinde yüksek oranda etkilidir. İnce daneli zeminlerin erozyona karşı direncinin belirlenmesinde, dane çapı dağılımının plastisite indisine göre etkisi daha azdır. Zeminlerin yoğunluğu, erozyona karşı direncin belirlenmesinde çok belirleyici değildir. Likit limitin (LL) zeminlerin erozyona karşı direncinin belirlenmesinde yoğunluğa göre daha etkili bir faktör olduğu ve yüksek likit limite sahip zeminlerin erozyona karşı dirençlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Yazar, yapılan deneylerden elde edilen verilere; zeminlerin tanımlanmasında kullanılan plastisite kartının A hattına bağlı olarak erozyon potansiyelinin değerlendirilebildiği bir yaklaşım önermiştir.

Aynı deney Lyle ve Smerdon (1965) tarafından kanala gevşek bir şekilde yerleştirilen malzemenin deneyden önce doygun hale getirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde zeminler sıkıştırılmadığı için su muhtevası ve yoğunluklar kontrol edilememiştir. Kanalda gözle görülür önemli bir erozyon görüldüğü andaki kritik taşınım kuvvetleri kritik hidrolik kayma gerilmeleri olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, boşluk oranı (e) ve plastisite indisi (PI) ile kritik kayma gerilmeleri arasında ilişkiler önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen verilere göre: kritik kayma gerilmelerinin tipik değeri 0.96 Pa olarak bulunmuştur. Kritik kayma gerilmesi değeri boşluk oranıyla doğrusal olarak değişmektedir. Kritik kayma gerilmesi değeri; plastisite indisi arttıkça artmaktadır.

Kandiah ve Arulanandan (1974) tarafından Yolo killeri üzerinde kanal erozyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde % 11 kil, % 49 silt ve % 40 kum olan ve mineral içeriği montmorillonit, kaolinit, mika ve vermikülitten oluşan zeminler, sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ve toplam çözünmüş tuz oranı (TDS) bilinen solüsyonla karıştırılmıştır. Doymun ve doymun olmayan zemin örnekleri kanal erozyon deneyinde değerlendirilirken; sadece suya doymun olan zeminler daha sonra değinilecek Dönen Silindirik Erozyon Testinde ele alınmıştır. Buna göre: erozyon oranı, kayma gerilmeleri arttıkça artmaktadır. Farklı SAR değerlerinde hem dönen silindirik deneyi hem de kanal deneyinden elde edilen kritik kayma gerilme değerleri benzerdir; ancak erozyon oranı, dönen silindirik erozyon deneyinde daha büyük elde edilmiştir. Karıştırılan solüsyondaki TDS'nin artmasıyla kritik kayma gerilmesi değerleri düşmektedir. Buna rağmen erozyon oranı artarken SAR değerleri de yükselmektedir. Düşük SAR değerlerine sahip doymun numunelerde, su muhtevasının kritik kayma gerilme değeri üzerine etkisi çok düşüktür. Sadece kritik kayma gerilme değeri aşıldığı zaman erozyon oranı, su muhtevasının artmasıyla artmaktadır. Doymun olmayan zemin numunelerinde kritik kayma gerilmesi değerleri su muhtevasına bağlıdır. Su muhtevası arttıkça şişme oranları düşmüş, kritik kayma gerilmeleri artmıştır.

Arulanandan ve Perry (1983) yapılan deneylerde elde edilen kritik kayma gerilmesi değerlerini; dielektrik dispersiyon kavramı ve bu kavrama paralel olarak boşluk sıvısının SAR ve erozyona neden olan sıvının TDS'sine bağlı olarak tahmin etmişlerdir. Dielektrik dispersiyon, kil mineralojisi ve miktarına bağlıdır ve katyon değişim kapasitesinin (CEC) fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Deneyler sonucunda kritik kayma gerilmesinin; kil mineralojisinden, ağırlıkça kil yüzdesinden, erozyona neden olan sıvının kimyasal içeriğinden, pH değerinden, sıcaklık ve organik madde varlığından etkilendiği belirtilmiştir. Aynı kayma gerilmelerinde erozyon oranları; erozyona neden olan sıvının TDS'si düştükçe artmaktadır. Baraj örneklerinde (29 adet) yaptıkları çalışmalar sonucunda; genel olarak kritik kayma gerilme değeri $\tau_c \leq 0.4$ Pa bulunan barajlarda borulanma olayı yaşanmıştır. Tam tersi $\tau_c > 0.4$ Pa'dan büyük olduğu barajlarda borulanma olayı yaşanmamıştır. Dispersif olmayan bazı zeminlerin, düşük erozyon direncine sahip oldukları belirlenmiştir. Yapmış oldukları bu çalışmayla zeminleri erozyon potansiyeli bakımından kritik kayma gerilmesine bağlı olarak üç kategoriye ayırmışlardır (**Kategori 1:** $\tau_c \leq 0.4$ Pa, Erozyon direnci düşük zeminler; **Kategori 2:** $0.4 < \tau_c < 0.9$ Pa, Orta derecede erozyon direnci olan zeminler; **Kategori 3:** $\tau_c \geq 0.9$ Pa, Erozyon direnci yüksek zeminler).

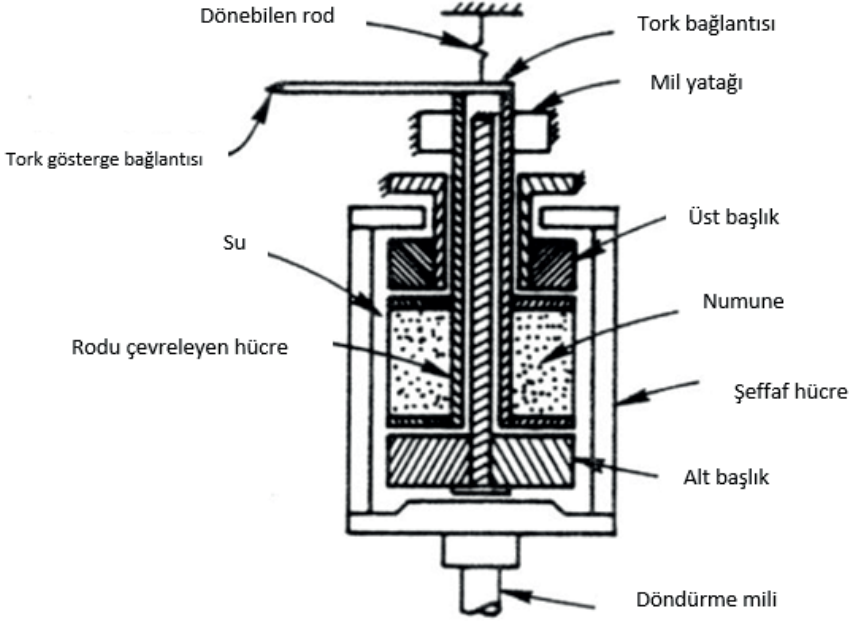
Shaikh vd. (1988a), suya doymun olmayan sıkıştırılmış Sodyum-Montmorillonit kilinde deneyler yapılmıştır. Silis karıştırılarak elde edilen

numunelerde değişik yüzdelerde (kuru ağırlıkça % 100, 70, 40 ve 10) Na-Montmorillonit kili kullanılmıştır. Numuneler; 700 kPa altında statik olarak farklı su muhtevalarında (± 5 % optimum su muhtevasında) sıkıştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: her numune için erozyon oranı sabittir. Erozyon oranı ile kayma gerilmeleri arasındaki ilişki doğrusaldır ve eğri orijinden başlamaktadır. Kritik kayma gerilmesi, suya doymun olmayan Na-Montmorillonit kil zeminleri için sıfırdır. Erozyon oranı için bir katsayı belirlenmiştir. Bu katsayı zeminlerdeki kil oranı arttıkça düşmektedir. Yani kil oranı arttıkça erozyon oranı azalmaktadır. Erozyon oranı katsayısı, numunelerin Veyn kesme dayanımı arttıkça azalmaktadır. Ancak yazarlar bu genellemenin tüm zeminler için yapılamayacağını belirtmişlerdir. Zeminlerin sıkıştırılması esnasındaki su muhtevasının net bir şekilde erozyon oranını etkilediği görülmüştür.

2.1.2. Dönen Silindirik Erozyon Testi

Bu testte, su dolu hücre içerisine yerleştirilen zemin numunesinin içinden geçen rod yardımıyla döndürülmesiyle zemin yüzeyinde meydana gelen erozyon davranışı incelenmiştir. Moore ve Masch (1962), dönen silindirik erozyon testinde yaptıkları çalışmalarda % 60 kil (montmorillonit) ve % 40 kumdan oluşan sıkıştırılmış zeminleri kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre kritik kayma gerilmesinin tipik değeri 9.6-14.4 Pa arasında değişmiştir. Arulanandan vd. (1973); Masch vd. (1963) tarafından yapılan dönen silindirik erozyon testini modifiye ederek geliştirmişlerdir (Şekil 1). Deneyler Yolo zeminleri üzerinde yapılmıştır. Yolo zeminleri, % 46 kum; % 35 silt ve % 19 kil içeriğine sahiptirler. Kil mineralojileri; montmorillonit, kaolinit, mika ve vermikülitten oluşmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Erozyon oranı kayma gerilmeleriyle doğrusal olarak değişmekte ve artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde; kritik kayma gerilmesi, TDS arttıkça azalmaktadır. Belirli bir TDS'de, SAR değeri arttıkça kritik kayma gerilmesi doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Boşluk sıvısının SAR değeri arttıkça veya TDS'si düştükçe; zeminin folükülasyon derecesi düşmekte ve partiküller arası bağlar zayıflamaktadır. Bununla beraber, zeminler erozyona karşı daha hassas hale gelmektedirler. Belirli bir SAR değerinde; su muhtevası ve TDS sabit tutulması halinde; erozyona neden olan sıvının, TDS'si arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, aynı kil mineralojisinde SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde; ağırlıkça kil içeriğinin, TDS ve su muhtevasının sabit olduğu bir deney serisinde kritik kayma gerilmesi arttıkça dielektrik dispersiyon değeri

azalmaktadır. En yüksek şişme potansiyeline sahip olan montmorillonit kili, en yüksek kritik kayma gerilmesi değerini vermektedir.



Şekil 1. Arulanandan vd. (1973) tarafından geliştirilen dönen silindirik erozyon testi

Arulanandan vd. (1975), örselenip yoğurulmuş suya doygun zeminlerin aşınabilirliğini, boşluk sıvısının içeriğine ve erozyona neden olan sıvının TDS'sine bağlı olarak dönen silindirik erozyon test ekipmanında incelemiştir. Deneyler, Yolo zeminleri üzerinde yapılmıştır. Boşluk sıvılarının içeriği; değişik SAR ve TDS'si farklı olan solüsyonların karışımıyla elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Belirli TDS ve su muhtevasında erozyon oranı kayma gerilmelerinin artmasıyla doğrusal bir şekilde artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Düşük SAR değerlerinde; kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin çok az artış göstermesi halinde çok hızlı bir düşüş göstermektedir. Belirli bir SAR değerinde, kritik kayma gerilmesi TDS'nin artmasıyla artmaktadır. Zeminlerdeki zamana bağlı şişme oranı yüksekse, SAR değeri de yüksek elde edilmektedir. SAR değerinin yüksek olması; zeminlerin iç yapısının dağılması, yüksek oranda şişmesi ve partiküller arası bağlarının zayıf olması anlamına gelmektedir. Belirli bir SAR değeri, TDS ve belirli su muhtevasında; erozyona neden olan sıvının TDS'si arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır.

Sargunan (1977), konsolide edilmiş kohezyonlu zeminlerin, erozyon davranışını incelemiştir. Zemin numuneleri; ağırlıkça % 80 silt (Yolo zeminlerinden elde edilen) ve % 20 kil (Kaolinit veya İllit) karışımından elde edilmiştir. Zemin numunelerini, farklı TDS ve SAR değerlerinde incelemek için solüsyonlar kullanılmıştır. Deneylerde kontrol edilen parametreler; kil mineralojisi, katyon oranı ve TDS olmuştur. Erozyon deneyine tabi tutulan zemin numuneleri suya doygun halde iken konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre: Erozyon oranı kayma gerilmesine bağlı olarak doğrusal olarak değişmektedir. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerindeki artışa bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde, kritik kayma gerilmesi TDS'nin artmasıyla artmaktadır. Kritik kayma gerilmelerinin sıfır olduğu değerler için SAR değerleri elde edilmiştir.

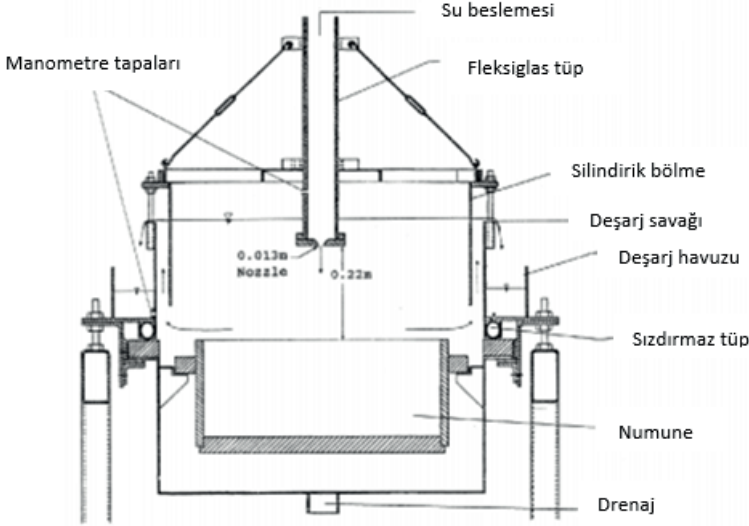
Chapuis ve Gaiten (1986) ile Chapuis (1986a, 1986b); dönen silindirik erozyon testini geliştirerek örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Deney için numune hazırlama yöntemleri sonuçları etkilemiştir. Üç eksenli deney hücresinde konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yüzeyleri pürüzsüz olmaktadır. Bu nedenden dolayı örselenmemiş numunelere göre erozyon dirençleri yüksek çıkmaktadır. Örselenmiş numunelerde konsolidasyon basıncı arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Erozyon oranı; kayma gerilmelerinin kritik kayma gerilmelerinden düşük olması durumlarında konsolidasyon basıncının artmasıyla azalmaktadır. Kritik kayma gerilmesi değerleri üç doğal kil için, 4.2-8.0 Pa arasında değişmiştir.

2.1.3. Jet Erozyon Testi

Hazırlanan zemin numunesinin yüzeyine su jeti şeklinde suyun çarpmasıyla oluşan oyulmalara bağlı olarak erozyon davranışının incelendiği deney sistemidir. Dunn (1959), bu sistemle açık kanal tabanlarındaki kohezyonlu zeminlerin erozyon direncini araştırmıştır. Erozyonun başladığı kritik kayma gerilmeleri ile veyn kesme deneyinden elde edilen zeminlerin kesme dayanımı arasındaki ilişkinin verildiği çalışmalardan elde edilen sonuca göre; kritik kayma gerilmeleri ile veyn kesme deneyinden elde edilen drenajsız kesme dayanımları doğru orantılıdır.

Moore ve Masch (1962), yapılan deneylerde su jetini dik bir şekilde çapı 127 mm ve yüksekliği 102 mm olan bir zemin numunesine çarptırmışlardır. Sabit jet hızında numunenin 60 dakika boyunca oyulması sağlanmıştır. Her 10 dakikada bir kütle kaybı ölçülerek oyugun derinliği hesaplanmıştır. Her defasında su jetinin hızı artırılarak yukarıdaki prosedür tekrarlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda numunedeki oyulma derinliği; su jetinin yüksekliği, çapı, hızı, su jetinin uygulanma süresi, erozyona neden olan sıvının yoğunluğu, dinamik viskozitesi ile ilişkilendirilerek oyulma direncinin fonksiyonu belirlenmiştir. Hanson (1991,1992), deneyleri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde şekil 2’de gösterilen deney sisteminde gerçekleştirmiştir.



Şekil 2. Jet erozyon test ekipmanı (Hanson'dan, 1991)

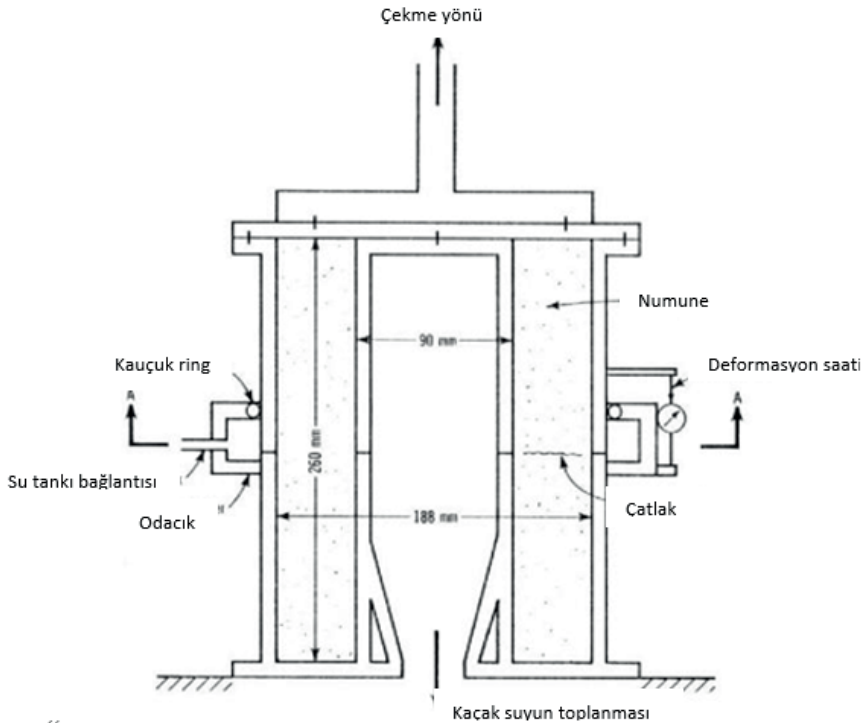
Hanson ve Robinson(1993), farklı kuru yoğunluklarda ve su muhtevalarında sıkıştırılan zeminlerin erozyon direncinin belirlenmesi için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bulunan sonuçlar, kanal testinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerin yapıldığı zeminler CL ve CL-ML'dir. Zeminler ağırlıkça % 34 kum, % 39 silt ve % 27 kil ihtiva etmektedirler. İğne deliği ve dağılma deneyi sonucunda zeminlerin % 44 oranında dispersif karakter gösterdiği görülmüştür. Zeminler hem dinamik hem de statik olarak farklı su muhtevaları ve kuru yoğunluklarda sıkıştırılmışlardır. Numuneler testlerden önce 20 saat suda bekletilmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: belirli bir su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde kuru yoğunluk arttıkça erozyon direncinde artış meydana gelmiştir. Aynı kuru yoğunluklarda, yüksek su muhtevası erozyon direncinde artış sağlamaktadır. Fakat suya doymun numunelerde yüksek su muhtevalarında erozyon direncinde azalma olmaktadır. Aynı su muhtevasına ve kuru yoğunluğa sahip numunelerin dinamik ve statik halde hazırlanmaları durumunda erozyon dirençlerinde çok az bir değişiklik olmaktadır. Jet erozyon testinden elde

edilen sonuçlar ile kanal testinden elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

2.2. İçsel Erozyon Test Ekipmanları

2.2.1. Kaçak Erozyon Testi

Hjeldnes ve Lavania (1980) tarafından geliştirilen bu deney ekipmanında çatlak ve bu çatlakta oluşan kaçağın meydana getirdiği erozyon davranışı incelenmiştir. Deney ekipmanı şekil 3'de gösterilmiştir. Deneyde kullanılan zemin numuneleri, standart proktor metoduyla bilinen su muhtevalarında sıkıştırılmışlardır. Numunenin orta bölgesinde yatayda çatlak oluşturmak için zemin numunesi deney ekipmanı yardımıyla önceden belirlenmiş oranlarda çekme deformasyonuna maruz bırakılmıştır. Arzu edilen hidrolik eğimde su akımı verilerek çatlaktan meydana gelen kaçak ve erozyona uğramış malzeme miktarları ölçülmüştür.

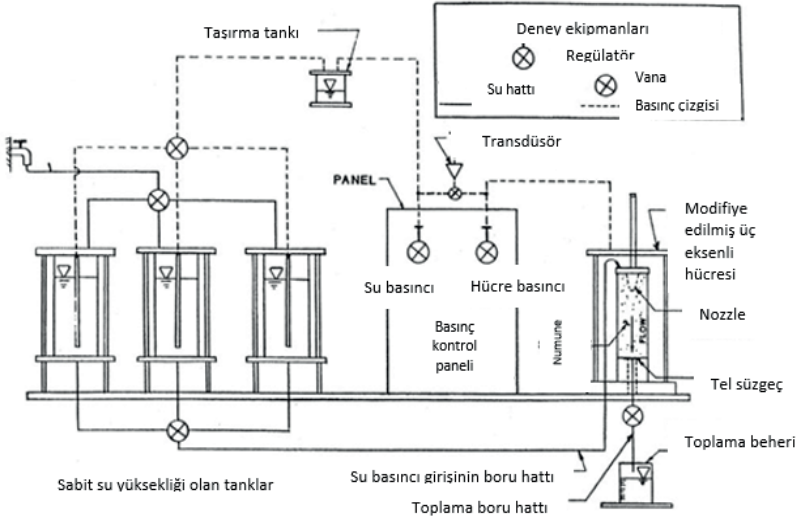


Şekil 3. Kaçak erozyon test ekipmanı (Hjeldnes ve Lavania, 1980)

İki farklı zemin türünde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Buzul morenlerinde oluşan çatlaklar kendi kendini iyileştirmişlerdir. Çatlakta meydana gelen erozyon zamanla azalmış ve durmuştur. $w_{opt} -3$ 'de kuru tarafta sıkıştırılmış zemin numuneleri, w_{opt} 'da sıkıştırılanlara göre daha küçük çekme deformasyonlarında çatlak oluşturmuş ve çatlaktan dolayı oluşan kaçak ve erozyon miktarı daha fazla olmuştur. Siltli-killi kum zeminlerde çatlağın kendi kendini iyileştirmesi görülmemiştir. Erozyon, belirli bir çekme deformasyonunda gelişmiş ve zamanla artmıştır. $w_{opt} +3$ 'de sıkıştırılan zeminlerde, erozyonda ani bir artış meydana gelerek numuneler dağılarak parçalanmıştır. $w_{opt} -3$ 'de sıkıştırılan zeminler, w_{opt} 'da sıkıştırılan zeminlere göre çatlağın gelişimi için daha büyük çekme deformasyonlarına maruz bırakılmıştır. $w_{opt} -3$ 'de sıkıştırılan zeminlerin erozyon oranı w_{opt} 'da sıkıştırılanlarla aynı olmuştur.

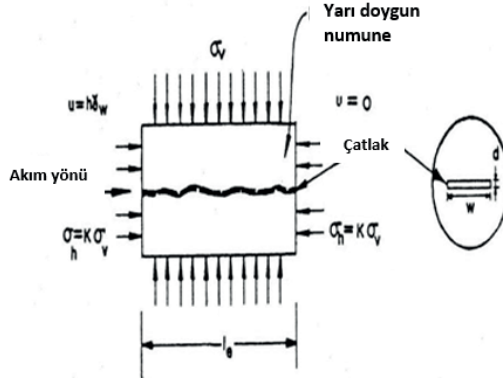
2.2.2. Üç Eksenli Erozyon Testi

Sanchez vd. (1983) tarafından geliştirilen deney ekipmanında beş farklı dolgu barajın çekirdek zeminleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Geleneksel üç eksenli test cihazının modifiye edilmesi ile elde edilen deney sistemi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Üç Eksenli Erozyon Test Ekipmanı'nın şematik gösterimi (Sanchez vd.,1983)

Zemin numuneleri, çapı 7,1 cm ve yüksekliği 5,5 cm olan yandan açılabilir kalıplarda sıkıştırılarak hazırlanmıştır. İnce bir bıçak yardımıyla numunelerde yükseklik boyunca yarık(çatlak) oluşturulmuştur (Şekil 5).

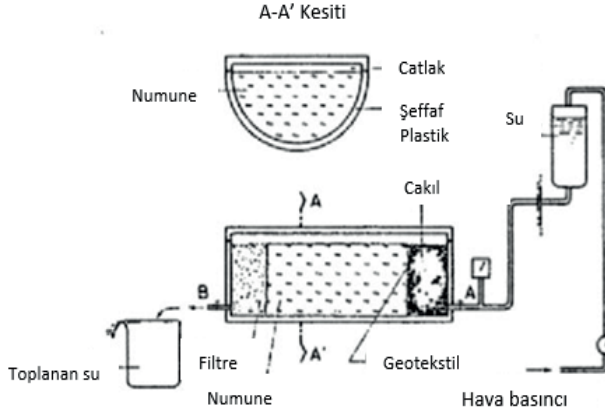


Şekil 5. İnce bir bıçak yardımıyla oluşturulan yarık (Sanchez vd., 1983)

Erozyonu sağlayan suyun yarıktan ilerleyebilmesi için nozzle kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda aşağıdaki sonuçlara göre: optimum su muhtevasında siltlerde sıkıştırılma esnasında elde edilen yoğunluğun erozyona etkisi düşüktür. Killerde ise yoğunluk azaldıkça erozyon oranı artmaktadır. Sıkıştırma su muhtevası, siltlerin erozyonunda önemli bir etkidir. Killer de ise çok da önemli olmadığı görülmüştür. Zemin numuneleri, optimum ve ıslak tarafta sıkıştırıldığında erozyon azalmaktadır. Tam tersi kuru tarafta hazırlanan numunelerde ise erozyon artmaktadır. Erozyon oranı, erozyonu sağlayan sıvının TDS'sinin azalmasıyla artmaktadır. Bu artış, silt zeminlerde kil zeminlere göre daha kayda değer görülmüştür.

2.2.3. Çatlak Erozyon Testi

Maranha das Neves (1987,1989) tarafından geliştirilen deney sistemi şekil 6'da gösterilmiştir. Sıkıştırılan zeminler, düşey eksenleri boyunca ortadan ikiye kesilerek yarım silindir şeklinde zemin numuneleri elde edilmiştir. Yarım silindir zeminler; şeffaf permeametrelerin içerisine üst taraflarında 5 veya 2,5 mm boşluk kalacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Giriş akımının olduğu bölgeye çakıl ve geotekstiller yerleştirilerek üniform akım elde edilmeye çalışılmıştır. Akımın zemin numunelerinden çıkış noktasına filtre yerleştirilmiştir. Permeametrenin eğimi değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

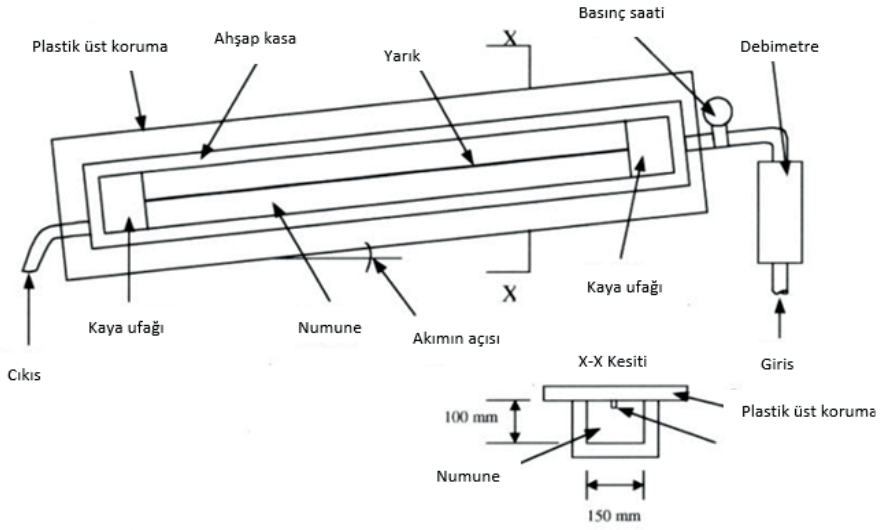


Şekil 6. Çatlak Erozyon Test Ekipmanı (Maranba das Neves, 1987)

Düşük akım hızlarında, permeabilite eğimi erozyonu etkilemektedir. Muhafazakâr bir şekilde tasarlanan filtre, çatlakın kendi kendini iyileştirmesine kadar görevini yapamamıştır. Bu çalışmada özellikle deney süresinin deney sonuçlarının kıyaslanmasında önemli bir etken olacağı kabul edilmiştir.

2.2.4. UNSW (University of New South Wales) Yarık Erozyon Testi

Cedeno (1998) tarafından tasarlanan ekipmanla, dolgu barajlarda meydana gelen borulanma türü içsel erozyon araştırılmıştır (Şekil 7). Deneyler, sıkıştırılmış doygun olmayan zeminlerin yarılp deney sistemine yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Orta plastisiteli, kumlu çakıllı kil zeminler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zeminlerin özellikleri; orijini şeyl olan kalıntı zeminlerdir. İğne deliği deneyi karakteristikleri D1 ve D2'dir. Dağılma deneyi sınıfı K2'dir.



Şekil 7. UNSW yarık erozyon test ekipmanının şematik gösterimi (Cedeno, 1998)

Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre: ıslak tarafta hazırlanan ve sıkıştırılırken kompaksiyon enerjisinin fazla uygulandığı zeminlerde borulanma tipi erozyona karşı direnç yüksektir. Kuru tarafta hazırlanan ve sıkıştırılırken kompaksiyon enerjisinin düşük tutulduğu zeminlerde borulanma tipi erozyon direnci düşüktür. Su akımının durdurulup, yeniden başlatılmasıyla erozyon oranında ani bir artış elde edilmiştir. Deneyde zemin numunesinin tam yatay olmaması yani yatayla açı verilmesi erozyon oranını etkilemektedir.

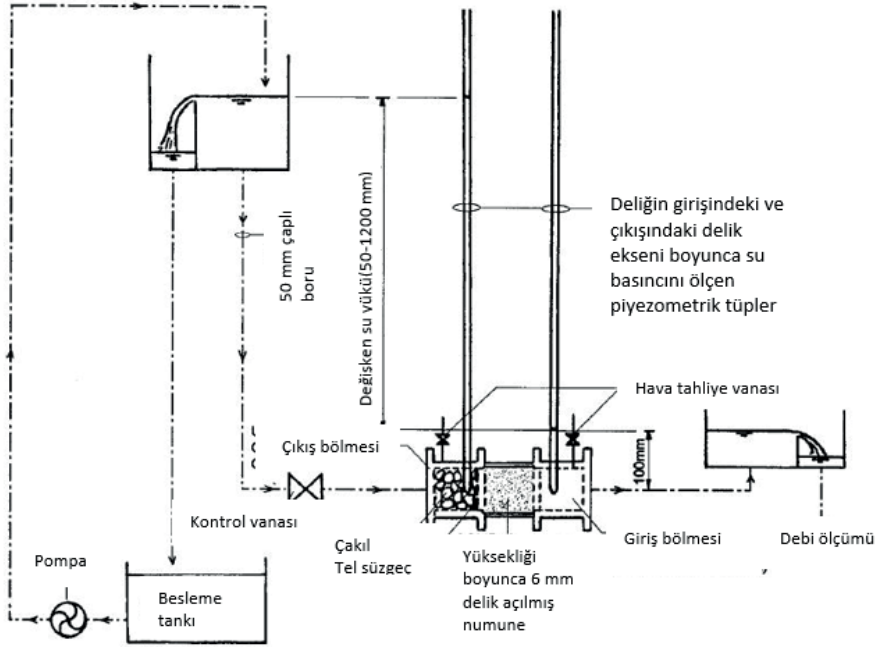
Wan ve Fell (2002) , UNSW yarık erozyon testini delik erozyon testiyle birlikte yaparak ikisi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmışlardır. İki deneyden de elde edilen sonuçlar; $r^2=0.93$ gibi yüksek regresyon katsayısı oranında birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu elde edilen sonuçlarla birlikte; özellikle yarık erozyon testine göre daha ucuz, kolay ve az malzemenin kullanıldığı delik erozyon testinin zeminlerin erozyon direncinin araştırılmasında kullanılması önerilmiştir.

2.2.5. Delik Erozyon Testi

Christensen ve Das (1973) tarafından ilk olarak geliştirilen sistem, belirli bir su muhtevasında hazırlanan kohezyonlu zemin numunelerinin yükseklik doğrultusunda belirli bir çapta delinmesi ve bu delikten belirli su yüksekliğindeki su akımının geçirilmesi esasına dayanmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: erozyon mekanizması üç aşamada

gerçekleşmektedir. Birinci aşamada erozyon oranı zamanla azalmaktadır. İkinci aşamada ise kararlı ve dengede bir erozyon oranı görülmektedir. Üçüncü aşamada ise, erozyon oranında hızlı bir artış olmaktadır. Kararlı ve denge durumundaki erozyon oranını, kayma gerilmeleri ile ilişkilendirildiğinde çift doğrusallı bir grafik elde edilmektedir. Sabit bir sıcaklıkta ve sabit kayma gerilmelerinde, sıkıştırma su muhtevasının arttırılması erozyon oranını azalmaktadır. Sabit bir sıcaklıkta, sabit sıkıştırma su muhtevasında ve kayma gerilmelerinde erozyona neden olan sıvının sıcaklığının arttırılması ile erozyon oranı artmaktadır. Erozyon oranı, zeminin içeriğine, ağırlıkça kil yüzdesine ve kil mineralojisine bağlı olarak değişmektedir. Suya doymun killerde; yoğunluğun artmasıyla erozyona karşı direnç artmamıştır. Numuneler deneye hazırlanırken deliğin yüzeyindeki oluşan pürüzlülük, yoğunluğun etkisini gölgelemiştir.

Wan ve Fell (2002), Christensen ve Das (1973) tarafından geliştirilen deney sistemini daha da geliştirerek çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Şekil 8). Zemin numunelerinin kuru yoğunluğu; standart proktor deneyinden elde edilen maksimum kuru yoğunluğa oranı % 90-98 sıklık oranlarında olacak şekilde hazırlanmıştır. Zeminler, $w_{opt}-3$, w_{opt} ve $w_{opt}+3$ su muhtevalarında sıkıştırılmışlardır. Deneylerde kullanılan su; Sidney'nin çeşme suyudur. Numunelerin ortasındaki delik el matkabıyla 6 mm çapında olacak şekilde açılmıştır. Deneylerde dispersif ve dispersif olmayan zemin numuneleri kullanılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre: zeminlerin erozyona karşı gösterdikleri direnç, erozyon oranı indeksi (I) ifade edilmiştir. Erozyon oranı indeksi (I) değeri 1 ile 6 arasında değişmektedir. Zeminler bu indekse göre gruplandırılmıştır (Tablo 2). Hızlı bir şekilde erozyona uğrayan zeminler düşük erozyon oranı indeksine sahip olmaktadır.



Şekil 8. Delik erozyon test sisteminin şematik gösterimi (Wan ve Fell, 2002)

Yüksek su muhtevalarında (ıslak tarafta) sıkıştırılan ve büyük kuru yoğunluğa sahip zeminler; düşük su muhtevalarında (kuru tarafta) sıkıştırılan ve küçük kuru yoğunluğa sahip zeminlere göre daha büyük erozyon oranı indeksi değeri vermektedirler. Bazı plastik olmayan iri daneli zeminler, kuru tarafta sıkıştırıldığında ve yüksek kuru yoğunluğa sahip olduğunda yüksek erozyon oranı indeksi vermektedirler.

Tablo 2. Erozyon oranı indeksi (I)

| Grup No. | Erozyon Oranı İndeksi (I) | Açıklama |
|----------|---------------------------|-------------|
| 1 | < 2 | Aşırı hızlı |
| 2 | 2-3 | Çok hızlı |
| 3 | 3-4 | Az hızlı |
| 4 | 4-5 | Az yavaş |
| 5 | 5-6 | Çok yavaş |
| 6 | > 6 | Aşırı yavaş |

Smektit ve vermikülit gibi kil minerallerinin bulunmaması durumunda ve demir oksit gibi bağlayıcı malzemelerin varlığında ince daneli zeminlerin

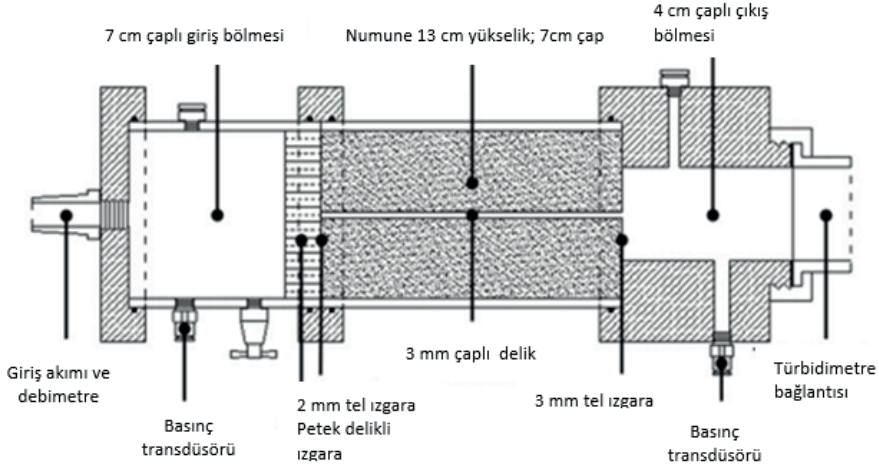
erozyon direnci artmaktadır. Deneylerde bulunan ve erozyonun başlamasını sağlayan kritik kayma gerilmesi değerleri; bir barajda borulanma erozyonun başlama olasılığının değerlendirilmesinde dikkate alınabilir.

Lim (2006), delik erozyon sisteminde numunelerin deneye hazırlanmasında değişikliklere gitmiştir. Mevcut delik açılırken, delik etrafındaki yoğurulma ve zeminlerin delik çeperine bulanıp yüksek erozyon direnci göstermesini engellemek için daha keskin auger matkap ucu kullanmıştır. Delik boyunca üniform bir erozyon davranışının görülebilmesi için zemin numuneleri 3 tabaka yerine 5 tabaka halinde sıkıştırılmışlardır. Deneysel esnasında numunelerin sadece su içinde kalmasından dolayı oluşan yani akımın olmadığı durumdaki erozyon davranışının dikkate alınması için bazı düzeltmelere gidilmiştir. Toplamda 139 deney; 9 doğal kil ve 5 yapay zemin karışımlarında gerçekleştirilmiştir. Elde ettiği verilere göre, delik erozyon test sonuçlarının zeminlerin erozyon davranışında sınırlı bir bilgi sunduğunu belirtmiştir.

Farrar vd. (2007), Wahl vd. (2008) delik erozyon test sistemini hidrolik ölçümler açısından geliştirmişlerdir. Akımın debisini 10°'lik bir açığa sahip V tipindeki bir savakla ölçmüşlerdir. Deliğin başlangıcındaki su yükünün 5400 mm'ye çıkabilmesi sağlanmıştır. Deliğin başındaki ve sonundaki akımın basıncı basınç transdüserleriyle ölçülmüştür. Örselenmiş ve örselenmemiş 10 farklı zemin üzerinde deneyler yapılmıştır. Delik erozyon sisteminin sert zeminlerde uygulanmasının zor olduğu belirtilmiştir. Delik girişindeki yetersiz su basıncından dolayı delikte meydana gelen tıkanmaların etkisiyle sert zeminlerin farklı noktalarında göçmeler ve oyulmalar meydana gelmiştir. Delik erozyon test sonuçlarını, jet erozyon testiyle kıyasladıklarında her zaman jet erozyon testinden elde edilen erozyon dirençlerinin, delik erozyonundakilere göre daha az olduğu belirlenmiştir.

Bonelli vd. (2006), Bonelli ve Brivois (2008); mevcut delik erozyon test sistemi üzerinden verilerin analiz edilmesi için yeni bir model geliştirmişlerdir. Böylelikle erozyon karakteristiklerinin, interpolasyona ve ölçüme gerek kalmadan belirlenmesini sağlamışlardır. Marot vd. (2011); delik erozyon testinden elde edilen verileri analiz etmek için yeni bir metod geliştirmişlerdir. Bu metod ile akımın yük kaybına ve erozyona uğrayan malzeme miktarına bağlı olarak zeminleri erozyon direncine göre sınıflandırmışlardır. Luthi (2011), numunenin ortasındaki deliği sonradan açmak yerine numune hazırlanırken kalıbın ortasına rod yerleştirmiştir. Bu rodu, numune sıkıştırıldıktan sonra numune içerisinden çekilerek delik oluşturulmuştur. Bunun yanında deliğin çıkış kısmına pitot tüpü yerleştirilerek akımın hızı ölçülmüştür. Böylelikle delik çapı ve çeperlerinde oluşan kayma gerilmeleri direkt hesaplanabilmiştir.

Haghghi vd. (2013); Wan ve Fell (2002) tarafından geliştirilen delik erozyon test sistemini modifiye etmişlerdir. Deney sisteminde numunenin yerleştirildiği hücre ve bağlantı detayları şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Numunenin yerleştirildiği hücre ve bağlantı detayları (Haghghi vd., 2013)

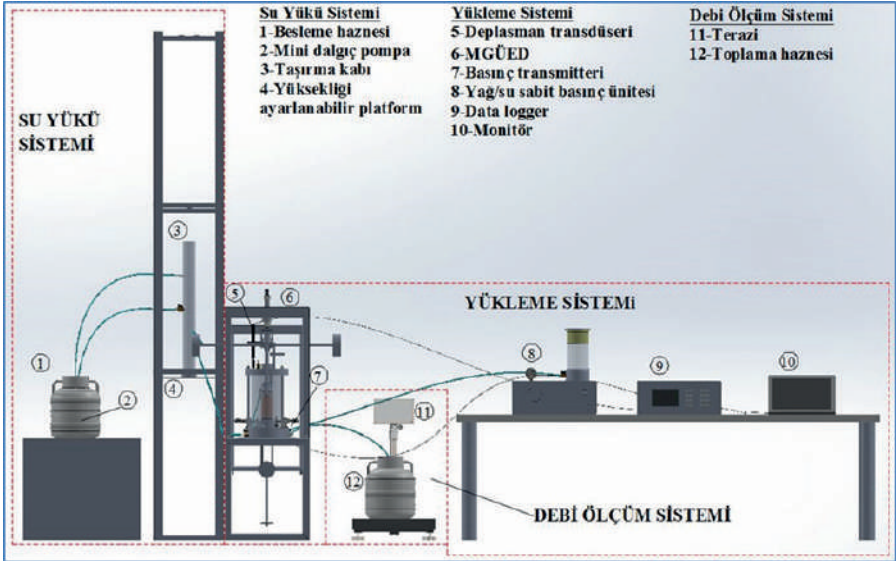
Delige giren ve çıkan suyun basıncının transdüsörlerle ölçülmesi sağlanmıştır. Delige giren suyun basıncı, hava ile basınçlandırılmış 80 litrelik su tankıyla sağlanmıştır. Böylelikle erozyon boyunca deliğin girişindeki ve çıkışındaki basınç farkı sürekli sabit tutulmuştur. Belirli oranlarda karıştırılmış kaolin kili, silt ve kum zeminler deneylerde kullanılmıştır. Başlangıçtaki delik 3 mm olarak açılmıştır. Erozyona uğrayan malzeme miktarı ve buna bağlı olarak delik çapının değişimi deliğin çıkışında kullanılan türbidimetre yardımıyla hidrolik akım hipotezlerinden bağımsız bir şekilde belirlenmiştir.

Mehenni vd. (2016), geliştirdikleri yeni delik erozyon test sistemiyle kil (kaolinit ve bentonit), çimento ve kireç ile iyileştirilen silt zeminlerin içsel erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Yeni geliştirilen delik erozyon test sisteminde delige giren suyun basıncı 650 kPa'ya kadar çıkabilirken delik yüzeyinde oluşan hidrolik kayma gerilmeleri de 10.000 Pa'ya kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmaya göre: kil ile iyileştirilen silt zeminlerde, erozyon oranı düşmüştür. Aynı oranda bentonit ve kaolinit kullanıldığında erozyon katsayısı bentonit kullanımında daha fazla düşmektedir. Silt zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi erozyon dirençlerini artırmıştır. Kritik kayma gerilmesi değerleri artmıştır. Erozyon direncindeki bu artışa kür süresinin bir etkisi olmamıştır. Çimento ile iyileştirme kritik kayma gerilmelerinin artışına neden olmuştur. Erozyon direncindeki bu artış, kullanılan çimento oranı

üzdesiyle doğrusal olarak artmaktadır. Yüksek oranda çimento kullanımı küçük erozyon katsayılarının elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. % 3 çimento katkı oranı, kısa sürede etkisini gösterirken daha fazla orandaki çimento katkısında yüksek erozyon direncine ulaşabilmek için kür süresinin daha uzun tutulmasını gerektirmektedir.

2.2.6. Gerilme Kontrollü Üç Eksenli İçsel Erozyon Testi

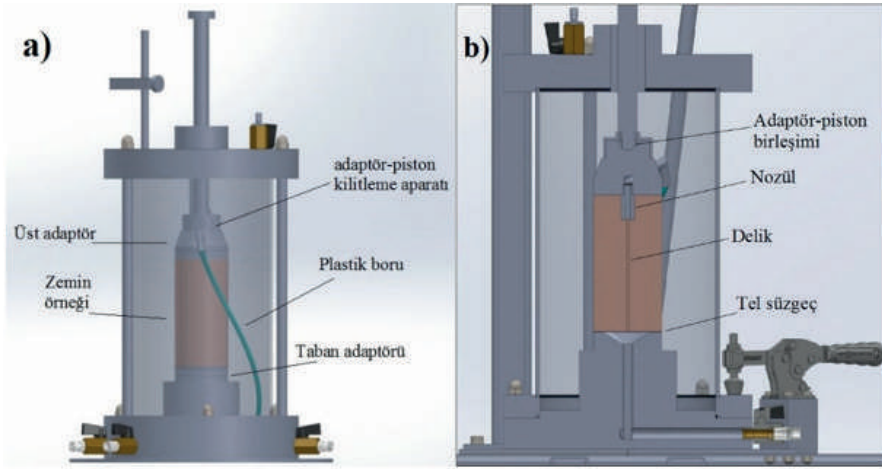
Topçu ve Tosun (2022) tarafından ince daneli zeminlerin erozyon direncinin belirlenebilmesi için yeni bir test ekipmanı geliştirilmiştir (Şekil 10). Bu test ekipmanında aynı zamanda ince daneli zeminlerin, gerilme koşulları altındaki erozyon davranışları da incelenebilmektedir. Su yükü sisteminde silindirik taşıma kabı pleksiglastan imal edilmiştir. Silindirik taşıma kabını besleyen haznenin hacmi 30 L'dir. Hazneden suyun taşıma kabına iletilmesini sağlayan mini dalgıç pompanın deşarj kapasitesi 200 L/sa ve pompa gücü ise 3 Watt'dır. Yüksekliği ayarlanabilir platform yardımıyla deneylerde 25. 000 Pa'lık hidrolik bir yük oluşturulabilmektedir. Zemin örneklerinde gerilme koşullarının oluşturulabilmesi için yükleme sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 10. Test ekipmanı (Topçu ve Tosun, 2022)

MGÜED (Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Deney Cihazı) ile zemin örneğine çevre basıncı yanında eksenel çekme ve basınç gerilmeleri de uygulanabilmektedir. Kuvvet, çekme kolunda 1:5 oranında;

basınç kolunda ise 1:10 oranında büyütülerek örneğe aktarılır. Cihazda basınç gerilmeleri için 50-300 kPa ve çekme gerilmeleri için ise 25-150 kPa aralıkları için kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Hücrenin test sırasında stabil halde durması için iki adet manivelalı kelepçe ile alt tablaya tutturulmuştur. Hücre, 70 ve 100 mm çaplı örnekler için kullanılabilen üç eksenli deney hücresidir. Hücre 1000 kPa su basıncına dayanıklı olacak şekilde pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Hücrenin oturduğu alt tablada dört ve üst kısmında bir adet olmak üzere toplamda beş adet vana vardır. Hücre içerisine yerleştirilmiş zemin örneğinin görüntüsü ve boyuna kesit detayı şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. a) Hücre içerisine yerleştirilmiş zemin örneği b) Zemin örneğinin boyuna kesit detayı (Topçu ve Tosun, 2022)

Zemin örneğinde oluşturulan delikten geçen akımın debisi, dijital göstergeli terazi ve toplama haznesinden oluşan debi ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Dijital terazi ile ölçülen zamana bağlı ağırlık verileri, suyun ölçülen sıcaklıktaki yoğunluk değerine bölünerek hacim değerleri elde edilir. Zamana bağlı elde edilen hacim değerlerinden de debi değerleri hesaplanır. Zemin örneğinde oluşturulan delikten geçen akımın hidrolik parametrelerinin belirlenmesinde boru hidroliğinin temel prensipleri kullanılmıştır. Test ekipmanında deneyler tek bir hidrolik yük altında gerçekleştirilmektedir. Test ekipmanında hidrolik modellerin enerjisinin belirlenmesinde Bernoulli eşitliğinden faydalanılmıştır. Test ekipmanının hidrolik kapasitesinin belirlenmesinde ise zemin örneğine eşdeğer farklı delik çaplarına (1,2,3,4,6,8,10,12,14 mm) sahip alüminyum kalıplar kullanılmıştır. Alüminyum kalıplar kullanılarak hidrolik kapasite

belirlenirken elde edilen fiziksel hidrolik modele göre; deneylerde başlangıç delik çapı olan 2 mm ile 4 mm arasında debi artışının doğrusala çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle erozyona uğrayan zemin örneklerinde erozyon oranının hesaplanmasında süreklilik denklemi esasında bu iki delik çapı arasındaki debi değişimleri dikkate alınmaktadır. Test ekipmanında sürtünme ve yersel enerji kayıpları belirlenerek bu delik çapları (2,3 ve 4 mm) için SF Pressure Drop v7.2 programında teorik hidrolik modeller kurulmuştur. Fiziksel hidrolik modelden bu delik çapları için elde edilen debi değerleri teorik hidrolik modellerde değerlendirildiğinde; Bernoulli eşitliğinden elde edilen fiziksel hidrolik modeldeki toplam enerji kayıpları ile teorik hidrolik modellerden elde edilen toplam enerji kayıplarının çok düşük hata oranlarıyla birbirine yakın olduğu görülmüştür. Teorik hidrolik modellerde sürtünme enerji kayıplarının hesaplanmasında $Re < 3000$ olduğu zaman akımın rejimi laminer; $Re > 3000$ olduğu zaman ise akımın rejimi türbülanslı kabul edilmektedir. Test ekipmanındaki hidrolik modelin ve kapasitenin belirlenmesiyle ilgili diğer detaylar Topçu ve Tosun'da (2022) verilmektedir.

Benzer kil mineralojisine sahip ve aynı kategorilerde dispersif olarak tanımlanan iki farklı doğal dispersif zeminin, tek bir hidrolik yük altında saf su kullanılarak yeni geliştirilen test ekipmanında erozyon dirençleri araştırılmıştır. Dispersif erozyonun geliştiği deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre: Erozyona neden olan sıvı olarak saf su kullanıldığında dispersiyon gelişip kil oranı arttıkça ince daneli zeminlerin erozyon dirençleri azalmaktadır. İnce daneli zeminlerde erozyona neden olan sıvı olarak TDS'si yüksek çeşme suyu kullanıldığında; zeminlerin saf suda dispersibilitesi yüksek bile olsa; mekanik erozyon gelişmekte ve kil oranı arttıkça erozyon direnci artmaktadır. Kum/kil oranı yüksek olan zeminlerde dispersif erozyon görülmesine rağmen kum danelerin taşınımı zorlaşmaktadır. Zeminin iskeleti kum daneleri tarafından oluşturuldukça dispersif zeminlerin erozyon dirençleri artmaktadır.

3. Sonuçlar

Dolgu barajların ince daneli zeminlerle inşa edilen çekirdek zonunda değişik nedenlerle oluşan çatlaklarda gelişen kaçak erozyonu için, zeminlerin içsel erozyon dirençlerinin belirlenmesinde kullanılan test ekipmanları geçmişten günümüze doğru yukarıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

İnce daneli zeminlerin erozyon dirençlerinin belirlenmesinde kullanılan hidrolik esaslar için zamanla açık kanal hidroliğinden boru hidroliğine geçilmiştir. Boru hidroliğinde de ölçüm teknolojilerindeki gelişmeye bağlı

olarak çok fazla ilerleme kaydedilmiştir. Bunun yanında test ekipmanları boyut olarak küçülürken aynı zamanda deneylerde kullanılan zemin örneği miktarları da azalmıştır. Özellikle son yıllarda dolgu barajlarda meydana gelen çatlakların içerisinde gelişen akımı benzeştirmek için yarı-model deney sistemleri geliştirilmiştir. Test ekipmanlarında ince daneli zeminlerin kimyasal, fiziksel, mekanik, indeks ve yükleme koşullarının içsel erozyon direncine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Arulanandan, K., Loganathan, P., Krone, R. B., 1975, Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil, Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 101, No. GT1, 51-66.
- Arulanandan, K., Perry, E.B., 1983, Erosion in relation to filter design criteria in earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(5), 682-698.
- Arulanandan, K., Sargunam, A., Loganathan, P., Krone, R. B., 1973, Application of chemical and electrical parameters to prediction of erodibility, In *Soil erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control*, Highway Research Board, Special Report 135, 42-51.
- Bonelli, S., Brivois, O., 2008, The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 32(13), 1573-1595.
- Bonelli, S., Brivois, O., Borghi, R., Benahmed, N., 2006, On the modelling of piping erosion, *Comptes Rendus Mécanique*, 334(8-9), 555-559.
- Cedeno, A.R.J., 1998, Piping in Dams: Tests to asses the factors which affect progression, Project/Thesis, School of Civil and Enviromental Engineering, University of New South Wales, CIVL4906, 256 p. (unpublished).
- Chapuis, R. P., 1986 a, Use of rotational erosion device on cohesive soils, *Transportation Research Record*, 1089, 23-28.
- Chapuis, R. P., 1986 b, Quantitative measurement of the scour resistance of natural solid clays, *Canadian geotechnical journal*, 23(2), 132-141.
- Chapuis, R.P., Gatien, T., 1986, An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. *Canadian geotechnical journal*, 23(1), 83-87.
- Christensen, R. W., Das, B. M., 1973, Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. In *Soil Erosion: Causes and Mechanism; Prevention and Control*, Highway Research Board, Special Report 135, 8-19.
- Dunn, I. S., 1959, Tractive resistance of cohesive channels, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 85(SM3), 1-214.
- Farrar, J. A., Torres, R. L., Erdogan, Z., 2007, Bureau of reclamation erosion testing for evaluation of piping and internal erosion of dams. In *Geotechnics of soil Erosion*, p. 1-10.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. 2000, The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.
- Gibbs, H.J., 1962, A Study of erosion and tractive force characteristics in relation to soil mechanics properties, U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Report No. EM-643, 57 p. (unpublished).

- Haghighi, I., Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Reiffsteck, P., 2013, Improvement of hole erosion test and results on reference soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 330-339.
- Hanson, G. J., Robinson, K. M., 1993, The influence of soil moisture and compaction on spillway erosion, *Transactions of the ASAE*, 36(5), 1349-1352.
- Hanson, G.J., 1991, Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways, *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2015-2020.
- Hanson, G.J., 1992, Erosion resistance of compacted soils, *Transportation Research Record* 1369, p.26-30.
- Hjeldness, E. I., Lavania, B. V., 1980. Cracking, leakage, and erosion of earth dam materials, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(ASCE 15220), 117-135.
- Kandiah, A., Arulanandan, K., 1974, Hydraulic erosion of cohesive soils, National Research Council, Washington, D. C., Soil Properties, Transportation Research Board Record 497, 60-68.
- Lim, S.S., 2006, Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils, Doctoral Thesis, University of New South Wales, 182 p. (unpublished).
- Lüthi, M., 2011, A modified hole erosion test (het-p) to study erosion characteristics of soil, Doctoral dissertation, University of British Columbia, 133 p. (unpublished).
- Lyle, W.M., Smerdon, E.T., 1965, Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils, *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 419-422.
- Maranha das Neves, E., 1987, Discussion report, Proceedings, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland, p.1367-1373.
- Maranha das Neves, E., 1989, Analysis of crack erosion in dam cores, The crack erosion test, de Mello Volume, Sao Paulo, Brazil, p.284-298.
- Marot, D., Regazzoni, P. L., Wahl, T., 2011, Energy-based method for providing soil surface erodibility rankings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1290-1293.
- Masch, F.D., Jr., Espey, W.H., Jr., Moore, W.L., 1963, Measurements of the shear resistance of cohesive sediments. Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Agricultural Research Service, Publication No. 970, Washington, D.C., p.151-155.
- Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2016, Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), 1-12.

- Moore, W. L., Masch, F.D., Jr., 1962, Experiments on the scour resistance of cohesive sediments, *Geophysical Research*, 67(4), 1437-1446.
- Sanchez, R.L., Strutytsky, A.I., Silver, M.L., 1983, Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using the laboratory triaxial erosion test procedure (No. WES/TR/GL-83-4), Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab, 339 p. (unpublished).
- Sargunan, A., 1977, Concept of critical shear stress in relation to characterization of dispersive clays. In *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. ASTM International, 390-397.
- Shaikh, A., Ruff, J.F., Abt, S.R., 1988 a, Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils, *Journal of geotechnical engineering*, 114(3), 296-305.
- Topçu, S., Tosun, H. 2022, Determination of Dispersive Erosion Resistance in Fine-Grained Soils with Newly Developed Test Equipment. *Geotechnical Testing Journal*, 45(1), 38-58.
- Wahl, T.L., Regazzoni, P., Erdogan, Z., 2008, Determining erosion indices of cohesive soils with the hole erosion test and jet erosion test (Hydraulic Laboratory (HL), No. DSO-08-05), Denver, Colorado, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 62 p. (unpublished).
- Wan, C.F., Fell, R., 2002, Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test-interpretative report, 325 p. (unpublished).

Dolgu Barajların Deprem Kaynaklı Kret Oturma Tahmini İçin Kullanılan Denklemler ve Karşılaştırmalı Analiz

Sadettin Topçu¹

Evren Seyrek²

Özet

Deprem kaynaklı kret oturmalarının önceden tahmini dolgu barajların tasarımında son derece önemlidir. Deprem sırasında oluşan deformasyonlar hava payını aşar ise üstten aşma kaynaklı baraj göçmesine sebebiyet verebilmektedir. Dolgu barajlarda sismik yükler altında oluşacak deformasyonları belirlemek için pek çok yöntem kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş Newmark yaklaşımı, ampirik ve yarı-ampirik yaklaşımlar barajların deprem sırasındaki davranışını incelemek için kullanılan ilk değerlendirme yöntemleridir. Ancak bu yöntemlerin gerçek deformasyon biçimini ve deformasyon büyüklüğünü tam olarak tahmin ettiğini söylemek mümkün değildir. Bu sebeple dolgu barajlarda deprem kaynaklı kret oturmalarının tek bir yöntem yerine farklı yaklaşımlara göre tahmin edilmesi ve sonuçların karşılaştırılarak kullanılması çok daha uygundur.

1. GİRİŞ

Depremselliğin yüksek olduğu bölgelerde inşa edilen dolgu barajların deformasyon davranışının analiz edilmesi, bu barajların uzun vadeli güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır. Esasen, deprem yüklerine maruz kalan dolgu barajlarda aşırı oturmalar enine çatlaklara neden olarak içsel erozyona neden olabilmektedir (Seed vd., 1978). Oturma sebebiyle, hava payının aşılması, rezervuardaki suyun taşmasına ve dolgu barajların çökmesine neden olabilir (OMNR, 2011).

- 1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Yüksekokulu, İnşaat Böl., Kütahya, Türkiye, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502
- 2 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

Literatürde deprem kaynaklı kret oturma değerini tahmin etmek için basit ve hızlı yöntemlerden karmaşık yöntemlere kadar farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Her yöntemin farklı avantaj ve dezavantajlarının olduğu unutulmamalıdır. Her yöntemin farklı amaçlar için kullanım önceliğine sahip olabileceği açıktır. Son yıllarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan yazılımların popüleritesinin artmasıyla birlikte, dolgu barajlarda deformasyonların belirlenmesinde psödo-statik analizlerin yerini 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizler almıştır. Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar yöntemleri sayısal analizde en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Dolgu barajların tasarımında bu teknikler esas alınarak birçok ticari paket program geliştirilmiştir (FLAC, Quake/W, Plaxis vb). Sayısal analizler sırasında şev stabilitesi, sıvılaşma, yatay ve düşey yer değiştirmeler bütünsel bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Özellikle baraj geometrisinin yanında, barajın doğal periyodu ve baraj vadisinin şeklinin de dikkate alınması bu yöntemlerin sonuçlar üzerindeki etkisini arttırmaktadır.

Zeminlerin gerilme-deformasyon davranışına dayalı yöntemler hem karmaşık hem de zaman alıcı olduğundan, barajların risk durumunu değerlendirmek için bu kapsamlı analizlere alternatif olan basitleştirilmiş yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş yöntemler arasında Newmark'ın önerdiği en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde dolgudaki potansiyel kayan kütleinin davranışının, eğimli yüzeydeki kayan bloğun davranışına benzer olduğu kabul edilmektedir (Newmark, 1965). Literatürde bu yaklaşım değiştirilerek geliştirilen farklı çalışmalar da mevcuttur (Maksidi ve Seed 1978; Rathje ve Braj 1999; Bray ve Travasarou 2007; Saygili ve Rathje 2008).

Bu yöntemlerin dışında ampirik ve yarı ampirik yaklaşımlar da dikkat çekmektedir (Jansen 1990; Swaisgood 1998; Swaisgood 2003; Singh vd., 2007; Bureau 2009; Swaisgood 2014; Seyrek ve Topçu 2022) Bu çalışmalarda deprem yüklerine maruz kalan barajlar incelenerek ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Genel olarak deprem sonrasında gözlenen oturma ve depremin şiddet ölçümleri (M ve PGA) ile baraj yüksekliği ve kret uzunluğu gibi baraj özellikleri arasında matematiksel korelasyonlar kurulmuştur. Uygun maliyetli ve hesaplama açısından kolay olan bu ampirik yöntemler, gelişmiş sayısal simülasyon tekniklerine göre daha az zaman ve profesyonellik gerektirir. Deprem kaynaklı kret oturmalarının kritik olup olmadığını değerlendirmek için birçok kılavuz, yönetmelik ve referans, erken tasarım aşamalarında yardımcı analiz araçları olarak bu tür yöntemlerin kullanılmasını önermektedir (FEMA 2005, USBR 2015, ANCOLD 2017). Bu yöntemlerle hesaplanan oturma değerleri hava payı değerine yakın ya

da büyük ise barajların daha kapsamlı bir dinamik analize tabi tutulması gerektiği yönünde görüş hakimdir.

Bu çalışmada deprem kaynaklı baraj oturmalarını hesaplamak için literatürde yer alan farklı denklemler kullanılmıştır. Bu denklemlerin; deprem büyüklüğü (M), en büyük yer ivmesi (PGA) ve baraj yüksekliği (H) değerlerine olan hassasiyetini değerlendirmek amacıyla dört farklı senaryo için analizler gerçekleştirilmiş ve oturma değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların barajların erken tasarım aşamasında risklerinin belirlenmesinde kullanılabileceği görülmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında farklı deprem senaryoları ve baraj yükseklikleri için deprem kaynaklı kret oturma değerlerini tahmin eden yaklaşımlar karşılaştırılmıştır. Dört farklı deprem büyüklüğü ($M=6, 6.5, 7$ ve 7.5), dört farklı ivme değeri ($PGA=0.20g, 0.30g, 0.40g$ ve $0.50g$) ve dört farklı baraj yüksekliği ($H=25m, 50m, 75m$ ve $100m$) dikkate alınarak oluşturulan altmış dört ayrı senaryo için analizler gerçekleştirilmiştir. Pratik olmaları ve ilk değerlendirmelerde daha hızlı çözüm üretme yetenekleri nedeniyle beş farklı ampirik yaklaşım aday denklem olarak seçilmiş ve ön değerlendirmeye tabii tutulmuştur (Swaigood 1998; Swaigood 2003; Bureau 2009; Swaigood 2014; Seyrek ve Topçu, 2022). Swaigood'un son iki yaklaşımı, yıllar içinde veri tabanına eklenen yeni olayların güncellenmiş versiyonlarına atıfta bulunmaktadır. Bu yaklaşımlara ilişkin özet bilgiler aşağıda verilmektedir.

2.1. Swaigood (1998) Yöntemi

Bu yaklaşımda 54 adet dolgu barajın sismik davranışı incelenmiş ve Denklem 1'de verilen ilişki elde edilmiştir. Denklem 1'de hesaplanacak kret oturması (Δ) değeri, baraj yüksekliği ve alüvyon kalınlığının oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta\% = SEF \times K_{typ} \times K_{dh} \times Kat \quad (1)$$

Denklem 1'de SEF , K_{typ} , K_{dh} ve Kat sırasıyla sismik enerjiye, baraj tipine, baraj yüksekliğine ve alüvyon kalınlığına bağlı faktörlerdir. Sismik Enerji Faktörü (SEF), baraj yerindeki en yüksek yer ivmesine (g cinsinden PGA) ve deprem büyüklüğüne (M) bağlı olarak Denklem 2 ile hesaplanmaktadır. Kat ve K_{dh} değerleri Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak belirlenmektedir. At ve H sırasıyla metre cinsinden alüvyon kalınlığını ve baraj yüksekliğini ifade etmektedir.

$$SEF = e^{(0.7168 \times M + 6.405 \times PGA - 9.098)} \quad (2)$$

$$Kat = 0.851 \times e^{(0.00368 \times At)} \quad (3)$$

$$Kdh = 9.134 \times H^{-0.437} \quad (4)$$

Ktyp değerinin; merkezi çekirdekli kaya dolgu barajlar ve ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar için 1.187, toprak dolgu barajlar için 1.363 ve hidrolik dolgu barajlar için 4.620 değerinin alınması önerilmektedir.

2.2. Swaisgood (2003) Yöntemi

Bu yöntemde sınılaşma ile ilgili herhangi bir olayın yaşanmadığı 69 vaka geçmiş dikkate alınarak ampirik bir denklem önerilmiştir. Araştırmacının önceki çalışmasında olduğu gibi depreme bağlı deformasyonu gösteren parametre olarak kret oturmaları seçilmiştir. Regresyon analizi sonucunda kret oturmaları üzerinde en etkili faktörlerin PGA ve deprem büyüklüğü olduğu tespit edilmiştir (Denklem 5). S değeri baraj yüksekliğine (DH) ve alüvyon kalınlığına (AT) bağlı olarak Denklem 6'daki gibi tanımlanmaktadır. Denklem 5'te verilen PGA değeri, barajın temelinde ölçülen veya tahmin edilen en yüksek yer ivmesi değeri olarak dikkate alınmakta olup M deprem büyüklüğünü ifade etmektedir.

$$S\% = e^{(6.07 \times PGA + 0.57M - 8.00)} \quad (5)$$

$$S\% = \frac{\Delta}{DH + AT} \times 100 \quad (6)$$

2.3. Bureau (2009) Yöntemi

Bureau (1985), senaryo deprem için baraj yerinde beklenen yer hareketinin, deprem sonrası baraj yapısını değerlendirme amacıyla sarsıntının şiddetinin tahmininde kullanılan deprem şiddet indeksi (ESI) ile ifade edilebileceğini belirtmiştir (Denklem 7). Bu yaklaşıma göre ESI değeri depremin şiddet ölçüsü olarak kullanılabilir. Bu denklemde PGA değeri baraj yerindeki en yüksek yer ivmesi değerini, M ise Richter veya Moment magnitudünü temsil etmektedir.

$$ESI = PGA \times (M - 4.5)^3 \quad (7)$$

Bureau (2009), Denklem 7'de verilen ESI değerini kullanarak kret oturmalarını hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir. Bu denklemde S, göreceli kret oturmasını göstermektedir.

$$\log(S\%) = -0.51931 + 0.54388 \times \log(ESI) + 0.26284 \times [\log(ESI)]^2 \quad (8)$$

2.4 Swaisgood (2014) Yöntemi

Swaisgood (2014) tarafından gerçekleştirilen araştırma, 2003 yılındaki çalışmasına 13 vaka daha ekleyerek toplam 82 vaka içeren bir veri tabanı içermektedir. Bu çalışma, içerdiği 2004 Niigata Ken Chuetsu depremi (M=6.6), 2008 Wenchuan depremi (M=7.9), 2008 Iwate-Miyagi Nairiku depremi (M=6.9), 2010 Maule depremi (M=8.8) ile Swaisgood (2003)'dan farklılık göstermektedir. Bu depremlerin yanı sıra 2011 Tohoku depreminde (M=9.0) meydana gelen 13 baraj kazasını da içermektedir. Çoklu regresyon analizlerinde deprem sırasındaki en yüksek yer ivmesi, deprem büyüklüğü, baraj tipi, baraj ile enerji kaynağı arasındaki mesafe, baraj yüksekliği, kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranı, eğim açıları ve rezervuar su seviyesi değerleri bağımsız olarak dikkate alınmıştır. Ancak kret oturmalarıyla yalnızca maksimum yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün doğrudan ilişkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Denklem 9'da normalize edilmiş kret oturması (NCS) ile PGA ve M değerleri arasındaki ilişki verilmektedir.

$$NCS\% = e^{(5.70 \times PGA + 0.471M - 7.22)} \quad (9)$$

Denklem 9'da tanımlanan NCS değeri, baraj yüksekliği ve alüvyon kalınlığının toplamının yüzdesi olarak ifade edilen kret oturma miktarını temsil etmektedir. PGA değeri "g" cinsinden temelde ölçülen veya hesaplanan en büyük yer ivmesi değeri olarak dikkate alınmaktadır.

2.5. Seyrek ve Topçu (2022) Yöntemi

Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelmiş seksen sekiz ayrı vakanın incelendiği bu çalışma da Genetik Algoritma kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu vakaların seçimi sırasında sıvılaşma içeren olaylar veri tabanından çıkarılarak değerlendirme yapıldığı özellikle belirtilmelidir. Araştırmacılar tarafından önerilen tahmin denklemi aşağıda verilmektedir (Denklem 10). İlgili denklemde girdi parametrelerinden biri olan magnitüd-ivme-faktörü (MAF) Denklem 11'de tarif edilmekte olup M_w moment magnitüdünü PGA ise "g" cinsinden en büyük yer ivmesi değerini ifade etmektedir. H_d ise "m" cinsinden baraj yüksekliğini tanımlamak için kullanılmıştır.

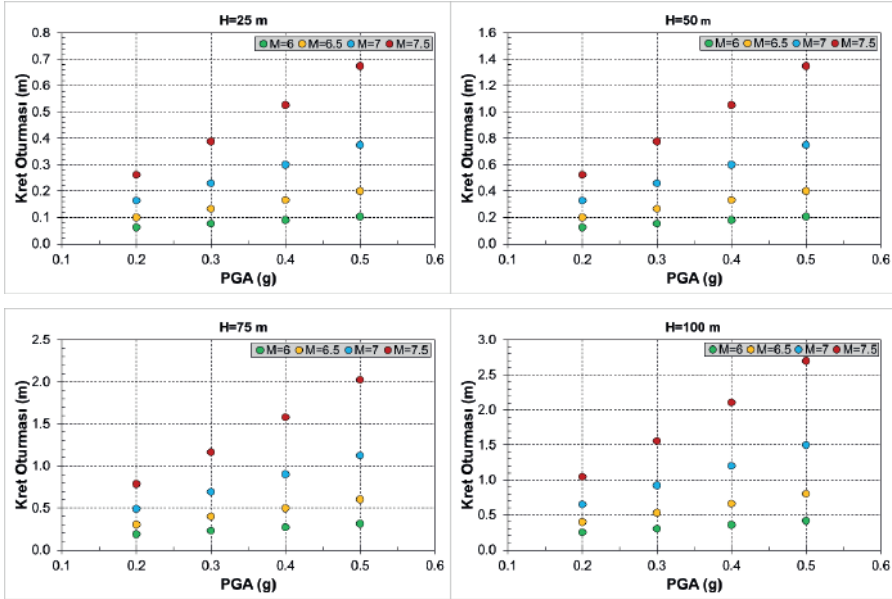
$$S_{kret} = \log[\log(2.849 - \sin(9.972 \times H_d))] \times \left[-\frac{MAF}{18.836} \times (14.977 + H_d) \right] \times \left[0.240 + \left(\frac{15.534}{H_d} \right)^{MAF} \right] \times 0.645^{7.747 - \sin(26.812 \times MAF)} \quad (10)$$

$$MAF = e^{\sqrt{2 \times PGA \times M_w}} \quad (11)$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

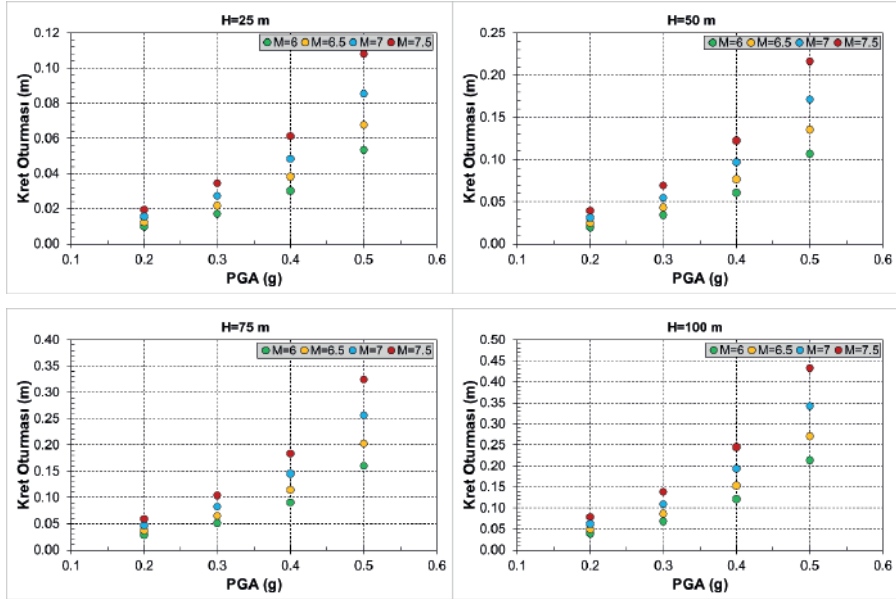
Bir önceki bölümde detayları verilen ve Swaisgood tarafından önerilen yaklaşımlar dikkate alınarak yapılan ön değerlendirme analizlerinde, araştırmacının 2003 ve 2014 yıllarında önerdiği yaklaşımların benzer sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca Swaisgood (1998) tarafından önerilen tahmin denkleminin oluşturulmasında kullanılan veri tabanındaki vakaların bazıları sıvılaşma kaynaklı oturmalar da içerdiği belirlenmiştir. Bu sebeple analizlerde kullanılacak ve karşılaştırması yapılacak yöntemlerin Bureau (2009), Swaisgood (2014) ve Seyrek ve Topçu (2022) olmasına karar verilmiştir. Dört farklı deprem büyüklüğü, dört farklı ivme değeri ve dört farklı baraj yüksekliğinin dikkate alındığı altmış dört ayrı senaryo için deprem kaynaklı kret oturma değerleri belirlenmiştir. Baraj temeli altındaki alüvyon kalınlığı 0 m olarak kabul edilerek analizler yapılmıştır.

H=25m, H=50m, H=75m ve H=100 m'lik dolgu baraj yüksekliği için Bureau (2009) denklemi ile hesaplanan deprem kaynaklı kret oturma değerleri Şekil 1'de verilmektedir. İlgili şekle göre, farklı en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal bir çizgi elde edilmektedir. Farklı deprem büyüklükleri için elde edilen noktaların birleşimi ile oluşan çizgilerin eğimi deprem büyüklüğünün artması ile artmaktadır. Bu gözlem, kret oturması değerlerindeki artışın deprem büyüklüğünden çok fazla etkilendiğini göstermektedir. Şekil 1 detaylı olarak değerlendirildiğinde, aynı en büyük yer ivmesi değerine sahip senaryolar içim incelenen tüm baraj yüksekliklerinde kret oturmalarındaki en büyük değişim oranı, deprem büyüklüğünün $M=6.5$ 'dan $M=7.0$ 'ye ve $M=7.0$ 'dan $M=7.5$ 'a çıkması durumunda olduğu görülmektedir. Örnek olması açısından H=50 m yüksekliğe sahip dolgu barajda $M=7.0$ ve $PGA=0.50g$ deprem senaryosu için beklenen kret oturması değeri 0.749 m iken aynı baraj yüksekliği için $M=7.5$ ve $PGA=0.50g$ senaryosunda tahmini kret oturması 1.350 m bulunmuştur.



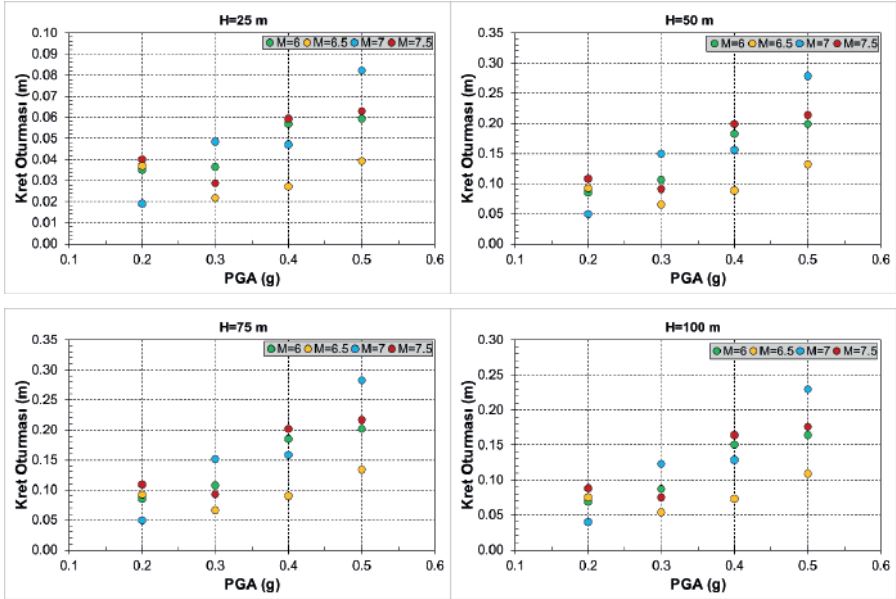
Şekil 1. Bureau (2009) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Swaigood (2014) tarafından önerilen tahmin denklemi kullanılarak hesaplanan kret oturma değerlerinin deprem büyüklüğü, en büyük yer ivmesi ve baraj yüksekliğine göre değişimi Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2 incelendiğinde, farklı en büyük yer ivmesi değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal olmayan bir ilişki elde edildiği görülmektedir. Farklı PGA değerleri için hesaplanmış kret oturma değerlerinin deprem büyüklüğünün artması ile arttığı görülmekle birlikte bu artış oranı Swaigood (2014) yaklaşımına göre daha küçüktür. Karşılaştırmayı daha kolay yapabilmek için, H=50 m yükseklikteki bir dolgu baraj için M=7.0 ve PGA=0.50g deprem senaryosu için beklenen kret oturması değeri ile aynı baraj yüksekliği için M=7.5 ve PGA=0.50g senaryosuna ait tahmini kret oturması değeri incelendiğinde ilk senaryo için 0.171 m kret oturması beklenirken, ikinci senaryoda tahmini kret oturması 0.216 m olarak hesaplanmıştır. İlgili şekilde dikkati çeken bir diğer durum ise kret oturmalarının deprem büyüklüğünden en çok etkilendiği durumun $PGA \geq 0.40g$ olan senaryolarda gözlenmesidir.



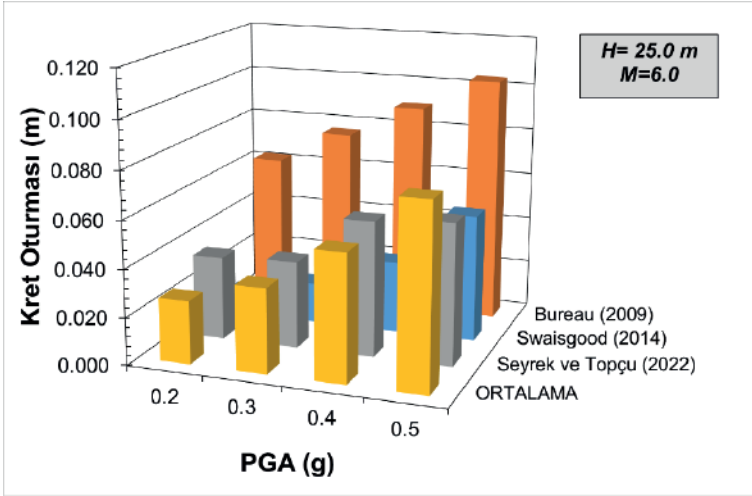
Şekil 2. Swaisgood (2014) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Seyrek ve Topçu (2022) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde ise Bureau ve Swaisgood yöntemlerindeki gibi en büyük yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün artmasına paralel olarak deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin düzenli bir şekilde artmadığı görülmektedir (Şekil 3). Bu durum, diğer yöntemlerdeki denklemlerin aksine araştırmacıların önerdiği denklemin genel bir formunun olmaması, küçük depremlerin küçük ivme, büyük depremlerin ise büyük ivme oluşturma ihtimallerinin de model sonuçlarına yansımaları ve önerdikleri modelin deprem belirsizliklerindeki rassallığı da göz önüne alınması ile açıklanabilir. Şekil 3 incelendiğinde, altmış dört senaryo içerisinde en büyük kret oturması değerinin M=7.5 ve PGA=0.50 g ve H=75.0 m için gözlemlendiği ve 0.282 m olduğu anlaşılmaktadır. Aynı deprem senaryosu için baraj yüksekliğinin 50.0 m olması durumunda ise tahmini kret oturması değeri 0.278 m olarak belirlenmiştir. Tahmini kret oturma değerlerindeki değişim oranı açısından yapılacak değerlendirmede, özellikle M=7.0 deprem büyüklüğünün oluşması senaryosunda ivme değerinin 0.20g'den 0.30g'ye çıkması durumunda en büyük değişim ortaya çıkmaktadır. Benzer davranış M=7.0 deprem büyüklüğünde ivme değerinin 0.40g'den 0.50g'ye artması durumunda da görülmektedir.

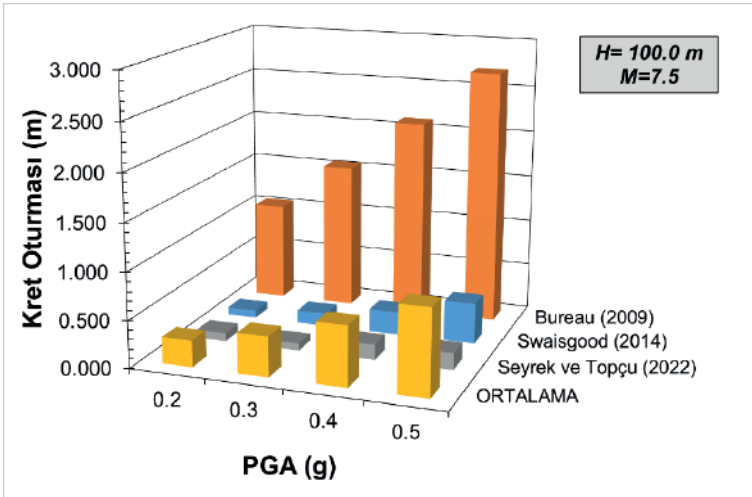


Şekil 3. Seyrek ve Topçu (2022) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Deprem kaynaklı kret oturmalarının tahmini için seçilen yöntemlerin birbiri ile mukayeselerini daha kolay yapabilmek adına baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün en küçük olduğu senaryo ($H=25$ m, $M=6.0$) ile baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün en büyük olduğu senaryo ($H=100$ m, $M=7.5$) için kret oturması değerlerinin değişimini gösteren Şekil 4 ve Şekil 5 oluşturulmuştur. $H=25$ m ve $M=6.0$ kombinasyonunda en büyük kret oturma değeri Bureau (2009) yöntemi ile edilmiş olup bu yöntemi Seyrek ve Topçu (2022) ile Swaisgood (2014) yöntemi izlemektedir. Üç farklı yöntem ile belirlenen ortalama kret oturması değerlerinin Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımı ile belirlenen kret oturması değerlerine yakın olduğu dikkati çekmektedir. $H=100$ m ve $M=7.5$ kombinasyonunda ise en yüksek kret oturması değerleri Bureau (2009) yöntemiyle elde edilmiştir. Bu senaryo için en küçük oturma değeri Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımında gözlenmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 birlikte değerlendirildiğinde, baraj yüksekliğinin ve deprem büyüklüğünün artması ile birlikte Bureau (2009) yöntemine göre belirlenen kret oturması değeri ile diğer yöntemlere göre hesaplanan oturma değerleri arasındaki fark da artmaktadır.



Şekil 4. $H=25.0$ m ve $M=6.0$ senaryosu için deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin mukayesesi



Şekil 5. $H=100.0$ m ve $M=7.5$ senaryosu için deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin mukayesesi

4. SONUÇLAR

Dört ayrı baraj yüksekliği ($H=25$ m, 50m, 75m ve 100m), dört ayrı deprem büyüklüğü ($M=6$, 6.5, 7 ve 7.5) ve dört farklı ivme değeri ($PGA=0.20$ g, 0.30g, 0.40g ve 0.50g) dikkate alınarak oluşturulan altmış dört ayrı senaryo için deprem kaynaklı kret oturma değerleri hesaplanmıştır. Oturma değerlerinin tahmini için Bureau (2009), Swaisgood (2014) ile

Seyrek ve Topçu (2022) tarafından önerilen denklemler kullanılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm senaryolar için Bureau (2009) yöntemi diğer iki yönteme göre daha büyük kret oturması değeri tahmin etmektedir.
- Bureau (2009) yöntemine göre elde edilen oturma değerleri ile Swaisgood (2014) ve Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımları ile belirlenen oturma değerleri arasındaki farklar baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün artışı ile beraber artmaktadır.
- Bureau (2009) yaklaşımında en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal bir çizgi elde edilmektedir.
- Swaisgood (2014) yönteminde kret oturmalarının deprem büyüklüğünden en çok etkilendiği durum $PGA \geq 0.40g$ olan senaryolarda gözlenmiştir.
- Seyrek ve Topçu (2022) tarafından önerilen tahmin denkleminin genel formu sebebiyle Bureau ve Swaisgood yöntemlerindeki gibi en büyük yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün artışına paralel olarak deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin düzenli bir şekilde artmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- ANCOLD (2017). ANCOLD Guidelines for Design of Dams and Appurtenant Structures for Earthquake. Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD).
- Bray, J.D. and Travasarou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* - ASCE, 133(4), 381-392.
- Bureau G. (2009). Seismic performance review of Zipingpu Dam. In Proc. International Seminar on Earthquake and Dam Safety, ICOLD, March-April, China, 33-54.
- FEMA (2005). Federal guidelines for dam safety: earthquake analyses and design of dams. FEMA-65, Federal Emergency Management Agency.
- Jansen, R. B. (1990). Estimation of embankment dam settlement caused by earthquake. *International Water Power and Dam Construction*, 42(12), 35-40.
- Makdisi, F.I and Seed H.B. (1978). Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. *J. Geotech. Eng. Division*, 104(7), 849-867.
- Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15, 139-16.
- OMNR. (2011). Geotechnical design and factors of safety. Technical Bulletin, Ontario Ministry of Natural Resources, Canada.
- Rathje, E.M. and Bray, J.D. (1999). An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures. *Can. Geotech. J.*, 36(1), 72-87.
- Saygili, G. and Rathje, E.M. (2008). Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* - ASCE, 134(6), 790-803.
- Seed, H. B., Makdisi, F. I., & De Alba, P. (1978). Performance of earth dams during earthquakes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(7), 967-994.
- Seyrek, E., & Topcu, S. (2022). Prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams using gene expression programming. *Geomechanics and Engineering*, 31(6), 637.
- Singh, R., Roy, D. and Das, D. (2007). A correlation for permanent earthquake-induced deformation of earth embankments. *Eng. Geol.*, 90(3-4), 174-185.
- Swaigood J. R. (1998). Seismically-induced deformation of embankment dams. In proceedings of sixth national conference on earthquake engineering. Seattle, Washington, U. S. A. May 31 – June 4 1998.

- Swaisgood, J.R. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. Proceeding of the 7th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Christchurch, New Zealand.
- Swaisgood, J.R. (2014). Behavior of embankment dams during earthquake. *J. Dam Saf.*, 12(2),35-44.
- USBR (2015). Chapter 13: Seismic Analysis and Design. Design Standards No. 13 Embankment Dams, Phase 4: Final, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.

Isparta İli Anadolu Mahallesi Kentsel Dönüşüm Alanının Jeoteknik İncelenmesi¹

Onur Tuncel²

Mehmet Özçelik³

Özet

Yapılaşma alanlarında meydana gelebilecek deprem gibi bir doğal afetin oluşturacağı etkileri önceden tahmin edebilmek ve oluşabilecek zararları en aza indirebilmek veya ortadan kaldırmak, o bölgenin jeolojik ve tektonik özelliklerini iyi tanımlamaktan ve iyi değerlendirmekten geçmektedir. Bu da yapılaşma öncesinde, gerekli zemin araştırmaları yapılarak, zeminin mühendislik özelliklerinin yanı sıra dinamik, yerel ve çevresel etkilerin, olası tehlike ve risklerinin analiz edilmesiyle sağlanabilir. Ayrıca bu özelliklerin bilinmesi ile yeni yerleşim alanları için imar planlarının oluşturulup yanlış arazi kullanımı önlenir. Isparta ili Anadolu Mah. yerleşim alanının I. Derece deprem bölgesinde yer alması, yapılması planlanan kentsel dönüşüm çalışmasında; zeminin gevşek alüvyonlardan oluşması, sismik etkilerin sebep olduğu taşıma gücü ve oturma problemleri ile karşılaşılmasına neden olacağı öngörülmektedir. Bu sebeple Anadolu Mahallesi çalışma alanındaki zeminlerin jeolojik ve jeoteknik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, inceleme alanında 10 adet jeoteknik amaçlı sondajlar yapılarak, standart penetrasyon deneyi darbe sayısı ile zeminlerin kıvamı ve sıklığı belirlenmiştir. Bu veriler ışığında Anadolu Mahallesi yerleşim alanındaki zeminlerin dinamik ve statik taşıma gücü ve oturma hesabı yapılarak yerleşime uygunluk değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre inceleme alanın orta sıkı ve gevşek birimlerden oluşmasının, taşıma gücü ve oturma kriterlerinin sismik etki durumunda aşılabacağına varılmıştır. Bu çalışma, kentte uygulanacak imar planlarının jeoteknik olarak önemli bir altlığını da oluşturmaktadır.

- 1 Bu çalışma 'Isparta İli Anadolu Mahallesi Kentsel Dönüşüm Alanının Jeoteknik İncelenmesi' başlıklı yüksek lisans tezi verileri esas alınarak hazırlanmıştır.
- 2 SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, onur-tuncel@hotmail.com, 0000-0003-4697-7549
- 3 SDÜ, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ozcelikmehmet@sdu.edu.tr, 0000-0003-4511-1946

1. Giriş

Kentsel dönüşüm, genellikle bir şehirdeki eski ve riskli yapıların, çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik prensipleri doğrultusunda güvenli, modern ve çağdaş yapılarla değiştirilmesini ifade eden bir kavramdır. Bu süreç, şehirleşme sürecindeki sorunları çözmeyi, yaşanabilirlik koşullarını artırmayı ve afet risklerini azaltmayı amaçlar. Kentsel dönüşüm ile ilgili temel bilgiler aşağıdaki şekilde verilebilir;

Riskli Yapılar: Kentsel dönüşüm genellikle deprem, sel, yangın gibi doğal afetlere karşı risk oluşturan eski ve güvensiz yapıların yenilenmesini içerir. Bu yapılar hem sakinleri hem de çevresindeki toplumu tehdit edebilir.

Çevresel ve Sosyal Değişim: Kentsel dönüşüm sadece fiziksel yapıları değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal koşulları da iyileştirmeyi amaçlar. Yeşil alanlar, yaya dostu alanlar, toplu taşıma sistemleri gibi çevresel düzenlemelerle birlikte, sosyal hizmetlerin artırılması, yerel ekonominin canlandırılması gibi faktörler de dikkate alınır.

Ekonomik Gelişim: Kentsel dönüşüm, genellikle bir bölgenin ekonomik potansiyelini artırmayı hedefler. Yenilenmiş alanlar, ticaret, turizm ve diğer ekonomik faaliyetler için daha uygun hale getirilebilir, bu da bölgesel kalkınmayı destekler. Şehir Planlaması: Kentsel dönüşüm, daha etkili ve sürdürülebilir bir şehir planlaması sağlamayı amaçlar. Planlı ve düzenli bir şehirleşme, kaynakları daha verimli kullanmayı, trafik sorunlarını azaltmayı ve genel yaşam kalitesini artırmayı hedefler.

Afet Risklerini Azaltma: Özellikle deprem bölgelerinde, eski ve dayanıksız yapıların yenilenmesiyle afet risklerinin azaltılması amaçlanır. Bu, can güvenliğini artırmayı ve afet sonrası toparlanmayı kolaylaştırmayı hedefler.

Mevcut Kaynakları Etkin Kullanma: Kentsel dönüşüm, mevcut kentsel alanların ve altyapının daha etkili bir şekilde kullanılmasını amaçlar. Bu, su ve enerji tasarrufu gibi kaynakları daha sürdürülebilir bir şekilde yönetmeyi hedefler.

Kentsel dönüşüm, şehirlerin sürdürülebilirlik, güvenlik ve yaşanabilirlik açısından gelişimini sağlamak amacıyla uygulanan bir stratejidir. Ancak uygulama süreçlerinde yerel halkın katılımı, sosyal adalet, mülkiyet hakları gibi konular dikkate alınmalıdır, çünkü bu süreçlerde toplumun etkileşimi önemlidir.

Son dönemlerde kentsel dönüşüm planları, ülkemizin jeolojik yapısı, doğal afetler, hızlı ve plansız kentleşme, eski imar alanlarının ömrünü

tamamlaması gibi faktörlerle birlikte geniş bir değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Bu durum, kentsel alanların değiştirilmesi ve yeniden yapılandırılma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Kentsel dönüşüm projelerinde genellikle mimarlar ve şehir planlamacıları tarafından tasarımlar yapılırken, en etkili uygulamaların gerçekleştirildiği ülkelerde jeoteknik çalışmaların da planlama süreçlerine büyük katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Isparta ili Anadolu Mahallesi'nde planlanan kentsel dönüşüm projesi için zeminin taşıma kapasitesi ve oturma açısından dinamik ve statik durumda incelenmesini amaçlamaktadır. Çalışma alanının eski ve temelsiz yapılarıyla karakterize olması nedeniyle Isparta Belediyesi ve Valiliği tarafından öncelikli kentsel dönüşüm bölgesi olarak belirlenmiştir. Zemin profilindeki birimlerin mühendislik jeolojisi özelliklerinin belirlenmesi, bu birimlerin potansiyel dinamik ve statik taşıma kapasitesi eksikliği ve oturma gibi jeolojik risklerinin ortaya konulması, olası mühendislik sorunlarına çözüm odaklı çalışma yöntemlerinin belirlenmesi ve bu şekilde dönüşüm sürecinin daha güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir. Jeoteknik açıdan yapılacak bu analizler, kentsel dönüşüm sürecinin başarısında önemli bir rol oynayacaktır. Yapılaşma alanlarında olası deprem gibi doğal afetlerin etkilerini önceden tahmin edebilmek ve bu afetlerin neden olabileceği olumsuzlukları minimize etmek, söz konusu alanların jeolojik ve tektonik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde tanımlanması ve değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu, yapılaşma sürecinden önce, zeminin parametrelerine ek olarak dinamik, yerel ve çevresel afetlerin, potansiyel tehlikelerin ve risklerin teşkil edilmesi için gerekli olan zemin araştırmalarının yapılmasını içerir. Ek olarak, yeni yerleşim bölgeleri üzerine etkili imar planlarının oluşturulmasına ve hatalı arazi kullanımının önlenmesine olanak tanır.

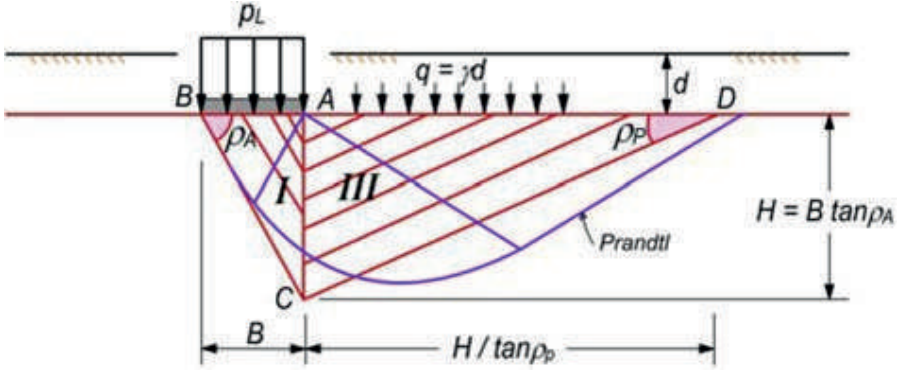
Isparta ili Anadolu Mahallesi'nin 1. Derece deprem bölgesinde konumlanması ve planlanan kentsel dönüşüm çalışmasının bölgenin gevşek alüvyon zeminlerinden oluşması nedeniyle, sismik etkilerin yol açabileceği taşıma kapasitesi ve oturma sorunlarına yönelik öngörüler bulunmaktadır. Bu nedenle, Anadolu Mahallesi'ndeki zeminlerin jeolojik ve jeoteknik özellikleri detaylı bir şekilde incelenecektir. Alan üzerinde gerçekleştirilecek 18 adet jeoteknik sondaj, SPT deneyinden, zeminlerin kıvam ile sıklığını belirleme amacını taşımaktadır. Temsil edici zemin örnekleri alınacak ve laboratuvar ortamında bu örneklerin jeoteknik özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilecektir. Elde edilen tüm verilere dayanarak, bölgedeki zeminler TBDY 2018'e göre sınıflandırılacaktır. Bu veriler ışığında, Anadolu Mahallesi'ndeki zeminlerin dinamik ve statik taşıma gücü ile oturma hesapları yapılarak yerleşim alanının uygunluğu değerlendirilecektir. Bu tez

çalışması, kentte uygulanacak imar planlarının jeoteknik açıdan sağlam bir temelini oluşturmayı amaçlamaktadır.

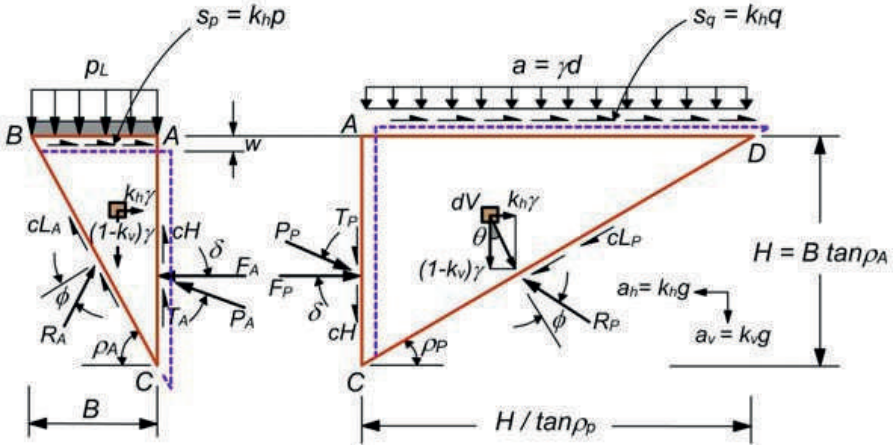
Yapılacak çalışma ile Isparta ili için oluşturulacak taşıma gücü ve oturma analizleri grafikleri ile yapılması planlanan kentsel dönüşüm alanı için değerlendirmeler yapılacaktır. Ayrıca kullanılan dinamik taşıma gücü yöntemi günümüz literatürüne katkı sağlayacaktır. Ek olarak alüvyon zeminlerin dinamik taşıma gücünün deprem etkisinden ne kadar etkilendiği ve tasarımda dinamik etkilerin de değerlendirilmesinin de gerekliliği tartışılacaktır.

2. Materyal ve Metot

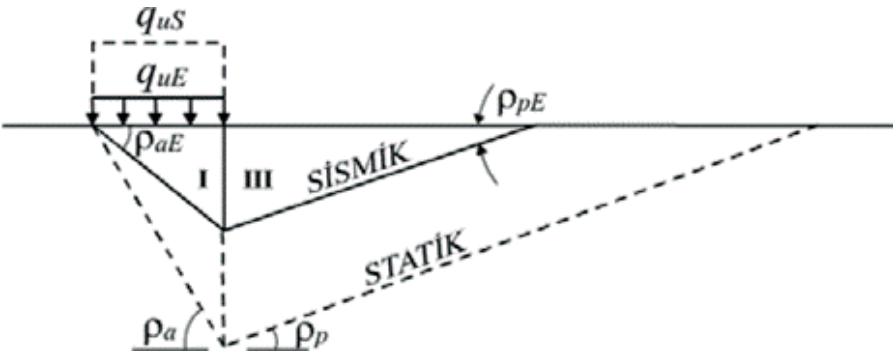
Günümüzde zemin yapıları uygulamalarında sismik etkilerden kaynaklanan taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik herhangi bir kriter veya kılavuz bulunmamaktadır. Bu konuda önemli bir çalışma Richards vd. (1993) tarafından yapılmıştır. Son 10-15 yıldır konuya yönelik yoğunlaşmalar giderek kendini göstermeye başlamıştır. Richards vd. (1990) tarafından ortaya atılan sismik taşıma gücü kaybı hesapları davranış mekanizmasını en iyi anlatan açıklama olduğu için tercih edilmiştir. Richards vd. (1993) statik taşıma gücü katsayılarının sismik durum için emsallerini hesaplamış ve tablolar halinde sunmuşlardır. Taşıma gücündeki azalma hem zemin mukavemetinin sismik etki ile azalmasından hem de depremin yarattığı kayma etkisi ile yapıdan veya herhangi başka bir sürşarjdan temele aktarılan yatay kuvvetlerden kaynaklandığını ifade etmiştir. Tekil temeller, sürekli temeller, radye temeller ve hatta kazık temeller sismik etki ile göçebilir ve bu çoğunlukla sıvılaşmaya atfedilir. Hâlbuki gözlemler bu göçmelerin kısmi doygun ve hatta sert ve sıkı zeminlerde bile oluştuğunu göstermektedir. Bu durumda sıvılaşma açıklaması geçerli ve/veya yeterli değildir. Deprem etkisi ile temel altında oluşan göçme mekanizması değişmektedir. Statik durumda göçme mekanizmasını oluşturan aktif ve pasif kamaları çevreleyen kayma düzlemleri artan ivme ile giderek yataylaşmaktadır. Statik taşıma gücünü hesaplamak için kullanılan aynı Coulomb göçme mekanizmasına (bknz. Şekil 2.1-2.2) dinamik deprem etkileri (yatay ve düşey deprem ivme etkileri) eklenecek deprem durumundaki taşıma gücü faktörleri bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Basitleştirilmiş Coulomb kayma kamaları ($\delta \neq 0$) (Richards vd., 1993)



Şekil 2.2. Coulomb mekanizması (δ sürtünmesinin dikkate alındığı durum) (Richards vd., 1993)



Şekil 2.3. Statik ve sismik şartlarda taşıma gücü kamaları (Richards vd., 1993)

Önceki verilere göre, Terzaghi (1943)'e bağlı olarak sürekli temel için statik durumdaki taşıma gücü (q_{uS}) denklem 2.1 ile bulunur.

$$q_{uS} = c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (2.1)$$

Bu denklemde c = kohezyon, N_c = kohezyon taşıma gücü katsayısı, γ = Birim Hacim Ağırlık (BHA), L = Temel uzunluğu, N_q = yüke bağlı taşıma gücü katsayısı, B = Bina eni ve N_γ = birim hacim ağırlığa bağlı taşıma gücü katsayısı, olarak tanımlanmaktadır.

Deprem ivmelerinin etkisi yukarıdaki limit denge probleminin içine eklenerek sismik taşıma gücü (q_{uE}) formülü Denklem 2.2 olarak elde edilir.

$$q_{uE} = c \cdot N_{cE} + \gamma \cdot L \cdot N_{qE} + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_{\gamma E} \quad (2.2)$$

Bu denklemde sismik taşıma gücü faktörleri N_{cE} , N_{qE} , $N_{\gamma E}$ sembolleriyle tanımlanmıştır.

İvme değerleri boyutu artış ilişkisine göre sismik göçme mekanizması giderek sığlaşmaktadır. Sonuç zemin temelin altından kayar. Zeminin efektif sürtünme açısı ne kadar küçükse taşıma gücünün sismik azalması o ölçüde hızlıdır. Statik taşıma gücü faktörleri sadece içsel sürtünme açısının (ϕ) bir fonksiyonu olarak tanımlanırken, aşağıda verilen dinamik taşıma gücü faktörleri içsel sürtünme açısı (ϕ), duvar sürtünme açısı (δ), ve yatay ve düşey ivme katsayılarına (k_h , k_v) bağlıdır ve Denklem 2.3, 2.4 ve 2.5'te bulunan formüller ile bulunmaktadır.

$$N_{qE} = K_{pE}/K_{aE} \quad (2.3)$$

$$N_{cE} = (N_{qE} - 1) \cot\phi \quad (2.4)$$

$$N_{\gamma E} = \tan \rho_{aE} ((K_{pE}/K_{aE}) - 1) \quad (2.5)$$

Bu denklemlerde; ρ_{aE} kama açısı, K_{aE} ve K_{pE} dinamik etkiler altında kamalar için geçerli olan aktif ve pasif yanal toprak basıncı katsayılarıdır ve Tschebotarioff (1951)'e göre Denklem 2.6, 2.7 ve 2.8'e göre belirlenir.

$$\rho_{aE} = a + \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(1 + \tan^2 a) [1 + \tan(\delta + \theta) \cot a]} - \tan a}{1 + \tan(\delta + \theta)(\tan a + \cot a)} \right) \quad (2.6)$$

$$K_{aE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right)^2} \quad (2.7)$$

$$K_{pE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}}\right)^2} \quad (2.8)$$

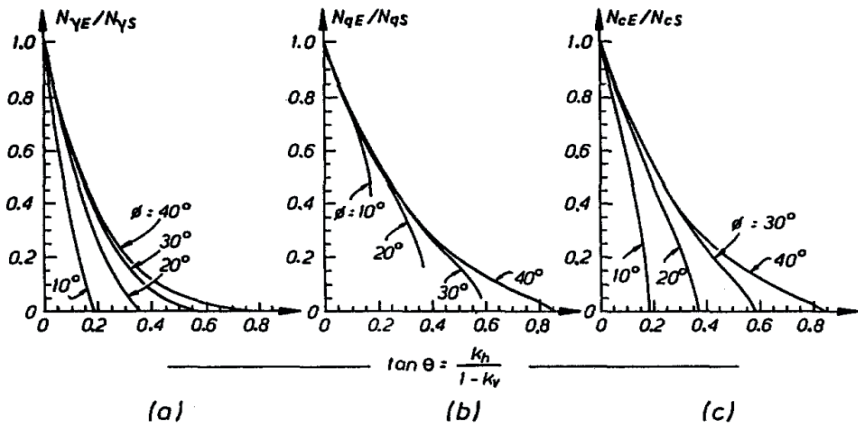
Burada $\theta = \tan^{-1}k_h/(1-k_v)$ ve $a = \phi - \theta$ olarak tanımlanmaktadır. $\delta = \phi/2$ olarak alınmaktadır. k_h ve k_v sırasıyla temel hizasında oluşan yatay ve düşey deprem ivme katsayılarıdır. TBDY 2018' e göre $k_h=0.2SDS$ ve $k_v=\pm 0.5k_h$ sırası ile yatay ve düşey eşdeğer deprem katsayısıdır. Deprem yüklerinin ilave edilmesi ile temel altındaki aktif ve pasif kamaların geometrisi Şekil 2.4'de görüldüğü şekilde değişmektedir. Deprem ivmesinin artışı ile aktif itki katsayısı artmakta (K_{AE}) ve pasif itki katsayısı (K_{PE}) ise azalmaktadır. Deprem ivmesinin kritik bir seviyesinde ise genel akışkanlaşma durumuna ulaşılarak $K_{\alpha E} = K_{\pi E}$ ve $\rho_{\alpha E} = \rho_{\pi E} = 0$ değerlerine ulaşılmaktadır. Bu durumda zemin temelin altından kaymaktadır. Bir depremde taşıma kapasitesindeki aşırı azalmayı daha iyi göstermek için sismik taşıma kapasitesi faktörlerinin statik taşıma kapasitesi faktörlerine oranları Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. $k_h = 0.25$ gibi ortalama bir ivme seviyesinde ve yükte sismik bir artış olmadığında bile, sıkı kum üzerindeki yüzeysel temelleri statik taşıma kapasitesinin yalnızca üçte birini korur ve statik güvenlik faktörü 3,0 olacak şekilde tasarlanırsa oturmaya başlamaktadır. Sıvılaşmaya karşı önlem almak sismik taşıma kapasitesi sorunlarını önlemeye garantisini vermemektedir. Büyük depremlerde, sıkı kum üzerinde bile tüm temellerde bir miktar oturma meydana gelecektir. Etkili sürtünme açısı daha düşük olan zeminlerde taşıma kapasitesinin sismik deformasyonu daha hızlıdır ve genel kırılma çok daha erken gerçekleşir. Örneğin; $\phi = \sim 10$ için taşıma kapasitesi $k_h = 0.176$ 'da tamamen ortadan kalkar ve güçlü, uzun süreli bir depremle sonuçlanacak büyük oturmalar kolaylıkla yanlışlıkla sıvılaşmaya atfedilebilir.

Çizelge 2.1. İşsel sürtünme açısı 30 olan zeminin çeşitli deprem ivmelerine göre dinamik ve statik taşıma gücü katsayıları

TABLE 2. Seismic Bearing Capacity Factors and Ratios to Static Values for $\phi = 30^\circ$

| Acceleration Intensity $\tan \theta = \frac{k_h}{1 - k_v}$ (1) | Seismic Bearing-Capacity Factors | | | Ratios of Seismic to Static Bearing-Capacity Factors | | |
|--|----------------------------------|-----------------------|-----------------|--|------------------------------------|------------------------|
| | N_{qE} (2) | $N_{\gamma E}$ (3) | N_{cE} (4) | N_{qE}/N_{qs} (5) | $N_{\gamma E}/N_{\gamma s}$ (6) | N_{cE}/N_{cs} (7) |
| 0 | 16.51 | 23.76 | 26.86 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.807 | 12.86 | 15.34 | 20.55 | 0.78 | 0.65 | 0.77 |
| 0.176 | 9.84 | 9.45 | 15.31 | 0.60 | 0.40 | 0.57 |
| 0.268 | 7.30 | 5.36 | 10.91 | 0.44 | 0.23 | 0.41 |
| 0.364 | 5.12 | 2.61 | 7.14 | 0.31 | 0.11 | 0.27 |
| 0.466 | 3.21 | 0.88 | 3.83 | 0.19 | 0.04 | 0.14 |
| 0.577 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 |

Ayrıca Şekil 2.4'te tüm içsel sürtünme açısı ve $\tan\theta$ değerleri için dinamik/statik taşıma gücü katsayıları oranları yer almaktadır.



Şekil 2.4. Sismik ve Statik Taşıma Kapasitesi Oranları

Oturma analizi statik ve dinamik olarak iki şekilde gerçekleştirilmiştir.

Statik oturma analizi

İnceleme alanında statik oturma tahkiki Meyerhof, Terzaghi-Peck tarafından verilen formüller esas alındığında Denklem 2.9 ile hesaplanmıştır.

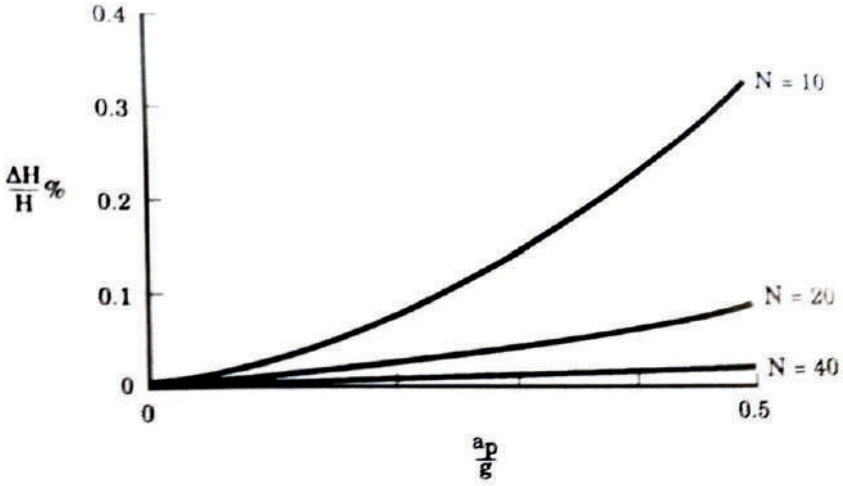
$$\Delta H = 31,2 (q_{net} / N) \quad (2.9)$$

Burada q_{net} = bina (kolon) yükü olup, bina toplam yükünün birim alana tekabül eden miktarıdır, Proje alanı için (Z+6 kat) 1,5 kg/cm² değeri kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. SPT (N60)30 değerleri kullanılmıştır.

Dinamik oturma analizi

Dinamik oturma hesapları ise Krinitzsky vd. (1993) tarafından önerilen aşağıdaki grafikten elde edilmiştir. Bu şekilde deprem kökenli hacimsel birim deformasyonu (yüzde olarak ifade edilen $\Delta H/H^1$) hesaplamak için standart penetrasyon deneyi N ile pik yer ivmesi (a_p) kullanılmaktadır. Şekil 2.5' de hacimsel sıkışmaya neden olan üç ana faktörün ikisi hesaba katılmaktadır. Bunlar, standart penetrasyon deneyinden elde edilen zeminin gevşekliği ve pik yer ivmesinden (a_{max}) bulunan kayma deformasyonu miktarıdır. Şekil 2.5'teki eğrilerin düzeltilmemiş N değerleri cinsinden olduğuna dikkat edilmelidir. Pratik bir yaklaşım olması bakımından, eğer eğriler standart penetrasyon deneyi (N₁)₆₀ değeri cinsinden olmalıdır. Çünkü (N₁)₆₀ değeri zeminin sıklık durumunu daha iyi temsil etmektedir. Örneğin, düzeltilmemiş aynı

N değerine sahip iki kum tabakası göz önünde bulundurulduğunda, yüzeye yakın kum tabakası, daha derinde bulunan kum tabakasından çok daha sıkı durumda olacaktır. Şekil 2.5'deki grafiği kullanmak için, kumun (N1)60 değeri ve pik yer ivmesi a_p 'nin ikisinin de bilinmesi gerekir. Sonra, grafiğe a_p/g değeri ile girilip arzu edilen (N1)60 eğrisinin kesleştirilmek suretiyle hacimsel birim deformasyon (yüzde olarak ifade edilen $\Delta H/H$) bulunur. Daha sonra, ondalık olarak ifade edilen hacimsel birim deformasyon zemin tabakasının kalınlığı H ile çarpılarak hacimsel sıkışma (yani oturma) elde edilmektedir.



Şekil 2.5. Kuru kumdaki oturmaya tahminde kullanılan diyagram (Krivitzsky vd., 1993)

2.1. Zemin Parametreleri

Çalışma alanı ile ilgili çalışmalar, arazi, laboratuvar ve büro çalışmaları olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları kapsamında, MTA (1987) tarafından hazırlanmış 1/25.000 ölçekli ve 1/100.000 MTA (2008) İnceleme alanı ve çevresini kapsayan bölgenin jeolojisi esas alınmış, inceleme alanında yüzeylenen litolojik birimlerin dağılımları, yapısal ve tektonik özelliklerini açıklamak amacıyla jeoloji haritası hazırlanmıştır. Jeolojik haritalama sırasında, yol yarmaları, temel kazıları, doğal mostralar ve sondaj kuyularından yararlanılmıştır.

2.1.1. Sondaj Çalışmaları

İnceleme alanında yapılan kareajlama ile arazi şartlarına bağlı olarak yaklaşık her hücreye 1 adet olmak üzere toplam derinliği 200 m olan 10

adet sondaj kuyusu açılmıştır. Açılan sondaj kuyularının derinlikleri 20 metredir. Sondajlar sırasında uygun seviyelerde Standart Penetrasyon Testi (SPT) yapılarak zeminlerin penetrasyon direnci belirlenmiş ve gerekli SPT numunesi alınmıştır. Bu sondajlara ait koordinatlar ve derinliğe göre litolojik birimler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. İnceleme alanında yapılan sondajlara ait kotlar ve diğer veriler

| Sondaj lokasyonlarına ait koordinatlar (ITRF96-30) | | | | | | |
|--|------------|------------|-------------|----------|---------------------------|---------------|
| No: | Sondaj No: | Y | X | Derinlik | Litoloji | Formasyon |
| 1 | SK-84 | 549114.603 | 4183489.552 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 2 | SK-85 | 548865.816 | 4183870.422 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,5-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 3 | SK-89 | 548239.258 | 4184100.106 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 4 | SK-90 | 548149.390 | 4183720.796 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 5 | SK-232 | 548346.316 | 4183408.371 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 6 | SK-238 | 548868.843 | 4182979.715 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 7 | SK-303 | 548469.220 | 4182709.954 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 8 | SK-304 | 548707.214 | 4182349.422 | 0-0,50 | Bitkisel Toprak | - |
| | | | | 0,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 9 | SK-308 | 549435.191 | 4182321.811 | 0-2,50 | Yapay Dolgu | - |
| | | | | 2,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |
| 10 | SK-343 | 548854.323 | 4182088.027 | 0-2,50 | Yapay Dolgu | - |
| | | | | 2,50-20 | Çakıllı, Killi, Sitli Kum | Alüvyon (Qal) |

2.1.2. Jeofizik Çalışmalar

İnceleme alanında enine dalga (S) ve boyuna dalga (P) hızlarının ölçülmesi ve dinamik zemin parametreleri, yer hâkim titreşim periyotları, yer sismik büyütmelemleri, deprem yönetmeliklerine esas zemin sınıfları belirlenmesi amacıyla),10 adet sismik ve 10 adet MASW-Kırılma etüdü yapılmıştır. Sismik kırılma çalışmaları sonucunda P ve S dalga hızları derinliğin değişkeni olarak belirlenmişlerdir. Elastik parametreler, P ve S dalga hızları ve yoğunluk değeri kullanılarak hesaplanmışlardır. Vs Dalga Hızı: Partiküllerin titreşim doğrultusu, dalganın tabaka içinde yayılım doğrultusuna diktir. S dalgaları sadece katı ortamda yayılırlar. Deprem anında yıkıcı özelliği olan dalgalardır. Yayılma hızları düşüktür (3-4 km/s) ve hızı P dalgası hızının % 60'ı ile % 70'i arasında değişir. S dalgaları sıvı içinde yayılamazlar. Bu sebeple de manto içine giremez ve deprem merkezinden 103° uzaklıkta bulunan yerlere kadar kaydedilirler. Yapılarda yıkıma yol açan dalgalar S dalgaları ile yüzey dalgalarıdır. S dalgaları yeraltının mekanik özelliklerini ortaya koyarlar.

2.1.3. Laboratuvar Çalışmaları

Sondaj çalışmalarından alınan örselenmiş (SPT) numuneler şartnameye uygun olarak Zemin ve Kaya Laboratuvarı'na sevk edilmiş ve şartnamede belirtilen sayı ve türdeki deneyler yapılmıştır (bknz. Çizelge 2.3). Tüm deneylerde TS-1900 standardı uygulanıp, Çizelge 2.4'de görüldüğü üzere örnekler birleştirilmiş zemin sınıflamasına (USCS) göre sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.3. Yapılan Laboratuvar Deneyleri

| Dency Adı | Standart |
|---------------------|------------------------------|
| Elek Analizi | TS EN ISO 17892-4/ TS 1900-1 |
| Atterberg Limitleri | TS EN ISO 17892-4/ TS 1900-1 |
| TBHA | TS EN ISO 17892-2 Şubat 2016 |
| Su içeriği | TS EN ISO 17892-1 |
| Direk kesme deneyi | TS 1900-2 |

Çizelge 2.4. İnceleme alanında yapılan sondajlara ait laboratuvar verileri

| Sondaj No | Derinlik (m) | USCS | W (%) | Bha | #10 kalan (%) | #200 geçen (%) | C (t/m ²) | Ø |
|-----------|--------------|------|-------|------|---------------|----------------|-----------------------|------|
| SK-84 | 3-3,45 | siSa | 3,17 | 1,85 | 9,37 | 29,84 | 0,977 | 19,2 |
| SK-85 | 3-3,45 | SM | 10,2 | 1,77 | 7,1 | 27,80 | 0,497 | 17 |
| SK-89 | 3-3,45 | siSa | 5,18 | 1,81 | 4,58 | 8,65 | 0,217 | 22 |
| SK-90 | 3-3,45 | SM | 5,48 | 1,80 | 29,40 | 6,60 | 0,106 | 22,1 |
| SK-232 | 3-3,45 | siSa | 5,81 | 1,84 | 8 | 26,72 | 0,742 | 20,1 |
| SK-238 | 3-3,45 | GM | 9,6 | 2,04 | 50 | 36,5 | 0,625 | 21 |
| SK-303 | 3-3,45 | SM | 6,9 | 1,87 | 20 | 41,90 | 0,817 | 20 |
| SK-304 | 4,5-4,95 | SM | 14,9 | 1,82 | 37,90 | 25,20 | 0,732 | 21 |
| SK-308 | 3-3,45 | SM | 2,35 | 1,79 | 7,05 | 4,78 | 0,014 | 21,9 |
| SK-343 | 3-3,45 | siSa | 8,57 | 1,81 | 16,58 | 8,53 | 0,174 | 22 |

2.2. Statik ve Dinamik Taşıma Gücü Hesabı

Taşıma gücü hesapları için tip proje bazlı çalışma gerçekleştirilmiştir. Bina temeli üzerinde inşaattan kaynaklanan sabit yüklerin yanı sıra insan, demirbaş, malzeme ve gidip gelen insanların meydana getirdiği hareketli yükler gelecektir. Bina betonarme ve karkas yapılı olacaktır.

İnceleme alanı; Bakanlar Kurulunun 22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı kararı ile yürürlüğe giren Türkiye Deprem düzeyleri DD-2 bölgesinde yer almaktadır. Yapılacak yapıda 18.03.2018 tarih ve 30364 sayılı Resmî Gazetede yayımlanan, 01.01.2019 tarihinde yürürlüğe girecek “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” esaslarına uyularak tüm deprem önlemlerinin uygulanması gerekmektedir.

İnceleme alanına yapılması planlanan yapı yüklerinin, üstteki bitkisel toprak tamamen kaldırılarak, alttaki alüvyon birim (yer yer az killi sitli kum-kumlu-çakıl) üzerine oturtulması planlanmaktadır. Bu birimin zemin sınıfı ise ZD olarak belirlenmiştir. Aşağıda tip proje için veriler Çizelge 2.5’te verilmektedir.

Çizelge 2.5. Yapılması planlanan yapıya ait bilgiler

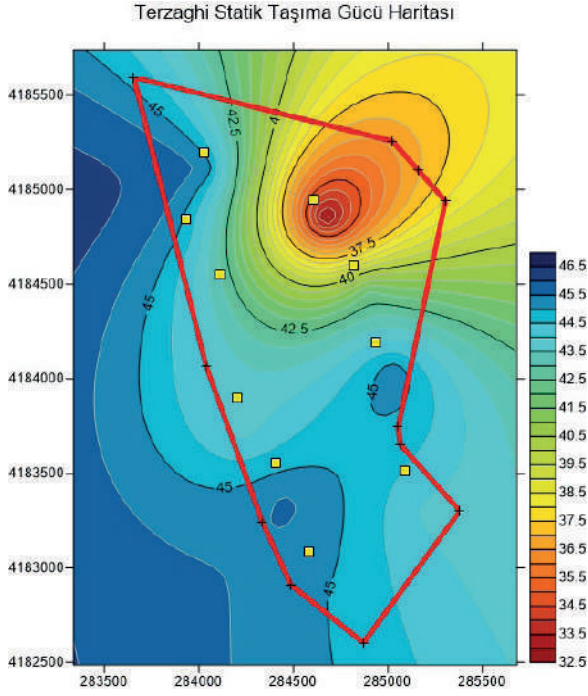
| Kat Adedi | B (m) | L (m) | Df (m) | Wt (t) | q_{\max}^0 (t/m ²) |
|-----------|-------|-------|--------|--------|----------------------------------|
| Z+6 | 20 | 30 | 3 | 9000 | 20 |

Bu çizelgede, B = binanın kısa kenarını, L = Binanın uzun kenarını, Df = temel kazısı derinliğini, Wt = Yapı yükünü ve q_{\max}^0 = temelde oluşan maksimum gerilmeyi temsil etmektedir.

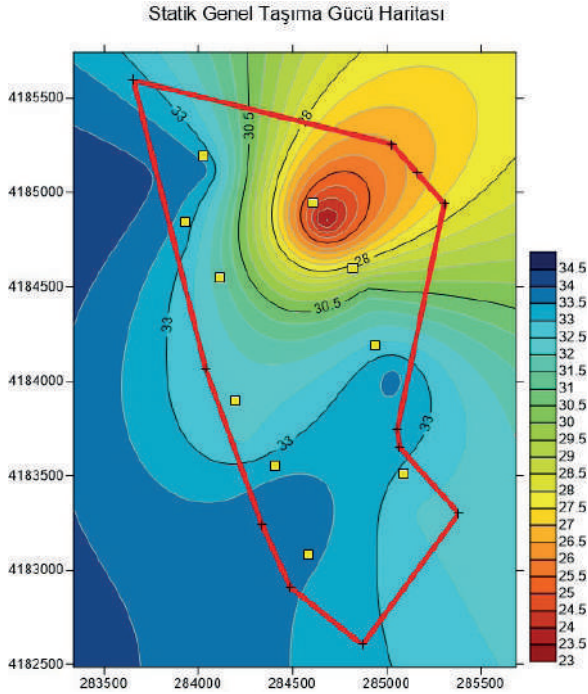
Çizelge 2.6. Dinamik ve statik durum için taşıma gücü hesapları

| Sondaj no | USCS | BHA | C (t/m ²) | Ø | Statik Terzaghi taşıma gücü (t/m ²) | Statik genel taşıma gücü (t/m ²) | Dinamik Terzaghi taşıma gücü (t/m ²) | Dinamik genel taşıma gücü (t/m ²) |
|-----------|------|------|-----------------------|------|---|--|--|---|
| SK-84 | siSa | 1,85 | 0,977 | 19,2 | 41,886 | 30,816 | 16,112 | 16,563 |
| SK-85 | SM | 1,77 | 0,497 | 17 | 32,762 | 23,271 | 13,164 | 13,200 |
| SK-89 | siSa | 1,81 | 0,217 | 22 | 45,334 | 33,621 | 15,919 | 17,444 |
| SK-90 | SM | 1,80 | 0,106 | 22,1 | 44,676 | 33,036 | 15,567 | 171,60 |
| SK-232 | siSa | 1,84 | 0,742 | 20,1 | 43,057 | 31,774 | 16,098 | 16,868 |
| SK-238 | GM | 2,04 | 0,625 | 21 | 45,311 | 33,650 | 16,544 | 17,618 |
| SK-303 | SM | 1,87 | 0,817 | 20 | 43,839 | 32,356 | 16,467 | 17,198 |
| SK-304 | SM | 1,82 | 0,732 | 21 | 45,602 | 34,014 | 16,729 | 17,750 |
| SK-308 | SM | 1,79 | 0,014 | 21,9 | 43,92 | 32,415 | 15,388 | 16,895 |
| SK-343 | siSa | 1,81 | 0,74 | 22 | 45,043 | 33,348 | 15,780 | 17,324 |

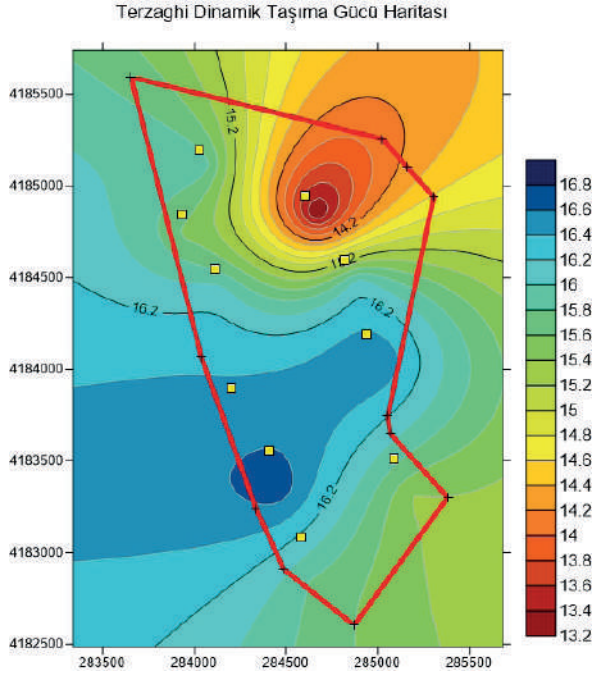
Taşıma gücü hesaplarına göre $q_{\max}^0 = 20$ t/m² ve Statik durumda hem Terzaghi Taşıma güçleri hem de Genel Taşıma gücü hesapları yeterlidir. Ancak Dinamik durumdaki taşıma güçlerine göre kıyas yapıldığında tüm serilerde zemin taşıma gücünün yetersiz kalacağı görülmektedir. TBDY 2018' e göre statik projeden alınan depremlili ve depremsiz durumlardaki q_{\max}^0 değerinin statik durumdaki taşıma gücü ile kıyasının yetersiz olduğu gözlemlenmiştir.



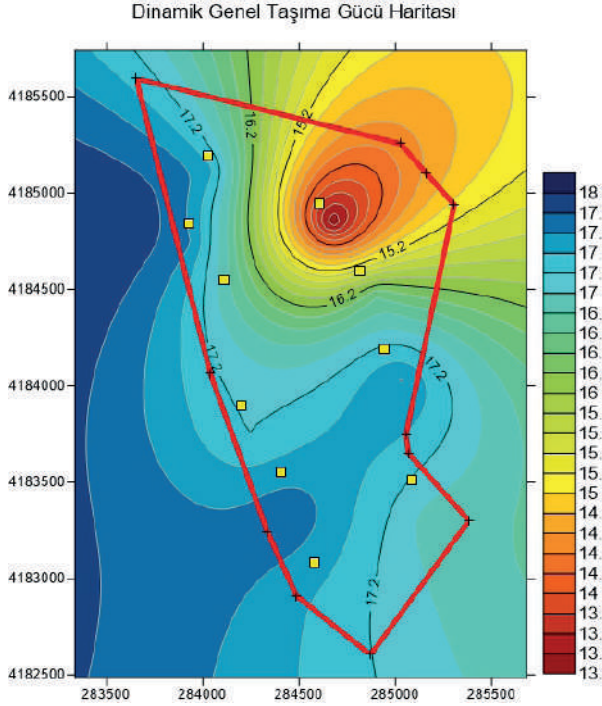
Şekil 2.6. İnceleme alanının statik durum için Terzaghi taşıma gücü haritası



Şekil 2.7. İnceleme alanının statik durum için Genel taşıma gücü haritası



Şekil 2.8. İnceleme alanının dinamik durum için Terzaghi taşıma gücü haritası



Şekil 2.9. İnceleme alanının dinamik durum için Genel taşıma gücü haritası

Yapılan haritalandırma sonuçlarına göre, Isparta da Karaağaç mahallesinden Deregümü Mahallesine doğru zeminin taşıma güçlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu düşüşün zeminin orta sıkı çakıl- siltli kum-kum birimlerden gevşek pomza-siltli kum birimlere dönüşmesinin sebep olduğu açıktır.

Çalışma alanının alüvyon birimlerden oluşması, orta sıkı ve gevşek zemin yapısı, sismik taşıma gücünü oldukça düşürmüştür. Özellikle binanın etki deriliği içerisindeki ilk 20 metrenin gevşek olması, sismik olarak yapıları tehlikeye sokmaktadır.

Çalışma alanında yerinde kentsel dönüşüm için zemin iyileştirme tekniklerinin uygulanması doğru çözüm olacaktır. Ayrıca, analiz sonuçları, yerinde kentsel dönüşüm alanlarının özellikler deprenselliğinin araştırılması ve tasarımların bun göre yapılması gerektiğini göstermiştir.

2.3. Statik ve Dinamik Oturma hesabı

Oturma hesapları statik ve dinamik olmak üzere iki şekilde hesaplanmıştır. Statik durum için $1,50 \text{ kg/cm}^2$ lik bir net yük, ilgili kuyuya ait $(N_{60})_{30}$ değerleri ve etkili derinliğe kadarki tabaka kalınlığı $(1.5xB)$ olan $H=30$ metre alınmıştır. Ancak Spt sayıları üzeri için oturma hesabı yapılmadığı için $SPT=50$ 'ye kadarki derinlik için oturma hesabı yapılmıştır. Dinamik Oturma miktarı hesaplar $\Delta H/H$ miktarı Krinitzsky vd. (1993) tarafından önerilen tablodan alınmıştır. Aşağıda SK-84 için hesap tablosu verilmiştir. Tüm kuyular için hesaplar Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.7. SK-84'e ait statik durum için oturma hesapları

| SPT Kuyusu | SK-84 | SK-85 | SK-89 | SK-90 | SK-232 | SK-238 | SK-303 | SK-304 | SK-308 | SK-343 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $(N_{60})_{30}$ | 33,12 | 26,37 | 25,88 | 34,50 | 34,97 | 26,26 | 32,47 | 17,68 | 24,51 | 28,37 |
| ΔH (cm) | 1,41 | 1,77 | 1,81 | 1,36 | 1,34 | 1,78 | 1,44 | 2,65 | 1,91 | 1,65 |

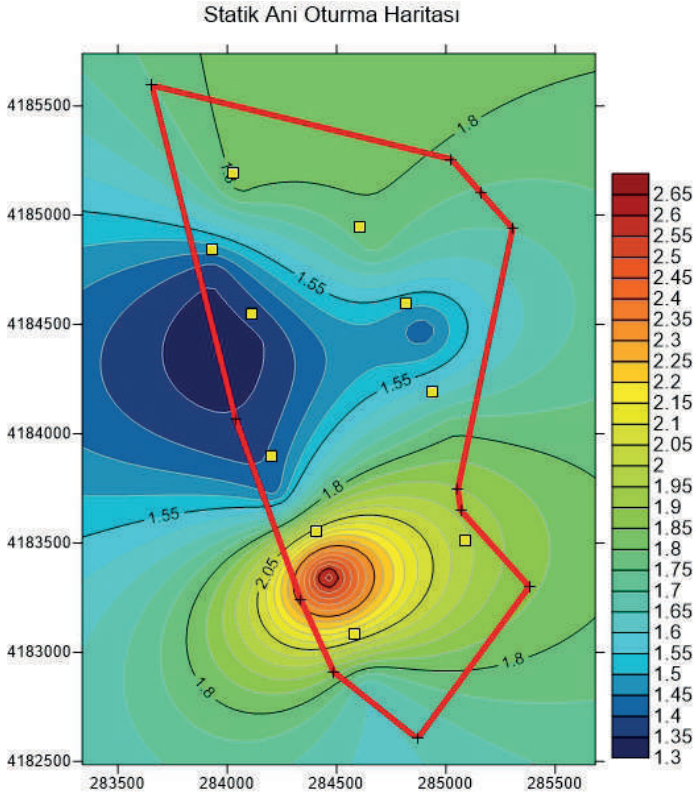
Çizelge 2.8. Dinamik durumlar için oturma hesapları

| SPT Kuyusu | SK-84 | SK-85 | SK-89 | SK-90 | SK-232 | SK-238 | SK-303 | SK-304 | SK-308 | SK-343 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $(N_{60})_{30}$ | 33,12 | 26,37 | 25,88 | 34,50 | 34,97 | 26,26 | 32,47 | 17,68 | 24,51 | 28,37 |
| $\Delta H/H$ | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,075 | 0,04 | 0,15 | 0,07 | 0,06 |
| H (m) | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| ΔH (cm) | 1,2 | 2,1 | 2,1 | 1,2 | 1,2 | 2,25 | 1,2 | 4,5 | 2,1 | 1,8 |

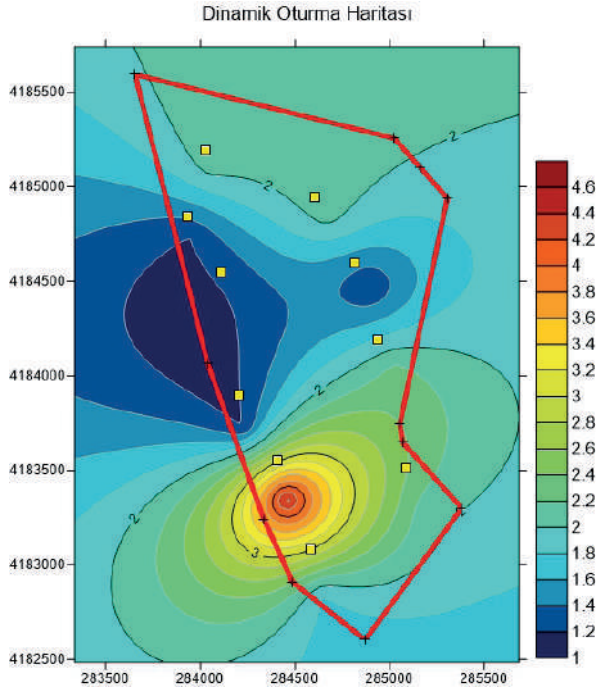
Çizelge 2.9. Statik, dinamik ve toplam oturmalar

| SPT Kuyusu | SK-84 | SK-85 | SK-89 | SK-90 | SK-232 | SK-238 | SK-303 | SK-304 | SK-308 | SK-343 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $(N_{60})_{30}$ | 33,12 | 26,37 | 25,88 | 34,50 | 34,97 | 26,26 | 32,47 | 17,68 | 24,51 | 28,37 |
| Statik Oturma (cm) | 1,41 | 1,77 | 1,81 | 1,36 | 1,34 | 1,78 | 1,44 | 2,65 | 1,91 | 1,65 |
| Dinamik Oturma (cm) | 1,2 | 2,1 | 2,1 | 1,2 | 1,2 | 2,25 | 1,2 | 4,5 | 2,1 | 1,8 |
| Toplam Oturma (cm) | 2,61 | 3,87 | 3,91 | 2,56 | 2,54 | 4,03 | 2,64 | 7,15 | 4,01 | 3,45 |

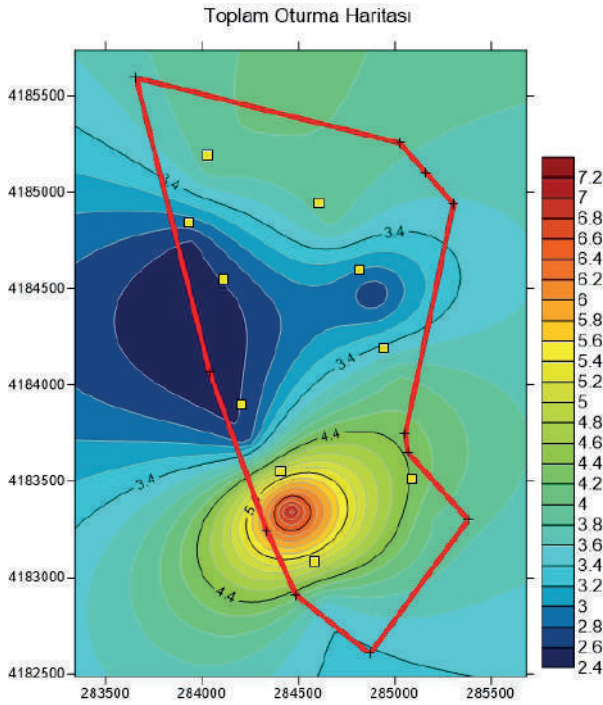
Oturma hesap sonuçlarına göre Spt $(N_{60})_{30}$ verilerinin 20'li seviyelere inmesi statik ve dinamik oturmanın için riskli seviyelerin başladığını göstermektedir.



Şekil 2.10. İnceleme alanının statik durum için oturma haritası



Şekil 2.11. İnceleme alanının dinamik durum için oturma haritası



Şekil 2.12. İnceleme alanının toplam oturma haritası

Temellerin sismik oturmalarının nedeni taşıma kapasitesinin azalması gibi görünmektedir. Geçmişte bu durum, 12 Haziran 1978'de Japonya'nın Sendai kentinin kuzeydoğusundaki 7.8 büyüklüğündeki Miyagihen-Oki depreminde meydana gelmiştir; burada birçok petrol depolama tankının temelleri, taşıma kapasitesi yetersizliğinden ve aşırı oturmalardan zarar görmüştür (Okamoto 1978). Bir başka durumda ABD'deki bir Petrol depolama tanklarının zemininin, tankların inşasından önce titreşimle sıkıştırılmış 65 m kalınlığında ince kumdan oluşmaktadır. Ancak Amerika Birleşik Devletleri'nde, San Fernando depremi sırasında Jensen Filtrasyon Tesisindeki oturma, sıkıştırılmış bir malzemenin yaşadığı büyük sismik oturmanın (yaklaşık 100 mm) göstermiştir (Whitman ve Bielak 1980). Yapılan analiz sonuçlarında, çalışma alanı içinde sismik durumda oturmaların 2,4 ile 7,5 cm arasında olacağı gözlemlenmiştir. Özellikle granüler zeminler için maksimum oturma sınırının (6,5 cm) aşılmaktadır. Isparta Ovasının, zemininin genel olarak 100 metreden fazla alüvyon zeminden oluşması hem küçük hem de özellikle büyük yapılar için sismik oturma riski oluşturacağı öngörülmektedir. Bu durumun oluşmasındaki en büyük pay oldukça derin alüvyon tabakasının varlığı sebep olmaktadır.

3. Sonuçlar

Granüler zeminlerdeki yüzeysel temellerin sismik oturmalarına ilişkin, zeminin yoğunluk veya sıvılaşmadaki değişikliklere bağlı olmayan saha ve laboratuvar gözlemleri, taşıma kapasitesinin sismik azalması olarak açıklanmaktadır. Temel kapasitesindeki azalma hem zemin mukavemetinin sismik bozulmasından hem de yapı boyunca temele kesme yoluyla iletilen yanal atalet kuvvetlerinden ve herhangi bir sürşarjdan kaynaklanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda Yüzeysel temeller için Terzaghi ve Genel Taşıma gücü için statik ve dinamik durum için hesabı yapılmıştır. Araştırma sonuçlarında Statik durumda taşıma kapasitesinin her iki yöntemde yeterli olduğu ancak dinamik durumda her iki yöntemde de yetersiz taşıma gücü söz konusu olduğu gözlemlenmiştir.

Sismik etki durumunda taşıma gücünde meydana gelen kayıplar, orta sıkı zeminlerde yerel kırılmalara sebep olacaktır. Bu durumda oluşacak oturmalar yapıya zarar verme ve kullanılamaz hale getirme potansiyeli göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda yüzeysel temeller için statik ve dinamik durum için oturma hesabı yapılmıştır. Araştırma sonucunda, statik durumda oturmaların üst limiti aşmadığı, ancak dinamik durumda SPT (N60)30 değerinin 20'in altına düştüğünde dinamik oturmanın oturma kriterini karşılamayacağı öngörülmüştür.

Elde edilen sonuçlar haritalandırılarak inceleme alanında yerel bir çalışma yürütülmüştür. Bunun sonucunda çalışma alanında yapılacak yapılar için deprem durumundaki taşıma güçlerine göre tasarım yapılması gerektiği saptanmıştır.

TBDY 2018 Yüzeysel temellerin taşıma gücü hesabı ve değerlendirmesi, Statik proje kapsamında temel altında oluşan statik ve deprem gerilmelerine karşı yapılmaktadır. Ancak bu çalışma bunun yetersiz olduğunu, doğru değerlendirmenin ancak deprem durumundaki taşıma gücünün, deprem durumundaki temel altı gerilmeleri ile kıyasının doğru olacağını göstermiştir.

Bu çalışma kentsel dönüşüm alanlarının, yeniden imarı konusunda depreme göre tasarımın gerekliliğini göstermiştir. Ayrıca mevcut yapıların da taşıma gücü ve oturma kriterleri bakımından risk altında olabileceklerini göstermiştir.

Kentsel dönüşüm planlamasının, tüm mühendislik hesaplamalarına ek olarak jeoteknik açıdan incelenmesinin hayati bir etken olduğu bu çalışma ile bir kez daha tespit edilmiştir.

Kaynakça

- Choudhury, D., & Subba Rao, K. S. (2006). Seismic bearing capacity of shallow strip footings embedded in slope. *International Journal of Geomechanics*, 6(3), 176-184.
- Ghosh, P. (2008). Upper bound solutions of bearing capacity of strip footing by pseudo-dynamic approach. *Acta Geotechnica*, 3, 115-123.
- Johari, A., Hosseini, S. M., & Keshavarz, A. (2017). Reliability analysis of seismic bearing capacity of strip footing by stochastic slip lines method. *Computers and Geotechnics*, 91, 203-217.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., & Chaloulos, Y. K. (2013). Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 64-76.
- Keshavarz, A., Beygi, M., & Vali, R. (2019). Undrained seismic bearing capacity of strip footing placed on homogeneous and heterogeneous soil slopes by finite element limit analysis. *Computers and Geotechnics*, 113, 103094.
- Knappett, J. A., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. G. (2006). Mechanisms of failure for shallow foundations under earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4), 91-102.
- Kumar, J., & Mohan Rao, V. B. K. (2002). Seismic bearing capacity factors for spread foundations. *Geotechnique*, 52(2), 79-88.
- Richards, R., Elms, D.G., Budhu, M. (1993). "Seismic bearing capacity and settlements of foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 5, pp. 662-674.
- Yang, X. L. (2009). Seismic bearing capacity of a strip footing on rock slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(8), 943-954.
- Okamoto, S. (1978). *Introduction to earthquake engineering*. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Whitman, R. V., and Bielak, J. (1980). "Chapter 7: Foundation." *Design of earthquake resistant structures*, Pentech Press, London, England.
- Senel, M. (1984). Discussion on the Antalya nappes. In *Geology of the Taurus belt*. International symposium (pp. 41-51).

Sahaya Özel Analizlerde Farklı Periyot Değerlerindeki Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması

Ersin Güler¹

Kamil Bekir Afacan²

Özet

Deprem bölgelerinde, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışının belirlenmesi ve yapı tasarımında dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Bu analizler, zemin davranışını doğrusal ve doğrusal olmayan davranış açısından detaylı bir şekilde incelemektedir. Bu analizlerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sahaya özel zemin davranış özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde farklı deney sistemleri ile laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır. Bu deney sistemlerinde hem kayma modülü hem de sönümleme oranı değerleri elde edilerek zemin davranışı belirlenmektedir. Bu çalışmada sahaya özel zemin büyütme analizleri (IB) olarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, yapı tasarımlarında önemli olan farklı periyotlardaki zemin büyütme etkileri karşılaştırılmıştır.

1. Giriş

Deprem bölgelerinde gerçekleştirilen saha özelindeki zemin davranış analizleri, sismik kuvvetin ana kayadan yüzeye doğru olan hareketini inceleyerek ve zemin yüzeyindeki spektral özellikleri belirlemek amacıyla yürütülmektedir.

Türkiye konumu itibariyle Arabistan ve Afrika Levhaları'nın kuzeye doğru hareketi ve Anadolu Levhası'nın batıya doğru hareketi görülmektedir. Bu nedenle önemli fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde geçmişten günümüze depremler meydana gelmiştir. Ülkede genel olarak meydana gelen önemli depremler şunlardır; Erzincan (1992),

1 Öğr.Gör.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, eguler@ogu.edu.tr, 0000-0002-5679-8838

2 Doç.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, kafacan@ogu.edu.tr, 0000-0002-3667-4432

Kocaeli (1999), Düzce (1999), Van (2011), Elazığ (2020), Seferihisar (2020), Pazarcık (2023) ve Elbistan (2023) depremleri meydana gelmiştir. Deprem bölgelerindeki yapıların tasarımlarında zeminlerin deprem anındaki göstereceği davranışın belirlenmesi önemlidir. Deprem bölgelerinde ayrıca suya doygun alüvyon zeminlerin olması sonucunda yapıların büyük hasarlar görmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle yerel zemin koşullarının araştırılmasına sebep olmuştur.

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda deprem bölgelerinde yüzey ivmeleri incelenmiş ve yakın bölgeler arasından büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. Bunun zemin tabakalarındaki farklılıklardan kaynaklandığı belirlenmiştir [1]. Sahaya özel olarak yapılacak olan analizler sonucunda zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi ve analizlerin yöntemi, kullanılacak olan deprem ivme kayıtları, ölçeklendirme yöntemi analiz sonuçlarını etkileyen önemli faktörlerdendir. Yapılan analizler sonucunda yüzeyde oluşan ivme spektrumları yapı tasarımlarda önemli bir parametredir [2].

Zeminlerin vereceği tepkilerin belirlenmesi deprem yönetmeliklerinde belirlenmiştir. Yapıların tasarımlarında yönetmeliğin önerdiği tasarım spektrumları kullanılmaktadır. Yapıların doğal titreşim periyodu belirlenerek yapıya etki edecek yatay ve düşey yükler belirlenmektedir. Yapıların tasarımlarında T:0.01s, T:0.1s, T:1.0s periyotları önemlidir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) yürürlüğe girmiş olduğu 2019 yılından itibaren her noktaya tasarım spektrumu önermektedir. Ancak araştırmacılar tarafından bu önerilen spektrumların geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir [3-8].

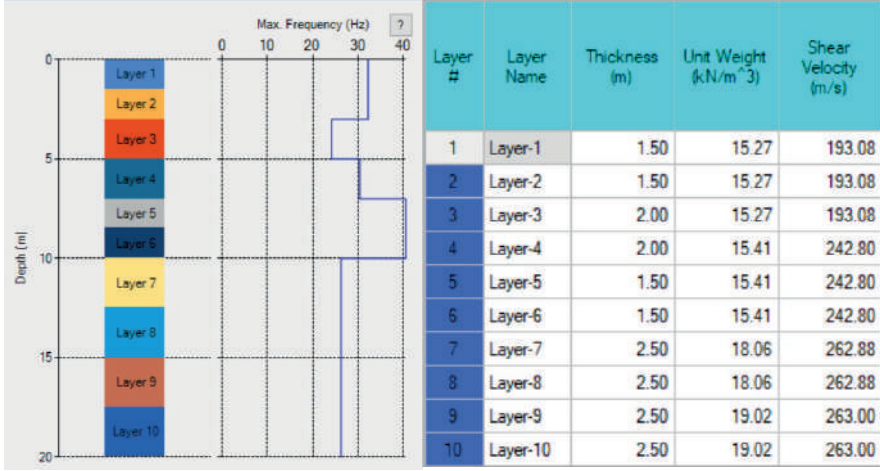
Bu çalışmada sahaya özel 1B zemin büyütme analizleri yapılmış ve ardından eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analiz sonuçları ile yapıların tasarımlarında kullanılan periyotlar üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. SAHAYA ÖZEL ZEMİN BÜYÜTME ANALİZİ

2.1. 1B Zemin Büyütme Analizi

Çalışma kapsamında Sakarya ilinden elde edilen veriler kullanılarak DeepSoil [9] programı yardımıyla (1B) zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu program ile hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bölgenin zemin tabakalarının tanımlanması ve bölgeye özel seçilen deprem ivme kayıtları ile tabakalanma boyunca ivmenin yüzeye kadar değişimi ve davranış spektrumları elde edilerek analizler

tamamlanmaktadır. PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi) [10] seçilen ve bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan deprem ivme kayıtları ile analizler yapılmaktadır. (Şekil 1).

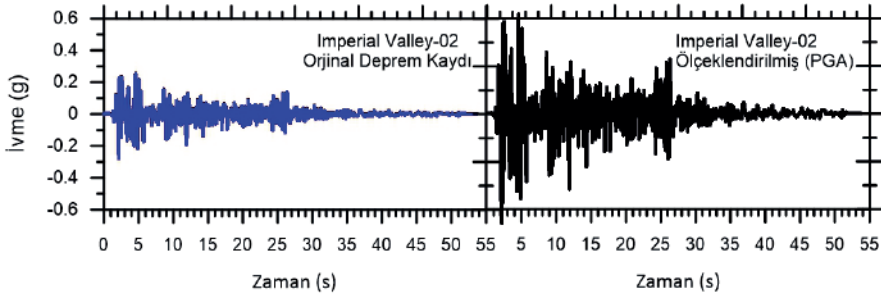


Şekil 1. Zemin bilgilerinin programa girilmesi

Sahaya özel analizlerde kullanılacak olan deprem ivme kayıtlarını bölgenin depremsellik karakteristiğine göre seçilmelidir. Seçilen deprem ivme kayıtlarının daha sonra analizlerde kullanılması için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. TBDY 2018'e göre deprem yer hareketi ile uyumlu depremler fay uzaklıkları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak seçilmelidir. Bu kapsamda 11 adet deprem ivme kaydı seçilmiştir.

Seçilen deprem ivme kayıtlarının öncelikle ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Farklı yöntemler kullanılarak ölçeklendirme yapılmaktadır. Burada zaman-tanımlanma alanında yapılan basit ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır. Bu ölçeklendirme yönteminde frekans içeriği değişmeden sadece kaydın genliği değiştirilmektedir [11-12]. Araştırmacılar tarafından ölçeklendirilen depremler ile zemin büyütmesi üzerine farklı çalışmalar yapılmaktadır [13-14]. Basit ölçeklendirme yönteminin kullanılması için AFAD tarafından bölgeye önerilen PGA değeri olan 0.689g değeri kullanılmıştır.

Yapılan ölçeklendirme sonucunda deprem ivme kayıtlarında değişimler oluşmaktadır. Bu değişim Şekil 2'de gösterilmektedir. Deprem ivme kaydı basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiştir.

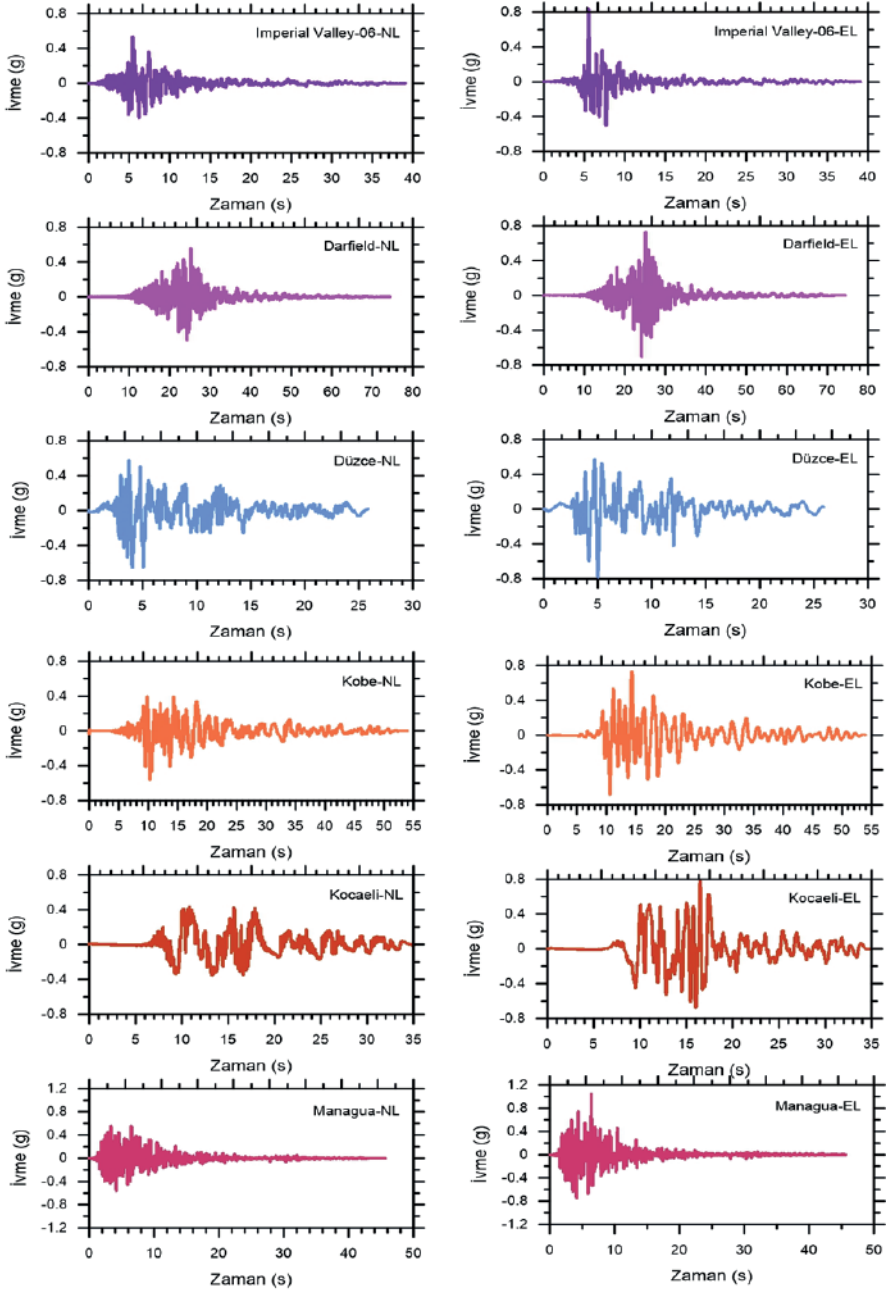


Şekil 2. Ölçeklendirme sonucunda deprem ivme kaydında meydana gelen değişim

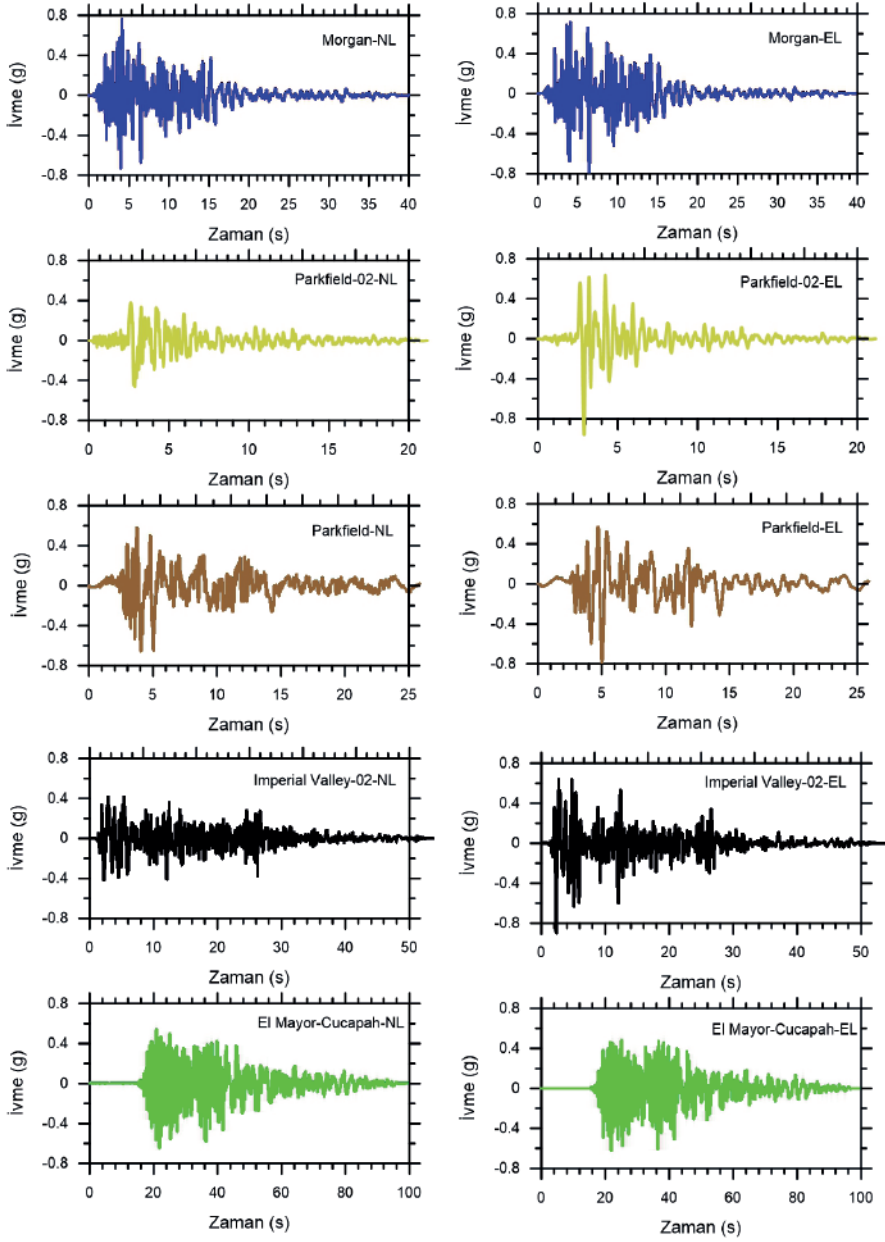
3.BULGULAR

Çalışma kapsamında sahaya özel elde edilen zemin parametrelerinin ardından bölgeye özel seçilen 11 adet deprem ivme kaydı ile zemin büyütme analizleri elde edilmiştir. Bu analizlerde hem eşdeğer doğrusal (EL) hem de doğrusal olmayan (NL) analiz sonuçları elde edilmiştir.

Anakayadan yüzeye doğru hareket eden deprem ivme kaydına ait yüzeydeki ivme değerleri EL ve NL analiz sonuçlarından elde edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

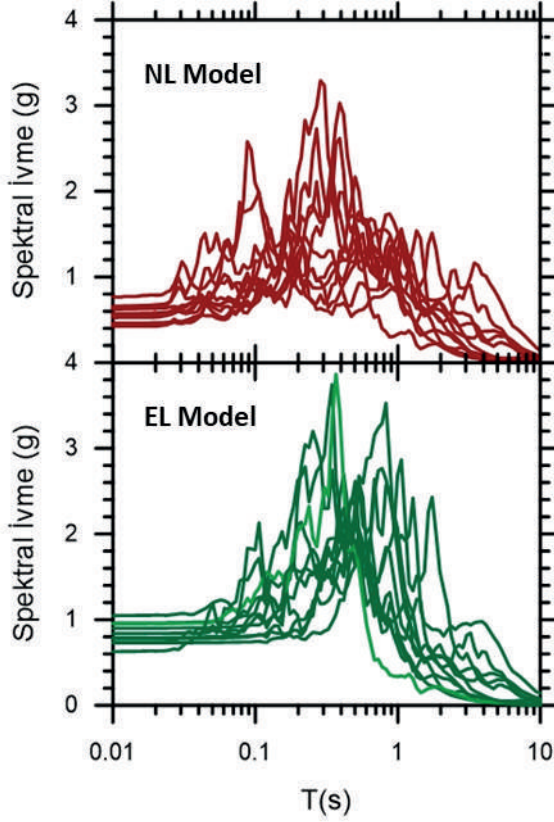


Şekil 3. Yüzeyde oluşan ivme değerleri (EL-NL)



Şekil 3. Yüzeyle oluşan ivme değerleri (EL-NL) (devam)

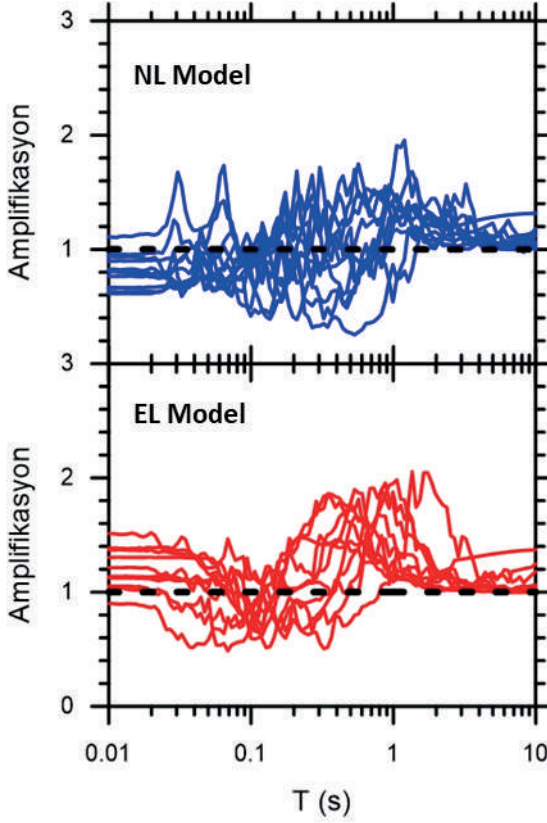
Yüzeyde oluşan spektral ivme değerleri her iki analiz yönteminde de (EL_NL) elde edilmiş ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yüzeyde oluşan spektral ivme değerleri

Analizler sonucunda NL analizler yapılarak yüzeyde oluşan pik ivmeler 0.25 sn'lerde 3.2 g olarak elde edilmiş ve EL olarak yapılan analizlerde 0.3 sn'de 4.0 g'ye varan değerler elde edilmiştir.

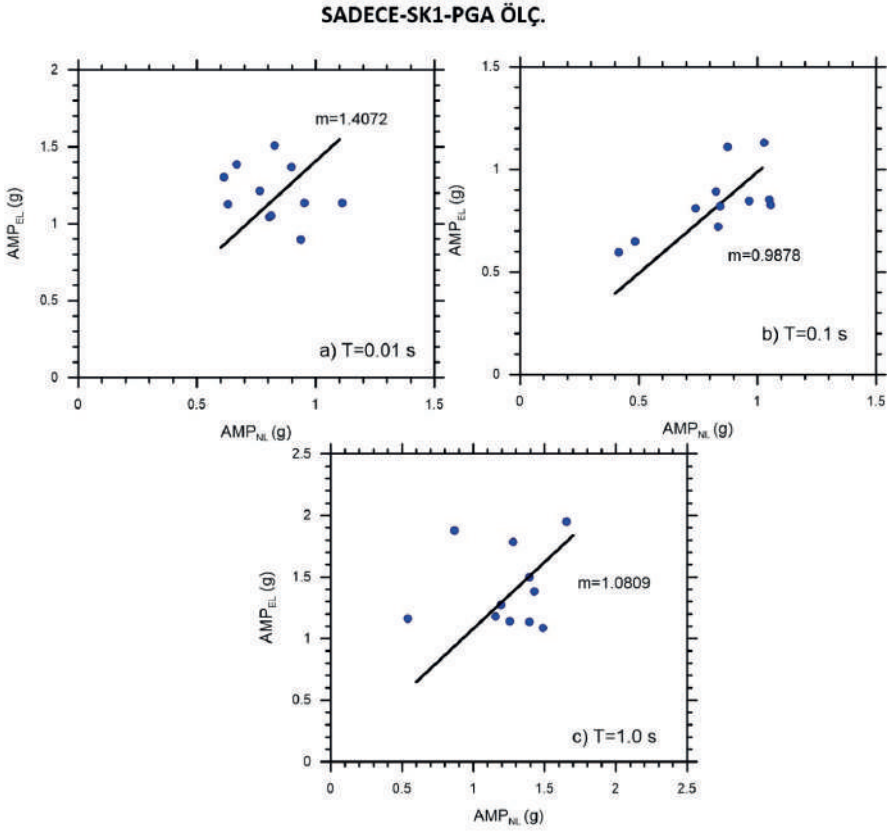
Zemin büyütme faktörü değerleri elde edilmiş ve Şekil 5'de her iki analiz yönteminde sonuçlar gösterilmiştir. Faktörün 1.0'dan yüksek olduğu periyotlarda zemin büyütmesi gerçekleştiğini göstermektedir. NL analiz yönteminde 0.1-1.0 sn aralığında 1.8'e kadar büyütme oranı elde edilmiştir. Ayrıca T:1.0 sn'de 2.0 olduğu belirlenmiştir. EL analiz yönteminde 0.3-2.0 sn'de toplanma olduğu ve 2.0 oranına kadar yükseldiği görülmektedir.



Şekil 5. Elde edilen zemin büyütme faktörü değerleri

Yapı tasarımında kullanılan ve önemli periyot değerleri olan $T:0.01$, $T:0.1$ ve $T:1.0$ sn periyot değerlerinde (NL) ve (EL) analiz yöntemlerinde sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

İncelenen üç farklı periyot değerlerinde elde edilen zemin büyütme faktörleri EL-NL olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 6 incelendiğinde $T:0.01$ s'de her iki analiz yöntemi sonuçları karşılaştırıldığında arasındaki bağıntıda $m:1.4072$ benzerlik, $T:0.1$ s'de yapılan incelemede $m:0.9878$ benzerlik ve $T:1.0$ s'de ise $m:1.0809$ oranında benzerlik olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Üç farklı periyot değerlerinde zemin büyütme analizlerinin karşılaştırılması

4.SONUÇLAR

Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, Sakarya ilinde yapılan çalışmada sahaya özel zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Bölgenin depremsellik karakteristiğine göre seçilen 11 adet deprem ivme kaydı basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiştir. Yapılan analizler şu şekilde özetlenebilir;

- Deepsoil programı yardımıyla yapılan 11 adet deprem ivme kaydı ile EL ve NL analizler yapılmıştır. Toplam 22 adet analiz yapılmıştır.
- Yapılan analizler sonucunda EL ve NL analizlerde yüzeyde oluşan ivme değerleri elde edilmiştir.
- Her iki analiz yöntemi karşılaştırıldığında EL analizlerin NL analizlere göre daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

- Zemin büyütme faktörleri incelendiğinde ise EL analizlerin NL analizlerden daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir.
- Çalışmada yapı tasarımında önemli olan üç periyot değeri ile analizler karşılaştırılmıştır.
- Analizler, periyot değerleri T:0.01 s ve 1.0 s'de 1.4072 ve 0.9878 oranında, T:0.1 s'de ise 1.0809 oranında benzerlik elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 201915A211 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Idriss, I. M., Seed, R. B. (1968) An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco Earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, 58(6), 2013-2032.
- Ansal, A., Tönük, G., Kurtuluş, A., (2011) Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi. *1. Turkey Earthquake Engineering and Seismology Conference*:1-8.
- Başaran, V. (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY2019) Göre Afyonkarahisar İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı 18, s. 1028-1035.
- Keskin, E., Bozdoğan, K.B., (2018) 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, Cilt 4, Sayı 1, s. 74-90.
- Koçer, M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-Hagri, M.G., Arslan, M.H. (2018) Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY2018 ve TDY2007'ye göre Karşılaştırılması, *Selçuk Teknik Dergisi*, Cilt 17, Sayı 2, s. 43-58.
- Afacan, K.B., Güler, E., (2019). Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının Zemin Büyütme Analizi ile Belirlenmesi”, *5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Turkey, 8-11 October 2019.
- Güler, E., & Afacan, K. B. (2021). Killi Zeminlerin Sahaya Özel Doğrusal Olmayan Davranış Analizinin TBDY (2018) ile Karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1047-1062. <https://doi.org/10.17482/uumfd.962459>
- Güler, E. (2021) Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü*. Doktora Tezi.
- Hashash YMA (2011) DEEPSOIL: User Manual and Tutorial. Version 5. Dept. of Civil and Environmental Engineering. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign
- PEER. Pacific Earthquake Engineering Research.2023.
- Özdemir Z, Fahjan YM (2007) Comparison of Time and Frequency Domain Scaling of Real Accelerograms To Match Earthquake Design Spectra. *Sixth Natl Conf Earthq Eng*. 435-446.
- Fahjan YM (2008) Selection and scaling of real earthquake accelerograms to fit the Turkish design spectra. *Tek Dergi/Technical J Turkish Chamb Civ Eng*. Vol:19. 1231-1250.

- Alielahi H, Adampira M (2016) Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications. *Int J Civ Eng*. Vol:14. 233–251. DOI:10.1007/s40999-016-0020-7.
- Rodrigues H, Furtado A, Vila-Pouca N, Varum H, Barbosa AR (2018) Seismic Assessment of a School Building in Nepal and Analysis of Retrofitting Solutions. *Int J Civ Eng*. Vol:16. 1573–1589. DOI:10.1007/s40999-018-0297-9.

Dinamik Üç Eksenli Test Sistemi ile Zeminlerin Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi

Ersin Güler¹

Özet

Deprem bölgelerinde yer alan yapıların güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için, bölgesel zemin koşullarının dinamik parametrelerinin titizlikle belirlenmesi ve bu parametrelerin tasarım hesaplamalarında kullanılması büyük bir öneme sahiptir. Bu, inşaat mühendisliği açısından kritik bir adımdır, çünkü zeminlerin dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi, deprem etkileri altında yapıların davranışını daha kesin bir şekilde anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu süreç, yapısal güvenlik standartlarını karşılayan ve deprem etkilerine karşı dirençli olan yapıların tasarımında temel bir unsur olarak öne çıkar. Bu nedenle zeminlerin yüksek deformasyon seviyelerinde dinamik parametrelerinin belirlenmesinde dinamik üç eksenli deney sistemi (TRX) kullanılmaktadır. Elde edilen veriler ile deprem anında zemin davranışı belirlenir ve tasarımlarda kullanılır. Burada dinamik kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönüm oranı eğrileri elde edilmektedir. Bu çalışmada örselenmiş numuneler üzerinde TRX deney sistemi kullanılarak farklı çevre basınçları altında deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde yükleme frekansı 1Hz olarak belirlenmiş ve her yüklemde 10 döngü yapılarak numunenin göçmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda çevre basıncının dinamik parametrelere etkisi incelenmiştir. Çevre basıncı arttıkça numune daha rijit bir durumda olmakta ve dayanım değerlerini etkilediği belirlenmiştir.

1. Giriş

Zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek için farklı test sistemleri kullanılmaktadır. Her bir deney sistemi farklı deformasyon seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranı değerlerini elde etmektedir. Bu kapsamda farklı deformasyon seviyelerinde Bender Eleman Deneyi, Rezonans Kolon Deneyi (RC), Dinamik Üç Eksenli Deney (TRX), Tekrarlı Basit Kesme ve Burulma Deney Sistemleri kullanılmaktadır [1-3].

1 Öğr.Gör.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, eguler@ogu.edu.tr, 0000-0002-5679-8838

Dinamik üç eksenli test sistemi, araştırmacıların dinamik yüklere maruz kalan zeminin karmaşık davranışını derinlemesine incelemelerini sağlayan vazgeçilmez bir araştır. Bu kapsamlı araştırma, döngüsel üç eksenli testler ve düşük genlikli dinamik titreşimler gibi çok yönlü teknikler kullanılarak zeminin dinamik özelliklerinin titiz bir şekilde ölçülmesiyle mümkün olmaktadır. Döngüsel üç eksenli deneyler alanında, sistem, özellikle suya doygun zeminler bağlamında ve yüksek gerilme seviyeleri koşullarında dinamik mukavemet, kayma modülü ve sönümleme katsayısı gibi önemli parametrelerin ortaya çıkarılmasında sağlam bir kolaylaştırıcı olduğunu kanıtlamaktadır [4]. Bu testlerden elde edilen verilerin hassasiyeti ve güvenilirliği, mühendislik sismolojisi alanında çok önemli hale gelmekte ve sismik aktiviteye duyarlı alanlarda yer hareketinin değerlendirilmesi için değerli bilgiler sunmaktadır [5-7].

Özetle, dinamik üç eksenli deney sistemi, geoteknik araştırma ve mühendislik uygulamalarının geniş repertuarında paha biçilmez bir araç olarak ortaya çıkmaktadır.

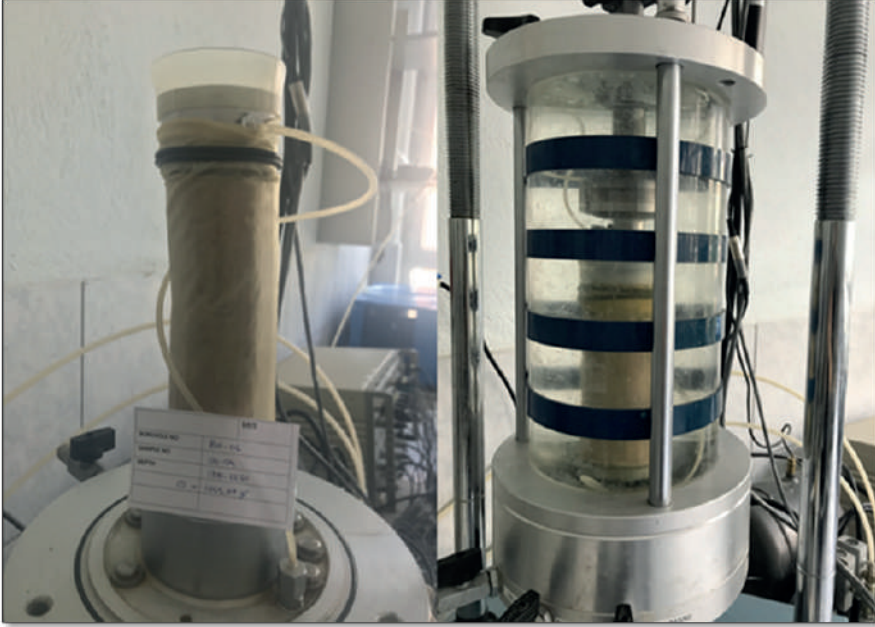
Zemin mekaniğinde, kayma modülü (G_{max}) ve sönüm oranı (D) zeminlerin dinamik özelliklerini karakterize etmek için kullanılır ve mühendislik uygulamalarında önemli parametrelerdir. Kayma modülü, bir zeminin elastik davranışını yansıtır ve kayma deformasyonlarına karşı direncini ifade eder. Yüksek G_{max} değerleri, zeminin sismik yükler altında daha dirençli ve sağlam olduğunu gösterir [8-10]. Özellikle zeminin deprem etkilerine karşı tepkisinin değerlendirilmesi ve sismik analizlerde kullanılması açısından belirleyici bir faktördür. Sönüm oranı, zeminin enerji yutma kapasitesini ifade eder. (D) değeri, yüksek frekanslı titreşimli yükler altında zeminin enerji kaybını gösterir. Bu parametreler, yapı mühendisliği alanında deprem etkilerinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [11-13].

Bu parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi, mühendislerin yerel zemin koşullarını dikkate alarak binaları, köprüleri ve diğer altyapı tesislerini güvenli bir şekilde inşa etmelerini sağlar. Bu yapıların depreme dayanıklılığını en üst düzeye çıkarmak ve depreme eğilimli bölgelerde yaşayan toplulukların güvenliğini artırmak için önemli bir adımdır. Bu sayede yapıların depremlerle başa çıkma kapasitesi artırılmakta ve deprem sonrası toparlanma süreçleri daha etkin bir şekilde yönetilebilmektedir.

Bu çalışmada her iki dinamik parametre ölçülmüş ve farklı parametrelerle karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE METHOD

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesine yönelik dinamik üç eksenli test sistemleri, zemin mühendisliği alanında geniş kabul görmüş ve etkili ve yaygın bir araştırma aracı olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, zeminlerin dinamik tepkisini ayrıntılı olarak analiz etmek, ölçmek ve anlamak için tasarlanmıştır. Dinamik üç eksenli test sistemleri, zeminlerin çeşitli yükleme koşulları altında nasıl davrandığını belirlemek, zeminlerin sismik performansını değerlendirmek ve yapıların zeminlerle etkileşimini anlamamızı sağlamaktadır.



Şekil 1. Deney sisteminde numunenin yerleştirilmesi

Deney sisteminde kullanılan yardımcı elemanlar CO₂ tüpü, membran, gözenekli taş, filtre kağıdı, o-ring, numune yerleştirme aparatı ve silikon gresten oluşmaktadır. Deney tüm bu aparatlar ve yardımcı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Deneyin aşamaları incelendiğinde;

- Numunenin hazırlanması,
- Deney düzeneğinin hazırlanması,
- Numunenin hücreye yerleştirilmesi,

- Numunenin doygunluğu,
- Örneklemin konsolidasyonu ve
- Numunenin yüklenmesi aşamalarından oluşur.

Deneye başlamadan önce su tankına yeterli miktarda su pompalanır. Daha sonra vakum yardımı ile suyun içindeki hava alınır. Bu aşamadan sonra hazırlanan numune deney sistemine yerleştirilmek üzere bekletilir. Hücre içerisine ilk olarak filtre kağıdı ve gözenekli taş yerleştirilir. Hücrenin tabanına silikon gres sürülerek membran geçirilir [14].



Şekil 2. Dinamik üç eksenli deney sistemi genel görünümü

Numunenin doygunluğu ve konsolidasyonu sağlandıktan sonra son işlem olarak numunenin yüklenmesi gerçekleştirilir. Burada numuneye gerekli ortam basıncı verildikten ve diğer tüm bağlantılar kontrol edildikten sonra numune yüklenir. Yapılan çalışmada 1 Hz frekansında yükleme yapılmıştır. Yapılan sondaj çalışmalarının ardından elde edilen numuneler ile yapılan çalışmada numunenin göçmesine kadar yükleme devam etmiş ve dinamik parametre değerleri elde edilmiştir. Deney sisteminin genel görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir. Yapılan deney programı Tablo 1'de gösterilmiştir.

Bu deney sisteminde kullanılan numunelerde 70*140mm boyutlarında tek tabaka halinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerde gerekli homojenlik sağlanmıştır.



Şekil 3. Deney sistemi için hazırlanan numune

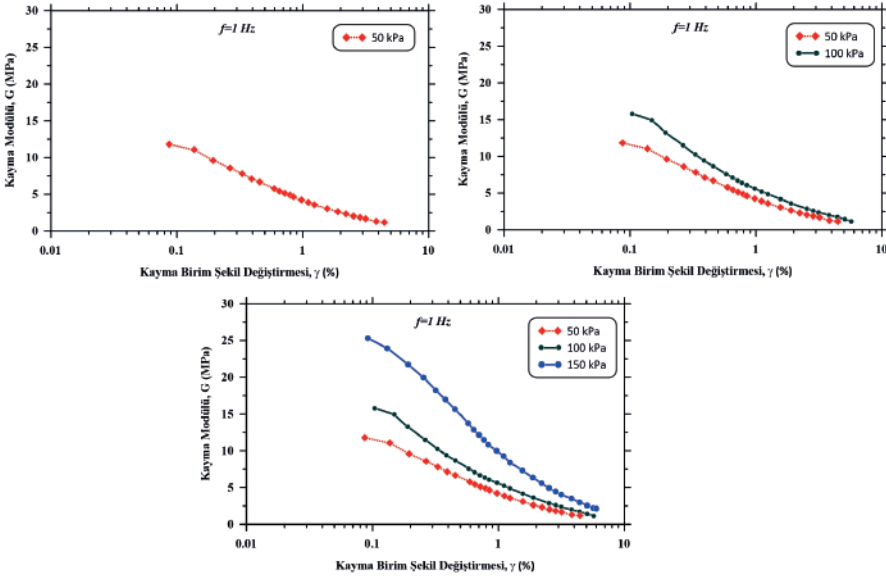
Çalışmada hazırlanan numunelerin ardından deney programı hazırlanmış ve 1 Hz frekansında sinüs dalgası uygulanarak yükleme yapılmıştır. Deneylerde her yüklemede 10 döngü yükleme yapılmıştır. Tablo 1'de deney programı ve zemin türü bilgileri yer almaktadır.

Tablo 1. Deney programı ve zemin bilgileri

| Deney No | Zemin Sınıfı | Çevre basıncı (kPa) | w (%) | Deney Tipi | Numune Boyutları (mm*mm) |
|----------|--------------|---------------------|-------|------------|--------------------------|
| 1 | CH | 50 | 42.3 | TRX-1Hz | 70*140 |
| 2 | CH | 100 | 42.3 | TRX-1Hz | 70*140 |
| 3 | CH | 150 | 42.3 | TRX-1Hz | 70*140 |

3.BULGULAR

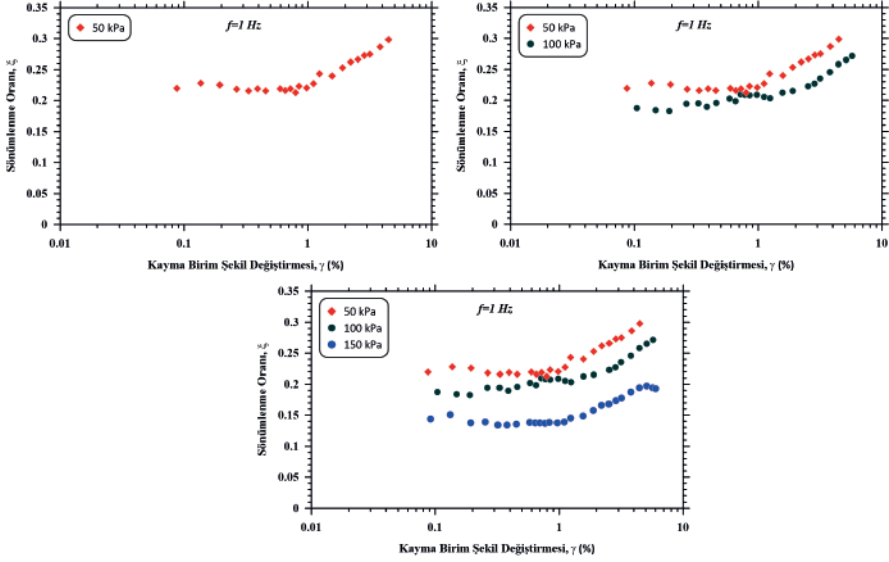
Numunelerin hazırlanmasının ardından dinamik üç eksenli test sistemi ile deneyler yapılmıştır. 1 Hz yükleme frekansında ve 50-100-150 kPa çevre basıncı altında yapılan deneylerde hem kayma modülü-birim şekil değiştirme hem de sönümleme oranı eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 4. Kayma modülü-birim şekil değiştirme eğrileri

Yükleme esnasında her deformasyon seviyesinde 10 döngü yapılarak daha sonra deformasyon değeri adım adım artırılmıştır. Şekil 4'te görülen her bir nokta burada deformasyon seviyesinden elde edilen kayma modülü değerini ifade etmektedir.

Numunelerin homojen olarak hazırlanması ve aynı şartlarda yükleme yapılması nedeniyle çevre basıncı etkisi incelenmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda derinliğe bağlı olarak dayanım değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Burada 50kPa çevre basıncında 12MPa değerinde iken 100kPa'da 17MPa değerine ve 150kPa çevre basıncında 27MPa değerine ulaştığı belirlenmiştir. 150kPa çevre basıncında daha net bir artış olduğu ve çevre basıncının etkisinin daha etkin olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Sönümleme oranı eğrileri

Sönümleme oranı eğrilerini incelediğimizde Şekil 5'te görüldüğü üzere 50kPa çevre basıncında daha yüksek sönüm değerlerinin olduğu belirlenmiştir. Numunenin çevre basıncı etkisi ile rijit olması sebebiyle daha az sönümleme değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

4.SONUÇLAR

Zeminlerin dinamik etkiler sonucunda göstereceği davranış deprem bölgelerindeki yapılar için önemlidir. Bu nedenle dinamik üç eksenli deney sisteminde zeminlerin göstereceği davranışın incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada çevre basıncı etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda farklı deformasyon seviyelerinde dinamik parametreler elde edilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda yüksek plastisiteli kil numuneleri kullanılarak tek tabaka halinde sıkıştırma işlemi yapılmış ve bu numuneler optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Yüksek deformasyon değerlerinde zeminlerin dinamik parametreleri elde edilmiştir.
- Deformasyon miktarının hesaplanmasında deneylerde on adet döngü elde edilmiş ve grafiklerde bir değer olarak işaretleme yapılmıştır. Bu şekilde verilerin değerlendirilmesinde daha gerçekçi olması sağlanmıştır.
- 1 Hz frekansında yapılan yüklemelerde, 50-100-150 kPa çevre basıncı altında yapılan deneylerde hem kayma modülü-birim şekil değiştirme hem de sönümleme oranı eğrileri elde edilmiştir.
- Çevre basıncı artışı ile dayanım değerlerinde artış olduğu ve bu artışın çevre basıncı artışından daha fazla etkilendiği belirlenmiştir.
- Sönümleme oranı eğrileri incelendiğinde daha rijit numunenin daha az sönüm yaptığı belirlenmiştir.
- Yapıların tasarımında ilk 20m derinliğin çok önemli olduğu ve bu derinlikteki zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesi gerektiği görülmektedir.
- Yapılacak olan analizlerde hem dayanım hem sönümleme değerlerinin sahaya özel belirlenmesinin önemi görülmektedir.

Deney sonuçlarının güvenilirliğini görmek açısından hem deney sayısının artması hem de literatürde yer alan dayanım değerleri ile de karşılaştırma yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Arpit, Jain., Abhijit, Chakraborty., Sukanta, Das., Satyendra, Mittal. (2021). Cyclic Triaxial Test to Measure Strain-Dependent Dynamic Properties—A Comprehensive Study. doi: 10.1007/978-981-33-6564-3_59
- Šarūnas, Skuodis., Neringa, Dirgėlienė., Jurgis, Medzvieckas. (2020). Using Triaxial Tests to Determine the Shearing Strength of Geogrid-Reinforced Sand. *Studia Geotechnica et Mechanica*, doi: 10.2478/SGEM-2020-0005
- Yi, Xia., Chunmei, Mu., Wenjie, Li., Kai, Ye., Ha, Wu. (2022). Study of Dynamic Evolution of the Shear Band in Triaxial Soil Samples Using Photogrammetry Technology. *Sustainability*, doi: 10.3390/su142114660
- Xianyuan, Tang., Xianyuan, Tang., Wang, Shihai., Feng, Cheng. (2021). Experimental study on dynamic stress dynamic strain relationship and dynamic modulus of reinforced expansive soil. doi: 10.1088/1755-1315/669/1/012006
- Pradipta, Chakraborty., Aaditaya, Raj, Roshan., Angshuman, Das. (2020). Evaluation of Dynamic Properties of Partially Saturated Sands Using Cyclic Triaxial Tests. *Indian Geotechnical Journal*, doi: 10.1007/S40098-020-00433-3
- B., R., Madhusudhan., A., Boominathan., Subhadeep, Banerjee. (2020). Effect of Specimen Size on the Dynamic Properties of River Sand and Rubber Tire Shreds from Cyclic Triaxial and Cyclic Simple Shear Tests. doi: 10.1007/978-981-15-6086-6_37
- Adnan, Jawad., Bushra, S., Albusoda. (2022). Numerical Modeling of a Pile Group Subjected to Seismic Loading Using the Hypoplasticity Model. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, doi: 10.48084/etasr.5351
- Lei, Gao., Guohui, Hu., Jiaru, Chen., Keyi, Ren., Qiuyue, Zhou., Xiangjuan, Yu. (2018). Dynamic Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Clay Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, doi: 10.1007/S11204-018-9543-Z
- Qassun, Sa'ad, Al-Deen, Mohammed, Shafiqu., Murtadha, A., Abdurassol. (2017). Database of Dynamic Soil Properties for Most Iraq Soils. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*,
- Lei, Gao., Yi, Luo., Zhen, Ren., Xiangjuan, Yu., Kexiong, Wu. (2020). Experimental Study on Dynamic Properties of Nano-MgO-Modified Silty Clay. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, doi: 10.1007/S40891-020-00210-5
- Bayat M., Ghalandarzadeh A., (2018), "Stiffness Degradation and Damping Ratio of Sand-Gravel Mixtures Under Saturated State". *Int J Civ Eng*, 16, 1261–77. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0274-8>

- Güler, E., and Afacan, KB., (2021), “Dynamic behavior of clayey sand over a wide range using dynamic triaxial and resonant column tests”. *Geomechanics and Engineering*. 105-113. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.24.2.105>
- Kumar, SS., Krishna, AM., Dey, A., (2017), “Evaluation of dynamic properties of sandy soil at high cyclic strains”. *Soil Dyn Earthq Eng*, **99**, 157–67. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.016>
- ASTM D4767-11. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standards, 913-925.

Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Uygulamaları ve Kullanılan Malzemeler

Tayfun Şengül¹

Yaşar Vitoşoğlu²

Özet

İstenilen özelliklere sahip olmayan doğal zeminlerin taşıma kapasitesinin ve diğer mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi zeminlerin stabilizasyonu ile mümkün olmaktadır. Zemin stabilizasyonu kimyasal, mekanik veya termal yöntemlerle zeminin iyileştirilmesini ifade eder. Bu şekilde zeminin dayanıklılığı artırılarak, hacim değişimi ve su geçirgenliği azaltılarak veya diğer mühendislik özellikleri geliştirilerek yapıların güvenli ve sağlam bir temel üzerine oturtulması sağlanabilir. Zemine kimyasal katkı maddeleri ekleyerek, zeminin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesinin artırılması en eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olup binlerce yıldır uygulanmaktadır. Bu katkı maddeleri genellikle çimento, kireç, uçucu kül ve diğer kimyasal maddeleri içerebilir. Bu katkılar, genellikle ucuz, yerel olarak bulunabilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu malzemelerdir. Dolayısıyla, bu malzemelerin tek tek veya kombinasyon halinde kullanılması, taban zeminlerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde birçok avantaj sağlar ve üst yapıların performansını önemli ölçüde artırır. Bu çalışmada kimyasal stabilizasyon yönteminde kullanılan katkı malzemeleri incelenmiş, zeminin özellikleri, projenin gereksinimleri ve yerel koşullar göz önüne alınarak uygun bir stabilizatör seçimi için kullanılan katkı malzemeleri ile elde edilen kazanımlar literatürde bulunan deneysel araştırma sonuçları ile somutlaştırılmıştır.

1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, 0000-0003-3473-7724

2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, 0000-0002-5543-9673

1. Giriş

İnşaat mühendisliği projeleri hayata geçirilmeden önce yapılacak en önemli işlerden birisi saha fizibilite etüdünün yapılmasıdır. Bu etüt, genellikle tasarım süreci başlamadan önce, projenin yeri konusunda karar vermek üzere taban zemininin özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Projenin yerinin seçimi esnasında göz önünde bulundurulacak tasarım kriterlerinin başında, yapının tasarım yükü ile işlevi, kullanılacak temel türü ve taban zemininin taşıma gücü gelir.

Geçmişte, taban zemininin taşıma gücü yer seçiminde daha fazla rol oynamıştır. Zeminin taşıma gücünün yetersiz olması durumunda ise tasarımın saha koşullarına uyacak şekilde değiştirilmesi, yerindeki zeminin çıkarılması ve değiştirilmesi ile sahanın terk edilmesi başlıca seçenekler olarak göz önüne alınmıştır. Bunun sonucunda, taban zemininin taşıma gücünün yetersiz olması nedeniyle terk edilen sahalar önemli ölçüde arttığından arazi kıtlığı ciddi bir sorun haline gelmiştir. Heyelana uğramış ve kirlenmiş arazilerin yanında terk edilen alanlar arasında, sıvılaşmaya yatkın sahalar ile yumuşak kil ve organik zeminlerle kaplı olanlar başta gelmektedir. Dolayısıyla çoğu inşaat mühendisliği projesinde, zemin modifikasyonu olmadan tasarım gerekliliklerini karşılayacak bir inşaat sahası elde etmek oldukça güçtür. Mevcut uygulama, tasarım şartnamelerindeki koşulları sağlamak için taşıma gücü düşük ve sorunlu zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Günümüzde, yumuşak killer ve organik topraklar gibi zeminler ortaya çıkacak inşaat mühendisliği gereksinimlerine göre iyileştirilebilmektedir. Bu inceleme, çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan zemin stabilizasyonu yöntemine odaklanmaktadır.

Zemin stabilizasyonun amacı, zemin tanelerini birbirine bağlayarak, taneleri su geçirmez hale getirerek veya ikisinin bir kombinasyonunu sağlayarak zeminin dayanımını ve su ile yumuşamaya karşı direncini artırmaktır [1]. Zeminlerin yumuşak ve taşıma kapasitesinin düşük olduğu, yerel doğal agregaların kalitesiz olduğu ve ithalinin maliyetli olduğu veya zeminlerin kazılıp granüler malzemelerle değiştirilmesinin pahalı olduğu durumlarda gerçekleştirilir. En basit stabilizasyon süreçleri, sıkıştırma ve drenajdır. Diğer süreç ise tane boyutu dağılımının iyileştirilmesi olup zayıf zeminlere bağlayıcılar eklenerek daha fazla iyileştirme sağlanabilir [2]. Zemin stabilizasyonu çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, mekanik ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır.

Mekanik stabilizasyon, doğal zemin tanelerinin fiziksel yapısını titreşim veya sıkıştırma yoluyla değiştirerek veya bariyerler ve çiviler gibi diğer fiziksel unsurları zemin yapısına dâhil ederek gerçekleştirilir. Mekanik

stabilizasyonun, aynı zamanda, bir zeminin tane dağılımının farklı tane dağılımına sahip diğer zemin türleriyle karıştırılarak değiştirilmesi yoluyla da gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu şekilde daha yoğun bir zemin kütlesi elde edilebilir. Silt veya kil gibi ince malzemelerden az miktarda ilave edilmesi, kohezyonsuz zeminlerdeki iri tanelerin bağlanmasını sağlayarak zeminin dayanımını artırır. Diğer yandan, iri ve köşeli kum ve çakıl taneleri, karışımın içsel sürtünmesini artırarak sıkıştırılabilirliğini azaltır. Zeminleri iyileştirmek için yüksek çekme dayanımına sahip doğal veya sentetik doğal lifler, donatı çubukları, geosentetik şeritler, geotekstilller veya geogridler gibi katkı maddelerinin kullanılması olan zemin takviyesi de, mekanik stabilizasyon yöntemlerinden birisidir.

Kimyasal stabilizasyon, doğal zeminlerin geoteknik özelliklerini belirli mühendislik amaçlarını karşılayacak şekilde iyileştirmek için gerçekleştirilir. Doğal zeminlerin geoteknik özellikleri, kesme mukavemeti parametrelerinin iyileştirilmesiyle, çekme mukavemetinin artırılmasıyla ve rijitliğin yükseltilmesiyle geliştirilebilir. Bu teknikte zeminlere kimyasal olarak aktif malzemeler eklenerek zemin kütlesinin stabilitesini arttırmak veya korumak amaçlanır. Kimyasal zemin stabilizasyonu, istenen etkiyi elde etmek için esas olarak çimento bir malzeme olan stabilizatör ile puzolanik maddeler içeren zemin mineralleri arasındaki kimyasal reaksiyonlara bağlı olup şişen killerden granüler malzemelere kadar çok çeşitli tipte taban zeminlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir. Bu husus, tasarım ölçütlerinin oluşturulmasının yanı sıra, istenen mühendislik özelliklerini elde etmek için kullanılacak uygun kimyasal olarak aktif katkının ve katkı oranının belirlenmesine imkân verir. Kimyasal stabilizasyon işleminin yararları arasında daha yüksek dayanım değerleri, plastisitede azalma, daha düşük geçirgenlik, üst yapı kalınlığının azalması, kazı malzemelerinin kaldırılmasının veya taşınmasının önlenmesi sayılabilir. Aynı zamanda nem değişkenliğinin neden olduğu şişen veya ince taneli zeminlerdeki hacimsel değişiklikleri en aza indirmesi, bir başka faydasıdır. Dolayısıyla, şişen zeminlerin katkı maddeleriyle stabilizasyonu, zeminlerin hacim bakımından değişim potansiyelini kontrol eder ve zeminlerin taşıma gücünü artırır. Kimyasal zemin stabilizasyonu, aynı zamanda uygun maliyetli, performans açısından verimli ve çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilir.

Zeminler, kireç, çimento, uçucu kül, bitüm, silis dumanı, pirinç kabuğu külü veya bunların kombinasyonu olan çimento malzemelerle stabilize edilebilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, stabilize edilmiş zeminler, doğal zeminden daha yüksek dayanıma, daha düşük geçirgenliğe ve daha düşük sıkıştırılabilirliğe sahiptir. Stabilizasyon, yerinde stabilizasyon ve yerinde olmayan stabilizasyon olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

2. Stabilizasyonun Bileşenleri

Zemin stabilizasyonu, dayanım, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik ve dayanıklılık gibi geoteknik özelliklerini iyileştirmek için zayıf zeminlerde stabilize edici bağlayıcı maddelerin kullanılmasını içerir. Stabilizasyon teknolojisinin bileşenleri arasında zemin veya zemin mineralleri ile stabilize edici ajan veya bağlayıcı özelliğe sahip çimentolu malzemeler bulunur.

2.1. Zeminler

İstenilen mühendislik özelliklerini elde etmek amacıyla stabilizasyon, killerden granüler malzemelere kadar çok çeşitli tipte zeminlere uygulansa da, çoğu zaman killi, siltli veya organik zeminlerde gerçekleştirilir. İnce taneli granüler malzemeler, tane çaplarına oranla geniş yüzey alanları nedeniyle stabilize edilmesi en kolay malzemelerdir [1]. Diğerlerine kıyasla killi bir zemin, düz ve uzun tanelere sahip olduğundan geniş bir yüzey alanına sahiptir. Öte yandan, siltli malzemeler nemdeki küçük değişikliklere karşı hassas olabildiklerinden stabilizasyon sırasında zorluklar çıkarabilir. Turba zeminler ve organik zeminler, çok yüksek su içeriğine, yüksek gözenekliliğe ve yüksek organik içeriğe sahiptir. Organik zeminlerde stabilizasyonun başarılı olması, uygun bağlayıcı seçimine ve ilave edilen bağlayıcı miktarına bağlıdır.

2.2. Stabilize Edici Maddeler

Stabilize edici maddeler, su ile temas ettiğinde veya puzolanik minerallerin varlığında su ile reaksiyona girerek çimentolu kompozit malzemeler oluşturan bağlayıcılardır. Yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, kireç, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bitümlü malzemelerdir. Bunların dışında, puzolanlar, prinç kabuğu külü, kireç fırını tozu, çimento fırını tozu, silika dumanı ve geopolimerler de zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Bu katkılar, genellikle ucuz, yerel olarak bulunabilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu malzemeler olduklarından kullanılmaları birçok avantaj sağlar. Bu malzemelerin tek tek veya kombinasyon halinde kullanılması, taban zeminlerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.2.1. Kireç

En sık kullanılan kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biri olan kireç stabilizasyonu, kohezyonlu zeminlerin dayanımlarının artırılması ve plastisite özelliklerinin iyileştirilmesi için iyi bilinen ve ekonomik bir tekniktir. Kireç üzerine yapılan araştırmalar, zeminin dayanımının artırılmasının kireç stabilizasyonunun en göze çarpan yararlarından biri

olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, kirecin; killerin hacim stabilitesini, işlenebilirlik ve durabilite gibi özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Özellikle orta ve ince daneli zeminler, kireç ile stabilize edilerek, plastisiteyi düşürülür, şişmesi azaltılır ve direnci yükseltilir. Kireç kil mineralleriyle daha iyi çalıştığı için kireç stabilizasyonuna killi zeminlerde yaygın olarak başvurulmaktadır. Ayrıca, killi çakıllar ve siltli killer de kireç ile kolayca reaksiyona girer. Kireç stabilizasyonu için genellikle plastisite indisi değeri (PI) 10'dan büyük, kütlece en az %25'i ince daneli olan killi zeminler ideal zemin grubudur. Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği (AASHTO) Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-2 (7), A-5, A-6, ve A-7 sınıfı zeminler, 0.002 mm'yi geçen kısmı %7 den büyük olan killer de kireç ile karıştırılarak başarılı bir şekilde stabilize edilebilirler. Bu tür zeminler için stabilize edilmiş tabaka kalınlığı, en az 12 cm olmalı ve standart proktor yoğunluğunun en az %100'ü kadar sıkıştırılmalıdır [3]. Diğer taraftan, kireç stabilizasyonu granüler zeminlerde, düşük kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminlerde puzolan ilavesi olmadan daha az uygundur [4-5]. Kireç, bazı durumlarda killi zeminlerin yalnızca işlenebilirliğinin geliştirilmesi amacıyla da kullanılabilir. Killi zeminleri stabilize etmek için kirecin çimentodan daha uygun bir malzeme olduğu düşüncesi çoğu zaman doğru değildir. Çimento, PI değeri 20 ila 50 arasında olan killi zeminlerin stabilize edilmesinde kireç kadar iyi sonuç vermektedir [6]. Kirecin çimentoyla birlikte kullanılması da oldukça yaygındır.

Kireç stabilizasyonunda, katyon değişimi, topaklanma yığılması, kireç karbonizasyonu ve puzolanik reaksiyon nedeniyle, zemin parçacıkları birbirine yapışarak daha büyük parçacıklar oluşturur ve bu da zeminin özelliklerini iyileştirir [7-8]. Zeminin dayanım artışında, puzolanik reaksiyonun getirdiği çimentolaşma etkisinden ziyade katyon değişim kapasitesi daha etkili olmaktadır [1]. Zemin modifikasyonunda, kil parçacıkları topaklaştıkça, doğal plaka benzeri kil parçacıklarının iğne benzeri birbirine kenetlenen yapılara dönüştüğü görülür. Böylece, killi zeminler, daha kuru ve su içeriği değişikliklerine daha az duyarlı hale gelir [2]. Kireç stabilizasyonu, sönmemiş kireç (CaO) ya da sönmüş (hidrate) kireç (Ca(OH)₂) ile sağlanabilirken, sönmemiş kireç kullanımı daha yaygındır. Bunun sebebi sönmemiş kirecin birim kütle başına daha yüksek serbest kireç içeriğine sahip olması ve kendi ağırlığının %32'si kadar su ile birleşerek sönmüş kirece dönüşürken mukavemet kazanımını ve nem içeriğindeki azalmayı hızlandırarak yüksek ısı meydana getirmesidir [2].



Kireç stabilizasyonu uygulamalarının çoğunda kullanılan kireç miktarı, zemin kuru ağırlığının yaklaşık olarak %5'i ile %10'u arasında değişmektedir.

Bazı araştırmalar, kirecin sıkıştırma parametreleri üzerinde büyük bir etkisinin olmadığını rapor etmiştir. Bununla birlikte, diğer bağlayıcılarla karşılaştırıldığında, kireç zemin parçacıklarıyla hızlı ve kapsamlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girmektedir. Kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak zeminin özelliklerinin değiştirilmesi, zeminin sıkışma ve dayanım parametreleri gibi çeşitli özelliklerinde iyileşme sağlar [7-9].

Kireç stabilizasyonu kapsamında Kavak ve Akyarlı (2007) [8], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yeşil ve kahverengi killerin hâkim olduğu 200 m uzunluğundaki bir yol kesiminde gerçekleştirilen kireç stabilizasyonu uygulaması sonucunda elde edilen iyileştirmeler çeşitli laboratuvar ve saha testlerinin sonuçlarına dayanarak belirlenmiştir. Saha koşullarında kireç stabilizasyonu her iki kil için de %5 kireç ilavesiyle gerçekleştirilmiş olup 30 cm kalınlığında tek bir tabaka halinde uygulanmıştır. Laboratuvarda yapılan Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerinde, 28 gün sonunda yeşil ve kahverengi killerde ilk CBR değerlerine kıyasla sırasıyla 16 ve 21 kata varan artışlar gözlenmiştir. CBR değerlerinde gözlenen yüksek artışlar, yolların üst tabaka kalınlığının azalacağı anlamına gelmektedir. Benzer iyileşmeler, serbest basınç ve plaka yükleme deneylerinde de elde edilmiştir.

Killi zeminler karayolu yapımında birçok soruna neden olur ve tatmin edici bir performans için değiştirilmeleri veya stabilizasyon ile iyileştirilmeleri gerekir. Daha önce de belirtildiği gibi, kireç stabilizasyonu, killerin performansını artırmak için iyi bilinen bir teknik olup kilin kireçle karıştırılmasıyla çimentolu mineraller oluşur ve bu da mukavemet ve dayanıklılıkta bir iyileşmeye neden olur. Kavak ve Baykal (2012) [10], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, X-ışını kırınım şablonu, taramalı elektron mikroskobu ve serbest basınç dayanımı kullanılarak, uzun süre kürlenmiş ve kireçle stabilize edilmiş kaolinit kilinin mikro yapısındaki değişiklikler incelenmiştir. Stabilize edilmemiş saf kaolinitin serbest basınç dayanımı 125 kPa olarak bulunmuştur. Kürlenmiş ve kireçle stabilize edilmiş numuneler için 1 ay sonra bu değer 1015 kPa'a ve 10 yıl sonra 2640 kPa'a yükselmiştir. Benzer uzun süreli dayanım artışları, %12 oranında kireç ile stabilize edilmiş kaolinit için de gözlenmiştir. Kaolinitin yapısında kalsiyum alüminat silikat hidrat mineralleri tespit edilmiştir. Bu durum, kireç stabilizasyonu ile puzolanik reaksiyonların uzun vadede 10 yıla kadar devam edebileceğini göstermektedir.

Soğuk bölgelerde, dolgular ve yollar gibi toprak yapılar donma-çözülme döngülerine maruz kalmaktadır. Donma-çözülme döngülerinin kireç

ile stabilize edilmiş iki farklı plastisite özelliğine sahip zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Hotineanu ve diğerleri (2015) [11] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada hem işlem görmemiş hem de 300 güne kadar varan kürlenme süresinde kireçle işlem görmüş yüksek plastisiteli bentonit ve düşük plastisiteli kaolinit olmak üzere iki tür killi zemin test edilmiştir. Donma-çözülme döngülerinin bu zeminlerin porozite, hacim değişimi, serbest basınç ve direkt kesme dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, işlem görmüş zeminlerin hacminin ilk donma-çözülme döngüleri sırasında arttığını, daha sonra bu artışın daha az belirgin hale geldiğini göstermiştir. Kür süresi 3 günden 28 güne ve daha sonra 300 güne uzatıldığında serbest basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır. Malzemeler donma-çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra, kireçle stabilize edilmiş zemin numunelerinin gözeneklerinde buz merceklerinin oluşmasından kaynaklanan çatlak oluşumunun bentonit zeminde kaolinit zemine göre daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kayma mukavemeti parametrelerinde ise artan donma-çözülme döngü sayısı ile değişim meydana gelmiş içsel sürtünme açısı hafifçe artarken kohezyon değeri azalmış, bunun sonucunda stabilize edilmiş zeminin dayanımının etkilendiği belirlenmiştir.

Kireçle stabilize edilmiş numuneler üzerinde yapılan araştırmalarda, gevrek malzemelerde karşılaşıldığı gibi bir kayma kırılması biçimi tespit edilmiştir [12-13]. Birçok çalışma, zeminlerin dayanım özelliğindeki iyileşmede kirecin etkin rolünü ortaya koymuştur [8,12,14]. Zemin ve kireç parçacıkları arasındaki zeminin dayanımını artıran bu etkileşim puzolonik reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır [8].

Bazı araştırmalarda kohezyonlu zeminleri stabilize etmek için kirecin yanında arıtma çamuru külü de kullanılmıştır. Lin ve diğerleri (2007) [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çamur külü ve sönmüş kirecin ağırlıkça %0, %2, %4, %8 ve %16 olmak üzere beş farklı oranı, kohezyonlu zemin ile karıştırılmış ve zemin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları, katkı maddesi içeren numunelerin serbest basınç dayanımlarının işlem görmemiş zemininkinden üç ila yedi kat daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bu numuneler için şişme davranışlarının da etkili bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Üç eksenli basınç deneyinin sonuçlarından, kayma mukavemeti parametresi olan kohezyonun artan katkı miktarı ile arttığı, 30 kPa'dan 50-70 kPa'ya yükseldiği, görülmüştür.

Araştırmacılar, plastisite indisindeki azalmanın kimyasal stabilizasyonda kireç miktarının artmasından kaynaklandığını ortaya çıkarmıştır. Zeminin plastisite indisi ile zeminin şişme basıncı ve şişme potansiyeli arasında direkt

bir ilişki bulunup, stabilize edilmiş zeminin plastisite indisindeki düşüşün şişme basıncının da düşmesine sebep olmaktadır [7-9,12].

2.2.2. Çimento

Portland çimentosu, su ilavesiyle sertleşen ve kimyasal olarak reaksiyona giren hidrolik bir bağlayıcı olup %21.9 silikon monoksit (SiO_2), %6.9 alüminyum oksit (Al_2O_3), %3.9 demir oksit (Fe_2O_3) ve %63 kalsiyum oksit (CaO) içerir [15]. Zemin stabilizasyonunda kullanılan en eski bağlayıcı malzemelerden biridir. Çimento ile stabilizasyon, belirli miktarda çimento ve suyun ufulanmış zeminlerle karıştırılması ve istenilen yoğunluk elde edilinceye kadar sıkıştırılmasıdır. Burada çimento, zemin içindeki mineral parçaları arasında kuvvetli bir bağ oluşturarak zeminin plastisitesini değiştirir ve kayma gerilmelerine karşı direncini artırır. Killi zeminlerin su tutma kapasitesini azaltıcı rol oynadığından, çimento ile stabilize edilmiş zeminler, absorbe edilmiş suyun hacim artırıcı ve yumuşatıcı etkilerine karşı korunmuş olur. Ayrıca zeminin donma ve çözülme döngülerinin bozucu etkilerinden de korunmasına yardımcı olur. Çimento reaksiyonu zemin minerallerine bağlı olmayıp, çimentonun herhangi bir zeminde mevcut olabilecek su ile reaksiyonudur. Bu nedenle çimento çok çeşitli zeminleri stabilize etmek için kullanılabilir. Piyasada çok sayıda çimento türü mevcut olup, Portland çimentosu, yüksek fırın çimentosu, sülfata dayanıklı çimento ve yüksek alüminalı çimentolar en fazla kullanılan türlerdir. İşlem görecekt zeminin türüne ve istenen nihai dayanıklılığa bağlı olarak çimento seçimi gerçekleştirilir.

Hidratasyon süreci, çimento reaksiyonunun gerçekleştiği bir süreç olup, çimentonun su ve diğer bileşenlerle karıştırılmasıyla başlar ve sertleşme olayıyla sonuçlanır. Çimentonun sertleşmesi ya da priz alması zemini tutkal gibi sarar, ancak zeminin yapısını değiştirmez. Hidratasyon reaksiyonu çimento tanelerinin yüzeyinden itibaren yavaş ilerler ve tanelerin merkezi susuz kalabilir [1]. Çimento hidrasyonu, bilinmeyen bir dizi kimyasal reaksiyon içeren karmaşık bir süreçtir [16]. Ancak bu süreç, yabancı maddelerin varlığı, su/çimento oranı, kürlenme sıcaklığı, katkı maddelerinin varlığı ve karışımın özgül yüzeyi gibi faktörlerden etkilenebilir.

Çimento ile stabilize edilmiş zeminin priz alması ve mukavemet kazanması bazı faktörlere bağlı olarak değişebileceğinden istenen dayanımı elde etmek için karışımın tasarımı sırasında bu durum dikkate alınmalıdır. Çimentolu hidratasyon, çimentoya özgü bir kimyasal işlem olup çimentoda bulunan faz bileşenleri trikalsiyum silikat (C3S), dikalsiyum silikat (C2S), trikalsiyum alüminat (C3A) ve tetrakalsiyum alüminoferrit

(C4AF). Kalsiyum silikatlar olan C3S ve C2S bileşenleri, sıradan Portland çimentosunun dayanım gelişiminden sorumlu iki ana çimentolu bileşendir. C3S ve C2S su ile reaksiyona girdiğinde hidrasyon reaksiyonu sertleşmiş çimento hamuruna mukavemet ve sertlik gibi mühendislik özelliklerinin çoğunu veren trikalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kristalize kalsiyum hidroksit (CH) üretir. Kristalize kalsiyum hidroksit, stabilize edilen zeminde bulunan puzolanik malzemelerle reaksiyona girerek daha fazla çimentolu malzeme meydana getirir [1]. C3A, suyla C3S'den daha hızlı reaksiyona girerek çimento hamurunun anında sertleşmesine neden olduğundan hidrasyonun erken aşamasında özellikle önemlidir. Bu reaksiyon, önemli olsa da, geciktirilmesi gerektiğinden ani sertleşmeyi önlemek için alçı eklenir [17]. C3A ve alçı suyla reaksiyona girerek etrenjit üretir. Alçı tükendiğinde, C3A su ile reaksiyona girerek trikalsiyum alüminat hidrat (CAH) meydana getirir. CSH ve CAH, zemin parçacıkları için bağlayıcı görevi gören bir jel ağı oluşturarak bir zemin-çimento matrisi elde edilir ve çimento hamuru sertleştiğinde dayanıklılık oluşur. Normalde kullanılan çimento miktarı az olmasına rağmen zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmek için yeterlidir. Çimentoyla stabilize edilmiş zeminlerin plastisitesi, hacim değişimi veya sıkıştırılabilirliği azalırken dayanımı artmaktadır.

Yüzeysel zemin stabilizasyonunda çimento karışımlarının kullanılması, kireç kullanımı kadar yaygın bir uygulama olup kireç gibi, çimento stabilizasyonu da zeminlerin dayanımını arttırmaktadır. Çimentonun aktif olarak zemin ile karıştırılmasının, taban zemininin taşıma gücünü artırarak üst yapı tasarım kalınlığını azaltmak gibi iki önemli getirisi vardır. Dolayısıyla, çimento kullanılarak gerçekleştirilen yüzeysel zemin stabilizasyonu, özellikle karayolu ve demiryolu gibi yol inşaatlarında ya da havaalanı pistlerinin yapımında tercih edilmektedir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu için genellikle Portland çimentosu kullanılır.

Çimentoların hemen hemen tüm zemin türlerini stabilize etmek için kullanılabileceği bilinmektedir. Ancak organik zeminler, yüksek derecede plastik killer ve bazen de yetersiz şekilde reaksiyona giren kumlu zeminler bunun istisnalarıdır [18]. Çimento, çakıllı ve kumlu zeminlerin stabilizasyonunda tercih edilse de killi zeminlerin ve turba toprakların stabilize edilmesinde de kullanılabilir. Çimento stabilizasyonu için en iyi zemin adayları, zayıf kohezyonlu granüler zeminlerdir. Dolayısıyla, AASHTO Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-2 ve A-3 sınıfına giren iyi derecelenmiş granüler zeminler çimento ile en iyi sonucu verirler. Kumlu ve çakıllı zeminlerin $PI < 30$ ise, ince daneli zeminler de, 200 nolu elekten geçen kısım %35'den az ve $PI < 20$ ise çimento stabilizasyonu uygulanabilir [3]. Çimento stabilizasyonu için uygun olan killi zeminler kaolinitik ve illitik

killi zeminler olup çimentonun düşük plastisiteli kilin stabilizasyonunda etkili olduğu bilinmektedir. Turba zeminler, puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesine izin veren ve killi zeminlerde bulunan silika (SiO_2) ile alüminadan (Al_2O_3) yoksun olmasına rağmen, birincil hidratasyon reaksiyonu bu zeminler için çimentolu bağ oluşturmak için yeterlidir. İçlerinde çok kalsiyum minerali bulduran kil çeşitleri, çimento ile stabilizasyon için en uygun kil tiplerini oluştururken daha çok sodyum ya da hidrojen barındıran killer ise kireç ile stabilizasyona daha uygundur. Genellikle %2'den daha fazla organik madde içeren ve pH'ı 5.5'tan az olan zeminlerin stabilizasyonunda çimentonun kullanılması uygun değildir [18]. Bu sebeple, gerçekleştirilecek stabilizasyon için kullanılacak malzemenin seçimine önem verilmelidir.

Çoğu uygulamada, normal olarak Tip I veya Tip II Portland çimentosu kullanılır ve çimento içeriği zeminin kuru ağırlığının %4'ü ile %16'sı arasında değişebilir. Genel olarak, zeminin kil kısmı arttıkça, gereken çimento miktarı da artar. %10 kil içeriğine sahip zeminlerin stabilizasyonunda gerekli çimento oranı %5 iken, kil içeriği %30'a yükseldiğinde bu oran %10 veya daha fazlasına yükselmektedir. İyi granülometrilili zeminler dona karşı daha az hassas ve şişmeye karşı daha az elverişli olduklarından stabilizasyonu için gerekli çimento oranı daha düşüktür. Buna karşılık üniform daneli kumlar, dona karşı hassas siltler ve killer için stabilizasyonda gerekli çimento miktarı artmaktadır. Ayrıca ince öğütülmüş çimentonun, daha büyük parçacıklar içeren aynı miktarda çimentodan daha yüksek dayanımlar üreteceği belirlenmiştir [19].

Mohamedzein ve Al-Rawas (2011) [20] yüksek sıkışabilirliğe ve düşük kayma dayanımına sahip aynı zamanda tuz içeren bir zeminin kayma dayanımını arttırmak amacıyla çimento ile stabilizasyon çalışması yürütmüştür. Bu çalışmada çimento, zeminin kuru ağırlığı esas alınarak %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında eklenmiş ve zemin karışımlarının 7, 14 ve 28 gün boyunca kürlenmelerine izin verilmiştir. Stabilize edilmiş malzemenin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla serbest basınç, konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin-çimento karışımlarının kayma dayanımında önemli iyileşmeler olduğunu ve karışımların aynı zamanda 12 ıslanma/kuruma döngüsünden sonra küçük ağırlık kaybına uğramaları nedeniyle dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Oyediran ve Kalejaiye (2011) [21], etkili stabilizasyon için gerekli optimum çimento içeriğini belirlemek amacıyla, ağırlıkça artan çimento miktarlarının zeminlerin mukavemet ve sıkıştırma parametreleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, öncelikle açılan bir test çukurundan 0.5

m, 1.0 m ve 2.0 m derinliklerde zemin örnekleri alınmıştır. Bu zemin örneklerinin maksimum kuru yoğunlukları, optimum su muhtevası, Kaliforniya taşıma oranları (CBR) ile kürlenmiş ve kürlenmemiş serbest basınç dayanımları, ağırlıkça %2, %4, %8, %10 ve %20 oranlarında çimento ile stabilize edilerek ve edilmeden belirlenmiştir. Sonuçlar, çimento oranı arttıkça zemin örneklerinin maksimum kuru yoğunluklarının, Kaliforniya taşıma oranlarının ve serbest basınç dayanımlarının arttığını, optimum su muhtevasının ise azaldığını göstermiştir. Ancak, ağırlıkça %10'dan fazla çimento ilavesi maksimum kuru yoğunlukları, Kaliforniya taşıma oranlarını ve serbest basınç dayanımlarını azaltmış ve optimum su muhtevasını ise artırmıştır. Sonuç olarak, araştırma, stabilizasyonda kullanılan çimento miktarındaki sürekli artışın bazı geoteknik özelliklerin iyileştirilmesinde daha iyi sonuçlar elde etmek için yeterli olmadığını göstermiştir.

2.2.3. Kireç-Çimento

Kireç ve çimento ayrı ayrı katkı maddeleri olarak kullanılmak suretiyle zemin stabilizasyonu yapılabileceği gibi farklı oranlarda bir kombinasyon şeklinde de kullanılarak zeminler stabilize edilebilir. Kireç ve çimentonun kombinasyon halinde zeminlerin stabilizasyonunda kullanıldığı bir çok çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle bazı zemin özellikleri açısından en iyi performansı sunan kireç ve çimentonun ideal karışım oranları belirlenmeye çalışılmaktadır. Kireçli çimento stabilizasyonunun başarısı ise zeminin özelliklerine, kireç/çimento oranına ve kür süresine bağlıdır.

Khemissa ve Mahamedi (2014) [22] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli çimento ve kireç içerikli karışımlarla muamele edilmiş bir kil zemin üzerinde Proctor kompaksiyon deneyi, metilen mavisi testi, California taşıma oranı ve drenajsız direkt kesme deneyleri yürütülmüş ve sonuçları sunulmuştur. Deney sonuçları, doğal kilin taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğunu, en iyi performansın %8 çimento ve %4 kireç içeriğine karşılık gelen bir karışımdan elde edildiği belirtilmiştir.

Al-Rawi ve Al-Samadi (1995) [23] tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada üç farklı zeminin stabilize edilmesi için çimento, kireç ve alkali sodyum kimyasal katkı maddeleri kullanılarak en iyi serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı sonuçlarını üreten optimum kombinasyonun bulunmasına çalışılmıştır. Killi silt zeminin stabilize edilmesinde kuru ağırlıkça %9 çimento veya %7 çimento + %2 kireç katkısının gerektiği, karışıma 0.5 N sodyum hidroksit veya karbonat eklendiğinde stabilize edici madde miktarının azaltılabileceği belirlenmiştir. Siltli kil zeminde ise bu karışım oranı %12 çimento veya %8 çimento + %4 kireç olarak

bulunmuştur. Sodyum alkalilerin çimentolaşma malzemesini azaltabileceği saptanmıştır. Üçüncü zemin olarak seçilen kil zeminin ise, çimentoya zayıf tepki gösterdiği ve %18 oranında sülfata dirençli çimentoya ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu zemin kullanılan alkali sodyum kimyasallarına olumsuz tepki göstermiştir. Her bir zemin için stabilizatör miktarına ilişkin seçimin mevcudiyete, maliyete, ilgili alanın ekonomik koşullarına ve inşaat süresine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Düzenli depolama maliyetlerinin yüksek olması ve atık dökümhane kumlarının potansiyel kullanım alanlarının çok olması, bu kumların faydalı bir şekilde yeniden kullanımı konusundaki araştırmaları teşvik etmiştir. Karayolları, dökümhane kumlarının büyük hacimli kullanımı için yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu amaçla, karayolu alt temel malzemesi olarak uygulanabilirliklerini değerlendirmek için çimento ve kireç katkılı zemin-dökümhane kumu karışımları üzerinde bir laboratuvar test programı Güney ve diğerleri (2006) [24], tarafından yürütülmüştür. Karışımlar laboratuvarında çeşitli nem içeriklerinde ve sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılmış ve serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı ve hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan karışımların çevresel uygunluğu, hidrolik iletkenlik testleri sırasında toplanan atık su analiz edilerek değerlendirilmiş, mukavemet parametreleri kullanılarak gerekli alt temel kalınlıkları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, bir karışımın mukavemetinin kütleme süresine, sıkıştırma enerjisine, kireç veya çimento varlığına ve sıkıştırma sırasındaki su içeriğine büyük ölçüde bağlı olduğu belirlenmiştir. Dökümhane kumu bazı numunelerin kış koşullarına karşı direncinin genellikle tipik bir alt temel referans malzemesinden daha iyi olduğunu, laboratuvar sızıntı testleri bu karışımların daha sonra asfalt kaplamadan drenaj edilen su gibi doğrudan çevreye boşaltılan suyla temas etmesi halinde suyun kalitesinin etkilenmeyeceğini göstermiştir.

2.2.4. Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde toz haline getirilmiş kömürün yakılmasından elde edilen ince tortu şeklindeki bir yan ürün olup kireç ve çimentoya karşılaştırıldığında çok az çimentolaştırıcı özelliğe sahiptir. Uçucu küllerin çoğu, ikincil bağlayıcılar grubuna ait olup kendi başlarına istenen etkiyi yaratamazlar. Bununla birlikte, az miktarda aktivatör bir maddenin varlığında kimyasal olarak reaksiyona girerek, yumuşak zeminlerin dayanımının artmasına katkıda bulunan çimentolu bileşikler oluşturabilir. Uçucu küller, kolaylıkla temin edilebilen, ucuz ve çevre dostu malzemeler olup C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu iki sınıf, yakılan kömürün türü ile ilgilidir. C sınıfı uçucu küller, bitüm altı veya linyit kömürünün

yakılmasıyla elde edilmektedir. Genellikle %15'ten daha fazla kalsiyum oksit (CaO) içeren ve aynı zamanda yüksek kalsiyum külleri olarak adlandırılan C sınıfı uçucu küller, kendiliğinden yüksek çimentoşlama özelliklerine sahip olduklarından 1970'lerde beton endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. C sınıfı uçucu küller, sadece doğada puzolanik değildir. Düşük kalsiyum külleri olarak adlandırılan F sınıfı uçucu küller ise, antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilir. Bu küller, kil minerallerinin flokülasyonu için gerekli olan serbest kalsiyum oksiti (CaO) %6'dan daha az içermeleri nedeniyle düşük kendiliğinden çimentolaşma özelliklerine sahiptir. Bu yüzden, kireç veya çimento gibi aktivatörlerin eklenmesini gerektirirler de genellikle puzolanik özellikler gösterir. Ayrıca bu küller tutuşma testindeki kayıp tarafından belirlenen %2'den daha fazla yanmamış karbon içerir.

Uçucu kül, birçok ülkede, betonların, tuğlaların ve astarların imalatı ile sıkıştırılmış dolguların ve setlerin inşası gibi çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılmaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi, uçucu kül kendi başına çok az çimentolaşmaya sahiptir. Ancak nemin varlığında, kimyasal olarak reaksiyona girerek çimentolu bileşikler oluşturmakta ve zeminlerin dayanıklılık ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Uçucu kül katkısı, yüksek derecede plastik killerin şişme potansiyelini etkili bir şekilde azaltmaktadır ve bu azalma, kil mineralleriyle iyonik değişimden ziyade mekanik bağlanma ile ilgilidir [25]. Bununla birlikte, uçucu külle zeminlerin stabilize edilmesi bazı sınırlamalara sahiptir. Öncelikle, stabilize edilecek zemin daha az nem içeriğine sahip olmalıdır; bu nedenle susuzlaştırma gerekebilir. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda kürlenmiş ve daha sonra suya batırılan zemin-uçucu kül karışımı gevşemeye ve mukavemet kaybına karşı oldukça hassastır. Kükürt içeriği, zemin-uçucu kül karışımında genişleyen mineraller oluşturabilir, bu da uzun vadede mukavemeti ve dayanıklılığı azaltabilir [26]. Öte yandan, uçucu küllerin kullanılarak yok edilmesi ve bu malzemeler için yeniden kullanım olanakları yaratılması, hem çevresel hem de ekonomik kaygılar bakımından önemlidir. Türkiye'de bir yılda üretilen toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık 13 milyon tondur. Bu çok büyük bir miktar olup, zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı uygulamaları sadece bu küller için depolama sahası ihtiyacını azaltmayacak, aynı zamanda değerli agregaların kullanımını da azaltacaktır.

Son yıllarda, zemin stabilizasyonunda doğal kaynakların ve endüstriyel minerallerin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, uçucu kül, kimyasal stabilizasyon için katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi uçucu kül, yakılan kömürün türüne bağlı olarak C sınıfı ve F sınıfı uçucu kül olarak ikiye ayrılır. Düşük birim ağırlık ve sıkıştırılabilirliğe sahip olması, puzolanik

reaksiyon karakteristiklerinin bulunması, maliyet bakımından etkin olması ve enerji tasarrufu sağlaması gibi faydaları bakımından, uçucu kül, yumuşak zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan atık malzemelerinden biri olmuştur [27-28].

Sezer ve diğerleri (2006) [27], yumuşak killi taban zemininin çok yüksek kireçli uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, zeminin %0, %5, %10, %15 ve %20'si uçucu kül ile değiştirilmiştir. Kontrol numunesine ek olarak, standart proktor testi ile belirlenen optimum su içeriklerinde uçucu kül ile zemin karıştırılarak dört farklı stabilize zemin numunesi hazırlanmıştır. 1, 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımı ve kayma dayanımı parametreleri, kohezyon ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Uçucu kül ilavesinin zeminin özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur. Uçucu kül içeriğinin artmasıyla ortaya çıkan iyileşmeler, uçucu külün puzolanik reaksiyon ve gözenek inceltme etkisinin yanı sıra yüksek serbest kireç içeriğine sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Uçucu külün zeminlerin plastisite indisi üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda; uçucu kül muamelesinin plastisite indisinin düşmesine yol açabileceği belirtilmiştir [29,30]. Ayrıca, zeminin plastisitesinin azalması, sülfat kabarmasının zararlı etkisini ve şişme potansiyelini azaltmaktadır. Öte yandan, diğer bazı çalışmaların sonuçları, sadece uçucu kül uygulamasının, büyük ölçüde plastik olan zeminlerin özelliklerini geliştirmek için yetersiz olabileceğini ortaya koymuştur [30-32].

Zeminlerin sıkıştırılma özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, zeminlere uçucu kül eklenmesinin zeminlerin porozitesini ve boşluk oranını değiştirdiğini ortaya koymuştur [29,31,33,34]. Zemin stabilizasyonu sayesinde, zemin parçacıkları daha fazla miktarda su çekebilir. Bu etkileşim doğrudan optimum su muhtevasında bir artışa ve maksimum kuru yoğunlukta bir azalmaya yol açmaktadır.

Uçucu külün zeminlerin dayanımındaki etkinliği üzerine birçok araştırma bulunmaktadır [12,30,35-37]. Elde edilen sonuçlar, uçucu külün zemin taneleri ile birleşmesinin, zeminin dayanım özelliğinde önemli bir artış ile sonuçlandığını göstermiştir. Deneysel sonuçları, aynı zamanda uçucu kül ile muamele edilmiş örneklerde ikincil sıkışma katsayısının küçük olduğundan, yapıların ikincil konsolidasyona uğraması nedeniyle oturması olasılığının azalabileceği belirlenmiştir [38].

Zayıf veya yumuşak bir zemin üzerinde herhangi bir altyapının inşa edilmesi, zemin farklı oturmalarına, zayıf kayma mukavemetine ve yüksek sıkıştırılabilirliğe maruz kaldığı için geoteknik uygulamalar açısından

oldukça tipik bir durumdur. Normalde, temellerin tipi zemin tabakalarının mevcudiyetine ve maliyete bağlı olarak değişir. Bazen, zayıf bir zemin üzerinde yüksek bir binanın inşa edilmesi gerekli olabilir. Bu gibi durumlarda, zeminin yük taşıma kapasitesinin zemin stabilizasyonu veya takviyesi gibi çeşitli teknikler kullanılarak artırılması çok önemlidir. Genel olarak, zemine bir katkının ilave edilmesi tekniği, kolay uyarlanabilirliği nedeniyle etkili bir zemin iyileştirmesi sağlar. Prabakar ve diğerleri 2004, zeminin yük taşıma kapasitesini artırmak, uçucu kül ile karıştırılan zeminlerin davranışını açıklamak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada ağırlıkça %9 ila %46 arasında değişen farklı uçucu kül yüzdeleri kullanılarak üç farklı zemin türü ele alınmıştır. Araştırma, uçucu külün zemin katkısı olarak kullanılabilirliğini değerlendirmeye ve temel yapılarından daha fazla yük alabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu şekilde uçucu külün etkin kullanımına ve dolayısıyla zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde uygun maliyetli bir yöntem geliştirilmesine fayda sağlamaktadır. Bu çalışma, zeminin karakterizasyonunu, uçucu külü, sıkışma davranışını, oturmayı, Kaliforniya taşıma oranını, kayma mukavemeti parametrelerini ve şişme özelliklerini kapsamaktadır. Uçucu külün düşük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle zeminin kuru yoğunluğunu %15-20 mertebesinde azalttığı, uçucu kül katkılı zeminin kayma mukavemetinin, zemindeki uçucu kül içeriğinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Uçucu külün genleşmeyi önleyen özellikleri, parçacık boyutu ve şekilden dolayı zemindeki şişmeyi azaltması, zeminin şişme davranışının uçucu kül ilavesiyle etkili bir şekilde kontrol edilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca uçucu külün kesme mukavemeti, kohezyon ve dolayısıyla taşıma kapasitesinde iyileşme elde etmek için zeminde etkili bir şekilde kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Parsons ve Kneebone (2005) [30], taban zeminlerinin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan C sınıfı uçucu külün sağladığı iyileştirme seviyesini ve bu iyileştirmenin etkili bir şekilde kalıcı olma derecesini ölçmek üzere bir çalışma gerçekleştirmiştir. Uçucu külle işlem görmüş taban zeminlerinin yer aldığı 12 cadde ve işlem görmemiş taban zeminlerine bulunduğu beş cadde için bir dizi dinamik koni penetrometre değeri elde edilmiştir. Caddelerin yaşları sıfır ile dokuz yıl arasında değişmiştir. Uçucu kül içeren taban zeminleri için penetrasyon direnci, uçucu külle muamele edilmiş katman ve altındaki işlem görmemiş zemin için kaydedilmiştir. Uçucu külle muamele edilmiş tüm taban zemini katmanları için alttaki işlem görmemiş zemine göre daha yüksek mukavemetler kaydedilmiştir. Değerlendirilen taban zeminlerinde yaşla birlikte herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. Uçucu kül ile işlem görmüş zeminlerin laboratuvar ve saha testleri de uçucu külün

zeminin mukavemetine ve rijitliğine katkıda bulunduğunu, plastisite ve şişme potansiyelini azalttığını, ancak şişmenin tamamen ortadan kaldırılmadığını göstermiştir.

Uçucu kül kullanımı son birkaç on yılda artmış olsa da, Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl üretilen uçucu külün yüzde 60'ından fazlası kül havuzlarında ve düzenli depolama sahalarında toplanmaktadır. Birçok depolama tesisinin şu anda ya da yakın gelecekte tasarım kapasitelerine kadar dolacağı beklenmektedir. Bu nedenle uçucu küllerin geri kazanılmasına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Killi taban zeminlerinin dayanım ve dayanıklılığının uçucu kül ile karıştırılarak artırılmasının yararları uzun yıllardır bilinmektedir. Literatürde, yol yapımındaki zemin stabilizasyonu çalışmalarında C ve F sınıfı uçucu küllerin etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [37,39-41]. Uçucu kül, daha uzun ömürlü ve sürdürülebilir altyapılar oluşturmak için dolgular ile temel ve alt temel tabakaları, banketler, asfalt betonu kaplamalar ve Portland çimentolu beton plaklar gibi üst yapı katmanları dâhil olmak üzere karayolu inşaatlarında faydalı bir şekilde kullanılabilir.

White, ve diğerleri (2005) [26], tarafından yürütülen çalışmada, ince taneli üst yapı alt katmanları kuru zemin ağırlığının %20'sine kadar kendiliğinden çimentolaşan uçucu küle stabilize edilmiştir. Düşük plastisiteli silt'den (ML) yüksek plastisiteli kil'e (CH) kadar değişen beş farklı zemin türü ve hidratlı ve şartlandırılmış uçucu küller de dâhil olmak üzere birkaç farklı uçucu kül kaynağının karışımları kullanılmış, standart Proctor ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) test yöntemleri ile hazırlanan numunelerin mukavemet ve dayanıklılık testleri yapılmıştır. Ayrıca donma/çözülme ve ıslak/kuru kürlenme etkisi bazı numunelerde 2.5 yıla kadar gözlemlenmiştir. Zemin-uçucu kül karışımlarının morfolojisi ve zemin kil mineralojisi de X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskopu teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, zeminin sıkıştırma özelliklerinin, basınç dayanımının, ıslak/kuru durumdaki dayanıklılığının, donma/çözülme dayanıklılığının, hidratasyon özelliklerinin, dayanım kazanma oranının ve plastiklik özelliklerinin uçucu kül ilavesinden etkilendiğini göstermiştir. Uçucu kül ilavesi ile uçucu kül-zemin karışımının kesme mukavemetinin arttığı belirlenmiş, yüksek basınç ve kesme dayanımı elde etmek için optimum karışım oranı olarak %60 uçucu kül ve %40 zemin oranı önerilmiştir.

Senol ve diğerleri (2006) [40], başka herhangi bir aktivatör olmaksızın sadece farklı tipte kendiliğinden çimentolaşan uçucu küller ile çeşitli yol sahalarından dört farklı yumuşak taban zemininin stabilizasyonu üzerine yürüttükleri araştırmada, optimum karışım oranını ve stabilize edilmiş

tabakanın kalınlığını dayanım testleri ile belirlemiştir. Uçucu kül ve zeminin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşiminin incelenmesinden ziyade uçucu külün performans analizinin, indeks özellikleri, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı ve belirli bir sahanın CBR testleri gibi laboratuvar testlerine dayandırılması önerilmektedir. Stabilizasyondan kaynaklanan mukavemet artışının kül içeriği, su muhtevası ve kompaksiyon gecikmesi olmak üzere üç temel faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir. Numuneler, 7 günlük kür süresinden sonra serbest basınç mukavemeti ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testlerine tabi tutulmuş, inşaat sırasında sahada yaygın olarak meydana gelen kompaksiyon gecikmesinin etkisini değerlendirmek için, numune setleri su ile karıştırıldıktan 2 saat sonra sıkıştırılmıştır. Serbest basınç dayanımı ve CBR testleri sonuçları üstyapı tasarımında stabilize edilmiş tabakanın kalınlığını belirlemek için kullanılmıştır.

Edil ve diğerleri (2006) [42], yumuşak ince taneli zeminlerin stabilizasyonu için elektrik santrallerinde bitüm altı kömürün yakılmasından elde edilen kendiliğinden çimentolaşan uçucu küllerin etkinliğini değerlendirmiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve esneklik modülü (M_r) testleri, altı inorganik zemin ve bir organik zemin olmak üzere yedi yumuşak ince taneli zemin ile dört uçucu külden hazırlanan karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zeminler 15 ile 38 arasında değişen plastisite indeksleri ile nispeten geniş bir plastisite aralığını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Uçucu küllerden ikisi yüksek kaliteli C Sınıfı uçucu kül iken diğerleri, ASTM C 618'deki [43] C veya F sınıfı kriterlerini karşılamayan spesifikasyon dışı küllerdir. Uçucu kül ilavesi, inorganik zeminlerin CBR ve M_r değerlerinde kayda değer artışlara neden olmuştur. Optimumun %7 su içeriği için, zeminlerin CBR değerleri 1-5 arasında değişirken, %10 uçucu kül ilavesi CBR değerlerinin 8-17 arasında, %18 uçucu kül ilavesi ise CBR değerlerinin 15-31 arasında değişmesine neden olmuştur. Benzer şekilde, zeminlerin M_r değeri 3-15 MPa arasında değişirken, %10 uçucu kül ilavesi 12-60 MPa arasında, %18 uçucu kül ilavesi ise 51-106 MPa arasında M_r değerine yol açmıştır. Buna karşılık, bir uçucu kül dışında, uçucu kül ilavesinin organik zeminin CBR veya M_r değeri üzerinde genel olarak çok az etkisi olmuştur.

Li ve diğerleri (2012) [44], karayolu dolgu inşaatı için uçucu kül-zemin karışımının optimizasyonuna yönelik yürüttükleri çalışmalarında, optimum su içeriğinde hazırlanan zeminler ve uçucu kül-zemin karışımları üzerinde sıkıştırma, serbest basınç dayanımı (q_u) ve kesme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Uçucu külün zemine eklenmesinin, killi zeminin serbest basınç dayanımında kayda değer artışlara neden olduğu, ham zeminin q_u değeri 317 kPa iken, 14 günlük kürlemeden sonra bu değer 940 kPa ile 4300 kPa arasında değişen değerlere yükselebileceği belirlenmiştir.

Hakari ve Puranik (2012) [45], killerin geoteknik karakteristiklerini iyileştirmek için gerçekleştirdikleri bir çalışmada, uçucu kül ilave edilmesinin indeks, sıkıştırma ve mukavemet özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Uçucu külün stabilizatör olarak kullanılmasıyla killerin mühendislik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Likit limit, plastik limit ve büzülme limiti gibi plastisite parametrelerinin değerlerinde olumlu değişiklikler meydana gelmiştir. Likit ve plastik limit değeri azalırken büzülme limiti uçucu kül ilavesiyle artmıştır. Sıkıştırma özellikleri, yani maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevasında meydana gelen azalmayla birlikte artmıştır. Bu zeminlerin serbest basınç dayanımının yanı sıra CBR değerleri, uçucu külün eklenmesi sonucu artış göstermiştir. Çalışma, en uygun sonuçların, optimum uçucu kül yüzdesi olarak adlandırılacak %20 - %40 oranında uçucu kül ilavesiyle elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Mir ve Sridharan (2013) [46], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yüksek kalsiyumlu C sınıfı ve düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu küller şişme potansiyeli yüksek yerel bir zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, 20, 40, 60 ve 80) karıştırılmış ve laboratuvar testleri ile fiziksel özellikler, sıkıştırma karakteristiği ve şişme potansiyeli belirlenmiştir. Test sonuçları, şişebilen zemin-uçucu kül karışımlarının kıvam limitlerinin, sıkıştırma özelliklerinin ve şişme potansiyelinin önemli ölçüde değiştirildiğini ve iyileştirildiğini göstermektedir. Plastisite özelliklerini iyileştirmek için %40 uçucu kül içeriğinin optimum oran olduğu görülmüştür. Zemin-uçucu kül karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasının karışımındaki uçucu kül oranının artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca C sınıfı uçucu küldü %10, F sınıfı uçucu kül de ise %40 karışım oranının şişme potansiyelini en aza indirmek için gereken optimum oran olduğu gözlemlenmiştir.

Camargo ve diğerleri (2013) [41], C sınıfı bir uçucu kül ile stabilize edilen geri kazanılmış bir yol üst yapısı malzemesinin ve bir yol yüzeyi çakılının özelliklerini, geleneksel bir temel malzemesi ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, mekanik özelliklerini iyileştirmek üzere geri kazanılmış yol üst yapısı malzemesine ve yol yüzeyi çakılına uçucu kül eklenmesinin Kaliforniya taşıma oranı (CBR), esneklik modülü (M_r) ve serbest basınç dayanımı değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca bu değerlerin kür süresi ile de değiştiği, 7 ve 28 günlük kür sonrası belirgin kazanımlar elde edildiği görülmüştür. Uçucu külün ilave edilmesi ile geri kazanılmış malzemelerin esneklik modülü deneyinde plastik şekil değiştirmelerinin ve donma-çözülme çevrimlerinin esneklik modülü ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisinin azaldığı belirlenmiştir.

Sengul v.d'nin (2023) [37], yol taban zeminlerinin iyileştirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmada, seçilen bölgesel yüksek plastisiteli bir zemin farklı yüzdelerde (%10, %20, %30 ve %40) uçucu kül ile takviye edilmiş ve bu zemin karışımlarının plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca donma-çözülme çevrimlerinin taban zeminlerinin dayanımına etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uçucu kül ile stabilizasyonda etkili uçucu kül karışım oranının %10 olduğu, uçucu kül katkılı karışımın ve doğal zeminin 28 günlük serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında uçucu kül katkısının dayanımı %85.8 oranında arttırdığı, doğal zeminde donma-çözünme çevrimleri nedeniyle yaklaşık %80 oranında dayanım kaybının meydana geldiği, fakat uçucu kül katkısının donma çözülme çevrimlerinin meydana getireceği dayanım kaybını telafi ederek dayanımı arttırabileceği belirlenmiştir.

2.2.5. Uçucu Kül-Kireç ve Uçucu Kül-Kireç-Çimento

Zeminlerin stabilizasyonu uçucu kül-kireç veya uçucu kül-kireç-çimento kombinasyonlarının birlikte kullanılmasıyla da gerçekleştirilebilir. Uçucu kül, kireç ve su ile karıştırıldığında yüksek basınç dayanımları elde edilen sertleşmiş çimentolu kütle oluşturan silikon ve alüminyum bileşikleri içerir. Uçucu kül kirecin reaksiyona girebileceği bir madde sağladığından kireç ve uçucu kül karışımları granül malzemelerin stabilizasyonunda sıklıkla başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu nedenle uçucu kül-kireç veya uçucu kül-kireç-çimento stabilizasyonu genellikle temel ve alt temel malzemeleri için uygundur.

Birçok araştırma, uçucu kül ve kireç karışımının kullanılmasıyla gerçekleştirilen stabilizasyonun etkinliğinin arttırılabileceğini ve bu şekilde yumuşak zeminlerin işlenebilirliği ile dayanım karakteristiği ve donma-çözülme dayanıklılığının, sadece uçucu kül stabilizasyonu veya kireç muamelesi ile karşılaştırıldığında belirgin şekilde iyileştiği sonucunu ortaya koymuştur [12,28,31].

F sınıfı uçucu küllerin kendiliğinden çimentolaşma özellikleri düşük olduğundan, bir aktive edici ile birlikte kullanılması gerektiği bu nedenle bu küllerin halen yalnızca %32'si faydalı bir şekilde yeniden kullanılabilirliği belirtilmektedir. Karayolları, uçucu küllerin kullanımı ve bertarafı için en büyük uygulama sahası olup her yıl milyarlarca lira tasarruf sağlanabilir. F sınıfı uçucu kül katkılı zemin-çimento veya zemin-kirecin karayollarında temel tabakası olarak kullanımının araştırıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak çimento ve kireç ile hazırlanan zemin-uçucu kül karışımları üzerinde serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı ve esneklik modülü deneyleri yürütülmüştür

[39]. Zemin stabilizasyonu için ağırlıkça %40 oranında F sınıfı uçucu kül ile değişik oranlarda kireç (%4, 7, 10) ve çimento (%1, 2, 4, 5, 7) kullanılmış laboratuvar bazlı mukavemet parametreleri kullanılarak gerekli taban kalınlıkları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçları, karışımın mukavemetinin büyük ölçüde kür süresine, sıkışma enerjisine, çimento içeriğine ve kompaksiyon sırasındaki su muhtevasına bağlı olduğu, kireç katkısının karışımların karayolu üst yapılarında temel tabakası olarak tasarlanması için yeterli mukavemeti sağlamadığı, donma-çözülme döngülerinin çimentoyla işlem görmüş karışımlar üzerinde zararlı bir etki oluşturmadığı belirlenmiştir.

Kireç stabilizasyonu, yüksek kil içeriğine sahip kohezyonlu zeminlerin hem plastik özelliklerini hem de mukavemetini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kireç kilin alümino-silikat fazlarıyla reaksiyona girerek çimento benzeri ürünler üretmektedir. Hızlı bir reaksiyon olup birkaç gün içinde iyileşmelerin meydana geldiği bu yöntemle çok geniş alanlar hızlı, düşük maliyetle ve çevreci bir yaklaşımla stabilize edilebilmektedir. Buna karşın, bazı killerde karşılaşılan sülfat fazları da kireçle reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna neden olabilir. Bu genişleyici bir reaksiyon olup stabilize edilmiş zeminin şişmesi nedeniyle hacim stabilitesi sorunları ortaya çıkabilir. Bu zararlı etkiler genellikle üst yapı tamamlandıktan sonra görünür hale gelir ve sorunu gidermek için önemli maliyetler ortaya çıkabilir.

Uçucu küller beton ve harçtaki sülfat ataklarını bastırmak içinde kullanılmaktadır. Farklı bir malzeme olmasına rağmen kilde kirecin neden olduğu etrenjit oluşumunda yer alan kimya genel olarak benzerdir ve uçucu külün bu uygulamada etrenjit kaynaklı şişme üzerindeki etkilerini incelemeye yönelik çalışmalara ilgi artmaktadır [31].

Yarbaşı ve diğerleri (2007) [28], donma-çözülme döngülerinin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla granüler zeminlerin modifikasyonunda silis dumanı, uçucu kül ve kırmızı çamur gibi atık malzemelerin kullanımını araştırmışlardır. Bunun için, ana kayadan elde edilen iki granüler zemin, silis dumanı-kireç, uçucu kül-kireç ve kırmızı çamur-çimento karışımları ile stabilize edilmiştir. Doğal ve stabilize edilmiş zemin numuneleri 28 gün boyunca kürlendikten sonra donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı, ultrasonik dalga ve rezonans frekansı deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, stabilize edilmiş numunelerin, yüksek donma-çözülme dayanıklılığına sahip olduğunu ve aynı zamanda dinamik davranışlarının da iyileştiğini göstermiştir.

Dayıoğlu ve diğerleri (2017) [47], şişme potansiyeli yüksek olan bir kilin C ve F sınıfı uçucu kül ve kireç ile stabilize edilmesi üzerine yürüttükleri bir araştırmada, farklı sürelerde (0, 7 ve 28 gün) kürlenmiş ve donma ve

çözülme etkilerine maruz bırakılmış örneklerin şişme basıncı ve serbest basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Sonuçlar, kilinin şişme basıncının, kuru zemin ağırlığının %4 oranında kireç ilavesiyle 235 kPa'dan neredeyse 0 kPa'ya, C ve F sınıfı uçucu küllerin ilavesiyle sırasıyla 47 ve 100 kPa'ya kadar önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Kil-uçucu kül karışımlarının aksine, donma ve çözülme döngüsü, kil-kireç karışımlarının şişme basıncını etkilememiştir. Katkı malzemelerinin kullanımının serbest basınç dayanımını arttırdığı, donma çözülme döngüsünün dayanım parametreleri üzerindeki düşürücü etkisini azalttığı belirlenmiştir.

Degirmenci ve diğerleri (2007) [29], çimento, uçucu kül ve fosfojips ile stabilize edilmiş zemin numuneleri üzerinde, Atterberg limitleri, standart Proktor kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Çimento, uçucu kül ve fosfojips ile iyileştirilmiş zeminlerin genellikle plastisite indisi ve optimum su muhtevası azalmış, maksimum kuru birim hacim ağırlığı çimento ve fosfojips içeriği arttıkça artmasına rağmen uçucu kül içeriği arttıkça azalmıştır. İşlem görmüş zeminlerin serbest basınç dayanımları, işlem görmemiş zeminlerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Çimento katkısının uçucu küle göre dayanım üzerinde önemli ölçüde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

2.2.6. Yüksek Fırın Cürufları

Yüksek fırın cürufları, pik demir üretimi sırasında elde edilen yan ürünlerdir. Granül cürufun fiziksel yapısı ve derecelenmesi, cürufun kimyasal bileşimine, suyla söndürme sırasındaki sıcaklığına ve üretim yöntemine bağlıdır. Kireçtaşı akışının kok külüyle füzyonu ile demirin cevherden indirgenmesi ve ayrılmasından sonra kalan silisli ve alüminli kalıntıdan elde edilir. Yüksek fırın cürufları, esas olarak kireç ve diğer bazların silikatları ve alümino-silikatlarından oluşur [48]. Kimyasal bileşimleri çimentoya benzemesine rağmen kendi başına çimentolu bileşikler değildir. Ancak, kireç veya alkali malzeme ilavesiyle hidrolik özelliklerin gelişebileceği özelliklere sahiptir [1]. Yüksek fırın cürufları, beton karışımlarında çimento yerine ve zeminlerin stabilizasyonunda stabilizatör olarak kullanılabilir ve zeminlerin basınç dayanımını, geçirgenliği ve dayanıklılığı artırır.

Yadu ve Tripathi (2013) [49], granüle yüksek fırın cürufu kullanarak yumuşak bir zeminin stabilize edilme potansiyelini değerlendirmiştir. Yumuşak zemini stabilize etmek için %3, 6, 9 ve 12 oranlarında olmak üzere farklı miktarlarda granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş zeminlerin performansı, plastisite indeksi, özgül ağırlık, serbest şişme indeksi, sıkıştırma, şişme basıncı, Kaliforniya

taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı gibi fiziksel ve mukavemet performans deneyleri ile değerlendirilmiştir. Mukavemet performans deneylerine dayanarak, optimum granüle yüksek fırın cürufu miktarı %9 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar granüle yüksek fırın cürufunun kullanılmasının yumuşak zeminlerin mukavemetini artırdığını göstermiş, %9 granüle yüksek fırın cürufu ile modifiye edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı ham zemine kıyasla yaklaşık %28 daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde, zeminlerin CBR değerlerinde önemli iyileşmeler gözlenmiştir.

Pathak ve diğerleri (2014) [50], öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun zeminin optimum su muhtevası, maksimum kuru yoğunluk, plastik limit, likit limit, sıkıştırma, serbest basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı gibi mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak ve stabilize edilmiş zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla, zemine kuru ağırlıkça %0'dan %25'e kadar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu eklemiştir. Genel olarak granüle yüksek fırın cürufu ilavesi ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştiği görülmüş, maksimum kuru yoğunluk değeri artarken, optimum nem içeriği artan granüle yüksek fırın cürufu ile azalmış ve %25 karışım oranında maksimum kuru yoğunluk değeri elde edilmiştir.

Fasihnikoutalab ve diğerleri (2020) [51], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, killi bir zemini stabilize etmek için olivin (Mg_2SiO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Stabilize edilmiş zeminin mekanik ve mikroyapısal özellikleri, 7, 18 ve 90 günlük kürlenme sürelerinin ardından serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile değerlendirilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile işlem görmüş zeminin serbest basınç dayanımı (NaOH ile aktivasyon olmadan), 90 gün sonra en yüksek cüruf dozajında bile, orijinal zemine kıyasla sadece hafif bir artış (142 kPa) göstermiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş zemin karışımına olivin eklendiğinde, serbest basınç dayanımı 90 gün sonunda 444 kPa'ya yükselmiş, bu karışıma olivin ve aktivatör olarak NaOH eklendiğinde ise, serbest basınç dayanımı aynı süre sonunda 6000 kPa'nın üzerine çıkmıştır. Bu önemli mukavemet artışı, sırasıyla cüruf ve olivinde bulunan Ca ve Mg'un çözünmesini ve daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayan ve C-S-H ve M-S-H jellerinin bir karışımını oluşturan NaOH tarafından sağlanan daha yüksek reaksiyon derecesine bağlanmıştır.

Maneli ve diğerleri (2016) [52], zemin iyileştirme uygulamasında %12 uçucu kül, %8 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %1-9 oranlarında kireç

kullanılmasının etkisini değerlendirmiştir. 7, 28, 60 ve 90 gün süreyle kürlenmiş modifiye zeminin performansı, standart spesifikasyonlara göre gerçekleştirilmiş sıkıştırma, Kaliforniya taşıma oranı ve serbest basınç dayanımı deneyleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı sıkıştırma seviyeleri ve kürlenme periyotları için ilave edilmiş atık malzemelerin etkisi, Kaliforniya taşıma oranı ve serbest basınç dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Stabilize edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, tüm kürlenme periyotları için %97 ve %100 sıkıştırma düzeyinde, alt temel malzemesi için şartname değerlerini karşılamıştır.

2.2.7. Puzolanlar

Puzolanın genel tanımı, köken, bileşim ve özellikler açısından büyük farklılıklar gösteren çok sayıda malzemeyi kapsar. Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri hiç olmayan veya çok az olan silisli ve alüminli malzemelerdir; ancak ince öğütülmüş formda ve nem varlığında, bağlayıcı özelliklere sahip bileşikler oluşturmak üzere normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerler. Dolayısıyla, hem doğal hem de yapay puzolanlar tamamlayıcı çimentolu malzemeler olarak kullanılabilir. Yapay puzolanlar, örneğin metakaolin elde etmek için kaolin killerin termal aktivasyonu ile üretilebildiği gibi kömürle çalışan elektrik santrallerinden kaynaklanan uçucu küller gibi yüksek sıcaklık süreçlerinden atık veya yan ürün olarak elde edilebilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan puzolanlar uçucu kül, silisyum eritme işleminden kaynaklanan silika dumanı, yüksek reaktif metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi silika bakımından zengin yanmış organik madde kalıntıları gibi endüstriyel yan ürünlerdir.

Bir puzolanın kalsiyum hidroksit ve su ile reaksiyona girme kapasitesinin ölçümü, puzolanik aktivitesinin ölçülmesiyle belirlenir. Kaolinit, montmorillonit, mika ve illit gibi kil mineralleri puzolanik yapıdadır. Kül gibi yapay puzolanlar, kil, şist ve bazı silisli kayalar gibi puzolan içeren doğal malzemelerin ısıl işlemiyle elde edilen ürünlerdir. Bitkiler yakıldığında, besin olarak topraktan alınan silika geride küllerin içinde kalarak puzolanik elemente katkıda bulunur. Pirinç kabuğu külü, pirinç samanı ve küspe silika açısından zengin olup mükemmel bir puzolan oluşturur [1].

Doğal puzolanlar belirli yerlerde bol miktarda bulunur ve İtalya, Almanya, Yunanistan ve Çin gibi ülkelerde Portland çimentosuna katkı olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Büyük ölçüde volkanik camdan oluşan volkanik küller ve pomzalar, volkanik camın alkali sularla etkileşime girerek zeolitlere dönüştüğü çökeltiler gibi yaygın olarak kullanılmaktadır. Tortul kökenli yataklar daha az yaygındır. Silisli diyatom mikro iskeletlerinin birikmesiyle

oluşan diyatumlu topraklar öne çıkan bir kaynak malzemedir. Doğal puzolanlar volkanik kökenli malzemeler ve tortul kökenli malzemeler olarak iki kategoriye ayrılabilir. Birinci kategori, patlayıcı volkanik püskürmeler sonucu atmosfere atılan erimiş magmanın sönmesiyle oluşan malzemeleri içerir. Patlayıcı püskürmenin iki sonucu vardır. İlk olarak, başlangıçta magma içinde çözülmüş olan gazlar, basıncın aniden düşmesiyle serbest kalır. Bu da ortaya çıkan malzemedeki mikro gözenekli bir yapıya neden olur. İkinci olarak, erimiş magma parçacıklarının atmosferle temas ettiğinde hızla soğuması, katılaştırmış malzemenin camsı yapıya sahip olmasıyla sonuçlanır. Doğal puzolanların ikinci kategorisi killeri ve diyatumlu toprağı içerir. Killeri, termal olarak işlenmedikleri sürece çok sınırlı puzolanik reaktiviteye sahiptir. Tortul bir kayaç olan diyatumlu toprak, esas olarak bir tür alg diyatomların fosilleştirmiş kalıntılarından oluşur. Amorf silisli bir yapıya sahiptir ancak kütlece %30'a kadar kristalin fazlar içerebilir.

Bahadori ve diğerleri (2019) [53], problemleri zeminlerden biri olan marn zeminin stabilizasyonu için üç tür doğal puzolanın (volkanik kül) kullanımına ilişkin deneysel bir çalışma yürütmüştür. X-ışını floresan (XRF) analizi kullanılarak marn zeminin tanımlanması ve sınıflandırılması yapılarak, %5, 10 ve 15'lik üç tip volkanik kül stabilizatör içeriğinin etkisi, maksimum kuru yoğunluk (Standart Proctor Deneyi) ve optimum su muhtevası, Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü belirlenerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, stabilizatör olarak volkanik kül ile stabilize edilen marn zemin karışımlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Volkanik kül içeriğindeki ve kür süresindeki artışın stabilize marn zeminin verimliliğini artırırken genişlemesini ve sünekliğini azaltmaktadır.

Al-Swaidani ve diğerleri (2016) [54], doğal puzolan ilavesinin kireçle stabilize edilmiş killi zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla zemine %0-20 arasında değişen oranlarda doğal puzolan %0-8 arasında değişen oranlarda kireç ekleyerek, kıvam, kompaksiyon, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve büzülme özelliklerini araştırmıştır. Doğal puzolanın stabilize edici bir madde olarak ilave edildiğinde kireçle işlem görmüş killi zeminlerin incelenen özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilebileceği, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) analiz sonuçları ile işlem görmüş killi zeminin mikro yapısında önemli değişiklikler oluştuğı, killi partiküllerin daha iyi floküle olduğu ve çimentolaştırıcı malzemelerin daha fazla oluştuğı belirlenmiştir.

Harichane ve diğerleri (2011) [12], doğal puzolanın, kirecin veya her ikisinin kombinasyonunun kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Doğal puzolan, kireç ve doğal puzolan-kireç iki kohezyonlu zemine sırasıyla %0-20 ve %0-8 oranlarında eklenmiştir. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için işlem görmüş 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilmiş ve işlem görmemiş zemin numuneleri üzerinde kıvam, sıkıştırma, drenajsız üç eksenli basınç ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kohezyonlu zeminlerin doğal puzolan ve kireç kombinasyonu ile başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği belirtilmiştir.

Yin ve diğerleri (2022) [55], doğal kireç, volkanik kül ve bunların karışımları ile stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerini Atterbeg limitleri, proctor, şişme yüzdesi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri ile araştırmıştır. Volkanik külün %20 ve kirecin %3 oranında ilave edilmesi doğal CBR değerlerini 10.76 kat artırırken, plastisiteyi %29 ve kabarma yüzdesini %88 azaltmıştır. Stabilize edilmiş zemin minimum şişme, plastisite ve mukavemet gereksinimlerini karşıladığından yarma ve dolguya alternatif olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

2.2.8. Bitümlü Malzemeler

Bitümler, karbon disülfürde çözünebilen ve sulu olmayan hidrokarbon sistemleridir. Bitümlü zemin stabilizasyonu, kontrollü miktarda bitümlü malzemenin mevcut bir zemin veya agrega malzemesiyle iyice karıştırılarak stabil bir temel veya aşınma yüzeyi oluşturulması işlemi ifade eder. Bitüm stabilizasyonu katran, asfalt çimentosu, katbek asfaltı veya asfalt emülsiyonları kullanılarak gerçekleştirilir. Katranlar, kömür gibi organik maddelerin destrüktif damıtılmasıyla üretilir. Asfalt çimentosu ise, rafine edilmiş petrol bitümlerinden elde edilir. Asfalt çimentosu genellikle doğrudan kullanılmayacak kadar viskoz olduğundan, katbek asfaltları ile asfalt emülsiyonlarının kullanımı daha yaygındır. Ancak bunlar daha uzun bir kuruma süresi gerektirirler. Ayrıca enerji kısıtlamaları ve kirlilik kontrolü çabaları nedeniyle katbek asfaltları yerine emülsiyonlar tercih edilmektedir [56]. Bitümlü malzemeler bir zemine eklendiğinde, hem kohezyonu hem de su emilimini azaltır. Zeminlerin bitümlü malzemelerle stabilizasyonunda oluşan bağlayıcı filminin rolü zeminin özelliklerine bağlı olarak değişir. Kum veya çakıl gibi iri taneli granüler zeminlerde bağlayıcı filmi zemini su geçirmez hale getirmesinin yanında danelerini birbirine bağlayarak zeminin yük taşıma kapasitesini artırır. İnce taneli kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda, stabilize edilen zemin tabakasının geçirimsizliğinin sağlanması bitümlü malzeme kullanımının esas amacıdır. Genellikle, granüler

veya plastik olmayan zeminlerin bitümlü malzemeler kullanılarak stabilize edilmesiyle başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Bitümlü malzemelerle zeminlerin stabilizasyonunda zeminlerin dayanıklılık, stabilite ve geçirimsizlik özelliklerine etkileyen dört ana etken mevcuttur. Bunlar, zemin cinsi, bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı, karıştırma ve sıkıştırmadır. Zeminin gradasyonu, plastisitesi ve pülverize edilebilme durumu stabilize edilmiş zeminin direnci üzerinde rol oynar. Genellikle, zeminin tane boyutu küçüldükçe ve plastisitesi arttıkça, bitümlü malzeme ile karışması zorlaşmaktadır. Çakılın varlığı durumunda stabilize edilmiş zeminin direnci ve dayanıklılığı artarken gerekli bitümlü malzeme miktarı azalır. Bitümlü malzemenin karışım içinde üniform dağılımını sağlamak ve sıkıştırmayı kolaylaştırmak için zemin içinde bir miktar su bulunmalıdır. Zeminin pülverize edilmesinde zeminin plastisitesi ve tane boyutunun yanında zeminin su içeriği de rol oynar. Bitümlü malzemelerle etkili bir şekilde stabilize edilebilen zeminler genellikle 200 nolu elekten geçen ince malzeme oranı %30'dan ve plastisite indisi (PI) değeri %10'dan az olan zeminlerdir [57].

Bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı, stabilize edilmiş zeminin stabilitesi üzerinde etkilidir. Bitümlü malzeme püskürtme yoluyla 2-3 defada uygulanırsa toplam miktarı 3-4 lt/m² olur. Sabit tesislerde zeminle karıştırılırsa, bitümlü malzeme oranı karışım ağırlığının %4-6'sı kadardır. Kullanılacak bitümün türü, stabilize edilecek zeminin türüne, yapım yöntemine ve hava koşullarına bağlıdır. Don bölgelerinde, yüksek sıcaklıklardaki hassasiyeti nedeniyle bağlayıcı olarak katran kullanımından kaçınılmalıdır. Sıcak iklimlerde, yavaş sertleşen katbek asfaltlarının kullanılması durumunda, likit haldeki asfaltın sertleşmeden önce zemin taneleri arasına iyice girmesi sağlanmış olur. Soğuk iklimlerde ve fazla miktarda taneli malzeme içeren zeminler için hızlı kuruyan katbek asfaltların kullanılması daha uygundur. Yol katranları nemli iklimlerde diğer bitümlü malzemelere göre daha iyi sonuç verirken asfalt emülsiyonları genellikle sıcak iklimlerde kullanılır.

Karışımında kullanılan makinenin tipi, karıştırma enerjisi, bitümlü malzemenin ilave edilme şekli ve karıştırma sırasındaki sıcaklık derecesi iyi bir karışımın elde edilmesi ve karışımın üniform olması açısından önemlidir. Uygulama sıcaklıkları kullanılacak bitümlü malzemenin cinsine bağlı olarak değişir. Soğuk ve nemli havalarda özel önlemler alınmadıkça bitümlü malzeme ile stabilizasyon yapılması sakıncalı olduğundan stabilizasyonun sıcak mevsimde yapılması gerekir.

Sıkıştırma miktarı ve sıkıştırma sırasında karışımın içerdiği likit oranı stabilizasyonun kalitesi ve direnci üzerinde etkilidir. Sabit plantlerde asfalt

çimentosu kullanılarak gerçekleştirilen stabilizasyonlarda, agrega ısıtılarak bitümlü malzeme ile iyice sarılması sağlanmaktadır. Agreganın ısıtılmadan kullanılması halinde, karışımın yüksek sıcaklık derecelerinde 200-300 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak yapılması zorunludur. Bu tip stabilizasyonlar karıştırmadan hemen sonra serilip sıkıştırılmalıdır [3].

Çimento ve bitüm emülsiyonunun zeminle karıştırılarak zeminin mukavemetinin, dayanıklılığının ve ilgili diğer özelliklerinin iyileştirilebileceğini rapor eden birçok çalışma bulunmaktadır [58,59]. Bu şekilde çimento etkisi ile rijitliği artırılan stabilize edilmiş tabakanın bitüm emülsiyonu ile esnekliği ve zemin geçirgenliği iyileştirilerek daha iyi yük aktarımı sağlanmakta ve üst yapıların taşıma kapasitesi artırılmaktadır.

2.2.9. Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç kabuğu, pirinç öğütme işleminden geriye kalan bir yan ürün olup dünya çapında yılda yaklaşık 100 milyon ton kabuk üretilmektedir [60]. Pirinç kabuğu, aşındırıcı karakteri ve neredeyse ihmal edilebilir düzeyde sindirilebilir protein içeriği nedeniyle hayvan yemi olarak kullanılmaya uygun olmadığı gibi, yüksek kül ve lignin içeriği yüzünden kâğıt üretimi için de bir hammadde olarak kullanılamamaktadır [61]. Bu nedenle atık hacmini azaltmak için pirinç kabuğu ya açık yığınlar halinde yakılmakta ya da pirinç kurutmak ve enerji üretmek için fırınlarda yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakma işlemi, pirinç kabuğundaki organik bileşikler ve suyu uçurduğundan kütlelerin yaklaşık %17-25'i pirinç kabuğu külü olarak kalmaktadır [61]. Çok büyük miktarlarda üretilen bu atık külün değerlendirilmesi ile, bertaraf maliyeti ve çevresel zararının azaltılması, inşaat maliyetinin düşürülmesi ve öncelikli kullanımlar için yüksek nitelikli malzemelerin korunması sağlanabilir.

Pirinç kabuğu külü, kolaylıkla temin edilebildiğinden potansiyel olarak zemin stabilizasyonunda kullanılabilecek puzolanik bir malzemedir. Puzolanlar silisli ve alüminli malzemeler olup kendi başlarına çimentolaşma değerleri çok azdır veya hiç yoktur. Ancak, ince bölünmüş formda ve nem varlığında, çimentolaşma özelliklerine sahip bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerler. Pirinç kabuğu külü, silika bakımından zengin olup yaklaşık %90 oranında silika içerir, bu da tüm bitki kalıntıları arasında en yüksek konsantrasyondur [61]. Pirinç kabuğu külü, zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için tek başına ilave edilerek ya da çimento ve kireç gibi bir hidrolik aktivatör ile karıştırılarak kullanılabilir [60,62]. Buna rağmen, çoğu zaman çimentolaşma özelliğinin olmaması nedeniyle zemin stabilizasyonunda tek başına kullanılamaz [63].

Killi, killi kum, siltli kil ve siltli kum zeminler pirinç kabuğu külü ve kireç veya çimento ile muamele edildiğinde serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [60,63]. Pirinç kabuğu külü ve çimento ile stabilize edilen lateritik ve killi zeminlerin serbest basınç dayanımlarının sadece çimento ile muamele edilmeleri durumundaki artışına kıyasla çok az veya önemsiz artışlar gösterdiği belirlenmiştir [64]. Belirli bir kireç veya çimento içeriği için maksimum serbest basınç dayanımına karşılık gelen optimum pirinç kabuğu külü içeriği zemin türüne, külün özelliklerine, hidrolik aktivatöre ve kürlenme süresine bağlı olarak değişmektedir [60,63].

Rahman (1986) [64] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, zemini oluşturan tanelerin %45'i 75 μm 'dan küçük olan lateritik zemin çeşitli oranlarda pirinç kabuğu külü, kireç ve çimento ile stabilize edilmiştir. Bu stabilizatörlerin etkilerini incelemek için Atterberg limitleri, standart Proctor sıkıştırma deneyi, serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı deneyleri yapılarak, ekonomik stabilizasyon için gerekli pirinç kabuğu külü, kireç ve çimento miktarları belirlenmiştir. Bu çalışma, lateritik zemin stabilizasyonunda kireç ve çimentoya kıyasla pirinç kabuğu külünün potansiyelini ortaya koymuştur. Yol yapımında, temel malzemeleri için %7 çimento, alt temel malzemeleri için %5 kireç ve yine alt temel malzemeleri için %18 pirinç kabuğu külü önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranının 1 gün içinde pirinç kabuğu külündeki artışla sırasıyla %20 ve %18'e kadar arttığını, daha sonra azalmaya başladığını göstermiştir.

Pirinç kabuğu külü ile birlikte başka stabilizatörlerin de kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Basha ve diğerleri (2005) [63], tortu zeminlerin stabilizasyonunu, pirinç kabuğu külü ve çimento kullanarak kimyasal olarak incelemiştir. Zeminin kompaksiyon, dayanım ve X-ışını kırınımı gibi özellikleri değerlendirildiğinde, hem çimento hem de pirinç kabuğu külünün zeminlerin plastisitesini azalttığı, maksimum kuru yoğunluğu azaltırken, optimum su muhtevasının arttığı belirlenmiştir. Plastisite, sıkıştırma ve mukavemet özellikleri ve ekonomi açısından bakıldığında, %6-8 çimento ve %10-15 pirinç kabuğu külü ilavesi optimum karışım oranı olarak önerilmiştir.

Pirinç kabuğu külü kendinden çimentolu olmadığından, zemin dayanımını artırmak için çimento oluşturmak üzere kireç gibi bir hidrolik bağlayıcı eklenmelidir. Behak (2017) [65], kumlu zeminlerde pirinç kabuğu külü ve kireç kombinasyonlarını uygulanarak stabilizasyon üzerine yürüttüğü çalışmada, pirinç kabuğu küllerinin alkalın reaktivitesi, X-ışını difraktometri analizi ve tutuşma kaybı testleri ile incelenmiştir. Farklı pirinç kabuğu külü ve kireç içerikli zemin karışımlarında çimentolu bileşiklerin oluşumu gözlemlenmiştir. Pirinç kabuğu külü ve kireç ile muamele edilmiş

zeminler üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri dayanımda artışların meydana geldiğini göstermiştir.

Prasanna (2022) [66], zemin numunelerinin uçucu kül ve pirinç kabuğu külü atıkları ile stabilize edilmesi üzerine yürüttüğü araştırmada, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kombinasyonu, zemine %5, %10, %15, %20 ve %25 gibi değişen oranlarda eklenmiştir. Zemin numuneleri üzerinde kompaksiyon, kesme kutusu, likit limit ve plastik limit gibi çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevası, kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi değerlerin farklı yüzdelerde uçucu kül, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kombinasyonları için güçlendirilmemiş zemine kıyasla artması nedeniyle zemin özelliklerinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

2.2.10. Kireç Fırını Tozu

Kireç fırını tozu, kireç üretiminde toplanan bir yan üründür. Hızlı kireç üretim tesislerinin fırınlarında toplanan kireç fırını tozu, gerçekte Portland çimentosu gibi karbon yoğun bağlayıcıların yerini almak üzere stabilizasyon faaliyetlerinde kullanılmaya uygun olduğu düşünülen yüksek kalsiyum içeriğine sahip bir maddedir. Kireç fırını tozu, fiziksel olarak çimento fırını tozuna benzese de kimyasal olarak oldukça farklıdır [67].

Taze kireç fırını tozu, serbest kireç ve serbest magnezya içeriği ile doğrudan ilişkili olan göreceli reaktiviteye dayalı olarak iki kategoriye ayrılabilir. Serbest kireç ve magnezya içeriği, en çok kullanılan hammaddenin kalsitik veya dolomitik kireçtaşı olmasına bağlıdır. Yüksek serbest kireç içeriğine sahip kireç fırını tozu oldukça reaktiftir ve su eklendiğinde ekzotermik bir reaksiyon üretir. Kireç fırını tozu, stabilizasyon amacıyla hidratlı kirecin doğrudan yerine kullanılabilir olması nedeniyle ticari ilgiye sahiptir [67].

Kireç üretiminin bir yan ürünü olan kireç fırını tozu, killi zeminlerin işlenebilirliğini artırmak için bir katkı maddesi olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak, bu amaçla kullanılan kireç fırını tozunun faydalarını ölçmek için yapılan araştırmalar sınırlıdır. Kakrasul ve diğerleri (2018) [68], taban zeminlerinin stabilizasyonunda kireç fırını tozunun kullanımına yönelik yürüttükleri deneysel çalışmada, iki farklı sahadan elde edilen killi zemin farklı oranlarda kireç fırını tozu ile karıştırılmıştır. Doğal ve kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminlerin Atterberg limitleri, karıştırma su muhtevası-yoğunluk ilişkileri, şişme potansiyeli, dayanıklılığı ve serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Kireç fırını tozu ile işlem görmüş numuneler 1-2 saat ve 1, 3, 7 ve 28 günlük sürelerde sıkıştırılmış ve kürlenmiş, ardından serbest basınç dayanımının ve hacim genişlemesinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır.

Kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminde, işlem görmemiş zemine göre %100'den fazla bir mukavemet artışı gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminin mukavemetinin zamanla sürekli olarak arttığını göstermiştir. Kireç fırını tozu ayrıca taban zemininin plastisitesini ve şişme potansiyelini önemli ölçüde azaltmış ve killi zeminin işlenebilirliğini ve dayanıklılığını geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kireç fırını tozunun killi taban zeminlerinin modifikasyonu veya stabilizasyonu için kullanılabilceği değerlendirilmiştir.

Düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu küllerin, kombinasyon halinde kireç fırını tozundaki silika eksikliğini potansiyel olarak tamamlayabileceği düşünülmektedir. Arulrajah ve diğerleri (2017) [69], endüstriyel bir yan ürün olan ve düzenli depolama sahalarında biriken mevcut stokların azaltılması için bir çözüm bulmak üzere uçucu kül ve kireç fırını tozu kullanarak stabilize edilen geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atıklarının mukavemetini ve dayanıklılığını artırmayı amaçlamışlardır. Bu şekilde Portland çimentosu üretiminden kaynaklanan genel karbon emisyonlarının da azaltılacağı düşünülmektedir. Kireç fırını tozu ve uçucu kül ile stabilizasyon işleminin, agregalar arasındaki temas alanını artırarak zemin matrisinin yük taşıma kapasitesini geliştirdiği belirlenmiştir. İnşaat ve yıkım agregaları + %20 kireç fırını tozu + %10 uçucu kül kombinasyonunun mukavemet ve esnek davranış açısından optimum karışım oranı olarak altyapı uygulamaları için uygun bir çözüm olduğu bulunmuştur.

Kang ve diğerleri (2015) [70], killi yol üst yapısı temel malzemelerinin stabilizasyonunda C sınıfı uçucu külü ve kireç fırını tozunun etkinliğinin araştırıldığı çalışmada, kimyasal olarak modifiye edilmiş zemin üzerinde, Proktor kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, Briaud kompaksiyon cihazı modülü ve termal iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, optimum su muhtevasında statik sıkıştırma ile oluşturulmuş, çeşitli kürlenme sürelerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ağırlıkça %20'ye kadar C sınıfı uçucu kül ilave edilmesinin, kuru birim ağırlığı 16.8'den 17.4 kN/m³'e, serbest basınç dayanımını 18.2 kPa'dan 497.2 kPa'ya, Briaud kompaksiyon cihazı modülünü 40 MPa'ya kadar yükseltebileceğini göstermiştir. Kireç fırını tozunun, zayıf zeminlerin serbest basınç dayanımını ve rijitliği nispeten küçük karıştırma oranlarında arttırabilen iyi bir stabilize edici olduğu belirlenmiştir.

2.2.11. Çimento Fırını Tozu

Çimento fırını tozu ile stabilize edilmiş zeminlerde çimentoda gözlemlenen benzer kimyasal reaksiyon ve hidrasyon ürünleri görülmektedir. Çimento

fırını tozu daha ileri bir işleme veya arıtmaya ihtiyaç duymayan bir atık ürün olduğundan ucuz olup toz halinde çimento yerine büyük ölçekli projelerde kullanılabilir. Çimento fırını tozunun zemin stabilizasyonundaki etkinliği hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerine bağlıdır. Partikül dağılımı, CaO ve SiO₂ yüzdesi, alkali ve sülfat içeriği çimento fırını tozunun stabilizasyon etkinliğini etkilemektedir.

Adeyanju ve Okeke (2019) [71], çimento fırını tozunun bir stabilizatör olarak uygunluğunu araştırmak için, %7.5, 10, 12.5 ve 15 gibi değişen oranlarda killi zemin ile karıştırmıştır. Bu deneysel çalışmada CBR değerinin %1.49'dan %28.6'ya yükseldiği ve %10 çimento fırını tozu ile karıştırılan zeminin 7 günlük bir kürlenme süresinden sonra en iyi mekanik iyileşmeyi gösterdiği belirlenmiştir. Zeminin kuru ağırlığına göre çimento fırını tozunun miktarındaki artışla stabilize zeminlerin geoteknik özelliklerindeki iyileştirmenin artacağı ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarıyla uyumlu olarak çimento fırını tozu gibi endüstriyel atıkların zeminlerin stabilizasyonunda faydalı bir şekilde kullanılabilceği belirlenmiştir.

Çimento fırını tozu, kireç, çimento ve C sınıfı uçucu külden oluşan geleneksel stabilizasyon maddelerine bir alternatif teşkil etmektedir.

Solanki ve diğerleri (2007) [72], farklı oranlarda çimento fırını tozunun zemin stabilizatörü olarak etkinliğini değerlendirmek için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmiştir. Hazırlanan silindirik numuneler sabit sıcaklık ile kontrollü neme sahip nemli bir odada 28 gün boyunca kürlenmiştir. Kürlenmeden sonra numunelerin esneklik modülü (M_p), elastisite modülü (M_E) ve serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Çimento fırını tozu ile stabilize edilmiş numunelerin M_p , M_E ve serbest basınç dayanımı değerlerinin karışımdaki çimento fırını tozu oranının artması ile arttığı, kimyasal reaksiyonlara bağlı ürünlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilen mikrograflara dayanarak zemin boşluklarında açıkça görüldüğü ve mukavemetteki artışın sebebi olduğu sonucuna varılmıştır.

Hossain ve Mol (2011) [73], killi zeminleri farklı oranlarda çimento fırını tozu, volkanik kül ve bunların kombinasyonları ile stabilize ettikleri çalışmada, stabilizatörlerin etkisi Atterberg limitleri, standart Proktor, serbest basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, esneklik modülü ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri ile değerlendirmiştir. Suya daldırmanın dayanım, su emilimi ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi incelenerek, 14 tane stabilize edilmiş zemin karışımının dayanıklılık özellikleri araştırılmış, dayanıklılık, esneklik modülü ve Kaliforniya taşıma oranı arasındaki korelasyonlar kurulmuştur. Stabilize zemin karışımlarının, tatmin edici dayanım ve dayanıklılık özellikleri göstermesi yerel mevcut zeminlerin,

volkanik kül ve çimento fırını tozu ile stabilize edilerek kullanımı ile inşaat endüstrisine sürdürülebilirlik sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

Ismail (2013) [74], çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozu kullanarak şişen, yüksek plastisiteli Pliyosen çökeltileri zemininin, şişme potansiyelini düşürmeyi ve geoteknik özelliklerini iyileştirmeyi amaçladıkları çalışmada kimyasal stabilizasyon öncesi ve sonrasında mikroyapısal değişiklikler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca zeminin plastisite, sıkıştırma parametreleri, serbest basınç dayanımı (q_u), ultrasonik hızlar ve serbest şişme gibi geoteknik özellikleri, stabilizasyon öncesi ve sonrası ölçülmüştür. Çimento fırını tozunun optimum içeriği %16, kireçli çimento fırını tozunun optimum içeriği ise pH testine göre %3 kireç ve %14 çimento fırını tozu olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozunun eklenmesinin, maksimum kuru yoğunlukta bir azalmaya ve optimum su muhtevasında bir artışa yol açtığını göstermiştir. Çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozu kullanılan numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımının, ultrasonik boyuna (V_p) ve kesme (V_s) hız değerlerinin arttığı, zeminin serbest şişme yüzdesinin uygulama sonrasında %80.0'dan %0.0'a düştüğü belirlenmiştir.

2.2.12. Geopolimer

Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar olarak da bilinen geopolimerler, son yıllarda zemin stabilizasyonu için çimento gibi geleneksel bağlayıcılara bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Geopolimerler, işlenmiş zeminlerin içinde çimentolu ürünler oluşturmak için endüstriyel atıkların alkali aktivasyonunu kullanır ve killi toprakların mekanik ve fiziksel niteliklerini artırır. Geopolimerler, hızlı sertleşen, yüksek mukavemete, düşük büzölmeye ve asit-alkali korozyon direncine sahip bir tür yeşil çimento esaslı malzemeler olup soğuk bölgelerde taban zeminlerinin sıklığını, stabilitesini ve dayanıklılığını sağlamak için çok faydalıdır.

Geopolimerler genellikle yüksek konsantrasyonda alüminosilikat içeren birçok malzemenin sentezlenebilir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi silika (Si) ve alümina (Al) mineralleri bakımından zengin olan geopolimer öncülleri, zemin stabilizasyon uygulamalarında geopolimerizasyon için önerilmektedir.

Entegre bir süreç olan geopolimerizasyon, geopolimerlerin sentezlenmesi için süzme, difüzyon, yeniden yönlendirme, polimerizasyon ve yoğunlaşmayı içerir. Aşırı alkali koşullar altında silika ve alümina içeren kaynak malzemelerden oksit minerallerinin çözünmesi, çözünmüş oksit

minerallerinin yönlendirilmesi ve ardından jelleşme, üç boyutlu bir siliko- alüminat yapı ağı oluşturmak için polikondenzasyon, polimerizasyonun üç aşamasını oluşturur.

Wang ve diğerleri (2021) [75], metakaolin bazlı geopolimer bağlayıcı ile iyileştirilen killi zeminin serbest basınç dayanımının metakaolin ve alkali-aktivatör içeriği ile önce arttığını ve sonra azaldığını belirledikleri deneysel çalışmada, metakaolin ve alkali-aktivatörün geopolimer bağlayıcıdaki ideal karışım oranının yaklaşık 2:1 olduğu belirlenmiş, geopolimer bağlayıcının killi zemindeki maliyet açısından optimum karışım oranı yaklaşık %12 olarak önerilmiştir. Geopolimer ile iyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, kesme dayanımı ve Brezilya yarma dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Zemin stabilizasyonunda Portland çimentosu yerine çevre dostu bir alternatifin geliştirilmesine yönelik ilgi artmaktadır. Ghadir ve diğerleri (2021) [76], volkanik kül bazlı geopolimerin çimentoya alternatif bir zemin stabilizatörü olarak kullanılmasının fizibilitesini, kayma mukavemeti davranışlarını ve yaşam döngüsü değerlendirmesini karşılaştırarak değerlendirmiştir. Kütleme koşullarının, dikey sınırlamaların, bağlayıcı içeriklerinin ve alkali aktivatör özelliklerinin etkileri araştırıldığı çalışmada, bağlayıcı türünden bağımsız olarak artan bağlayıcı içeriğinin agregasyon yoluyla killi zeminin yapısını değiştirdiğini ve böylece kayma direncini artırdığını ortaya koymuştur. Parçacıklar arası bağlar daha yüksek kütleme sıcaklıklarında daha hızlı gelişmiş ve parçacıkların birbirine kenetlenmesi daha yüksek sınırlama basınçlarında artmıştır.

Sıradan Portland çimentosunu endüstriyel atık bazlı geopolimerlerle değiştirerek “düşük karbon ayak izine” sahip çimentolu malzemeler geliştirmek, zemin stabilizasyon teknolojisinin geliştirilmesinde daha çevreci bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Zhou ve diğerleri (2021) [77], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, düşük kalsiyum içerikli geopolimerler, yüksek kalsiyum içerikli geopolimerler ve sıradan Portland çimentosu ile stabilize edilen yumuşak deniz zemininin mekanik özellikleri ve mikro yapısı, serbest basınç dayanımı (UCS) testi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karşılaştırılmıştır. Düşük kalsiyum içerikli ve yüksek kalsiyum içerikli geopolimerler sırasıyla alkali ile aktive edilmiş kömür içeren metakaolin ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile üretilmiştir. Sonuçlar, nispeten yüksek alkali aktivatör/öncül madde oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve NaOH konsantrasyonunun kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerin mukavemet gelişimi için faydalı olduğunu, ancak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler için elverişsiz olduğunu göstermiştir. Kömür içeren metakaolin

ile muamele edilmiş numuneler için optimum alkali aktivatör/öncül madde oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5 ve 75:25 iken, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler için 1.0 ve 25:75'tir. Pratik uygulamalar için önerilen NaOH molaritesi 12 M'dır. Aynı öncül içeriğinde, kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numuneler, ortam sıcaklığında düşük reaktiviteleri nedeniyle sıradan Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerden daha düşük bir mukavemet göstermiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler, prekürsör içeriği ağırlıkça %20'den yüksek olduğunda sıradan Portland çimentosu ile muamele edilmiş numunelerden daha yüksek bir mukavemete sahip olmuştur. Kürleme süresi arttıkça, kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerin mukavemeti doğrusal olarak artarken, sıradan Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerin mukavemeti logaritmik olarak artmış ve kürlemenin ilerleyen aşamalarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerin mukavemetinde bir azalma tespit edilmiştir. Sıcaklığın artırılması çimentolu ürünlerin oluşumunu hızlandırmış ve özellikle kömür içeren metakaolin uygulanmış numuneler için kür süresini kısaltmıştır. Kömür içeren metakaolin, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve sıradan Portland çimentosunun yumuşak deniz zemininin üzerindeki stabilizasyon etkisi esas olarak yoğun üç boyutlu jel ağ yapısının oluşumuna bağlanmıştır. Sıradan Portland çimentosu ile muamele edilmiş numunelerin hidratasyon ürünleri C-S-H jelleri, etrenjit (AFt) ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iken, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerde C-(A)-S-H jelleri ve kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerde N-AS-H jelleri gözlenmiştir.

Ghadir ve Ranjbar (2018) [78], volkanik kül bazlı geopolimer ve sıradan Portland çimentosu kullanılarak gerçekleştirilen killi zemin stabilizasyonunun mekanik performansını karşılaştırmıştır. Kürleme koşulları ve süresi, alkali aktivatör/kil ve alkali aktivatör molaritesi ve volkanik kül/kil oranının etkileri belirlenmiştir. İşlem görmemiş killi zemin numunelerinin basınç dayanımı, zemin bağlayıcıların ağırlıkça %15'i ile kısmen değiştirildiğinde, ıslak ve kuru ortam koşullarında sırasıyla 0.2-4 MPa ve 2-12 MPa arasında artırılabilmiştir. Geopolimer muamelesinin kuru koşullarda daha etkili olduğu, Portland çimentosunun ise ıslak ortamlarda üstün olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark, geopolimerizasyon ve Portland çimentosu hidrasyon kinetiğinde su ve pH'nın rolü ile ilişkilidir. Ayrıca, alkali aktivatör ve alkali aktivatör/kil molaritesinin artırılması, geopolimer ile işlenmiş zeminin basınç dayanımını artırmaktadır. Ayrıca, tüm geopolimer numunelerindeki daha yüksek enerji emilimi,

bu malzemenin sıradan Portland çimentosuna kıyasla üstün sünekliliğini göstermektedir.

Şişen zeminler, nem içeriğindeki değişimlere bağlı olarak şişme ve büzülme eğilimindedir. Bunun sonucunda, zemin ciddi şekilde bozulur ve üzerindeki yapıda önemli hasara neden olur. Kireç, uçucu kül veya çimento gibi katkı maddelerinin şişen zeminleri stabilize etmek için kullanımına, geçmişte zeminin şişen yapısını modifiye etmek amacıyla kapsamlı bir şekilde başvurulmuştur. Kireç ve çimentonun şişen zeminlerin stabilizasyonu için sıklıkla kullanılmasına rağmen, bu geleneksel katkıların enerji yoğun olduğu ve önemli miktarda CO₂ salınımı yaptığı artık bilinmektedir. Bu malzemelerin bu dezavantajı göz önünde bulundurularak, daha düşük çevresel maliyetlerle eşit derecede verimli olan yeni bağlayıcı malzemeler geliştirilmeye çalışılmıştır. Uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve alkali aktivatör gibi endüstriyel atık malzemeleri karıştırarak toprak zemin parçacıklarını bağlayabilen bir macun haline getiren geopolimer teknolojisi geliştirilmiştir.

Santhikala ve diğerleri (2022) [79], çimento ve uçucu kül bazlı geopolimer stabilizasyonunun şişen zemin davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, uçucu kül bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç dayanımı artan bağlayıcı konsantrasyonu ile yükselmiştir. Aktivatörün molaritesi 8 M'den 10 M'ye çıkarıldığında, uçucu kül bazlı geopolimerle stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç dayanımı artmış, ancak aktivatörün molaritesi 12 M'ye çıkarıldığında serbest basınç dayanımı azalmıştır. En az %20 bağlayıcı içeriğine ve en az 0.75 aktivatör/bağlayıcı değerine sahip uçucu kül bazlı geopolimerle stabilize edilmiş şişen zemin numuneleri, aynı dozda çimento uygulanmış numunelere kıyasla daha yüksek serbest basınç dayanımı ortaya koymuştur. Sonuç olarak, şişen zeminlerin uçucu kül kullanılarak geopolimer stabilizasyonu, çimento stabilizasyonuna göre daha çevre dostu bir alternatif olarak düşünülebilir.

Sülfat bakımından zengin zeminlerin genişmesi ve kabarması, kireç ve çimento gibi kalsiyum bazlı stabilizatörlerle zemin stabilizasyonu için uzun süreden beri zorluklar çıkaran bir olgudur. Bu durum, sülfat konsantrasyonlu bir zemine kalsiyum ve su eklendiğinde genişleyici bir mineral olan etrenjit oluşumundan kaynaklanır. Zhang ve diğerleri (2015) [80], tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, inorganik bir alüminosilikat çimentolu malzeme olan kalsiyum içermeyen geopolimerin sülfat bakımından zengin zeminler için bir stabilizatör olarak kullanılmasının fizibilitesini araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, 1000, 5000 ve 10.000 ppm alçıtaşı (sırasıyla 565, 2825 ve 5650 ppm sülfat konsantrasyonuna eşdeğer) ile önceden karıştırılmış sentetik

yağsız kili stabilize etmek için metakaolin bazlı geopolimer kullanılmıştır. Kil numuneleri ağırlıkça %8 ve %13 oranında metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş ve mekanik özellikleri ve şişme potansiyelleri belirlenmiştir. Kil numunelerinin mikroyapısal ve mineralojik özelliklerini daha ayrıntılı incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınım ölçer (XRD) testleri yapılmıştır. Ayrıca, metakaolin bazlı geopolimerin sülfatça zengin zeminler için etkili bir stabilizatör olup olmadığını değerlendirmek üzere bir referans temel sağlamak için stabilize edilmemiş kil, kireç ve çimento ile stabilize edilmiş kil içeren kontrol numune setleri hazırlanmış ve test edilmiştir. Kil numunelerinin serbest basınç dayanımı, Young Modülü ve göçme gerilmesi (gerinimi), metakaolin bazlı geopolimer ile stabilizasyondan sonra önemli ölçüde artmıştır. Geopolimer ile stabilize edilen numunelerin şişme gerinimi, suda bekletildikten sonra %4 kireçle stabilize edilen benzerlerinden çok daha düşük bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) sonuçları ve X-ışını kırınım ölçer (XRD) spektrumları ile doğrulandığı üzere, geopolimer ile stabilize edilmiş kil örneklerinde geopolimer jelleri gözlenmiş, ancak etrenjit kristalleri gözlenmemiştir. Kalsiyum içermeyen geopolimerin aşırı genleşme olmaksızın sülfat bakımından zengin zeminler için etkili bir stabilizatör olabileceği belirlenmiştir.

2.2.13. Silika Dumanı

Silika dumanı, silikon ve ferrosilikon alaşımlarının üretiminde yüksek saflıkta kuvarsın elektrikli fırınlarda kömürle indirgenmesi için gerçekleştirilen eritme işleminin bir yan ürünüdür. Ayrıca ferromanganez, ferromagnezyum, ferrokrom ve kalsiyum silikon gibi diğer silikon alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak da elde edilir. Genellikle silika dumanı bileşenlerinin %90'ından fazlasını oluşturan son derece ince amorf silikon dioksit (SiO_2) parçacıkları içerir. Silika dumanı aynı zamanda mikrosilika, uçucu silika ve yoğunlaştırılmış silika dumanı veya silika tozu olarak da bilinir. Silika dumanı, aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla çimento harcı ve betonda tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak kullanılmaya uygun puzolanik bir malzemedir. Silika dumanının beton endüstrisinde kullanımı dünya çapında oldukça yaygınlaşmıştır [81].

Singh ve diğerleri (2020) [82], düşük maliyetli bir malzeme olan silis dumanının zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasının uygunluğunun araştırıldığı çalışmada, şişebilen bir zemin, çeşitli yüzdelerde silika dumanı (%10-100) kullanılarak stabilize edilmiştir. Serbest şişme,

Atterberg limitleri, standart proktor, Kaliforniya taşıma oranı, serbest basınç dayanımı ve konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi doğal ve silis dumanı ile stabilize edilmiş zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Silika dumanı eklenmesinin serbest şişmeyi küçülttüğü, optimum nem içeriğinde artışa ve maksimum kuru yoğunlukta azalmaya yol açtığı, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyinde kohezyon ve içsel sürtünme açısından ve serbest basınç dayanımındaki kohezyon değerlerinde artışa sebep olduğu bu da zeminin mukavemet özelliklerinde genel olarak iyileşme olduğunu göstermektedir.

Silika dumanı kullanılarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada, Kalkan ve Akbulut (2004) [83], silis dumanının hidrolik bariyer olarak kullanılmak amacıyla sıkıştırılmış kil astarların geçirgenliği, şişme basıncı ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test sonuçları, silis dumanı ile sıkıştırılmış kil numunelerinin, ham kil numunelerine kıyasla oldukça düşük geçirgenlik, şişme basıncı ve önemli ölçüde yüksek basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. Bu nedenle silis dumanı, katı atık muhafaza sistemlerinde sızıntı suyuna maruz kalan astarların inşaatında kullanılmaya uygun bir malzeme olarak önerilmektedir.

3. Stabilize Edilmiş Zeminin Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Stabilize edilmiş zeminlerde organik maddelerin, sülfatların, sülfidlerin ve karbondioksitin varlığı, mukavemet kaybına neden olabilir [1].

Zemindeki organik maddeler hidrasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girerek pH değerinin düşmesine ve hidrasyon sürecinin gecikmesine sebep olabilir. Bu durum da, stabilize edilmiş zeminlerin sertleşmesini etkileyerek kompaksiyonu zorlaştırabilir. Zeminlerin sülfat bakımından zengin olması ve bu zeminlerde kalsiyum bazlı stabilizatörlerin yüksek su muhtevasında kullanılması, kimyasal reaksiyon sonucu kalsiyum sülfalüminat (etrenjit) veya tamausit oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda zeminde oluşan büyük miktardaki hacim artışları taşıma gücünde azalmaya neden olabilir [1,18]. Atık malzemeler ile endüstriyel yan ürünlerin çoğunda bulunan demir pirit formundaki sülfidlerin oksidasyonu, ortamda kalsiyum karbonat varlığında hidratlı kalsiyum sülfat oluşturmak üzere reaksiyona girebilen sülfürik asit üretir ve fazla suyun varlığında, stabilize edilmiş zemine hasar verebilir [1].

Çimentoyla stabilize edilmiş zeminlerde çimentonun su ile temasından hemen sonra hidrasyon süreci başlar ve geçen süreye bağlı olarak zeminin plastiklik özelliği kaybolarak katılaşıma meydana gelir. Bu katılaşıma zeminlerin kompaksiyonunu zorlaştırmasının yanında uygulanan kompaksiyon

enerjisinin artmasına dolayısı ile maliyet artışına neden olabilir. Kireçle stabilizasyon uygulamalarında zeminin işlenebilirliğinin artması nedeniyle bir süre beklenilerek kompaksiyon enerjisinin uygulanması ise sıkıştırma verimliliğini artırmaktadır.

Zeminlerin stabilizasyonunda, yeterli nemin olması sadece hidrasyon işlemi için değil aynı zamanda verimli sıkıştırma için de gerekli bir faktördür. Tamamen hidrate olmuş çimento, kendi ağırlığının yaklaşık %20'si, sönmemiş kireç (CaO) ise kendi ağırlığının yaklaşık %32'si kadar çevredeki su ile reaksiyona girer [1]. Yetersiz nemin olması hidrasyon sürecini etkileyerek dayanım kayıplarına sebep olabilir.

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri ve zemin parçacıkları arasındaki puzolanik reaksiyonlar ortam sıcaklığından etkilenmektedir. Düşük ortam sıcaklıklarında puzolanik reaksiyonların yavaşlaması stabilize edilmiş kütlenin daha düşük mukavemete sahip olmasına sebep olabilir. Bu nedenle çimentolu katkı malzemeleri ile yapılan zemin stabilizasyon uygulamalarında ortam sıcaklığı göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür.

Stabilize edilmiş zeminler donma-çözülme döngülerine karşı hassas olduklarından dolayı bu zeminlerin donmaya karşı korunması gerekebilir. Donma çözülme döngüleri stabilize edilmiş zeminlerde dayanım kayıplarına sebep olduğu, bu nedenle katkı malzemeleri ile stabilize edilmiş zeminlerde maksimum kayma dayanımının elde edileceği optimum karışım oranı donma çözülme döngülerine maruz kalan ve kalmayan zeminler için aynı olmayıp stabilizasyon yapılan bölgedeki iklim koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir [37].

4. Sonuç

Zemin stabilizasyonu, mevcut zemin koşullarının istenilen amaca uygun olmadığı durumlarda gerekli olup zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Sorunlu zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için en eski ve yaygın uygulanan zemin iyileştirme yöntemi kimyasal stabilizasyondur. Özellikle yumuşak ince taneli, düşük taşıma gücüne, yüksek geçirimsizlik ve hacim değiştirme potansiyeline sahip sorunlu zeminlerin mühendislik özellikleri kimyasal stabilizasyon ile ekonomik, çevreci ve etkin bir şekilde iyileştirilebilir. Kimyasal stabilizasyonda kullanılan malzemelerin birçoğu endüstriyel atık olup, bu atıkların değerlendirilmemesi durumunda depolama maliyetleri ve çevreye zararlı etkileri yüksek seviyelere ulaşabilir. Bu atık malzemelerin zemin iyileştirme uygulamaları ile bertaraf edilmesi birçok çevre probleminin ortaya çıkmadan engellenmesine, zemin iyileştirme

uygulamaları maliyetinin düşmesine ve değerli agregaların kullanımının azaltılmasına yardımcı olabilir.

Kimsayal stabilizasyonda seçilen katkı malzemesinin iyileştirilmesi düşünülen zemine uygunluğu stabilizasyonun başarısını belirleyen en önemli unsurdur. Ayrıca katkı malzemeleri yalnız uygulanabilecekleri gibi farklı katkı malzemelerinin bir kombinasyonu şeklinde de uygulanabilir. Katkı malzemelerinin karışımdaki oranı, optimum su muhtevası, küre, çevre ve iklim koşulları, kompaksiyon enerjisi, sıkıştırılan tabaka kalınlığı, sıkıştırma yöntemi gibi bir çok faktör yapılacak iyileştirmenin derecesini belirlemektedir. Ayrıca stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemeleri ile zemin arasındaki kimyasal reaksiyonun ve bunun sonucu olarak zeminin mikro yapısında meydana getireceği değişimlerin iyi anlaşılması katkı malzemelerinin daha etkili bir şekilde kullanılmasına imkan sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Sherwood, P., (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO.
- [2] Rogers, C.D., Glendinning, S., (1993). Modification of clay soils using lime, Proceeding of the Seminar held at Loughborough University on Lime Stabilization, 99-114, London: Thomas Telford.
- [3] Umar, F, Ağar, E., (1985). Yol Üst Yapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [4] Amadi A.A., Okeiyi, A., (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data Int. J. Geo. Eng. 8:3
- [5] Ibrahim A., Abdullah M.S., Jamalludin D. Apo M., (2007). Comparison between hydrated lime dry powder and slurry on peat soil stabilization Academic. Journal Universiti Teknologi Mara, Pulau Pinang 87-100.
- [6] Prusinski, J.R., Sankar, B., (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils J. Trans. Res. Board 1652 215-27.
- [7] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. Geotechnical and geological engineering, 29(5), 759.
- [8] Kavak, A., Akyarlı, A., (2007). A field application for lime stabilization. Environmental geology, 51(6), 987.
- [9] Castro-Fresno, D., Movilla-Quesada, D., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. A. (2011). Lime Stabilization of bentonite sludge from tunnel boring. Applied Clay Science, 51(3), 250-257.
- [10] Kavak, A., Baykal, A. (2012). Long-term behaviour of lime-stabilized kaolinite clay. Environmental Earth Sciences, 66(7), 1943-1955.
- [11] Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M., (2015). Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays Cold Regions Science and Technology, 119, 151-157.
- [12] Harichane, K., Ghrici, M., Missoum, H., (2011). Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength. Frontiers of Earth Science, 5(2), 162- 169.
- [13] Lin, D.-F, Lin, K.-L., Hungc, M.-J., Luo, H.-L. (2007). Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. Journal of hazardous materials, 145(1-2), 58.
- [14] Seco, A., Ramírez, F, Miqueleiz, L., García, B., Prieto, E. (2011). The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science, 51(4), 419-423.
- [15] Dunuweera S.P, Rajapakse R.M.G., (2018). Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions Adv. Mater. Sci. Eng. 1-11

- [16] MacLaren, D.C., White, M.A., (2003). Cement: Its Chemistry and Properties. *Journal of Chemical Education*, 8 (6), 623.
- [17] Domone, P., Illston, J., (2010). *Construction materials - their nature and behavior* (UK: Spon Press)
- [18] Little, D. N., Nair, S., (2009). Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Web only document – 144, Texas A&M University, Texas.
- [19] Ingles, O.G, Metcalf, J.B., (1972). *Soil stabilization: principles and practice*. Sydney: Butterworth.
- [20] Mohamedzein, Yahia E.-A., Al-Rawas, Amer A. (2011). Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman. *Geotech Geol Eng* 29, 999–1008.
- [21] Oyediran, I.A., Kalejaiye, M., (2011). “Effect of Increasing Cement Content on Strength and Compaction Parameters of Some Lateritic Soil from South Western Nigeria”, *EJGE*, Vol. 16,pp 1501-1513.
- [22] Khemissa, M., Mahamedi, A., (2014). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay *Applied Clay Science* 95 104-110.
- [23] El-Rawi, N.M., Al-Samadi, M.M.Y., (1995). Optimization of Cement-Lime-Chemical additives to Stabilize Jordanian Soils *Journal of Islamic Academy of Sciences* 8:4, 167-174.
- [24] Güneş, Y., Aydılek, A.H., Demirkan, M.M. (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, 26(9), 932-945.
- [25] Mackiewicz, S.M., Ferguson, E.G., (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *World of Coal Ash (WOCA)*, 1-7.
- [26] White, D.J., Harrington, D.S., Thomas, Z., (2005). Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils. Vol. 1: Engineering properties and construction guidelines, Center for Transportation Research and Education, IHRB Project TR-461; FHWA Project 4, Iowa State University, Ames.
- [27] Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H.R., Ramyar, K., (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay, *Building and Environment*, 41(2), 150-155, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.009>.
- [28] Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., (2007). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold regions science and technology*, 48(1), 44.
- [29] Degirmenci, N., Okucu, A., Turabi, A., (2007). Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and environment*, 42(9), 3393.

- [30] Parsons, R.L., Kneebone, E., (2005). Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground improvement*, 9(1), 33-38.
- [31] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Jones, R. (2009). Role of Fly Ash in the Mitigation of Swelling in Lime Stabilised Sulfate Bearing Soils. Paper presented at the World of Coal Ash (WOCA), Lexington, KY, USA.
- [32] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Dhir, R.K. (2012). Identifying the role of fly ash properties for minimizing sulfate-heave in lime-stabilized soils. *Fuel*, 92(1), 27-36.
- [33] Senol, A. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, conservation, and recycling*, 46(4), 365-87.
- [34] Sezer, A., (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, 41(2), 150.
- [35] Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R.K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction & building materials*, 18(4), 263.
- [36] Kim, B., Prezzi, M. (2008). Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Management*, 28(3), 649.
- [37] Sengul, T., Akray, N., Vitosoglu, Y., (2023), Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils, *Construction and Building Materials*, 400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132590>.
- [38] Tu, W., Zand, B., Butalia, T.S., Ajlouni, M.A., Wolfe, W.E. (2009). Constant rate of strain consolidation of resedimented Class F fly ash. *Fuel*, 88(7), 1154.
- [39] Arora, S., Aydilek, A., (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 640.
- [40] Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A., Benson, C.H. (2006). Soft subgrades stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation & Recycling*, 46(4), 365–376. doi:10.1016/j.resconrec.2005.08.005
- [41] Camargo, F.F., Edil, T.B., Benson, C.H. (2013). Strength and stiffness of recycled materials stabilized with fly ash: A laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 505-517.
- [42] Edil, T.B., Acosta, H. A., Benson, C.H. (2006). Stabilizing soft fine grained soils with fly ash. *Journal of materials in civil engineering, ASCE*, 18(2), 283-294.

- [43] ASTM C618 (1998). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania.
- [44] Li, L., Santos, F., Li, Y., Shao, W., Zhao, Q., Amini, F., (2012). Evaluation of fly ash and soil mixtures for use in highway embankments. *Geo-Congress*, 3672-3680.
- [45] Hakari, U.D., Puranik, S.C., (2012). Stabilisation of Black Cotton Soils Using Fly Ash, Hubballi- Dharwad Municipal Corporation Area, Karnataka, India. *Global Journal of Researches in Engineering Civil And Structural Engineering*, 12(2), 21-29.
- [46] Mir, B.A., Sridharan, A., (2013). Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil–Fly Ash Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(4), 1059-1072.
- [47] Dayioglu, M., Cetin, B., Nam, S., (2017). Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives. *Applied Clay Science*, 146, 56-69.
- [48] Lee, R., 1974, Blast furnace and Steel Slag, Edward Arnold Publishers Ltd.
- [49] Yadu, L., Tripathi, R.K., (2013). Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil *Procedia Engineering*, Vol. 51, 125-131.
- [50] Pathak, A.K., Pandey, V., Murari, K., Singh, J.P., (2014). Soil Stabilisation Using Ground Granulated Blast Furnace Slag *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 164-171.
- [51] Fasihnikoutalab, M.H., Pourakbar, S., Ball R.J., Unluer, C., Cristelo, N., (2020). Sustainable soil stabilisation with ground granulated blast-furnace slag activated by olivine and sodium hydroxide *Acta Geotechnica* 15:1981-1991.
- [52] Maneli, A., Kupolati, W.K., Abiola, O.S., Ndambuki, J.M. (2016). Influence of fly ash, ground-granulated blast furnace slag and lime on unconfined compressive strength of black cotton soil. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 252-260.
- [53] Bahadori, H., Hasheminezhad, A., Taghizadeh, F., (2019). Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans *Journal of Materials in Civil Engineering Archive* Vol. 31, No. 2.
- [54] Al-Swaidani, A., Hammoud, I., Meziab, A., (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725.
- [55] Yin, Z., Lekalpüre, R.L., Ndiema, K.M., (2022). Experimental Study of Black Cotton Soil Stabilization with Natural Lime and Pozzolans

- in Pavement Subgrade Construction Coatings, 12, 103. <https://doi.org/10.3390/coatings12010103>
- [56] Guyer, J.P., (2011). Stabilization for Pavements. NY.: Continuing Education and Development, Inc.
- [57] Onyelowe, K.C., Okofofor, E.O. (2012). Geochemistry of Soil Stabilization. ARPN Journal of Earth Sciences 1(1), 32-5.
- [58] Shah, K.A., Ahmad, E., (2020). A Study on Alluvial Soil Stabilization using Bitumen Emulsion International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 9(6).
- [59] Baghini M.S., Ismail, A., Kheradmand, B., Hafezi M.H., Almansob, R.A., (2013). Bitumen-cement Stabilized Layer in Pavement Construction Using Indirect Tensile Strength (ITS) Method Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(24): 5652-5656.
- [60] Alhassan, M., Mustapha A.M., (2007). Effect of Rice Husk Ash on Cement Stabilized Laterite. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 11, 47-58.
- [61] Boateng A.A., Skeete D.A., (1990). Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience. Cement and Concrete Research, 20(5), 795-802.
- [62] Rahman M.A., (1987). Effects of Cement-Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils. Journal of Soils and Foundations, 27(2), 61-65.
- [63] Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construction & Building Materials, 19(6), 448-453.
- [64] Rahman M.A., (1986). The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction, Building and Environment Journal.; 21(1): 57-61.
- [65] Behak, L., (2017). Soil Stabilization with Rice Husk Ash, Rice: Technology and Production. 29.
- [66] Prasanna, S., (2022). Utilisation of Fly Ash and Rice Husk in Soil Stabilization Journal of Geology & Geophysics, 1-6.
- [67] Chesner, W.H., Collins, R.J., MacKay, M.H., (1998). User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction, Report No. FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC.
- [68] Kakrasul, J.I., Parsons, R.L., Han, J., (2018). Performance of lime kiln dust-treated subgrade soils, IFCEE 2018.
- [69] Arulrajah, A., Mohammadinia, A., D'Amico, A., Horpibulsuk, S., (2017). Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilizati-

- on of construction and demolition materials, *Construction and Building Materials* 152, 999-1007.
- [70] Kang, X., Ge, L., Kang G.C., Mathews, C. (2015). Laboratory investigation of the strength, stiffness, and thermal conductivity of fly ash and lime kiln dust stabilised clay subgrade materials. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 928-945.
- [71] Adeyanju, E.A., Okeke1 C.A., (2019). Clay soil stabilization using cement kiln dust, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640. DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012080
- [72] Solanki, P., Khoury, N., Zaman, M., *Engineering Behavior and Microstructure of Soil Stabilized with Cement Kiln Dust GSP 172 Soil Improvement 2007* doi:10.1061/40916(235)6
- [73] Hossain, K.M.A., Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495-3501.
- [74] Ismaiel H.A.H., (2013), Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt *International Journal of Geosciences*, 4, 1416-1424. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.410139>
- [75] Wang S., Xue, Q., Zhu, Y., Li, G., Wu, Z., Zhao, K., (2021). Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil, *Construction and Building Materials*, 267.
- [76] Ghadir, P., Zamanian, M., Motlagh N.M., Saberian, M., Li., J., Ranjbar, N., (2021). *Transportation Geotechnics*, 31.
- [77] Zhou, H., Wang, X., Wu, Y., Zhang, X., (2021). Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers, *Construction and Building Materials*, Vol.305. 124722.
- [78] Ghadir, P., Ranjbar, N., (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
- [79] Santhikala, R., Chandramouli, K., Pannirselvam, N., (2022). Stabilization of expansive soil using fly ash based geopolymer, *Materials Today: Proceedings*, Vol.68, Part 1, 110-114.
- [80] Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Nowak, P., Coen, A., Tao, M., (2015). Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils, *Applied Clay Science*, Vol.108, 199-207.
- [81] Siddique, R., Kunal, (2016). Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete: Development of sustainable construction materials, *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*,

Characterisation, Properties and Applications, 159-204. DOI: 10.1016/B978-0-08-102704-2.00011-1

- [82] Singh, P., Dash, H.K., Samantaray, S., b Effect of silica fume on engineering properties of expansive soil *Materials Today: Proceedings Volume 33, Part 8, 2020, Pages 5035-5040*
- [83] Kalkan, E., Akbulut, S., (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, *Engineering Geology 73, 145-156.*

Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin Doğal ve Sentetik Lifler Kullanılarak İyileştirilmesi

Yaşar Vitoşoğlu¹

Tayfun Şengül²

Özet

Taşıma gücü düşük zeminler dünyanın birçok yerinde mevcuttur. Zemin takviyesi, özellikle bu tür zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmeye yönelik bir tekniktir. Bu amaç için son zamanlarda yeterli dayanımları, düşük maliyetleri ve kolay bulunabilirliklerinden dolayı doğal ve sentetik lifler yaygınlaşmaya başlamıştır. Zeminlerin liflerle takviye edilmesi, dik şevlerin inşası, şev hasarlarının onarılması ve yol taban zeminlerinin güçlendirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Dolayısıyla, doğal ve sentetik liflerle takviye edilmiş zeminler son zamanlarda geoteknik mühendisliğinde artan bir ilgi görmekte ve zemin-lif karışımlarında liflerin etkilerini anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu nedenle, bu araştırmanın ana amacı, doğal ve sentetik lifler kullanılarak zeminlerin takviyesi üzerine yapılmış bu çalışmaları gözden geçirerek lifin türü, fiziksel ve mekanik özellikleri, miktarı, uzunluğu ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin farklı türdeki zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkileri hakkında kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirmektir. Ayrıca bu çalışma, zemin güçlendirmede doğal ve sentetik liflerin kullanımının tarihçesini, faydalarını ve uygulamalarını tartışmayı amaçlamaktadır. Daha önceki çalışmaların gözden geçirilmesi, zeminlerin liflerle takviye edilmesinin, çeşitli geoteknik ve çevresel faydalara sahip, etkili ve düşük maliyetli bir zemin stabilizasyon tekniği olduğunu göstermektedir. Literatür incelendiğinde doğal ve sentetik liflerin eklenmesinin Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı değerlerini artırdığı görülmektedir. Ayrıca, lif kullanımı zeminin plastisite indisini düşürmekte ve hacim değişimini de azaltmaktadır. Sonuç olarak, bu literatür çalışması, geoteknik ve ulaştırma mühendislerine taşıma gücü zayıf zeminleri doğal ve sentetik lifler kullanarak stabilize etmelerinde yardımcı olacaktır.

- 1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, 0000-0002-5543-9673
- 2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, 0000-0003-3473-7724

1. Giriş

En genel ifadeyle toprak ya da zemin, minerallerin, organik maddelerin, gazların, sıvıların ve sayısız organizmanın bir karışımı olup çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreç yoluyla sürekli olarak değişime uğrar. Zemindeki mineraller ise, genellikle çakıl, kum, silt ve kil olmak üzere dört temel bileşenden oluşur. Zeminin özellikleri büyük ölçüde çevre koşullarına bağlı olup genellikle düşük çekme ve kesme dayanımına sahiptir. Diğer taraftan takviye, birtakım istenilen özelliklere sahip olmayan bazı malzemelerin, bu özelliklere sahip diğer malzemelerle birleştirilmesidir. Bu nedenle zemin takviyesi, kesme mukavemeti, yoğunluk, sıkışabilirlik ve hidrolik iletkenlik gibi parametrelerin geliştirilmesi için zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirme tekniği olup taş kolonlar, kazıklar, zemin çivisi ile sıkıştırılmış dolgu ve insan yapımı takviye malzemesi ile güçlendirilmiş topraktan oluşabilir [1].

Zemin stabilizasyonu, bir zeminin mühendislik özelliklerini ve performansını iyileştirmek amacıyla bir veya daha fazla zemin özelliğinin değiştirilmesi veya korunması olarak tanımlanabilir ve çeşitli yöntemleri içerir. Bu nedenle, zemin stabilizasyonu teknikleri farklı bakış açılarına göre değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Bununla birlikte, geoteknik mühendisliğinde kullanılan zemin stabilizasyon yöntemleri, genellikle mekanik ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki başlık altında toplanabilir [2]. İki yöntem, değişik açılardan bir zeminin performansını artırmak için bağımsız olarak veya aynı anda kullanılabilir.

Mekanik stabilizasyon, zeminin kimyasını değiştirmeden fiziksel özelliklerinin değiştirildiği bir süreçtir. Bu yöntemde zemin stabilizasyonu, doğal zemin parçacıklarının fiziksel yapısını titreşim veya sıkıştırma yoluyla değiştirerek veya bariyerler ve çiviler gibi diğer nesnelere zemin yapısına ilave ederek gerçekleştirilir. Mekanik stabilizasyon, aynı zamanda nihai karışımın hedeflenen tane dağılımına sahip olması için yerel zeminin çeşitli oranlarda başka bir zeminle karıştırılmasını da içerir. Diğer bir deyişle, iyi derecelenmiş, yoğun bir zemin-agrega karışımı oluşturmak için ilave ince taneler veya agregalar eklenebilir. Son olarak, zeminlerin özelliklerini geliştirmek için sentetik veya doğal katkı maddelerinin kullanılması olan zemin takviyesi de, mekanik stabilizasyon yöntemlerinden birisidir. Zeminin kayma direncini artırmak için yüksek çekme dayanımına sahip ve rastgele dağıtılmış liflerin zemine ilave edilmesiyle zemin stabilizasyonu sağlanabilir. Ayrıca, zayıf zeminlerin takviyesi, donatı çubukları, geosentetik şeritler, geotekstiller veya geogridler gibi düzlemsel donatı elemanlarının zemin içerisine yerleştirilmesi yoluyla da olabilir. Donatı elemanlarının yatay, dikey

veya her iki yönde yönlendirilerek tabaka tabaka yerleştirildiği bu yöntemde, takviyeli düzlemlerde ek sürtünme direnci sağlansa da takviye elemanları olmayan düzlemler nispeten zayıf kalmaktadır [3].

Mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon kadar yaygın olarak kullanılsa da bazı avantajları vardır. Avantajlardan biri, zemin parçacıklarının sadece fiziksel olarak dönüştürülmesidir; bu da, sonunda etkisi azalacak hiçbir kimyasal değişikliğin meydana gelmediği anlamına gelmektedir. Kimyasal stabilizasyonla karşılaştırıldığında, yağmur ve kar gibi hava etkenlerinden olumsuz yönde çok fazla etkilenmez ve sağlığa zararlı kimyasal maddelerin deşarjına daha az sebep olduğundan çevresel etkiler bakımından daha güvenilirdir. Zeminlerin mühendislik özellikleri kritik kabul edilmediğinde mekanik stabilizasyon uygulaması nispeten daha hızlıdır. Takviye maddeleri dâhil edilmediğinde, zaman alıcı standart laboratuvar deneylerine ihtiyaç duymaz. Uygulama prosedürü nispeten basit olup yüksek eğitimli personel gerektirmez. Diğer taraftan, mekanik stabilizasyonun dezavantajlarının olduğu da bildirilmiştir. Mekanik stabilizasyon teknikleri, genellikle bağımsız teknikler olmayıp çoğu zaman kimyasal stabilizasyon teknikleriyle desteklenmeleri gerekir. Kalite kontrolün temel olduğu ve zaman alıcı olabilecek durumlarda, yerinde uygulanması birtakım gecikmelere sebep olabilir. Şişen zeminlerdeki gibi zemin malzemesinin durumunun kritik olduğu durumlarda mekanik stabilizasyon yeterli görülmebilir. Her ne kadar mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyona göre daha çevreci bir yaklaşım olsa da, dünya çapında geosentetik plastik ürünlerin tüketiminin yıldan yıla artması çevre açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır [2]. Bundan başka, korozyona uğramış çelik çevre için zehirli olduğundan, çelik çubukların toprak takviyesi olarak kullanılmasının, kullanım ömrünün sonunda çevreye zararlı etkileri nedeniyle çevre dostu olmayan bir yaklaşım olduğu bildirilmiştir [4]. Dolayısıyla, geosentetik malzemelere ve çelik donatılara nazaran geoteknik mühendisliği uygulamaları için daha sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir mekanik stabilizasyon tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, doğal ve sentetik liflerin zemin takviyesinde kullanımı yeterli mukavemetleri, düşük maliyetleri ve kolay bulunabilirlikleri nedeniyle ivme kazanmıştır. Ayrıca, doğal lifler sentetik lifler ile karşılaştırıldıklarında daha çevre dostu, enerji tüketimi ve maliyet açısından da daha etkin malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan, doğal liflerin toprak altı koşullarında etkili ömürlerinin daha sınırlı olması bir dezavantajdır. Zeminlerin doğal ve sentetik liflerle güçlendirilmesi nispeten yeni bir teknik olduğundan, zemin-lif kompozitlerinin davranışını anlamak zorunludur. Liflerin miktarı, uzunluğu, en-boy oranı, yüzey pürüzlülüğü, özgül yüzey alanı, yönelimi

ve dağılımı, zemin-lif kompozitlerinin mühendislik özellikleri üzerinde en etkili parametreler olduklarından bunların etkilerini anlayabilmek için laboratuvar veya sahada gerekli araştırmalar yapılmalıdır.

Kimyasal stabilizasyon, zemine çimento, kireç, uçucu kül veya polimer gibi çeşitli katkıları eklenerek zeminin kimyasal yapısının değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilir. Bu katkıları, çoğunlukla ucuz, yerel olarak bulunabilir ve çevre dostu malzemeler olduklarından kullanılmaları birçok avantaj sağlar. Zeminlerin kimyasal stabilizasyonunun amacı, zemin malzemesindeki tanelerin boyutlarını artırarak, plastisite indeksini, şişme-büzülme potansiyelini ve çimentolaşmasını azaltarak stabiliteelerini arttırmaktır.

Pek çok araştırmacı, kimyasal stabilizasyonun yararlarından bahsetmiştir. Öncelikle, mevcut taban zeminini uygun bir toprak malzemesi ile değiştirmek yerine stabilize etmek önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca, taban zemininin stabilizasyonu yol üst yapısı tabakalarının kalınlığını azaltarak maliyetini düşürmektedir. Bundan başka, kimyasal stabilizasyon zeminlerin özelliklerinden bağımsız olarak etkili bir yöntemdir. Prosedür, kimyasal katkının karıştırılmasından hemen sonra başlayan kimyasal tepkiye bağlıdır ve zaman alıcı değildir. Etkili bir stabilizasyon işlemi için gereken kimyasal katkı miktarı az olduğundan çoğu zaman uygun maliyetlidir. Bu yöntem, aynı zamanda endüstriyel yan ürünlerin kimyasal katkı maddesi olarak yeniden kullanımına imkân verir. Son olarak, kimyasal stabilizasyon, uzun ömürlü ve kalıcı olup çoğu zemin türüyle uyumludur. Diğer taraftan, kimyasal stabilizasyonun dezavantajları da vardır. Öncelikle, kimyasal stabilizasyonda kullanılan maddelerin üretiminin çevreye zarar verebileceği ve zaman zaman çok pahalı olabileceği bildirilmektedir. Toksik ürünlerin kullanımının bazı zararlı maddeler üretmesi ve tehlikeli maddelerin sızıntı yoluyla yeraltı suyu kirliliğini daha da artırması söz konusudur. Özellikle çimento ile stabilizasyonda yeterli dayanımın elde edilmesi için beklenen kür süresi, çimento üretimi sırasında yüksek enerjiye ihtiyaç duyulması, ekolojik dengeye ve çevreye verilen zarar bu duruma örnek olarak verilebilir [5]. Ayrıca, saha koşullarının laboratuvar simülasyon testlerindeki koşullardan önemli ölçüde farklılık göstermesi durumunda yerinde uygulama pratik olarak verimsiz olabilir. Son olarak, koşullar elverişli olmadığında, kimyasal stabilizasyon zaman alıcı ve emek yoğunudur.

1.1. Zemin iyileştirmenin tarihçesi

Zeminlerin stabilizasyonu binlerce yıldır uygulanmaktadır. Örneğin, Mezopotamyalılar ve Romalılar, zayıf zeminleri toz haline getirilmiş kireç taşı veya kalsiyum gibi stabilize edici bir maddeyle karıştırarak

yolların trafiği taşıma kabiliyetini geliştirmenin mümkün olduğunu keşfetmişlerdir. Benzer olarak, zeminlerin takviyesinde liflerin kullanılması da, yeni bir kavram olmayıp zemin kütlelerine rastgele gömülen bitki köklerinin zeminlerin dayanıklılığını ve doğal şevlerin stabilitesini artırdığının anlaşılmasıyla ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak zeminlerin takviye edilmesinde, bitki liflerinin kullanıldığı yöntemlerin tarihi 5000 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Hejazi ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bu yöntemlerin tarihçesi özetlenmiştir [6]. Örneğin, çeşitli eski uygarlıklarda saman, ot ve at kılı gibi maddeler kerpiç içine katılıp güneşte kurutularak güçlendirilmiş yapı elemanları üretilmiştir. Irak'ta bulunan ve 3000 yıldan daha eski olan antik zigguratlar, zemin güçlendirme uygulamasının erken örneklerinden biridir. Yine Romalılar Tiber Nehri boyunca kamış takviyeli toprak setler inşa etmişlerdir. Çin Seddi'nde ağaç dallarının çekme elemanı olarak kullanılmasının yanında, Antik Çin ve Japon barınak inşaatlarında arpa samanı halıların takviye elemanı olarak tercih edilmesi de eski yapılarda liflerin kullanılmasını gösteren diğer örneklerden bazıları olmuştur [7].

Vidal, 1969 yılında bir zemin kütlelerine takviye elemanları eklenmesinin ortamın kayma direncini artırdığını keşfetmiş ve böylece liflerin kullanılması suretiyle zeminin güçlendirilmesi kavramına öncülük etmiştir [8]. Vidal'ın 1969 yılındaki bu buluşundan sonra tüm dünyada zemin güçlendirme konsepti kullanılarak pek çok yapı inşa edilmiştir. Geçmiş araştırmalar, düşük modüllü polimerik malzemelerden yüksek çekme mukavemetli metalik levhalara kadar değişen bir dizi takviye malzemesinin, zeminlerin takviyesinde geosentetik malzemeler olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu geleneksel sentetik lifler, çoğunlukla yenilenemeyen ve sınırlı bir kaynak olan petrolün yan ürünleridir. Geosentetik ürünler, işleme sırasındaki esneklikleri, yüksek özgül rijitlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Bu ürünlerden biri olan ve kesikli liflerden önce geoteknik mühendisliği pazarına "Texsol" markası altında giren ürün, sürekli polyester liflerden oluşmuş olup istinat duvarları ile şev korumalarında kullanılmıştır. Bununla birlikte, kısa lifli zemin kompozitleri olarak bilinen rastgele dağılmış lif takviyeli zeminler, son zamanlarda birçok geoteknik mühendislik uygulamasında ilgi çekmiştir [9]. Sentetik kesikli lifler, polimerik liflerin kullanıldığı ilk çalışmaların gerçekleştirildiği 1980'lerin sonundan beri zeminde kullanılmaktadır. Son olarak, zemini doğal liflerle güçlendirme kavramı eski zamanlarda ortaya çıksa da, sürdürülebilirliği artırmak için geleneksel geosentetik takviyeler yerine doğal liflerin kullanılması alternatifi büyük bir potansiyel göstermiş ve geoteknik mühendisliğinde yeniden ilgi çekmeye başlamıştır.

1.2 Sınıflandırma

Zemine gömülü lifler biçim, doku, sertlik, içerik, uzunluk, en-boy oranı, yönelim ve benzeri açılardan çeşitlilik gösterebilir; bunlar arasında liflerin içeriği, uzunluğu ve yönelimi geoteknik uygulamalarda karşılaşılan en pratik kaygılardır. Lif takviyeli zeminler, uygulama yöntemlerine göre temel olarak Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin ve Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin olmak üzere iki tipte sınıflandırılabilir [10].

Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, liflerin planlanmış bir sisteme göre dikey, yatay veya her iki yönde yerleştirildiği güçlendirme mekanizmasıdır. Genel olarak Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, uygulamaların gereksinimlerine göre dokuma, bağlama, birleştirme veya delme gibi modifikasyonlar yoluyla liflerin mekanik olarak geliştirilmesine izin verir. Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin'in mekanizması, malzemelerin geohücreler, geogridler, geomatlar ve geotekstillerdekine benzer şekilde zeminin daha zayıf düzlemlerine yerleştirildiği geleneksel geosentetik uygulamalara benzer. Yönlendirilmiş dağıtılmış lif takviyesi ile güçlendirilmiş düzlemler boyunca ek sürtünme direnci sağlanırken, nispeten zayıf takviyesiz bölgelerin kırılmaya kendi mukavemetleri ile direnmesi gerekir. Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin tekniğinin lif takviyeli düzlemler boyunca ek sürtünme mukavemetini harekete geçirdiği, takviyesiz bölgelerin ise kırılmaya kendi mukavemetleri ile direnmesi gerektiği iyice anlaşılmıştır. Dolayısıyla daha zayıf takviyesiz bölgelerde kırılma düzlemleri oluşma olasılığı hâlâ mevcuttur [2].

Diğer taraftan, Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, istenen özellik ve miktardaki liflerin rastgele düzenlendiği ve sıkıştırıldığı bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bu teknikte, kısa ayırık lifler, çimento, kireç, uçucu kül veya diğer katkı maddeleri gibi zemine basitçe eklenip rastgele karıştırılabilmekte ve böylece sürekli zayıflık düzlemleri oluşturmadan zemin kompozitinin mukavemetinde izotropik artış sağlanabilmektedir [2,3,10,11,12]. Gerilmeye maruz kalan rastgele dağıtılmış liflerin numunelerinin dayanımındaki artışa katkıda bulunduğu, ek sürtünmeler ve kenetlenmeler sağlayarak zemini güçlendiren bitki köklerinin davranışına benzer bir davranış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, ikinci konseptin birincisi kadar iyi bilinmediği, vurgulanmaktadır. Uygulamada ise lifler genel olarak doğal ve sentetik lifler olarak ikiye ayrılır.

2. Literatürde Bulunan Liflerle İlgili Çalışmalardan Bazıları

Zemin takviyesi, istenen özelliklerdeki malzemeleri kullanarak zeminin mühendislik özelliklerini ve davranışını iyileştirme tekniği olarak

tanımlanabilir. Zemin kütlelerini güçlendirmenin temel amacı, taşıma kapasitesini arttırmak ve böylece zemin deformasyonlarını azaltmaktır. Dolayısıyla, taşıma kapasitesi düşük veya sıkışabilirliği yüksek olan zayıf zeminler üzerine inşa edilen hafif yapılar, yol üst yapıları, kanallar ve istinat duvarları gibi yapıların hasar görmesini önlemek amacıyla zemin güçlendirmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Donma-çözülme çevrimleri altında zeminlerin dayanıklılığını arttırmak da zemin güçlendirmesinin önemli amaçlarından birisidir. Lif ilavesi ile zemin güçlendirme tekniğinde, lif-zemin kompozitlerinin mühendislik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler, liflerin uzunluğu, en-boy oranı, miktarı, yapısı, yönelimi, sertliği ve yüzey pürüzlülüğüdür [13,2]. Geleneksel geosentetik malzemelerle karşılaştırıldığında, zeminlerin rastgele dağıtılmış liflerle takviye edilmesi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları, liflerin kolaylıkla zemine eklenebilmesi ve karıştırılabilmesi, rastgele dağıtılmış lifler sayesinde potansiyel zayıflık düzlemleri oluşturmadan mukavemet izotropisi elde edilebilmesi, liflerin eklenmesiyle sadece zeminin fiziksel özelliklerinin değişmesi ve çevre dostu malzemeler olmalarıdır. Bu avantajları nedeniyle literatürde rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminler üzerine daha fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Esas olarak, rastgele dağıtılmış esnek liflerin kullanımı, bitki köklerinin davranışını taklit eder ve efektif gerilmenin düşük olduğu yüzeye yakın zeminlere dayanım katmak suretiyle zemin kütlelerinin stabilitesine katkıda bulunur.

2.1. Doğal lifler

Günümüzde, kirliliğin arttığı ve yenilenemeyen kaynakların tükenmekte olduğu konusunda büyük bir farkındalık vardır. Dolayısıyla, daha çevre dostu malzemelere her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, özellikle son yıllarda, doğal liflerin zeminlerin güçlendirilmesinde potansiyel kullanımına yönelik olarak birçok deneysel araştırma yapılmıştır. Yüksek dayanımları, hafiflikleri, düşük maliyetleri, yüksek sertlikleri, sürdürülebilirlikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle doğal liflerin modern endüstrideki önemini vurgulamak üzere “eko-kompozit” terimi yaygınlaşmaya başlamıştır [6,10].

Esas olarak lifin bitkinin hangi kısmından geldiği, bitkinin yaşı, lifin nasıl izole edildiği, iklim, hasat zamanı, lifin higroskopik yapısı ve depolama koşulları doğal lif takviyeli bir zeminde liflerin performansını etkileyen faktörlerden bazılarıdır [14]. Doğal lifler, bulunabilirlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle birçok ülkede uzun süredir çimento kompozitlerinde ve zemin bloklarında kullanılmaktadır [15]. Burada zemin takviyesinde kullanılan bazı doğal lifler ve özellikleri kısaca anlatılacaktır.

2.1.1. Hindistan cevizi lifi

Olgun bir Hindistan cevzinin lifli dış katmanı, Hindistan cevizi meyvesinin ıskartası olup Hindistan cevizi kabuğu olarak bilinir. Normalde 50-350 mm uzunluğunda olan lifler, esas olarak lignin, tanen, selüloz, pektin ve suda çözünebilen diğer maddelerden oluşur. Bununla birlikte, Hindistan cevizi kabuğu lifinin bozunması gömme ortamı ile iklim koşullarına bağlı olup yüksek lignin içeriği nedeniyle diğer doğal liflere göre daha yavaştır. Bu nedenle, lif 4 ila 10 yıl arasında hizmet ömrüne sahiptir. Lifin çapı yaklaşık 0,1-0,6 mm olup su emmesi ise yaklaşık %130-180 arasındadır.

Hindistan cevizi kabuğu lifi, ıslanıldığında çekme dayanımının çoğunu korur. Dayanımı düşük olsa da uzaması daha yüksektir. Hindistan cevizi geotekstilleri, geçici güçlendirme amaçları için ekonomik olarak kullanılabilen çok çeşitli özelliklere sahip olup sentetik liflere göre daha yüksek sürtünme katsayısı ile daha iyi esneklik tepkisi gösterir. Bulgular, Hindistan cevizi lifinin esneklik modülünde veya zeminin dayanımında sentetik olandan %47,50 oranında daha fazla artış sağladığını göstermektedir [13].

Viswanadham ve diğerleri, değişen lif içeriği ($f = \%0,25$ ve $\%0,50$) ve en boy oranı ($l/b = 15, 30$ ve 45) ile takviye edilen şişebilen zemin örneklerinin şişme özelliklerini incelemiştir [16]. Konsolidasyon örnekleri üzerinde tek boyutlu şişme-konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kabarma ve şişme basıncında azalma, hem $\%0,25$ hem de $\%0,50$ lif içeriklerindeki düşük en boy oranlarında maksimum olmuştur. Son olarak ayrık ve rastgele dağıtılmış liflerin şişebilen zeminin şişmesini engelleme mekanizması, zemin-lif etkileşimi yardımıyla açıklanmıştır.

Khedari ve diğerleri, düşük termal iletkenliğe sahip Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş yeni bir toprak-çimento bloğu tipi geliştirmiştir [17]. Çeşitli karışım oranları dikkate alınmış ve Tayland'da yaygın kullanımı olan yerel üretim süreci kullanılarak numune başına beş örnek üretilmiştir. Araştırma, numunelerin ısı iletkenliği, basınç dayanımı, ağırlığı ve kütle yoğunluğu ile sınırlandırılmıştır. Hindistan cevizi lifinin katkı maddesi olarak kullanılmasının bloğun termal iletkenliğini ve ağırlığını azaltabileceği sonucuna varılmıştır. İyi özellikler elde etmek için optimum toprak:çimento:kum hacim oranı 5,75:1,25:2 olarak bulunmuştur. Hindistan cevizi lifi oranı, 0,8 kg/blok'a karşılık gelen çimentonun $\%20$ 'sidir. Ortalama numune özellikleri şu şekilde bulunmuştur: 0,6510 W/mK ısı iletkenliği, 39,55 kg/cm² basınç dayanımı, 4,85 kg ağırlık ve 1586,77 kg/m³ kütle yoğunluğu. Ticari olarak üretilen toprak-çimento bloğu ile karşılaştırıldığında, termal iletkenlik ve ağırlıktaki karşılık gelen azalma sırasıyla $\%54$ ve 750 g olmuştur.

Kodicherla ve Nandyala, Hindistan cevizi lifi ve uçucu kül ile rastgele karıştırılan killi taban zeminlerinin stabilitesini araştırmıştır [18]. Deneyler, farklı miktarlarda Hindistan cevizi lifi ve uçucu külün rastgele karışımlarından oluşan ve yerel olarak mevcut killi zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Hindistan cevizi lifi ile uçucu kül oranları zeminin kuru ağırlığına göre yüzde olarak ifade edilmiş olup sırasıyla %1, %1,5 ve %2 ile %0, %5, %10, %20 ve %30'dur. Deney sonuçları, uçucu kül ile stabilize edilen killi zeminin dayanımında ve Kaliforniya taşıma oranında (CBR) iyileşme sağlandığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yalnızca %20 uçucu kül ile işlem görmüş killi taban zemininki ile karşılaştırıldığında, rastgele dâhil edilen %1 Hindistan cevizi lifi ve %20 uçucu kül kombinasyonu, taban zeminin CBR değerini 1,5 kat arttırmıştır. Hindistan cevizi lifinin uçucu küle karıştırılmış zemin numunesine dâhil edilmesi, gelişmiş sertlik ve sürtünme içeriği sağlamıştır. Hindistan cevizi lifi takviye edilmiş uçucu küllü zemin karışımlarının yük penetrasyon grafikleri uçucu küllü zemin karışımı örnekleriyle aynı olmuştur.

Ramesh ve diğerleri, Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş siyah pamuk zeminin sıkıştırma ve mukavemet davranışını açıklamıştır. Hindistan cevizi lifi ile güçlendirilmiş siyah pamuk zemin, mukavemet bakımından yalnızca marjinal bir artış göstermiş ve bu durum zemin iyileştirme için kullanımını engellemiştir. Zemin-Hindistan cevizi lifi kombinasyonunun mukavemetini daha da artırmak için optimum %4 oranında kireç eklenmiştir. En-boy oranının ve lif yüzdesinin kompozit zemin numunesinin davranışı üzerindeki kütleme ile etkisi izole edilmiş ve incelenmiştir. Siyah pamuk zeminin kireçle muamele edilmesi mukavemeti artırmış, ancak zemin numunesinde kırılma sebepleri olmuştur. %4 kireçle muamele edilmiş ve Hindistan cevizi lifi ile takviye edilmiş siyah pamuk zemin, göçmeden önce ve sonra sünek davranış göstermiştir. Siyah pamuk zemini güçlendirmek amacıyla, lif için en-boy oranı 20 olan, ağırlıkça %1'lik bir optimum lif içeriği önerilmiştir [19].

Naresh ve diğerleri laterit zemin kütlelerini güçlendirmek için ağırlıkça farklı oranlarda Hindistan cevizi lifi kullanmıştır [20]. Bu amaçla, laterit zemine %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere değişen yüzdelerde Hindistan cevizi lifleri eklenmiştir. Likit limit, plastik limit, Proctor, serbest basınç dayanımı ile ıslatılmış ve ıslatılmamış Kaliforniya taşıma oranı testleri gibi deneyler, değişen yüzdelerde Hindistan cevizi lifi eklenerek hazırlanan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece likit limit, plastik limit, plastisite indeksi, optimum nem içeriği, maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç dayanımı ile ıslatılmış ve ıslatılmamış Kaliforniya taşıma oranı değerleri elde edilmiştir. Hindistan cevizi lifi oranlarındaki artışın plastik

limiti %25,5'ten %16,4'e düşürdüğü, likit limit üzerindeki etkisinin ise %47'den %42'ye düşürdüğü için nispeten küçük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, plastisite indeksi değeri %21,5'ten %25,5'e çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk 1,84'ten 1,89'a yükselirken optimum nem içeriği %13'ten %11,95'e düşmüştür. Diğer taraftan, lif içeriğindeki her artışla birlikte serbest basınç dayanımının ve Kaliforniya taşıma oranının arttığı belirlenmiştir. Islatılmış durumda ve ıslatılmamış durumda CBR değeri ise sırasıyla %94 ve %36,42 oranında artmıştır. Serbest basınç dayanımı ise, %1 Hindistan cevizi lifi ilave edildiğinde Hindistan cevizi lifsiz durumdaki 35,2 kN/m² değerinden 42,8 kN/m² değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, Hindistan cevizi lifiyle laterit zeminin güçlendirilmesinin, zeminin özelliklerini iyileştirmek için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yaklaşım olduğu bulunmuştur.

Chauhan ve diğerleri, taban zemininde Hindistan cevizi lifi ve sentetik lif takviyesinin etkinliğini, dayanım açısından incelemiştir. Laboratuvarda kalıcı şekil değiştirme, esnek şekil değiştirme davranışı ve taban zemininin esneklik modülü belirlenmiştir. Optimum uçucu kül içeriği ile karıştırılmış siltli kumdan bir taban zemini ile çekme dayanımına ve sürtünme katsayısına göre değişen türde iki farklı lif kullanılmıştır. Optimum lif içeriğinde takviye edilmemiş ve takviye edilmiş numuneler üzerinde tekrarlanan üç eksenli testler, 25, 50 ve 75 kN/m²'lik bir hücre basıncında ve 153 ve 204 kN/m²'lik gerilme seviyelerinde, altı farklı deviatör gerilmesi üreterek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan, tüm malzemelerde hem kalıcı hem de esnek şekil değiştirmelerin hücre basıncıyla azaldığı, ancak takviye edilmiş ve takviye edilmemiş koşullarda yük döngüsü sayısı ve deviatör gerilme ile birlikte arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, esneklik modülü, yük döngüsü sayısı ve deviatör gerilme ile azalmış ve hücre basıncıyla artmıştır. Uçucu kül de bu çalışmada kullanılmış olup maksimum kuru yoğunluk için %30 uçucu kül ve %70 kum karışımı çeşitli parametreler için test edilmiştir [13].

Peter ve diğerleri, standart Proctor, statik üç eksenli ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerini gerçekleştirerek, çeşitli oranlarda Hindistan cevizi özü (%0-3) ve Hindistan cevizi lifi (%0-1) ile stabilize edilen yumuşak zeminin davranışı üzerine bir araştırma yapmıştır. Deney sonuçları, Hindistan cevizi atıklarıyla stabilizasyonun, sıkıştırma, esneklik modülü ve CBR özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [21].

2.1.2. Sisal (sabır ağacı) lifi

Sisal (sabır ağacı) lifi, %60-70 su emme oranına ve yaklaşık 0,06-0,4 mm çapa sahip olan ve yapı endüstrisinde kullanılan lingo-selülozlu bir elyafır. Sisal lifleri, 6-10 cm genişliğinde ve 50-250 cm uzunluğundaki bitkilerin

yapraklarından elde edilir. Genel olarak, Brezilya, Endonezya ve Doğu Afrika ülkeleri dünyanın başlıca sisal lifi üreticileridir.

Prabakar ve Sridhar tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sabır ağacı lifi, takviye malzemesi olarak seçilmiş olup lif içeriğinin %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere dört farklı yüzdesinde zemine rastgele olarak dâhil edilmiştir. Dört farklı lif uzunluğu da (10, 15, 20 ve 25 mm), bu çalışmanın parametrelerinden biri olarak dikkate alınmıştır. Takviye edilmiş zemin örnekleri, kompaksiyon ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonuçları, incelenen zeminin kırılma deviatör gerilmesi ve kayma mukavemeti parametrelerinde (C ve Ø) önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Sisal liflerinin zeminin kuru yoğunluğunu azalttığı görülmüştür. Lif uzunluğu ve lif içeriğindeki artış da zeminin kuru yoğunluğunu azaltmıştır. Ayrıca, lif uzunluğundaki 20 mm'ye kadar olan artışın kayma gerilmesini doğrusal olmayan bir şekilde arttırdığı ve uzunluktaki bundan daha fazla bir artışın kayma gerilmesini azalttığı bulunmuştur. Lif içeriğinin yüzdesi de kayma mukavemetini arttırmıştır. Ancak %0,75'lik lif içeriğinin ötesinde, lif içeriğindeki artışla birlikte kayma gerilmesi azalmıştır [22].

Yohanna ve diğerleri farklı yüzdelerde (%0, %0,5, %1, %1,5 ve %2) sisal lifi ilave edilmesi durumunda siyah pamuk zeminin davranışını araştırmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, doğal zeminin likit limiti ve plastisite indeksinin %44,47 ve %18,65 olduğunu ve sisal lifi içeriğinin artmasıyla arttığını göstermiştir. Bulgular ayrıca, maksimum kuru yoğunluğun %0 lif içeriğinde 1,55 Mg/m³ değerinden %0,5 lif içeriğinde 1,60 Mg/m³ değerine yükseldiğini ve ardından %2 lif içeriğinde 1,53 Mg/m³ değerine düştüğünü ortaya çıkarmıştır. Maksimum kuru yoğunluktaki düşüş paterni, sisal lifinin zemine kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmasına ve dolayısıyla kombinasyondaki katıların birim ağırlığını azaltmasına atfedilmiştir. Optimum nem içeriği ise, doğal zemin için %19'luk bir değerden %1,5 sisal lifi ilave edildiğinde %24,5'lik bir zirve değerine yükselmiş ve ardından azalmıştır. Zeminin lif içeriği arttıkça zemin yüzeyini yağlamak için fazladan su alınmış ve bu da optimum nem içeriğinin artmasına neden olmuştur. Diğer taraftan, modifiye zeminin hacimsel büzülme şekil değiştirmesi doğal zemine kıyasla önemli ölçüde azalmış ve sisal lifi yüzdesi arttıkça sürekli olarak azalma göstermiştir. Serbest basınç dayanımı ise, başlangıçta artmış ve daha sonra azalmıştır [23].

Ghavami ve diğerleri, sisal ve Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş kompozit toprak bloklarının üretimi için bu liflerin yerel olarak uygun olan üç tip toprakla birlikte uygulanmasına ilişkin yeni sonuçlar sunmuştur. Gerçekleştirdikleri çalışmada %4 sisal veya Hindistan cevizi lifi eklenmesinin

toprak bloklara kayda değer oranda süneklik kazandırdığını ve basınç dayanımını biraz artırdığını bulmuşlardır. Ayrıca bitüm emülsiyonunun eklenmesinin zemin ve lifler arasındaki bağları iyileştirmediği de bulunmuştur. Ancak zeminin dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür [15].

Sisal lifinin siyah pamuk zemin üzerindeki etkilerini araştırmak için Santhi ve Sayida tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sisal lifleri farklı uzunluklarda (1,5cm, 2,0cm, 2,5cm ve 3,0cm) kesilerek zeminin kuru ağırlığına göre değişen yüzdelerde (%0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) rastgele zemine karıştırılmış ve maksimum kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılmıştır. Dene sonuçları, sisal lifinin eklenmesinin zeminin maksimum kuru yoğunluğunda ve optimum nem içeriğinde bir azalmaya sebep olduğunu göstermiştir. Lif yüzdesindeki artışla maksimum kuru yoğunluktaki bu azalma, sisal liflerinin zemine kıyasla düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmıştır. Böylece zemin-lif kompozitindeki katların ortalama birim ağırlığı azalmıştır. Artan lif yüzdesi ile optimum nem içeriğindeki artış ise, organik doğal liflerin su emme doğasından kaynaklanmıştır. Çalışma, aynı zamanda sisal liflerinin eklenmesinden dolayı zeminin CBR değerinde ve serbest basınç dayanımında bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Optimum CBR ve serbest basınç dayanımı değeri %0,50 lif içeriğine sahip olan 2,5 cm uzunluğundaki lifle güçlendirilmiş zemin için elde edilmiştir [24].

Mattone tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yapı malzemesi olarak çimento veya kaktüs posası ile stabilize edilmiş sisal lifi takviyeli zeminler kullanılmıştır. Eğilme, aşınma direnci, su emme ve erozyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar toprak teknolojilerinde kullanılan geleneksel sıvalar üzerinde elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş sisal lifi takviyeli toprağın performans özellikleri, kaktüs posası ile stabilize edilmiş topraktan daha iyi bulunmuştur [25].

2.1.3. Palmiye lifi

Hurma üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan palmiye lifleri, dayanıklılık, hafiflik, düşük maliyet, gerilme kapasitesi ve bozulmaya karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir [26]. Ayrışmış palmiye ağaçlarından elde edilen liflerin ise kırılğan olduğu, düşük çekme gerilmesi dayanımı ve esneklik modülü ile çok yüksek su emme özelliğine sahip olduğu bulunmuştur.

Marandi ve diğerleri, rastgele dağıtılmış hurma liflerinin, siltli kum zeminleri güçlendirmek için kullanılması durumunda ortaya çıkan dayanım ve süneklik davranışını incelemiştir. Kompozit zeminler, laboratuvar koşullarında test edilmiş ve serbest basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve kompaksiyon deneyi açısından incelenmiştir. Sonuçlar, maksimum

ve artık (rezidüel) dayanımların, yüzey bozulmalarının oryantasyonunun, sünekliklerin ve numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin, hurma liflerinin dâhil edilmesinden oldukça etkilendiğini göstermiştir. Sabit bir hurma lifi uzunluğunda, lif içeriğindeki %0'dan %1'e kadar artışla birlikte, maksimum ve artık dayanımların arttığını, buna karşın artık ve maksimum dayanımlar arasındaki farkın azaldığını bildirmişlerdir. Benzer bir eğilim, sabit hurma lifi içeriği ve 20 mm'den 40 mm'ye hurma lifi uzunluğundaki artış için gözlenmiştir [27].

Batani ve diğerleri, palmye yağının rafine edilmesi sırasında oluşan sıkılmış palmye salkımı liflerinin akrilonitril bütadien stiren ile kaplandıktan sonraki performansını incelemiştir. Bu lifler, zemin iyileştirmesinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Liflerin güçlendirilmiş zeminde biyolojik olarak parçalanmasını önlemek için akrilonitril bütadien stiren ile kaplanmıştır. Kaplanmış liflerin morfolojik karakterizasyonu ile mekanik ve fiziksel özellikleri lif performansının arttığını göstermiştir. Akrilonitril bütadien stiren ile kaplama işlemi, lifleri su emiliminden korumuş ve liflerin zeminle temas halindeki biyolojik bozunma potansiyelini azaltmıştır. Sıkılmış palmye salkımı liflerinin çekme dayanımı ve esneklik modülleri de kaplama işlemi ile iyileştirilmiştir. Liflerin kaplanması işlemi, artan yüzey alanı nedeniyle lif ve zemin parçacıkları arasındaki ara yüz sürtünmesini artırmaktadır. Sonuçlar, lif takviyeli zeminlerin kayma direnci parametrelerinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir [28].

Al Adili ve Al-Soudany tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, takviye malzemesi olarak hurma lifi seçilmiş ve ham zeminin hacmi esas alınarak dört farklı lif içeriği yüzdesinde (%5, 10, 15 ve 20) zemine rastgele eklenmiştir. Bu çalışma, rastgele eklenen hurma lifi ile güçlendirilmiş zeminin sertlik ve dayanım davranışına odaklanmıştır. Direkt kesme, konsolidasyon ve yer değiştirme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları, tercih edilen bir ilave uzunluğu olarak adlandırılabilen 1 mm uzunlukta liflerin eklenmesinden sonra, incelenen zeminin göçme deviator gerilmesi ve kayma dayanımı parametrelerinde (C ve Ø) önemli bir iyileşme olduğunu açıkça göstermiştir. Ayrıca bu ekleme oranı, zeminin yükleme altında yer değiştirmesini azaltmıştır. Dolayısıyla, hurma lifinin zemin takviyesi için uygun bir malzeme olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır [29].

Ahmad ve diğerleri, rastgele dağıtılmış lifin takviye edilmiş siltli kumun dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç eksenli sıkıştırma deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, yağ palmyesi lifleri, üç eksenli sıkıştırma sırasında kayma dayanımındaki artışı araştırmak için siltli kum zemin ile karıştırılmıştır. Numuneler, drenajlı ve drenajsız koşullar altında

farklı uzunluklardaki (15 mm, 30 mm ve 45 mm) %0,25 ve %0,5 oranındaki palmye lifi içeriğiyle test edilmiştir. Ayrıca akrilik bütadien stiren termoplastik ile kaplanmış palmye lifleri, kaplamanın takviye üzerindeki etkisini belirlemek için deneye tabi tutulmuştur. Deneylerden, 30 mm uzunluğunda %0,5 oranında kaplanmış lif içeren takviyeli siltli kumun, takviyesiz siltli kuma kıyasla sürtünme açısının yaklaşık %25 ve kohezyonunun ise %35 artış gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, akrilik bütadien stiren termoplastik ile kaplanmış palmye lifleri, kaplanmamış liflerle kıyaslandığında siltli kumun kayma direncini daha fazla artırmıştır [30].

Arifin ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, yumuşak zeminin kayma dayanımını ve taşıma kapasitesini arttırmak için doğal lif kullanımına odaklanmıştır. Kullanılan lif, palmye yağı fabrikalarının bir yan ürünü olarak ortaya çıkan palmye yağı boş meyve salkımlarından elde edilmiştir. Karışımlarda yumuşak zemine %5, 6, 7 ve 8 oranlarında lif ilave edilmiştir. Standart kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, veyn deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi gibi bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan yumuşak zeminin %5'ten daha yüksek lif içeriğinde sıkıştırılabileceğini göstermiştir. Elde edilen maksimum yoğunluk %7 lif içeriğinde $0,92 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Zemine palmye yağı boş meyve salkımı liflerinin ilave edilmesi, serbest basınç, veyn ve CBR deneylerinin sonuçlarının gösterdiği gibi yumuşak zeminin kayma dayanımını ve taşıma kapasitesini başarılı bir şekilde artırmıştır. Zeminin kıvamı yumuşaktan orta zemine doğru değişmiştir. Maksimum q_u , s_u ve CBR değerleri, %6 ila %7'lik optimum lif içeriğinde sırasıyla $0,8 \text{ kg/cm}^2$, $0,65 \text{ kg/cm}^2$ ve %6 olarak elde edilmiştir [31].

Jamellodin ve diğerleri, bir zemin güçlendirme yöntemi olarak yağ palmyesi lifinin kullanımını incelemiştir. Çalışmada, ham yumuşak zeminin ağırlığına göre %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere dört farklı lif yüzdesi dikkate alınmıştır. Çalışma, zemindeki yağ palmyesi liflerinin kayma dayanımı davranışı üzerindeki etkisini incelemiş olup palmye lifleri ile güçlendirilmiş yumuşak zeminin göçme saptırma (deviyör) gerilmesi ve kayma dayanımı parametrelerinde (C ve ϕ) önemli bir iyileşme elde edilebileceğini bulmuştur. Liflerin, üniter kohezif bir matriste parçacıkları kilitlemek için hareket ettiği ve böylece zeminin dayanım özelliklerinin artırılacağı gözlemlenmiştir [32].

Sallehan ve Yaacob tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yağ palmyesi boş meyve salkımı lifi içeren, fırınlanmamış ve preslenmiş laterit tuğlalardan oluşan yeni ve düşük maliyetli bir yapı malzemesinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu araştırmanın temel amacı, yağ palmyesi boş meyve

salkımı lifi ile güçlendirilmiş laterit tuğlanın boyut, ağırlık, yoğunluk, su emme ve basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemektir. Bu amaçla, su emme ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol tuğlalarının karışım oranı %70 toprak, %24 kum ve %6 çimento olmuştur. Yağ palmyesi boş meyve salkımı lif içerikleri çimento ağırlığına göre %1 ila %5 arasında değişmiştir. Bu araştırmadan öncelikle laterit tuğlaların yoğunluğunun, tuğlaların lif içeriğindeki artışla azaldığı belirlenmiştir. İkinci olarak, palmye liflerinin eklenmesinin tuğlaların basınç dayanımını artırdığı ve tuğlalar için belirlenen maksimum basınç dayanımının %3 lif içeriği ile elde edildiği bulunmuştur. Son olarak, su emme testi sonuçları, palmye lifi içeriğindeki artışla birlikte su emmede küçük bir artış olduğunu göstermiştir [33].

2.1.4. Jüt lifi

Jüt, Bangladeş, Çin, Hindistan ve Tayland'da bol miktarda yetiştirilmektedir. Taban gövde çapı yaklaşık 25 mm olan ve 2,5 m'ye kadar uzayan jüt bitkilerinin lifli kabuğundan çıkarılan lifler, filtrasyon, drenaj ve zemin stabilizasyonunda yaygın olarak yararlanılan gözenekli tekstillerin üretiminde kullanılır. Jüt, mevcut tüm doğal lifler arasında en yüksek çekme mukavemetine sahip olup özellikle zemin stabilizasyonu için uygun maliyetli bir çözüm sunar. Araştırmacılar, jüt lifi takviyesinin zeminin dayanımını artırdığını ve böylece üst yapı kalınlığını azalttığını göstermiştir.

Bairagi ve diğerleri, jüt liflerinin kireçle muamele edilmiş siyah pamuk zeminin mühendislik ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Stabilize edilmiş zeminin büzülme limiti, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi özelliklerinin jüt lifi içeriğiyle değişimleri incelenmiştir. %0, %1, %2 ila %5 oranlarında jüt lifi içeren zemin numuneleri hazırlanmış ve indeks özellikleri belirlenmiştir. Test sonuçları, siyah pamuk zeminin şişme davranışında önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Siyah pamuk zemin ağırlıkça %5 kireç ve %0'dan %5'e kadar jüt lifleri ile karıştırıldığında büzülme limiti %13,75'ten %28,68'e yükselmektedir. Ayrıca, optimum su muhtevası değerinin %16,2'den %19,6'ya yükseldiğini ve maksimum kuru yoğunluk değerinin ise 1,68 gr/cm³'ten 1,58 gr/cm³'e düştüğünü bildirmişlerdir. Öte yandan, lif içeriğindeki artışla birlikte CBR değeri %3,1'den %4,95'e ve serbest basınç dayanımı ise 1,09 kg/cm²'den 1,35 kg/cm²'ye artmıştır [34].

Singh ve Bagra, taban zemininin iyileştirilmesi için jüt lifi kullanımını incelemiştir. Jüt lifi içeriğindeki artışla birlikte taban zemininin CBR

değerinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca kullanılan jüt lifinin uzunluğunun ve çapının artmasıyla CBR değerinin de arttığı sonucuna varmışlardır [35].

Aggarwal ve Sharma, taban zemininin özelliklerinin iyileştirilmesinde jüt lifi uygulamasını incelemiştir. Bu amaçla, farklı uzunluklarda (5-20 mm) ve farklı oranlarda (%0,2-1,0) jüt lifleri kullanmışlar ve bu lifleri mikrobiyal saldırı ve bozunmadan korumak için bitüm ile kaplamışlardır. Jüt lifinin maksimum kuru yoğunluğu azaltırken optimum su içeriğini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Maksimum CBR değeri, 10 mm uzunluğunda ve %0,8 oranında jüt lifi ilavesi ile elde edilmiş olup, ham zeminin CBR değerinin 2,5 katından daha fazla bir artış göstermiştir [36].

Alqaissi ve diğerleri yumuşak zeminlerin doğal lifler kullanılarak takviye edilmesi kapsamında deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu amaçla, takviyesiz ve takviyeli numunelerin hazırlanmasında kaolin ve jüt lifi kullanılmıştır. Jüt lifi, takviye malzemesi olarak %0,5, %1, %2 ve %3 olmak üzere farklı içeriklerde kaoline rastgele ilave edilmiştir. Lifler 2 cm ve 4 cm olarak iki farklı uzunlukta kesilmiştir. Jüt liflerinin kilin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla hazırlanan karışım üzerinde standart Proktor sıkıştırma deneyi, tek boyutlu konsolidasyon deneyi ve serbest basınç deneyi olmak üzere toplam 27 laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneylerden, jüt lifinin eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluğun azaldığı ve optimum nem içeriğinin arttığı görülmüştür. Jüt lifinin %0,5 oranında dâhil edilmesi maksimum kuru yoğunluğu yaklaşık %5 azaltmıştır. Jüt lifi, kullanılan tüm lif içeriği ve uzunluğu için serbest basınç dayanımını büyük ölçüde etkilemiştir. Jüt lifi ile takviye edilmiş kil numunesinin doğal kilden 4,26 kata kadar daha fazla serbest basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca jüt lifi, özellikle 4 cm'lik bir lif uzunluğunda kopma gerinimini artırmıştır. Diğer taraftan, takviye edilmiş kil numunelerinin gerilme altında yumuşadığı görülmüştür [37].

Islam ve Ivashita, kerpiç malzemenin dayanımını ve sünekliğini artırmak için takviye malzemesi olarak saman, kenevir ve jüt lifleri ile çimento ve alçı kullanmıştır. Saman, basınç dayanımı pahasına kerpiç bloğun sünekliğini artırmıştır. Jüt, kerpiç bloğun sünekliğini ve tokluğunu geliştirmek için seçilen lifler arasında en etkili olanı olmuştur. Alçı, kerpiç bloğun dayanımını arttırmasına rağmen sünekliğini arttırmamıştır. Benzer şekilde, çimento sadece harç dayanımını iyileştirmiştir. Diğer taraftan, jüt liflerinin harç dayanımının yanında blok ve harç arasındaki yapışmanın iyileşmesinde etkili olduğu belirlenmiştir [38].

Hossain ve diğerleri, jüt lifi ile takviye edilmiş zemin üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, zemin numuneleri, takviyeli ve

takviyesiz olarak Kaliforniya taşıma oranı (CBR) kalıbında optimum nem içeriğine karşılık gelen maksimum kuru yoğunlukta hazırlanmıştır. Kuru zemin ağırlığına göre jüt lifi yüzdesi, %0,3, %0,6, %0,9 ve %1,2 olarak alınmıştır. Araştırmada, lif uzunluğu, 15 mm ve 30 mm olarak alınmış ve her lif uzunluğu için 4 mm ve 8 mm'lik iki farklı çap kullanılmıştır. Laboratuvar deneylerinden, jüt lifi içeriğinin zeminin yoğunluğu üzerindeki etkisi, jüt lifinin her bir uzunluğu ve çapı için gözlemlenmiştir. Jüt lifinin her bir uzunluk ve çapı için, jüt lifi içeriğindeki artışla optimum nem içeriğinin arttığı ve maksimum kuru yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Zemin ve lif ile güçlendirilmiş zeminin laboratuvar CBR değerleri belirlenerek jüt lifinin uzunluk/çap oranının zeminin CBR değeri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Deney sonuçları, zeminin CBR değerinin, jüt lifinin uzunluğundaki artışla arttığını göstermiştir. Ayrıca, jüt lifinin çapının arttırılmasının, güçlendirilmiş zeminin CBR değerini daha da arttırdığı gözlemlenmiştir [39].

2.1.5. Keten lifi

Keten, dünyanın birçok yerinde lifleri ve tohumları için yetiştirilen bir bitkidir. Keten insanlığın bildiği en eski tekstil liflerinden biri olup Antik çağlardan beri kumaş yapımında kullanılmaktadır.

Segetin ve diğerleri, keten liflerinin eklenmesi suretiyle zemin-çimento kompozitinin sünekliliğini iyileştirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Zeminle ara yüzey bağ dayanımını artırmak için lif yüzeyine bir emaye boya kaplaması uygulanmıştır. 70 ve 85 mm'lik lif uzunlukları, kompozitteki zeminin kuru kütlelerinin yüzdesi olarak ölçülen %0,6 ve %0,8'lik lif içeriği ile birlikte incelenmiştir. Keten lifi takviyesinin eklenmesiyle zemin-çimento kompozitinin sünekliliğinde önemli bir gelişme sağlanmıştır. Yazarlar tarafından %0,6'lık lif içeriği seviyeleri ile birlikte 85 mm'lik lif uzunluğu önerilmiştir [40].

Ayininuola ve Udoh tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, keten lifinin zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Zemin örnekleri Nijerya'nın İbadan kentinde bulunan İbadan Üniversitesi'ndeki ariyet çukurlarından elde edilmiştir. Doğal zeminlerin Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Keten lifleri taban zeminine ağırlıkça %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında eklenmiş ve karışımların geoteknik özellikleri ölçülmüştür. Sonuçlar, keten lifi ilavesinin zeminin Kaliforniya taşıma oranını %3,1'den %15'e yükselttiğini ve aynı zamanda serbest basınç dayanımında da muazzam bir artışa sebep olduğunu göstermiştir. Zeminin maksimum Kaliforniya taşıma

oranına ve serbest basınç dayanımına %1,2'lik optimum keten lifi içeriğinde ulaşılmıştır [41].

“Uku”, kırsal Maori topluluklarında yetersiz barınma sorununu çözmek için geliştirilmiş, düşük maliyetli, keten lif takviyeli, stabilize edilmiş ve sıkıştırılmış toprak duvarlı bir konut sistemidir. Bu sistemde, keten yapraklarının keten liflerine hızlı bir şekilde dönüşümünü sağlayan bir mobil keten makinesi kullanılmaktadır. Cheah ve diğerleri mevcut bir Uku test evinde inşa edilmiş, bir pencere ve kapı açıklığı içeren, tam boyutlu 5,5 metre uzunluğundaki bir duvar kesitinde bir dögüsel yük testi gerçekleştirmiştir. Duvar testi, göçme yöntemlerini, yapısal sismik zayıflık alanlarını, duvar panelleri arasındaki etkileşimleri ve duvar sisteminin yapısal performansını belirlemek için yapılmıştır. Test, Uku duvar sisteminin doğrusal olmayan bir kapasiteye sahip olduğunu, ancak duvarın her bir toprak paneli içinde sünek olmayan göçme modları sergilediğini kanıtlamıştır. Test, aynı zamanda gelecekteki Uku konut sistemleri için verimli ve güvenli bir tasarım metodolojisi geliştirmek için bir temel sağlamıştır [42].

2.1.6. Bambu lifi

Bambu lifi, yenilenmiş bir selüloz lifi olup nadiren haşereler tarafından yenir veya patojenler tarafından enfekte edilir. Bu özelliğinden yola çıkarak araştırmacılar, bambunun “Bambu Kun” olarak bilinen özel bir antibakteriyel ve bakteriyostatik biyoajana sahip olduğunu keşfetmiştir. Diğer taraftan, bambu köksaplarının erozyonu önleyebilen mükemmel toprak bağlayıcılar olduğu da bir başka önemli konudur [43]. Ayrıca, bambu lifleri çekme gerilmelerine karşı önemli ölçüde dayanıklıdır. Bu özelliklerinden dolayı bambu lifi, sıradan zemin için güçlendirici bir malzeme görevi görebilir. Toprak parçacıklarını birbirine bağlar ve hacimsel özelliklerdeki hızlı değişimin azaltılmasına yardımcı olur.

Coutts ve Ni, bambu lifinin çimento yapı malzemeleri için potansiyel bir takviye malzemesi olarak kullanımını araştırmıştır. Yazarlar tarafından gerçekleştirilen testler, bambu lifinin çimento matrisine dâhil edilmek için tatmin edici bir lif olduğunu göstermiştir [44]. Dolayısıyla, Ramaswamy ve diğerleri de bambu lifleri ile güçlendirilmiş betonun davranışını incelemiştir. Sonuçlar, bu liflerin betonda avantajlı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [45]. Zira bambu lifli betonların basınç ve çekme dayanımları kontrol betonlarından daha yüksek olmamakla birlikte, deformasyon davranışları süneklikte iyileşme ve rötrede azalma göstermiştir. Bu betonların darbe ve kırılma toklukları da belirgin şekilde daha yüksek olmuştur.

Brahmachary ve Rokonuzzaman tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada hem sıradan zemin hem de lif takviyeli zemin kullanılarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Islatılmamış ve ıslatılmış CBR testleri için zemin numuneleri, lifli ve lifsiz durum için optimum nem içeriğine sahip olacak şekilde maksimum kuru yoğunlukta hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan takviye malzemesi, sırasıyla 3 ve 6 mm çapında ve 10 ve 20 mm uzunluğundaki doğal bambu lifleri olmuştur. Bambu lifinin zeminin susuz ağırlığına oranı %0,20, 0,40, 0,60, 0,80, 1,00, 1,20 ve 1,40 olacak şekilde lifler zemine rastgele karıştırılmıştır. Deney sonuçlarından bambu lifinin uzunluğu ve çapı arttıkça zeminin ıslatılmamış ve ıslatılmış CBR değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bambu lifi yüzdesinin artırılmasının güçlendirilmiş zeminin CBR değerini arttırdığı ve bu artışın %1,2 lif dozajında anlamlı olduğu tespit edilmiştir [46].

Kanayama ve Kawamura, zemine %1, %3, %5 oranında bambu lifi katılarak hazırlanan örneklerde, lif içeriği arttıkça likit limit ve plastik limit değerlerinin artma eğiliminde olduğunu, plastisite indeksinin ise değişmediğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan kompaksiyon testi sonuçlarına göre, lif içeriğinin artmasıyla maksimum kuru yoğunluğun düştüğü ve optimum nem içeriğinin arttığı sonucuna varmışlardır. Sıkıştırma testi ve serbest basınç testi sonucunda, bambu lifinin karıştırılmasının inşaat için gerekli toprak malzemenin azalmasına ve dayanımın artmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Bambu lifi karıştırılmış zeminin %0, %1, %3 ve %5 karışım oranlarındaki maksimum basınç gerilmesi sırasıyla 115, 108, 130 ve 152 kN/m² olmuştur. Kuru bölgede lifli zemin lifsiz zemine göre daha düşük rijitlik ve daha yüksek dayanım gösterdiğinden, lif ilavesinin zemine süneklik kazandırdığı düşünülebilir. Ayrıca su içeriğinin artmasına bağlı olarak numunenin rijitliğindeki azalmanın bambu lifi ilavesiyle bastırıldığı bulunmuştur. Dijital mikroskop ile yapılan gözlem sonuçlarından, esas nispeten kalın lifli yapı ve ikincil kılcal lifli yapıdan oluşan iki katmanlı bir yapının oluştuğu görülmüştür. Böylece, bambu lifinin karmaşık yapısının, lifle takviye edilmiş zeminin dayanımında etkili olduğu bulunmuştur [47].

2.1.7. Arpa samanı

Arpa, bütün dünyada yaygın olarak ekilen bir üründür. Arpa samanı ise, kompozit toprak bloklarının üretiminde ve zeminde takviye elemanı olarak kullanılsa da bu kullanımın performansına ilişkin az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde, Bouhicha ve diğerleri, arpa samanı ile güçlendirilmiş kompozit bir zemini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, lif uzunluğu ve lif oranının büzülme ile basınç, eğilme ve kayma dayanımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma, eğer

optimize edilmiş bir takviye oranı kullanılırsa, büzülmeyi azaltmada, sertleşme süresini kısaltmada ve basınç dayanımını artırmada saman eklemenin olumlu etkilerini göstermiştir. Ayrıca eğilme ve kayma dayanımları da arttırılmış ve güçlendirilmiş numunelerde daha sünek bir kırılma elde edilmiştir [48].

Ashour ve diğerleri tarafından lif takviyeli toprak sıvaların basınç dayanımına ilişkin deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kohezyonlu toprak ve kumdan oluşan yeni bir sıva malzemesi yapmak için buğday samanı, arpa samanı ve talaş olmak üzere üç tür doğal lif kullanılmıştır. Liflerin sıvaların mukavemeti ve sünekliği üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmasına rağmen, sıvaların esneklik modülü üzerindeki etkilerinin nispeten az olduğu sonucuna varmışlardır [49].

Kazragis, arpa samanı ile çimento karışımının, atmosferik kirliliği de azaltan, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir yapı malzemesi oluşturabileceğini ifade etmiştir [50]. Bu faydalara ek olarak, samanın hoş iç mekân sıcaklıkları yaratmak üzere bir ısı yalıtım malzemesi görevi görebileceği belirtilmiştir.

2.1.8. Mısır püskülü

Mısır, dünyada en çok ekilen üçüncü üründür. Mısır üretiminden elde edilen büyük miktarda mısır püskülü ise, bir yan ürün olup çoğunlukla imha edilmektedir. Ancak yüksek selüloz içeriğine sahip bir tarımsal atık olan mısır püskülü lifi, günümüzde kâğıt ve ilaç yapımı gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Diğer taraftan mısır püskülü lifi, takviye edilmiş kompozitlerde lif ve matris arasında daha iyi bir temas sağlar ve içeriğindeki yüksek lignin sayesinde hava koşullarına karşı oldukça dayanıklıdır. Dolayısıyla, bu yan ürün kullanılarak gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu, birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar doğal veya çimentolu zemine mısır püskülü eklenmesinin, işlenmiş zeminin basınç ve yarmada çekme mukavemetini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Bu çalışmalardan birinde Tran ve diğerleri, mısır püskülü lifi ile takviye edilmiş düşük plastisiteli silt zeminin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalarında lif katkı miktarının (%0,5, 1, 1,5 ve 2) yanı sıra lif uzunluklarının (10, 30 ve 50 mm) lif takviyeli zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi ve yarmada çekme deneyi gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, zemine mısır püskülü liflerinin eklenmesinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, süneklik, tokluk ve sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Lif içeriğinin %1,5'e kadar artmasıyla maksimum kuru yoğunluk değerinin arttığını, optimum su muhtevası değerinin azaldığını, %1.5'ten sonraki artışlarda maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığını ve optimum su

muhtevası değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca lif uzunluğundaki artışın maksimum kuru yoğunluk değerinde düşüşe, optimum su içeriği değerinde ise artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan serbest basınç dayanımında en yüksek artışa neden olan lif içeriğinin %1, en etkili lif uzunluklarının ise 10 ve 30 mm olduğunu bildirmişlerdir [51].

Roy ve Mukherjee, sentetik yağla kirlenmiş toprağın sıkışma ve dayanım özelliklerinin, mısır kabuğu liflerinin toprağın ağırlığına göre %1, 2, 3 ve 4'lük farklı yüzdelerde rastgele karıştırılmasıyla iyileştirilmesini ele alan deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma, toprağın ağırlığına göre %5, 10 ve 15 oranlarında sentetik yağ karıştırılarak yapay olarak hazırlanan toprak numuneleri üzerinde yürütülmüştür. Toprağın indeks özellikleri test edilmiş, ardından mısır kabuğu lifi ilavesiyle değişen şablonu gözlemek amacıyla Proktor deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar toprağın sıkışma ve dayanım özelliklerinde belirgin bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Toprağın pH değeri de belirlenmiş ve mısır kabuğu lifi ilavesiyle toprak özelliklerinde asidik yapıdan nötralizasyona doğru kayda değer bir değişiklik olduğu gösterilmiştir [52].

2.1.9. Kenaf lifi

Kenaf, otsu bir bitki olup 1,5-3,5 metreye kadar uzayabilen sapları 1-2 cm çapındadır. Yaprakları 10-15 cm uzunluğunda olup şekil olarak değişkendir. Hindistan, Bangladeş, Orta Asya, Afrika ve bazı Orta Amerika ülkeleri, kenafın en çok yetiştirildiği bölgelerdir. Kenaf, jüt ile benzer özellikler göstermektedir.

EsmailpourShirvani ve diğerleri tarafından, kenaf lifi ile takviye edilmiş zeminin sıkışma ve kayma dayanımı özelliklerini büyük ölçekli direkt kesme deneyi ile araştırmak için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, takviye edilmemiş ve edilmiş kum-kil karışımları üzerinde toplam 128 deney yapılmıştır. Sonuç olarak, kenaf lifi takviyesinin zeminin gerilme-gerinim ilişkisi, hacim değişimi, sünekliği ve göçme durumu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kum-kil karışımına belirli bir miktar kenaf lifi eklenmesi, karışımın sünekliği ile kayma dayanımını arttırmış ve böylece üst yapı tabakalarında, şevlerin korunmasında, dolgularda ve bina temellerinde kullanılmasını mümkün kılmıştır [53].

Maguesvar ve diğerleri, pirinç kabuğu küllü ve kenaf lifi ilavesinin zeminin yoğunluk, optimum nem içeriği, kayma dayanımı, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır. Killi zemini stabilize etmek için pirinç kabuğu küllü %0 ila %12,5 oranları arasında %2,5 artışla ve kenaf

lifi ise %0 ila %1 oranları arasında %0,25 artışla zemine ilave edilmiştir. Standart Proktor sıkıştırma, serbest basınç dayanımı, direkt kayma dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı ve geçirimsizlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piring kabuğu külünün optimum yüzdesi %10 olarak belirlenmiştir. Zemine kenaf lifi ilave edilmesiyle geçirimsizlik katsayısı artmıştır. Serbest basınç dayanımı, kayma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı, zemin karışımlarında kenaf lifi kullanılmasıyla artan bir eğilim göstermiştir [54].

Ghadakpour ve diğerleri, çimento ve kenaf lifinin kumlu zemin üzerindeki etkilerini, değerlendirme kriterleri olarak çimento içeriği, kenaf lifi içeriği ve uzunluğu açısından incelemiştir. Bu amaçla, serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik dalga hızı dâhil olmak üzere çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Test edilen numunelerde, çeşitli çimento içerikleri (%3 ve %6) ile 8 mm ve 16 mm uzunluğundaki liflerin yine çeşitli içeriklerinin (%0, 0,25, 0,5 ve 0,75) çimentolu kumun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu tüm lif içerikleri için %50 (8 mm) + %50 (16 mm) oranında 8 mm ve 16 mm'lik liflerin aynı anda "hibrit" olarak uygulanmasının etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çimento içeriğinin artmasıyla serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, enerji absorpsiyon kapasitesi, ultrasonik dalga hızı ve kırılgenlik indeksi değerlerinin arttığını göstermiştir. Numunelere rastgele dağıtılmış kenaf lifi eklenmesi sadece gevreklik indeksini, elastisite modülünü ve ultrasonik dalga hızını azaltmakla kalmamış, aynı zamanda serbest basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve enerji absorpsiyon kapasitesini de artırmıştır. Ayrıca, kenaf liflerinin uzunluğu arttıkça serbest basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı artarken, esneklik modülü azalmaktadır. Bundan başka, "hibrit" karıştırma planının uygulanmasıyla, 8 mm'lik lif içeren numunelere kıyasla serbest basınç dayanımının, yarmada çekme dayanımının ve enerji absorpsiyon kapasitesinin artması ve gevreklik indeksinin azalmasının yanı sıra, 16 mm'lik lif içeren numunelere kıyasla pik gerilmenin %50'sindeki sekant modülü (E50) ve ultrasonik dalga hızı artmıştır [55].

Doğal kenaf liflerinin kullanılmasının zayıf taban zeminlerinin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini göstermek için Mittal ve Shukla tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip silt (MH) ve orta sıkıştırılabilirliğe sahip kil (CI) olarak sınıflandırılan iki tip zemin kullanılmıştır. Zemin ağırlığına göre %0,0625, %0,125, %0,25 ve %0,50 olmak üzere dört farklı yüzdede kenaf lifleriyle güçlendirilmiş zemin numuneleri üzerinde laboratuvar kompaksiyon, ıslatılmış Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Siltli zemin kenaf lifleriyle güçlendirildiğinde Kaliforniya taşıma oranında %150

ve serbest basınç dayanımında %84'lük maksimum iyileşme rapor edilirken, killi zemin durumunda bu artışlar sırasıyla yalnızca %18 ve %40 olmuştur. Çeşitli yüzdelerde kenaf lifleri ile takviye edilmiş zemin numuneleri için pik sonrası daha küçük mukavemet kaybı ve daha büyük göçme gerinimi gözlemlenmiştir. Siltli zemin durumunda ise daha belirgin etki görülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, siltli zemin durumunda zemin parçacıkları ve lifler arasında önemli bir bağ oluştuğunu, dolayısıyla zeminden takviye malzemesine stres transferinin meydana geldiğini ve bunun da dayanım artışına yol açtığını göstermiştir. Ancak, killi zeminde bu etki daha az olmuştur. Sıkıştırma özellikleri ve lif içeriği açısından ıslatılmış CBR ve serbest basınç dayanımı için tahmin modelleri geliştirmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir [56].

2.1.10. Papirüs lifi

Papirüs sulak alanlarda yetişen bir bitkidir. Papirüs, erozyon kontrolü, toprak setlerin performansının artırılması ve zeminin taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi için farklı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Al-Adili ve diğerleri, papirüs lifi ilavesinin kumlu ve killi silt zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Papirüs lifi, ham zeminin hacimce %5, 10, 15, 25 gibi dört farklı lif yüzdesinde rastgele zemine karıştırılmıştır. Çeşitli lif içeriklerine sahip papirüs takviyeli numuneler üzerinde direkt kesme, konsolidasyon ve yer değiştirme testleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, direkt kesme deneyi sonuçlarına dayanarak, %10 lif ilavesi ile en yüksek içsel sürtünme açısı, kohezyon ve elastisite modülü değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, lif ilavesiyle zeminin rijitliğinin önemli ölçüde arttığını ve sonuç olarak zeminin ani oturmasının azaldığını bildirmişlerdir [57].

2.1.11. Pamuk samanı lifi

Pamuk samanı, katma değerli biyokompozit ürünler üretmek için kullanılır. Ayrıca saman lifinin dayanımı için önemli bileşimler olan yüksek kaliteli selüloz ve lignini büyük miktarda içerir ve doğal bir polimer malzemedir [58]. Pamuk samanından hazırlanan lifler, içi boş bir yapıya sahiptir, bu da yumuşak zeminlerin performansını etkili bir şekilde artırabilir. İlave olarak, saman liflerinin biyobozunurluk özelliklerine rağmen, saman lifi takviyesinin neden olduğu zeminin artan dayanımı uzun süre tamamen ortadan kalkmadığından birçok araştırmacı bu malzemelerle çalışmıştır [59].

Liu ve diğerleri, donma-çözülme döngülerinin doğal liflerle güçlendirilmiş zeminin dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için pamuk samanı lifi

ile güçlendirilmiş zemin üzerinde serbest basınç dayanımı, tek lif çekme ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneylerini 0, 3, 5, 10, 15 ve 20 donma-çözülme döngüsü altında gerçekleştirmiştir. Zemin %0,2 ve %0,4 oranlarında pamuk samanı lifi ile takviye edilmiştir. Donma-çözülme döngüleri için, numuneler 12 saat boyunca -20°C 'deki bir dondurma kabına yerleştirilmiş, ardından çıkarılmış ve 12 saat boyunca 20°C 'deki çözülme kabına koyulmuştur. Deneylerden, lif takviyeli zeminin serbest basınç dayanımının, donma-çözülme döngüsü sayısı ile birlikte üstel olarak azaldığı bulunmuştur. İlave olarak, lif takviyesi, serbest koşullar altında donmuş ve çözülmüş zeminin yumuşama derecesini zayıflatmıştır. Bundan başka, donma-çözülme koşulları altında lifle güçlendirilmiş zemindeki serbest basınç dayanımının azalması, lif-zemin arayüzündeki dayanım azalmasından daha küçük bulunmuştur. Bunun sebebi, lif takviyesinin esas olarak sadece lif-zemin arayüzü tarafından değil aynı zamanda ayrı lifler tarafından oluşturulan uzaysal gerilme ağı tarafından da yönetilmesidir. Liflerin takviyesini artıran karmaşık uzaysal gerilme ağı, donma-çözülme döngülerinden sonra taramalı elektron mikroskobu tarafından izlenmiştir [60].

Brahmachary, hem uçucu kül hem de pamuk lifinin zemini iyileştirmek için stabilize ve takviye edici malzeme olarak kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada tüm deneyler, zeminin maksimum taşıma kapasitesi için uçucu kül yüzdesinin %10 olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Pamuk lifinin %0,3, %0,5 ve %0,7 oranlarında ilave edildiği üç tip numune hazırlanmıştır. Örneğin, normal lif ilavesiz zemin numunesi için kuru yoğunluk yaklaşık 22 kN/m^3 iken, pamuk lifi ilavesi ile kuru yoğunluk $48,05 \text{ kN/m}^3$ 'e kadar artmıştır. Nihai taşıma kapasitesi donatılı zemin için $80,65 \text{ kPa}$ 'a kadar çıkarken, donatısız zemin numunesi için nihai taşıma kapasitesi 35 kPa değerini vermiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyinin sonucu, donatısız zeminde %17 iken donatılı zeminde %23 değerine yükselmiştir. CBR deneyi, yalnızca maksimum gerilmenin elde edildiği pamuk lifinin ilave edilme oranının %0,7 olduğu durum için yapılmıştır. Bu çalışmanın en önemli kısmı, zemin iyileştirmesinde pamuk lifinin farklı oranlarda kullanılmasının etkisini ortaya koymak olmuştur. Bu makale, pamuk lifinin uçucu kül ile karışma yüzdesindeki artışa bağlı olarak serbest basınç dayanımı deneyleri için deviyör gerilmenin kademeli olarak arttığını göstermiştir [61].

2.1.12. Kenevir lifi

Kenevir, özellikle endüstriyel veya tıbbi kullanım için yetiştirilen bir bitki olup çok çeşitli ürünlerin yapımında kullanılabilir. Bambu ile birlikte kenevir, dünyada en hızlı büyüyen bitkiler arasındadır. Ayrıca, 50.000 yıl önce kullanılabilir life dönüştürülen ilk bitkilerden biridir. Kenevir lifleri ise, doğal

lifler ailesinin en güçlü üyelerinden biri olup biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve yapay liflere kıyasla düşük yoğunlukları nedeniyle kompozit malzemelerde takviye olarak geniş kabul görmüştür. Ayrıca bu malzemeler doğal mekanik, termal ve akustik özelliklere sahiptir.

Kalkan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, doğal ve çevre dostu özelliklerinden dolayı kenevir lifi tercih edilmiştir. Kenevir lifinin killi zeminin basınç dayanımı üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla laboratuvar koşullarında serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kenevir lifinin killi zeminlerin basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [62].

Bir başka çalışmada, Najjar ve diğerleri, sıkıştırılmış kilin yük tepkisini iyileştirmede doğal kenevir liflerinin potansiyel kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla kapsamlı bir laboratuvar deney programı tasarlanmıştır. Deney programı, kenevir lifleriyle güçlendirilmiş kil numuneleri üzerinde gerçekleştirilen bir dizi konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli deneyden oluşmuştur. Takviye edilmiş kil numunelerinin çapı 7,1 cm ve yüksekliği ise 14,2 cm olup, lif içerikleri %0 ile %1,0 arasında değişen 25 mm uzunluğunda liflerle güçlendirilmiştir. Lif yüzdesinin artmasıyla kilin sünek davranışının arttığı tespit edilmiştir. Bu davranışta %0,4'ten daha büyük lif içeriklerinde daha belirgin bir iyileşme olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, lif içeriği arttıkça zeminin drenajsız kayma dayanımının arttığı, en yüksek dayanım artışının ise özellikle %0,3 ile %0,5 arasındaki lif içeriğinde elde edildiği belirtilmiştir [63].

Vafaei ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada kenevir lifleriyle güçlendirilmiş zeminin davranışı araştırılmıştır. Rastgele dağıtılmış kenevir lifleriyle güçlendirilmiş Babolsar kumunun dayanım davranışını değerlendirmek için bu çalışmada çeşitli statik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Kenevir lifleri kuru ağırlığa göre %0,3, 0,6 ve 0,9 oranlarında ve 6, 10 ve 14 mm uzunluklarda zemine karıştırılmıştır. Statik üç eksenli deneyler 50, 100 ve 200 kPa hücre basıncında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, liflerin varlığının kumun davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kenevir takviyeli kum üzerinde yapılan incelemelerin sonuçları, liflerin kumun kayma dayanımı parametrelerini, tepe dayanımını, akma gerinimini ve rijitliğini iyileştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Zemine 6 mm lif eklenmesi, lif katkı oranı %0,9 ve hücre basıncı 50 kPa iken tepe dayanımında en yüksek artışa (%331) neden olurken lif katkı oranı %0,3 ve hücre basıncı 200 kPa iken tepe dayanımında en düşük artışa (%21) sebep olmuştur. 10 mm ve 14 mm uzunluğundaki lifler için maksimum ve minimum mukavemet artış oranları, 6 mm liflerle aynı koşullar altında ortaya

çıkıştır. Böylece 10 mm'lik lifler için maksimum ve minimum mukavemet kazanımları sırasıyla %499 ve %39 bulunmuştur. 14 mm uzunluğundaki lif için bu rakamlar sırasıyla %845 ve %49 olmuştur. Takviyesiz zemin durumunda içsel sürtünme açısının 43° 'ye eşit olduğu görülmüştür. Bu değer, 6 mm uzunluğunda %0,3 lif içeren donatılı zemin için 49° 'ye eşit olup, 10 mm uzunluğunda %0,9 lif içeren donatılı zemin için çoğu durumda 57° 'ye ulaşmıştır. 6 mm uzunluğunda %0,3 lif içeren güçlendirilmiş zeminin kohezyon miktarı 65 kPa'a eşit olmuş ve çoğu durumda %0,9 lif içeren ve 14 mm uzunluğa sahip güçlendirilmiş zemin numunesi için 385 kPa olarak bulunmuştur [64].

Yazici ve Keskin tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 olmak üzere farklı lif içeriklerinin, ham ve kaplanmış olarak güçlendirilmiş düşük plastisiteli killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, güçlendirilmiş numuneler, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyinde farklı hücre basınçları (50, 100 ve 200 kPa) altında aksel olarak yüklenmiştir. Deney sonuçları, güçlendirilmemiş zeminin gerilme-gerinim davranışının, zemine kenevir lifi eklenmesinden sonra gerinim yumuşamasından gerinim sertleşmesine doğru değiştiğini göstermiştir. Genel olarak tüm numunelerde şişkinlik kırılması meydana gelmiştir. En yüksek deviator gerilmesi, enerji absorpsiyon kapasitesi ve içsel sürtünme açısı değerleri ağırlıkça %0,10 kenevir lifi kullanılan numunede elde edilmiştir. Lifler, ham kenevir liflerini biyolojik bozulmaya karşı korumak için üç farklı su geçirmez malzemeyle kaplanmıştır. Ham kenevir lifinin %218 olarak ölçülen su emme kapasitesi, Akrlonitril Bütadien Stiren, epoksi ve Kristal PIB 907 kaplanmasından sonra sırasıyla %127, %213 ve %159 oranında azalmıştır. Ham kenevir liflerinin kaplanmasıyla liflerin çapları, sürtünme yüzey alanları ve yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. Sonuç olarak, ağırlıkça %0,10 oranında kaplanmış kenevir lifi içeren numunelerin, ham kenevir lifi içeren numunelerle karşılaştırıldığında deviator gerilmesi, içsel sürtünme açısı ve enerji absorpsiyon kapasitesi değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir [65].

Diab ve diğerleri, sıkıştırılmış kilin yük tepkisinin iyileştirilmesinde doğal kenevir lifinin kullanımını araştırmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, 18 tane konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyden oluşan bir laboratuvar deney programı tasarlanmıştır. Kontrol kili ve çeşitli oranlarda eklenen kenevir lifleriyle karıştırılmış kil numuneleri, bir dizi su içeriğinde hazırlanmış ve standart Proktor prosedürü kullanılarak sıkıştırılmıştır. Çapı 7,15 cm, yüksekliği 14,3 cm olan numuneler %14, %18 ve %20 olmak üzere değişen nem içeriklerinde hazırlanmış ve %0,5 ile %1,5 arasında değişen gravimetrik içeriklerde 4 cm uzunluğundaki liflerle karıştırılmıştır.

Sonuçlar, kenevir takviyeli numuneler için kayma mukavemetinde %100'e kadar iyileşmelerin gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. İyileşme yüzdesi, %1,25'lik bir eşik değerine kadar lif içeriğiyle birlikte artmış ve matris kilinin optimum nem içeriğine göre sıkılaşmada kullanılan su içeriğinin büyüklüğüne bağlı olarak farklılık göstermiştir [66].

2.1.13. Kamış lifi

Kamış veya şeker kamışı, 6 m yüksekliğe ve 6 cm çapa kadar büyüyebilir. Küspe ise, şeker kamışı üretiminde kamış sapından özsuyunun çıkarılmasından sonra elde edilen lifli artıktır olup bu artıkların çapları 0,2-0,4 mm arasındadır. Bununla birlikte, atık kamış lifi, lif içindeki artık şekerler ve sınırlı yapısal özellikler nedeniyle sınırlı kullanıma sahiptir.

Danso ve diğerleri, şeker kamışı küspesi liflerinin toprak blokların dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, %0,25-1 oranında lifle güçlendirilmiş toprak bloklar üzerinde yoğunluk, su emme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve erozyon deneyleri yapılmıştır. Zemin matrisinde optimum (%0,5) şeker kamışı küspe liflerinin kullanılmasının toprak blokların dayanımını iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş toprak blokların daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek su emme özelliğine sahip olmalarına rağmen, erozyona karşı daha iyi bir direnç gösterdikleri bulunmuştur [67].

Asher ve Sarang tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada zemin %6 oranında sönmüş kireç ile stabilize edilerek şişme ve kıvam limitleri azaltılmıştır. Daha sonra, zemin-kireç karışımı %2, %4 ve %6 oranında şeker kamışı küspesi lifi ilave edilerek daha da stabilize edilmiştir. Sonuçta elde edilen karışımlar, yoğunluk ve Kaliforniya taşıma oranı bakımından gelişme göstermiştir. Araştırmadan, özellikle zeminin taban zemini malzemesi olarak kullanılabileceği üst yapı açısından, hidratlı kireç ve şeker kamışı küspesi lifi kullanılarak stabilize edilebileceği sonucuna varılmıştır [68].

Dang ve diğerleri tarafından, şeker kamışı küspesi lifleri ile sönmüş kireç ilavesinin, stabilize edilmiş şişebilen zeminlerin mühendislik özellikleri ve büzülme-şişme davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir çalışma yapılmış ve bu amaçla bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Şeker kamışı küspesi lifi, bu çalışmada şişebilen zeminlerin stabilizasyonu için takviye bileşeni olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan şişebilen zeminler Queensland, Avustralya'dan elde edilmiştir. Şeker kamışı küspesi liflerinin şişebilen zeminin mühendislik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için, şişebilen zemine ve sönmüş kireç-şişebilen zemin karışımlarına %0,5, %1,0 ve %2,0'lik değişen oranlarda rastgele dağıtılmış küspe lifleri eklenmiştir.

İşlem görmemiş ve işlem görmüş şişebilen zemin numuneleri üzerinde 3, 7 ve 28 günlük çeşitli kür periyotlarından sonra gerçekleştirilen doğrusal büzülme ile serbest basınç dayanımı deneylerinin sonuçları sunulmuştur. Bu deneysel araştırmanın bulguları, sönmüş kireçle harmanlanan şeker kamışı küspesi lifi takviyesinin, kür süresi ve katkı maddesi içeriğinin artmasıyla şişebilen zeminin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Buna karşılık, sönmüş kireç ile şeker kamışı küspesi lifi oranlarının ve kürün artmasıyla stabilize şişebilen zeminlerin doğrusal büzülmesinin azaldığı görülmüştür. Deneysel sonuçlarına dayanarak, şişebilen zeminlerin sönmüş kireç ve şeker kamışı küspesi liflerinin kombinasyonu ile başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği belirtilmiştir [69].

2.1.14 Pirinç Kabuğu Lifi

Pirinç kabuğu, düşük fiyatı ve biyolojik olarak parçalanma potansiyeli olan, bol miktarda bulunan bir gıda atığıdır. Pirinç kabuğunun bileşimi diğer lifli malzemelerden daha karmaşıktır. Silika, pirinç kabuğunda %91,1 oranında dağılılı durumdadır ve silika asidinin canlı organizmalar tarafından polimerizasyonu yoluyla biyosentezlenen hidratlı taneler halinde oluşur.

Baldin ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Brezilya'nın Alegeyte şehrindeki bir işletmenin endüstriyel atığı olan pirinç kabuğu lifini ekleyerek yine Brezilya'nın Curitiba şehrindeki killi zeminin davranışını değerlendirmiştir. Doğal pirinç kabuğu lifinin sıkıştırılmış zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, lif içeriğinin etkisi ve zeminin drenajlı ve drenajsız davranışları gibi hususlar, serbest üç eksenli basınç deneyleri aracılığıyla araştırılmıştır. Ayrıca, zeminin granülometrisinin, özgül kütlelerinin ve Atterberg limitlerinin belirlenmesi için başka deneyler de gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç dayanımını belirlemek için %0,5, %0,75, %1 ve %1,5 oranlarında pirinç kabuğu lifi eklenerek oluşturulan karışımlar için numuneler dört kopya halinde üretilmiştir. Üç eksenli basınç deneyleri, saf zemin numunesi ve %1 oranında pirinç kabuğu lifi eklenmiş numuneler üzerinde 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa hücre basınçları altında gerçekleştirilmiştir. Kabuk yüzeyi ile zemin arasında yer alan arayüzdeki etkileşimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Serbest basınç dayanımı deneylerinde, pirinç kabuğu lifi içeriği %1 ve %1,5 olan numuneler, pirinç kabuğu lifi içermeyen zemine göre %36 artışla en yüksek sonuçları vermiştir. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneylerinin sonuçları, efektif gerilme açısından, sıkıştırılmış saf zemin ile pirinç kabuğu lifi ilave edilmiş zemin numunelerinin dayanımında küçük bir fark olduğunu göstermiştir. Drenajsız testler için, pirinç kabuğu lifi ilavesi olmayan zemine kıyasla, pirinç kabuğu lifi içeren numunelerde

kohezyonda %50'lik bir azalma ve sürtünme açısından %22'lik bir artışla birlikte, dayanımın arttığı görülmüştür [70].

2.1.15 Su Sümbülü Lifi

Su sümbülü dünyanın en istilacı türlerinden biri olup çok çabuk yayılması ve kitlesel olarak büyümesi nedeniyle küresel farkındalık kazanmıştır. Bu yabancı otun yönetiminin maliyetli olduğu ve bu atık otun katma değeri yüksek bir alanda değerlendirilmesinin faydalı olacağı bildirilmektedir. Atık yönetiminin alternatif bir yolu olarak su sümbülü lifinin muhtemel kullanımları üzerine çok az geoteknik çalışma yapılmıştır.

Bol miktarda bulunan, çevre, eko-turizm ve biyolojik çeşitlilik açısından zararlı bir yabancı ot türü olan su sümbülünün sınırlı ömürlü geotekstil üretimi için kullanılabilirliğini göstermek amacıyla Bordoloi ve diğerleri tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Su sümbülü lifinin selüloz, hemiselüloz, lignin ve kül içeriği açısından biyokimyasal bileşimi ile su sümbülü filamentlerinin ve geotekstillerin gerilme mukavemeti belirlenmiştir. Su sümbülünden imal edilen geotekstillerin gerilme mukavemetinin, diğer Hindistan cevizi, jüt, bambu ve sisal gibi tarım ürünlerinden elde edilen liflerin mukavemeti ile karşılaştırıldığında daha yüksek veya karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Su sümbülü geotekstilinin kısa vadeli mukavemet iyileştirmesi konusundaki etkinliği, geotekstil ile güçlendirilmiş zeminin CBR değeri ile güçlendirilmemiş zemininki karşılaştırılarak gösterilmiştir. Su sümbülü geotekstili ile güçlendirilmiş zeminin ortalaması $8,48 \pm 0,2$ olan CBR değerlerinin, donatısız zeminin ortalaması $6,13 \pm 0,07$ olan CBR değerlerine göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu çalışmadan, su sümbülünden elde edilen sınırlı ömürlü geotekstil malzemenin karayolu altyapı projelerinde kullanımının teşvik edilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır [71].

2.2. Sentetik (insan yapımı) lifler

Sentetik lifler, korozyona karşı dirençleri, toksik olmamaları, yüksek çekme mukavemetleri ve rijitlikleri nedeniyle takviye malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Plastik üretim teknolojisinin gelişimi, zemin takviyesinde özellikle plastikten yapılan liflere karşı artan bir ilgiye yol açmıştır.

2.2.1. Naylon lif

Polyamid lifler olarak da adlandırılan naylon lifler, termoplastik, güçlü ve elastik malzemelerdir. Ayrıca, bu lifler, mükemmel tokluğa ve aşınma direncine sahip olup yıkanmaları ve boyanmaları kolaydır.

Kumar ve Tabor, naylon lif takviyeli siltli kilin farklı sıkıştırma derecelerindeki dayanım davranışını incelemiştir. Numuneler, %0, 0,05, 0,15 ve 0,30 oranında naylon liflerle takviye edilerek serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma, %93 sıkıştırma için numunelerin tepe ve artık dayanımının daha yüksek yoğunluklarda sıkıştırılan numunelerden önemli ölçüde daha fazla olduğunu belirlemiştir. Sonuçlar ayrıca, naylon lif ilavesinin, zeminlerin artık dayanımını tepe dayanımındaki artıştan önemli ölçüde daha fazla arttırdığını göstermiştir [72].

Salim ve diğerleri, atık naylon torbalardan elde edilen geri dönüştürülmüş naylon lifler kullanmak suretiyle düşük taşıma kapasitesine ve yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip yumuşak killi bir zemini stabilize etmiştir. Bunun için %1-5 oranında 6 mm uzunluğunda lifler kullanmışlardır. Sonuç olarak lif ilavesi ile zeminin likit limitinin düştüğünü ve plastik limitinin bir miktar arttığını belirtmişlerdir. Böylece zeminin plastisite indeksinin düştüğünü ve zeminin işlenebilirliğinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca lif içeriğindeki artışla birlikte zeminin optimum su içeriği değerinin arttığını ve maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığını bildirmişlerdir. Öte yandan, lif içeriği arttıkça, lif-kil kompozitinin özgül ağırlığının azaldığını ve drenajsız kayma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak artan lif içeriği ile sıkıştırma indeksinin düştüğünü ve %5 naylon lif içeriğinde yaklaşık %35 azalma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [73].

Murray ve diğerleri, naylon halı atığı lifi takviyeli kumlu silt zeminin özelliklerini değerlendirmek için laboratuvar sıkıştırma ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrık, rastgele dağıtılmış lif inklüzyonları, tepe kesme mukavemetini önemli ölçüde artırmış, tepe sonrası mukavemet kaybını azaltmış ve kırılmaya kadar eksenel gerinimi artırmıştır. Ayrıca yazarlar, üç eksenli basınç dayanımının %3 halı atığı lifi ile %204 oranında arttığını ve zeminin sünekliğinin yükseldiğini bildirmişlerdir [74].

Gosavi ve diğerleri, rastgele karıştırılmış lifler ile güçlendirilmiş yerel olarak mevcut siyah pamuk zeminin mukavemet davranışını araştırmıştır. Çalışmada, naylon ve jüt liflerinin karıştırılmasıyla zeminin CBR değerinin takviyesiz zemine göre yaklaşık %50 arttığı, Hindistan cevizi lifinin ise CBR değerini %96'ya kadar artırdığı bulunmuştur. Zemine karıştırılacak optimum lif miktarı %0,75 olarak bulunmuş olup, bu miktarın ötesinde herhangi bir lif ilavesi CBR değerinde önemli bir artışa neden olmamıştır [75].

2.2.2. Polipropilen (PP) lifler

Polipropilen lifler, toksik olmamaları, düşük maliyetleri, yüksek asit ve alkali dirençleri, hidrofobik ve kimyasal olarak inert bir malzeme olmaları

ve yüksek çekme dayanımları nedeniyle zeminleri takviye etmek için yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinden birisidir [76]. Günümüzde, polipropilen lifler, zeminin mukavemet özelliklerini arttırmak, büzülme özelliklerini azaltmak ve kimyasal ve biyolojik bozulmasının üstesinden gelmek için kullanılmaktadır [77]. Polipropilen lifler dünyanın her yerinde büyük miktarlarda üretildiğinden büyük miktarlarda çöp olarak atılmakta ve büyük bir çevresel etki bırakmaktadır. Sonuç olarak, zemin stabilitesini sağlamak ve ekosistemdeki kirliliği en aza indirmek için bu tür atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir [78].

Lif takviyesinin derin veya radye temeller için bir alternatif olarak kullanılabilirliğini ve etkinliğini araştırmak üzere, Balagoudra ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çeşitli testler zemin ağırlığına göre sabit %4 oranında kireç ve %0,25'in katları olarak %1'e kadar artan oranlarda polipropilen lif içeren siyah pamuk zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, maksimum dayanım, %0,75 oranında polipropilen lif ve %4 oranında kireç içeren zeminde elde edilmiştir [79].

Gaspard ve diğerleri, hem fibrile polipropilen lifli hem de fibrile polipropilen lifsiz çimento ile stabilize edilmiş zemin karışımlarının değerlendirmesini yapmışlardır. Louisiana eyaletindeki yedi sahadan üç zemin tipi seçilmiştir. Yapılan deneyler, dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve gerilmesi ile dolaylı çekme direnci modülü deneylerini kapsamıştır. Sonuçlar, fibrile polipropilen lifin zemin çimento karışımına dâhil edilmesinin, dolaylı çekme dayanımını, dolaylı çekme gerilmesini ve tokluk endeksini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, kür süresini arttırmanın yanı sıra liflerin ilavesi, karışımların esneklik modülünü korumuş ya da önemli ölçüde arttırmıştır [78].

Puppala ve Musenda, ayrık ve rastgele yönlendirilmiş polipropilen lif takviyesinin iki tür şişebilen kil zeminin üzerindeki etkisini araştırmıştır. İki tür lif ve zeminin kuru ağırlığına göre %0, 0,3, 0,6 ve 0,9 olmak üzere dört lif dozajı dikkate alınmıştır. Hem ham hem de lif takviyeli killi numuneler serbest basınç dayanımı, hacimsel büzülme, üç boyutlu serbest şişme ve şişme basıncı deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmada, polipropilen lif takviyesinin serbest basınç dayanımını arttırdığı ve şişen killerin hem hacimsel büzülme şekil değiştirmelerini hem de şişme basınçlarını azalttığı bulunmuştur [77].

Tiwari ve diğerleri, endüstriyel atık bir madde olan silika dumanını kimyasal stabilizatör olarak ve polipropilen lifini ise mekanik stabilizatör olarak kullanmayı amaçlayarak şişebilen bir zeminin mekanik ve kimyasal stabilizasyonunu gerçekleştirmiştir. Silika dumanının stabilizatör olarak performansını değerlendirmek için, işlem görmüş ve görmemiş numuneler

üzerinde kompaksiyon, Atterberg limitleri, serbest şişme indeksi, elektriksel iletkenlik, pH, şişme basıncı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Şişebilen zemini stabilize etmek için kuru zeminin ağırlığına göre %2, %4 ve %8 oranlarında silika dumanı ve %0,25, %0,5 ve %1 oranlarında polipropilen lif kullanılmıştır. Sonuçlar, silika dumanı ve polipropilen lif ilavesiyle CBR değerinin arttığını ve büzülme alanının azaldığını göstermiştir. Deneysel sonuçlardan, aynı zamanda silika dumanı ve polipropilen lif ilavesiyle Atterberg limitinde bir azalma olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda killi zeminin büzülme davranışı katlanarak azalmıştır [80].

Consoli ve diğerleri, polipropilen lifler ile güçlendirilmiş ve sıkıştırılmış kumlu zeminin kalın ve homojen bir tabakası üzerindeki yük-oturma tepkisini araştırmıştır. Polipropilen lif takviyeli numuneler, testlerin sonuna kadar, %20'den daha büyük eksenel gerilmelerde belirgin bir sertleşme davranışı gösterirken, takviye edilmemiş numuneler, büyük gerilmelerde neredeyse mükemmel bir plastik davranış sergilemiştir. Bu gelişme, sıg temellerde, zayıf zeminler üzerindeki toprak setlerde ve aşırı deformasyona uğrayabilen diğer toprak işlerinde lif takviyesinin potansiyel uygulamasını önermektedir [81].

Çimento ve polipropilen lif takviyesinin kum üzerindeki etkisini belirlemek için Hamidi ve Hoopes tarafından geleneksel üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Çimento içeriği, kuru ağırlıkça kumun %3'ü olup numuneler yedi gün süreyle kürlenmiştir. 12 mm uzunluğunda ve 23 μ m kalınlığındaki lifler, kum-çimento karışımının kuru ağırlıkça %0,0, %0,5 ve %1'i oranında ilave edilmiştir. Numuneler %50 ve %70 bağıl yoğunluklarda hazırlanmış ve 100, 300 ve 500 kPa hücre basınçlarında üç eksenli deneyler yapılmıştır. Gerilme-gerinim ve hacim değişimi davranışı ile zeminin rijitliği ve enerji absorpsiyonu ölçülmüş ve önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Liflerin eklenmesi, çimentolu zeminin tepe ve artık kayma dayanımlarını arttırmış ve kırılma davranışını daha sünek bir davranışa dönüştürmüştür. Lif içeriği arttıkça %0,1'lik eksenel gerinim için başlangıç rijitliği azalmıştır. Lif eklenmesi enerji absorpsiyonunu %20-50 oranında arttırmıştır. Lifler %70 bağıl yoğunlukta kayma dayanımı parametreleri üzerinde daha etkili olmuştur [82].

Santoni ve Webster, kumlu bir zeminin polipropilen lifler ile stabilize edildiği saha testleri için deneyler gerçekleştirmiştir. Deneylerden, tekniğin askeri hava alanı ve yol uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğu ve 203 mm kalınlığındaki bir lifli kum tabakasının önemli miktarda askeri kamyon trafiğini taşımak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır. Saha deneyleri ayrıca, trafik altında liflerin kopmasını önlemek için emülsiyon bağlayıcı kullanarak yüzeyin sabitlenmesinin gerekli olduğunu göstermiştir [83].

Uçucu kül ve polipropilen liflerin kombinasyonunun şişme ve büzülme özelliklerini azaltmadaki etkinliği de bildirilmiştir [77]. Mevcut raporlar, polipropilen lif takviyelerinin şişen killerin şişme potansiyelini azalttığını göstermiştir.

Ali ve diğerleri, polipropilen liflerle güçlendirilmiş yerel olarak mevcut killi zeminin konsolidasyon davranışı üzerine bir çalışma yapmıştır. İyileştirilmiş konsolidasyon özelliklerini bulmak için, orta plastisiteli killi zemin, 5-10 mm'lik farklı uzunluktaki liflerle zeminin kuru ağırlığına göre %0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4 ve 0,5'lik değişen yüzdelerde rastgele karıştırılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş zemin numunelerinin konsolidasyon davranışı gözlemlenmiş ve takviyesiz zemin numunesi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, sıkıştırma indeksinin (C_c), sıkıştırılabilirlik katsayısının (a_v) ve hacim değişim katsayısının (m_v), polipropilen liflerin eklenmesiyle belirli bir yüzdeye kadar azaldığını ve daha sonra artmaya başladığını göstermiştir. Araştırmada, ortalama 5-10 mm uzunluğunda polipropilen liflerin killi zemine kuru ağırlığının %0,35'i oranında ilave edildiğinde çeşitli konsolidasyon parametreleri için optimum sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır [84].

Tang ve diğerleri, ayrıık kısa polipropilen lifin çimentosuz ve çimentolu killi zeminin dayanımı ve mekanik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, üç farklı yüzdelikte polipropilen lif içeriğine ve iki farklı yüzdelikte çimento içeriğine sahip 12 farklı zemin numunesi grubu hazırlanmış ve 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç ve direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, liflerin çimentosuz ve çimentolu zemin içerisine dâhil edilmesinin, serbest basınç ve kayma dayanımları ile kopmadaki eksenel gerilmede bir artışa sebep olduğunu, rijitliği ve tepe noktası sonrası dayanım kaybını azalttığını ve çimentolu zeminin kırılma davranışını daha sünek olacak şekilde değiştirdiğini göstermiştir. Lif yüzeyi ve zemin matrisi arasında yer alan ara yüzdeki etkileşimler, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir [85].

Ali ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yerel şişebilen zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için polipropilen lifler kullanılmıştır. %0, 0,2, 0,4, 0,6 ve %0,8 oranlarında polipropilen liflerle işlem görmüş zeminin nem-yoğunluk ilişkisi, serbest basınç dayanımı, elastisite modülü (E50), Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve tek boyutlu konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Bu çalışmada, daha ağır zemin parçacıklarının hafif liflerle yer değiştirmesi nedeniyle güçlendirilmiş zeminin maksimum kuru yoğunluğunun %2,8 oranında hafifçe azaldığı ve

liflerin emici olmayan doğasından dolayı optimum nem içeriğinin neredeyse hiç etkilenmediği bulunmuştur. %0,4 oranında lifle güçlendirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, elastisite modülü (E50) ve Kaliforniya taşıma oranı değerlerinde önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. Zeminin serbest basınç dayanımı %279 oranında artış gösterirken elastisite modülünde %113,6 artış olmuştur. CBR değerinde ise ıslatılmamış koşullarda %94,4 oranında artış gözlenirken, ıslatılmış koşullarda %55,6 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca %0,8 oranında lif ilavesi ile zeminin serbest şişme ve şişme basıncında sırasıyla %94,4 ve %87,9'luk olmak üzere önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir. Benzer şekilde, sıkıştırma ve geri tepme endeksleri de %0,8'lik elyaf içeriğiyle sırasıyla %69,9 ve %88 oranında azalmıştır. Deneysel değerlendirmelerden, polipropilen lifin yaygın olarak şişen zeminler için düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir stabilizasyon malzemesi olduğu ortaya çıkmıştır [86].

Kapsamlı bir çalışmada Yetimoğlu ve diğerleri, polipropilen lif ile güçlendirilmiş zemin altında yumuşak kil üzerinde uzanan geotekstil ile güçlendirilmiş kum numuneleri üzerinde bir dizi CBR testi gerçekleştirmiştir. Lif takviyesi içeriğinin, lif takviyeli kum dolgu-yumuşak kil sisteminin taşıma kapasitesi, rijitliği ve sünekliliği üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Piston yükünün en yüksek olduğu penetrasyon değerinin, lif takviyesi içeriği arttıkça artma eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, test sonuçları, lif takviyesi içeriğinin arttırılmasının, lif takviyeli kum dolgu-yumuşak kil sisteminin kırılma dayanımında daha yüksek kayba neden olarak arttırabileceğini göstermiştir [11].

Consoli ve diğerleri, rastgele yönlendirilmiş polipropilen liflerle güçlendirilmiş yapay çimento kum numuneler üzerinde bir dizi drenajlı standart üç eksenli deney gerçekleştirmiştir. Çimento kum numuneler, çimento içerikleri ağırlıkça %0 ile %10 arasında değişen kuru kum ile hazırlanmış ve yedi gün süreyle kürlenmiştir. Ağırlıkça %0 ve %0,5 kuru kum-çimento karışımı içeriğinde lif uzunluğu ve çapı sırasıyla 24 mm ve 0,023 mm olmuştur. Lif takviyesi, tepe dayanımını sadece belirli bir çimento içeriğine kadar yaklaşık %5 yükseltmiş, nihai dayanımı arttırmış, rijitliği azaltmış ve çimento kumun kırılma davranışını daha sünek hale getirmiştir. Lif ilavesine bağlı üç eksenli tepe dayanımı artışı, daha az miktarda çimento için daha etkili olurken, nihai dayanımdaki artış, daha yüksek çimento içerikleriyle iyileştirilmiş kuma lif eklendiğinde daha etkili olmuştur [87].

Murthi ve diğerleri tarafından, silika dumanının polipropilen lifle güçlendirilmiş siyah pamuk zeminin dayanım özelliklerinin arttırılması

üzerindeki etkisini incelemek için bir araştırma gerçekleştirilmiştir. %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı ile %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında polipropilen lif zeminle karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, %20 silis dumanı ve %1,5 polipropilen ilavesiyle zeminin şişme potansiyeli özelliklerinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Zeminin serbest basınç dayanımı ise, yine %20 silis dumanı ve %1,5 polipropilen lif ilavesiyle önemli ölçüde iyileştirilmiştir [88].

Diambra ve diğerleri, polipropilen lif takviyeli kum malzemeyi, geleneksel üç eksenli sıkıştırma ve çekme deneyinde test etmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, liflerin dayanıma katkısının, sıkılaşmada dikkate değer olduğu, çekmede ise sınırlı olduğu, bunun da esasen çekme gerilmelerine göre oryantasyonlarına bağlı olduğu doğrulanarak bildirilmiştir [89].

Ghazavi ve Roustaie, donma-çözülme döngülerinin lif takviyeli kilin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, çelik ve polipropilen liflerle güçlendirilmiş kaolinit kil bir laboratuvarda sıkıştırılmış ve en fazla 10 kapalı sistem donma ve çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Daha sonra güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş numunelerin serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, incelenen zemin için, donma-çözülme döngülerinin sayısındaki artışın kil numunelerinin serbest basınç dayanımının %20-25 oranında azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Bundan başka, 12 mm uzunluğunda %3 polipropilen lif ilavesinin, donma-çözülme döngülerinin uygulanmasından önce ve sonra zeminin serbest basınç dayanımının %60-160 oranında artmasına ve donma kabarmasının %70 oranında azalmasına neden olduğu belirlenmiştir [12].

Sengul ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sorunlu taban zeminini temsil eden bölgesel yüksek plastisiteli bir zemin %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere farklı oranlarda uçucu kül ile stabilize edilmiş ve bu zemin karışımlarının plastisite, sıkışabilirlik ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deney yapılmıştır. Killi zemin ve uçucu külün yanı sıra bu karışımların mikro yapıları da X-ışını floresans (XRF) spektrometrisi, X-ışını kırınım (XRD) spektrometrisi, fourier-dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile incelenerek mekanik davranış ile mikro yapı arasındaki ilişkiler açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, kuru kütlein %0,5'i kadar zemine eklenen polipropilen liflerin ve donma-çözülme döngülerinin taban zemininin dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ile stabilizasyon için etkili uçucu kül karışım oranının %10 olduğunu, uçucu kül karışımı ile doğal zeminin 28 günlük serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında uçucu kül karışımının

dayanımı %85,8 artırdığını göstermiştir. Bundan başka, lif katkılarının kayma mukavemetini %3,0 ile %21,0 arasında değişen oranlarda arttırdığı ve doğal zeminde donma-çözülme döngüsü nedeniyle yaklaşık %80 civarında dayanım kaybı meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, uçucu kül ve sentetik lif katkılarının donma-çözülme döngülerinin neden olduğu dayanım kaybını telafi ederek kayma dayanımını artırabileceği belirtilmiştir [90].

Zaimoğlu, rastgele dağıtılmış polipropilen liflerin, donma-çözülme döngülerine maruz kalan ince taneli bir zeminin dayanımı ve dayanıklılık davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Dayanım davranışı için, bir dizi serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kütle kayıpları, dayanıklılık davranışı kriterleri olarak donma-çözülme döngülerinden sonra hesaplanmıştır. Deneylerde, polipropilen lif içeriği, kuru zemin ağırlığının %0,25 ile %2'si arasında değiştirilmiştir. Takviye edilmiş numuneler için deney sonuçları, takviye edilmemiş örnek için olanla karşılaştırılmıştır. Takviye edilmiş zeminlerdeki kütle kaybının, takviye edilmemiş zemindekenden yaklaşık %50 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin serbest basınç dayanımının, artan lif içeriği ile genellikle arttığı da bulunmuştur [91].

Li ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, lifle güçlendirilmiş zeminin çekme dayanımı özelliklerini belirlemek için yenilikçi bir çekme aparatı geliştirilmiştir. Lif içeriği, kuru yoğunluk ve su içeriğinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takviye malzemesi olarak 12 mm uzunluğunda ayrı polipropilen lif kullanılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen test cihazının zeminlerin çekme dayanımının belirlenmesinde uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Çekme dayanımı, artan lif içeriği ile genel olarak yükselmiştir. Lif içeriği %0'dan %0,2'ye çıktıkça çekme dayanımı %65,7 oranında artmıştır. Lifle güçlendirilmiş zeminin çekme dayanımı, kuru yoğunluğun artmasıyla artmış ve artan su içeriği ile azalmıştır. Örneğin, 1,7 Mg/m³ kuru yoğunluktaki çekme dayanımı, 1,4 Mg/m³tekenden 2,8 kat daha yüksektir. Ayrıca, su içeriği %14,5'ten %20,5'e çıktıkça çekme dayanımı %30 azalmıştır. Bundan başka, lif takviyeli zeminin çekme dayanımında, lif yüzeyi ile zemin matrisi arasındaki ara yüzey mekanik etkileşimine bağlı olarak lif çekme direncinin hâkim olduğu gözlemlenmiştir [92].

Tang ve diğerleri, zemin parçacıkları ile polipropilen lifler arasındaki mikromekanik etkileşim davranışını araştırmıştır. Lif/zemin ara yüzey kayma direncinin öncelikle zemin parçacıklarının yeniden düzenlenme direncine, etkili ara yüzey temas alanına, lif yüzey pürüzlülüğüne ve zemin bileşimine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yazarlar tarafından bir zemin-lif çekme test aparatı geliştirilmiştir [93].

Khattak ve Alrashidi tarafından gerçekleştirilen bir araştırma, işlenmiş selüloz ve polipropilen lifler ile takviye edilmiş zemin-çimento karışımlarının laboratuvar dayanıklılığı ve mekanistik değerlendirmesi üzerine odaklanmıştır. Louisiana eyaletindeki çeşitli proje sahalarından dört zemin türü elde edilmiştir. Dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve dolaylı çekme döngüsel yük testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, zemin-çimento-lif karışımlarının mekanik özelliklerinin, dozaj, zemin tipi ve kürlenme süresinin işlevleri olduğunu göstermiştir. Genel olarak, zemin-çimento-lif karışımlarının dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve kırılma tokluğu ile esneklik modülü değerleri ya aynı kalmıştır ya da zemin-çimento karışımlarından daha büyük olmuştur [94].

2.2.3. Polyester (PET) lifler

Polyester lifler tüm kimyasal lifler arasında lider konumdadır. Bu liflerin benzersiz özellikleri, makromoleküler zincirlerde alifatik ve aromatik kısımların varlığından ve düzenli moleküler yapıdan kaynaklanmaktadır. Poli(etilen tereftalat) (PET), yalnızca son kullanım özelliklerinin ve üretim ekonomisinin iyi olması nedeniyle değil, aynı zamanda özellikle PET'in olumlu özelliklerini artıran fiziksel ve kimyasal modifikasyon kolaylığı nedeniyle lif üretiminde kullanılan baskın polyesterdir. PET lifler geniş çapta araştırılmış olmasına rağmen, yapı veya üretim parametrelerine dayalı olarak mekanik davranış ve çekmedeki göçmeyi tahmin etmek için hala tam olarak tanımlanmış bir kural yoktur. Bunun ana nedenlerinden biri, lif üretimi sırasındaki değişikliklerin karmaşık karakteri ve gerilme alanı, sıcaklık, zaman ve çevresel faktörlerin etkisi sırasında yapıda meydana gelen değişikliklerdir [95].

Üniform bir ince kumun mühendislik davranışını iyileştirmek amacıyla Consoli ve diğerleri, atık plastik şişelerin geri dönüşümünden elde edilen rastgele dağıtılmış polietilen tereftalat lifinin tek başına veya hızlı sertleşen Portland çimentosu ile birlikte kullanılmasının faydasını değerlendirmek için serbest basınç deneyleri, yarmada çekme deneyleri ve lokal gerinim ölçümlü doymuş drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, polietilen tereftalat lif takviyesinin hem çimentolu hem de çimentosuz zeminin hem tepe hem de nihai dayanımını artırdığını ve çimentolu kumun kırılma tokluğunu azalttığını göstermiştir. Ayrıca, ilk rijitlik liflerin dâhil edilmesiyle önemli ölçüde değişmemiştir [96].

Maheshwari ve diğerleri, rasgele dağıtılmış polyester liflerle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş killi zeminlerden elde edilen sonuçları birbirleriyle karşılaştırmak için bu zeminler üzerinde küçük ölçekli üç eksenli testler

ve konsolidasyon testleri ile bu zeminler tarafından taşınan kare temeller üzerinde büyük ölçekli laboratuvar modeli testleri gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, 12 mm uzunluğundaki polyester lifleri yüksek oranda sıkıştırılabilir killi zemin ile %0 ila %1 arasında değişen oranlarda karıştırmıştır. Sonuçlar, yüksek oranda sıkıştırılabilir killi zeminin rastgele dağıtılmış liflerle güçlendirilmesinin nihai taşıma kapasitesinde artışa ve nihai yükteki oturmada azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Zemin taşıma kapasitesinin ve güvenli taşıma basıncının her ikisinin %0,50'ye kadar lif içeriğindeki artışla birlikte arttığı ve daha sonra liflerin daha fazla dâhil edilmesiyle azaldığı sonucuna varmışlardır [97].

Changizi and Haddad tarafından yapılan bir araştırma, düşük plastisiteli killi zemin (CL) ve yüksek plastisiteli killi zemin (CH) kullanarak, geri dönüştürülmüş polyester lif ilavesinin başta kayma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) olmak üzere zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Geri dönüştürülmüş polyester lifler, zeminin net ağırlığına bağlı olarak %0,1, %0,3 ve %0,5 olmak üzere üç farklı yüzdede zeminle karıştırılmıştır. İşlem görmüş numunelerin kayma dayanımları, CBR değerleri ve atterberg limitleri direkt kesme deneyi, CBR deneyi ve atterberg limitleri deneyi ile belirlenmiştir. Deney sonuçları, geri dönüştürülmüş polyester lif kullanımının, kayma dayanımı ve CBR değerlerinin artmasına, plastisite indeksinin ise azalmasına yol açtığını göstermiştir. En büyük dayanımı elde etmek için kullanılması gereken geri dönüştürülmüş polyester lifin optimum katkı oranı %0,5 olarak bulunmuştur [98].

Kumar ve diğerleri, serbest basınç dayanımı deneyinde yüksek oranda sıkıştırılabilir kili %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranında düz ve kıvrımlı polyester liflerle test etmiştir. Düz lifler için 3 mm, 6 mm ve 12 mm olmak üzere üç boy seçilirken, kıvrımlı lifler 3 mm uzunluğunda kesilmiştir. Sonuçlar, lif uzunluğu ve/veya lif içeriği arttıkça serbest basınç dayanımı değerinin iyileştiğini göstermiştir. Liflerin kıvrılması, serbest basınç dayanımının hafifçe artmasına neden olmuştur [99]. Bu sonuçlar, Tang ve diğerleri tarafından bulunanlarla oldukça karşılaştırılabilir [100].

Kaniraj ve Havanagi, uçucu kül-zemin karışımlarının geoteknik özellikleri üzerinde rastgele yönlendirilmiş lif katkıların ve çimento stabilizasyonunun tek tek ve birleşik etkilerini incelemek için Hindistan'da deneysel bir program yürütmüştür. Bu amaçla, bir Hint uçucu külü farklı oranlarda silt ve kum ile karıştırılmıştır. Ham uçucu kül-zemin numunelerinin ve %1 rastgele yönlendirilmiş polyester lif içeren uçucu kül-zemin numunelerinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Yalnızca %3 çimento içeriğiyle ve

ayrıca %3 çimento ve %1 lif içeriğiyle hazırlanan uçucu kül-zemin numuneleri üzerinde farklı kür sürelerinin ardından serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma, çimento stabilizasyonunun ham uçucu kül-zemin numunelerinin mukavemetini artırdığını göstermiştir. Lifin ilave edilmesi, ham uçucu kül-zemin numunelerinin yanı sıra çimento ile stabilize edilmiş numunelerin mukavemetini artırmış ve gevrek davranışlarını sünek davranışa dönüştürmüştür [101].

Uçucu kül-zemin karışımlarının geoteknik özellikleri üzerinde polyester lif katkılarının ve kireç stabilizasyonunun etkilerini incelemek için Kumar ve diğerleri tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bir Hint uçucu külü, farklı oranlarda şişebilen zemin ile karıştırılmıştır. Farklı oranlarda rastgele yönlendirilmiş liflerle karıştırılan uçucu kül-zemin numuneleri, kireç-zemin numuneleri ve kireç-uçucu kül-zemin numunelerinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Kireç ve uçucu kül, sırasıyla %1-10 ve %1-20 oranlarında şişen zemine eklenmiştir. Test numuneleri 7, 14 ve 28 gün boyunca kürlendikten sonra serbest basınç ve yarmada çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kireç ve uçucu kül için bulunan optimum değerlere dayanarak, 28 günlük külden sonra uçucu kül-şişen zemin-kireç-lif karışımından hazırlanan test numuneleri üzerinde testler yapılmıştır. Numuneler kuru ağırlık olarak %0, 0,5, 1,0, 1,5 ve %2 oranında düz ve kıvrımlı polyester lif ile karıştırılmıştır. Elde edilen olumlu sonuçlardan, şişen zeminin lif, kireç ve uçucu külün birleşik etkisiyle başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği anlaşılmıştır [102].

Mishra ve Gupta, killi taban zeminine uçucu külle birlikte geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) liflerinin dâhil edilmesinin zeminin mühendislik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Özellikle incelenen mühendislik özellikleri, kayma mukavemeti, CBR, dolaylı çekme mukavemeti ve Atterberg limitleridir. Geri dönüştürülmüş PET lifi ve uçucu kül, killi toprakla çeşitli oranlarda karıştırılmıştır. Oranlar, PET lifi için zeminin ağırlığınca %0 ila %1,6 arasında %0,4 artışla, uçucu kül için ise zeminin ağırlığınca %0 ila %20 arasında %5 artışla değişmiştir. Deneysel araştırmalar, kayma dayanımında ve CBR değerinde bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Plastisite indeksinde ise bir azalma meydana gelmiştir. Optimum oranlar, uçucu kül ve PET lifi için sırasıyla %15 ve %1,2 olarak bulunmuştur [103].

Kaniraj ve Gayathri, Hindistan'daki iki uçucu külün geoteknik davranışı üzerine rastgele yönlendirilmiş lifin dâhil edilmesinin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneylerde iki farklı tipte polyester lifi ve kuru ağırlıkça %1'lik sabit bir lif içeriği kullanılmıştır. Çalışmada, kompaksiyon deneyleri, üç eksenli kesme deneyleri ile ham ve lif takviyeli

uçucu küller üzerinde gerçekleştirilen diğer geoteknik tanımlama deneylerinin sonuçları verilmiştir. Lif katkısı, ham uçucu kül örneklerinin dayanımını arttırmış ve kırılma davranışlarını sünek davranışa dönüştürmüştür [104].

Furumoto ve diğerleri, polyester ve polipropilen kısa lifleri toprağa karıştırarak toprağın mukavemet ve tokluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Ayrıca 64 mm uzunluğundaki kısa PET lifi takviyeli zeminin yüksek borulanma direncine sahip olduğunu ve kısa lif takviyeli zemin tabakasının yağış ve sel sızıntısına karşı su setinin stabilitesini artırdığını tespit etmişlerdir [105].

2.2.4. Polietilen (PE) lifler

Polietilen lifler düşük özgül ağırlığa sahip olup suda yüzebilirler. Diğer polimer lifler gibi, sadece çekme gerilmesi alabilirler. Polietilen düşük yüzey yapışkanlığına sahip olduğundan polietilen lifleri kaplamalı uygulamalarda kullanmak zordur. Özel bir ön kaplama ile işlem gördüğünde bu mümkün olmaktadır [106].

Zeminlerin polietilen (PE) şeritler ve liflerle güçlendirilmesinin fizibilitesi de sınırlı ölçüde araştırılmıştır [107]. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) liflerin küçük bir miktarının bile zeminin kırılma enerjisini artırabileceği bildirilmiştir [108]. Günümüzde 1-2 inç uzunluğunda ayrık polipropilen ve/veya polietilen fibrile veya bant telleri olan GEOFIBERS®, kum veya kil zeminlere karıştırılmakta veya harmanlanmaktadır. Ancak, bazı araştırmacılar zemin güçlendirmede kullanılan polipropilen fiberler için “Geofiber” terimini kullanmaktadırlar [109].

Sobhan ve Mashand, çimento ve uçucu kül ile kimyasal olarak stabilize edilmiş ve geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerle güçlendirilmiş granüler bir zeminin yarmada çekme yükü-deformasyon dayanımı ilişkisini ve tokluk özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir araştırma yürütmüştür. Araştırma, eklenen yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerle çekme mukavemetinde artışların gerçekleşmediğini, ancak artan gerinim kapasitesinden kaynaklanan toklukta büyük artışlar gözlemlendiğini göstermiştir. Artan toklukla birlikte, lif ilavesinden dolayı beklenen performans faydalarının çoğu, gerilme-gerinim davranışının tepe yük sonrası kısmındadır. Böylece, lifler gerilme geliştirdikçe, gelişmiş bir gerilme-gerinim tepkisi ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, yorulma davranışında iyileşmeler kaydedilmemiştir [107].

Hassan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, polietilen ve polipropilen lifler kullanılmıştır. Güçlendirmenin etkisi, standart laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Bu deneyler, zemin ağırlığına

göre dört lif içeriğine (%1, %2, %3 ve %4) sahip olan doğal ve güçlendirilmiş zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, standart proctor deneyi, serbest basınç dayanımı deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi ile esneklik (resilient) modülü (M_r) deneyini içermiştir. Tüm bu deneylerde, lifler 1,0 cm ve 2,0 cm olmak üzere iki uzunlukta ilave edilmiştir. Laboratuvar deney sonuçları, plastik liflerin takviye edilmiş zeminlerin maksimum kuru yoğunluğunu ve optimum nem içeriğini azalttığını ortaya çıkarmıştır ve bu durum hafif malzemelerden dolguların inşası için gerekli görülmektedir. İlave olarak, zeminlerin serbest basınç dayanımında, polietilen liflerinin her iki uzunluğu için sırasıyla %76,4 ve %96,6 oranında, polipropilen liflerinin her iki uzunluğu için de sırasıyla %57,4 ve %73,0 oranında önemli bir iyileşme olmuştur. Kaliforniya taşıma oranı deneylerinin sonuçları, killi zeminlere plastik liflerin dâhil edilmesinin, özellikle %4'lük lif içeriğinde 1,0 cm ve 2,0 cm'lik her iki uzunluk için zeminin dayanımı ile deformasyon davranışını iyileştirdiğini ve polietilen ve polipropilen lifler için sırasıyla %185 ila %150'lik bir değere ulaştığını göstermiştir. Bundan başka, esneklik modülü deneylerinin sonuçlarından, mekanik özelliklerin bir miktar iyileştiği gözlemlenmiştir. Örneğin, lif içeriğinde bir artış olduğunda, polietilen lif için %4'lük lif içeriğinde esneklik modülü yaklaşık %120 artmıştır. Bununla birlikte, polipropilen lif için esneklik modülündeki iyileşme %3 lif içeriğinde azalmıştır. Bu nedenle, lif malzemesi ile zeminin takviye edilmesinde optimum lif içeriğinin aranması gerektiği sonucuna varılmıştır [110].

Choudhary ve diğerleri, geri kazanılmış yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerinin yerel kuma eklenmesinin CBR değerini ve sekant modülünü artırdığını bildirmiştir. CBR ve sekant modülündeki maksimum iyileşme, şerit içeriği %4 ve en-boy oranı 3 olduğunda elde edilmiştir. Bu da takviyesiz sistemin yaklaşık üç katıdır. Ayrıca, yüksek yoğunluklu polietilen şerit takviyeli kumun üstyapı mühendisliğinde taban zemini malzemesi olarak kullanılması durumunda temel tabakasının kalınlığının önemli ölçüde azaltılabileceği ifade edilmiştir [108].

Kim ve diğerleri, dip tarama işleminden elde edilen takviyeli ve takviyesiz hafif toprağın dayanım özelliklerini ve gerilme-gerinim davranışını araştırmıştır. Test numuneleri, değişen çimento içeriği (işlenmemiş toprağın ağırlığına göre %8, %12, %16 ve %20), başlangıç su içeriği (%125, %156, %187, %217 ve %250), hava-köpük içeriği (%1, %2, %3, %4 ve %5) ve atık balık ağı (%0, %0,25, %0,5, %0,75 ve %1) ile hazırlanmıştır. Daha sonra birkaç seri serbest basınç ve tek boyutlu sıkıştırma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, serbest basınç dayanımının çimento içeriğindeki artışla arttığını, ancak artan su içeriği ve hava-köpük içeriği ile azaldığını göstermiştir. Gerilme-gerinim ilişkisi ve serbest basınç dayanımı, atık balık

ağı yüzdesinden etkilenmiştir. Basınç dayanımındaki maksimum artışın yaklaşık %0,25'lik atık balık ağı içeriği için elde edildiği bulunmuştur [111].

2.2.5. Cam lifleri

Cam lifi, çok sayıda ince cam lifinden oluşan bir malzeme olup polimerler ve karbon lif gibi diğer liflerle kabaca karşılaştırılabilen mekanik özelliklere sahiptir. Karbon lif kadar sert olmasa da, kompozitlerde kullanıldığında çok daha ucuzdur ve daha az kırılımandır. Cam lifi takviyeli kompozitler, iyi çevresel dirence, yüksek özgül mukavemete ve sertliğe sahip olduklarından pek çok alanda kullanılmaktadır.

Consoli ve diğerleri cam liflerinin siltli kuma dâhil edilmesinin tepe mukavemetini etkili bir şekilde iyileştirdiğini göstermiştir [112]. Bir başka çalışmada, Maher ve Ho, kaolinit-lif (polipropilen ve cam lifleri) kompozitlerinin davranışını incelemiş ve serbest basınç dayanımındaki artışın cam lifi takviyeli numunelerde daha belirgin olduğunu bulmuştur [113].

Consoli ve diğerleri polipropilen, polyester ve cam liflerin çimento ile stabilize edilmiş üniform ince kum zeminlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla, lokal gerinim ölçümüne sahip konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Liflerin yapısına ek olarak, lif içeriğinin (ağırlıkça %0,5'e kadar), lif uzunluğunun (36 mm'ye kadar), çimento içeriğinin (ağırlıkça %0 ila %7 arasında) ve başlangıçtaki ortalama efektif gerilmenin (20, 60 ve 100 kN/m²) zeminin deformasyon ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Sonuçlar, polipropilen lifin dâhil edilmesinin çimentolu zeminlerin gevrek davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini, kırılma anındaki saptırılmış (deviatorik) gerilmeleri ise hafifçe azalttığını göstermiştir. Polipropilen lif durumundan farklı olarak, polyester ve cam liflerin dâhil edilmesi, kırılmadaki saptırılmış gerilmeleri hafifçe artırmış ve kırılma anındaki hafifçe azaltmıştır [114].

Maher ve Ho, rastgele dağıtılmış cam lifi takviyesinin çimentolu kumun yüke tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç eksenli statik sıkıştırma, döngüsel sıkıştırma ve yarmada çekme gerilmesi deneyleri gerçekleştirmiştir. Test sonuçları, lif takviyesinin çimentolu kumun basınç ve yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Basınç ve çekme mukavemetindeki artışın, daha yüksek cam lifi içeriklerinde ve daha uzun lif uzunluklarında daha belirgin olduğu görülmüştür [115].

Patel ve Singh cam lifle güçlendirilmiş kohezyonlu zeminin stabilitesini incelemiştir. Bu amaçla, taban zemini malzemesi olarak uygunluğunu araştırmak için cam lif takviyeli kohezyonlu zemin üzerinde Proktor ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Değişen lif içeriği,

lif uzunluğu, nem içeriği ve ıslatma süresinin CBR değeri ve sekant modülü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları, cam lif takviyeli numunelerde maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriğinin marjinal değişimini göstermiştir. Islatılmamış CBR testi, optimum nem içeriğinde ve optimum nem içeriğinin %2 ıslak ve kuru taraflarında sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilirken, ıslatılmış CBR testi yalnızca optimum nem içeriğinde sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. CBR değeri, ıslatılmamış ve ıslatılmış koşullarda sırasıyla 5,08 ve 7,62 mm'ye kadar penetrasyon derinliği ile artmıştır. Hem CBR değeri hem de sekant modülü, herhangi bir sıkıştırılmış durumda lif içeriği ve lif uzunluğu ile birlikte yükselmiştir. Optimum nem içeriğinin her iki tarafında ve ayrıca ıslatma süresinin artmasıyla birlikte azalmışlardır. Takviyenin faydası, herhangi bir lif uzunluğu ve deney koşulu için lif içeriğinin %0,75'e kadar arttırılmasıyla artmıştır. CBR değerindeki maksimum artış, ıslatılmamış ve ıslatılmış koşullar altında, 20 mm uzunluğunda %0,75 fiber takviyesiyle sırasıyla 2,77 ve 2,85 kat olmuştur [116].

Ahmad ve diğerleri, özellikle yumuşak zeminlerin güçlendirilmesinde uzun süreli bir güçlendirme tekniği olarak cam lif kullanımının, kolay bulunabilirliği, hafifliği, yüksek mukavemeti ve biyolojik olarak parçalanamayan yapısı nedeniyle bir avantaj olduğunu belirtmiştir [117].

Mahdi ve Al-Hassnawi, zayıf bir zeminin plastisite, dayanım, konsolidasyon, kayma mukavemeti ve diğer özelliklerini iyileştirmek için ezilmiş atık cam kullanmıştır. Bu amaçla, öncelikle Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-7-5 veya Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre ML olarak sınıflandırılan zemine, zeminin kuru ağırlığına göre %3, 5, 7 ve 9 oranlarında 75 µm elek boyutundan geçen atık cam katkı maddesi eklenmiştir. Daha sonra, zemine cam tozu eklenmesinin etkisini incelemek için elek analizi, Atterberg limitleri, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı gibi bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesinin zemine olumlu etkisinin olduğu ve zemin özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur. Cam tozu katkı oranının artmasıyla likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi azalmıştır. Diğer taraftan, serbest basınç ve kayma mukavemetinin, cam tozu oranının %7'ye kadar artmasıyla artan ondan sonra ise azalmaya başlayan bir eğri gibi davrandığı tespit edilmiştir. Böylece, %7'lik cam tozu katkısının serbest basınç ve kayma mukavemeti bakımından optimum katkı oranı olduğu belirlenmiştir. Cam tozu oranının %4'ün üzerine çıkmasıyla CBR değerlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Bu artışlar, cam tozunun %3, 5, 7, 9 oranlarında eklenmesi durumunda işlem görmemiş zeminin CBR değerinden sırasıyla 2,5, 3,3, 5,2, 9,4 kat daha yüksek olmuştur [118].

Baruah, kırmızı killi toprağa %0,5-1,5 oranında 10 mm uzunluğunda cam lifi malzemesi ilave edilerek elde edilen numunelerin serbest basınç dayanımının lif içeriğinin artmasıyla arttığını belirtmiştir. Ayrıca, cam lifi zeminin mukavemetini arttırdığından ve plastisite indeksini azalttığından cam lifi takviyeli kırmızı killi toprağın yol yapımı ve şev stabilitesi için taban zemini tabakasında kullanılabileceğini bildirmiştir [119].

Al-Refeai, laboratuvar verilerinin, cam lifi, polipropilen hamur lifi ve ağ elemanları ile güçlendirilmiş yuvarlak parçacıklara sahip ince kum ve yarı köşeli parçacıklara sahip orta kum üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli deneylerden elde edildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler, değişen uzunluk ve içerikteki inklüzyonlara sahip kum numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve farklı hücre gerilmelerinde test edilmiştir. Sonuçlar, kısa inklüzyonların, kum tipine rağmen bağ kopmasını önlemek için büyük bir hücre gerilimi gerektirdiğini göstermiştir. Yuvarlak parçacıklara sahip ince kum, yarı köşeli parçacıklara sahip orta kuma göre lif takviyesine daha iyi bir tepki vermiştir. Polipropilen ağ elemanları, özellikle ince kum durumunda dayanımı artırmada cam liflerden daha üstün performans göstermiştir [120].

2.2.6. Polivinil alkol (PVA) lifler

Polivinil alkol (PVA) lif, dayanıklılık, kimyasal direnç ve çekme dayanımı bakımından polipropilen liften daha üstün olduğu için lif takviyeli betonlarda kullanılmaktadır. Polivinil alkol lif, naylon ve polyesterlere göre ısıdan kaynaklanan daha düşük bir büzülme, 1,3 g/cm³lük bir spesifik ağırlığa ve çimentoya iyi yapışma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, polivinil alkol lifin zemin takviye malzemesi olarak kullanılması uygundur [121].

Park ve diğerleri, %4 çimentolu kuma %1 polivinil alkol (PVA) lif eklenmesinin, lif takviyeli olmayan numuneye kıyasla hem serbest basınç dayanımında hem de tepe mukavemetindeki aksel gerilmelerde iki kat artışa neden olduğunu bulmuştur [121]. Ayrıca Park, lif takviyeli çimentolu kum numuneleri üzerinde bir dizi serbest basınç deneyi gerçekleştirerek lif ilavesinin çimentolu kumun ölçülen mukavemet ve süneklik özelliklerini nasıl etkilediğini değerlendirmiştir. Çalışmada, %1'lik lif dozajında, çimento oranlarından bağımsız olarak süneklik değerlerinin dörtten daha büyük olduğu bildirilmiştir [122].

Raju ve diğerleri kum üretimi sırasında oluşan kum imalat tozunun üstyapı uygulamalarında potansiyelini araştırmıştır. Zayıf taban zemininin özelliklerini polivinil alkol (PVA) lifleri ile birlikte kum imalat tozu ilave ederek iyileştirmeye çalışmışlardır. Taban zeminin daha iyi performans göstermesi için zemine eklenecek optimum kum imalat tozu ve PVA lifi yüzdesini tahmin

etmişler ve üstyapı yapımında kullanıma uygunluğunu göstermişlerdir. Zemine %10 oranında kum imalat tozu ilavesinin Kaliforniya taşıma oranı (CBR) açısından daha iyi performans sağladığını gözlemlemişlerdir. %10 kum imalat tozu, %3 çimento ve değişen lif yüzdeleri (%0, %0,5, %1 ve %1,5) ile bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Performansı, CBR ve serbest basınç dayanımı (UCS) testleri ile birlikte ayrıık çekme testleri ve döngüsel üç eksenli test açısından değerlendirmişlerdir. Test sonuçları, kum imalat tozu ve PVA lifleri ile stabilize edilen zeminin hem statik hem de dinamik yükler altında daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [123].

2.2.7. Çelik lifler

Beton yapılarında bulunan çelik lif donatılar, zemin-çimento kompozitlerinin güçlendirilmesi için de kullanılmaktadır [124]. Buna ek olarak, çelik lifler zeminin mukavemetini artırabilir, ancak bu iyileşme diğer lif türlerinin kullanılması durumuyla karşılaştırılmaz [12].

Praveen ve diğerleri, çimento ile modifiye edilmiş ve/veya uçucu kül ile karıştırılmış çelik lif takviyeli killi kumdan marjinal bir zeminin etkinliğini değerlendirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Uçucu kül ile veya uçucu kül olmadan karıştırılan çelik lif takviyeli çimento ile modifiye edilmiş marjinal zeminin özellikleri, taban zemini inşaatı amacıyla Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değerini iyileştirme açısından incelenmiştir. Bu nedenle çalışma, üst yapı inşaatı için kompozit bir taban zemini malzemesi sağlamayı amaçlamıştır. Sonuçlar, çimento ve uçucu kül içeren kompozit marjinal zeminin CBR değerinde yeterli iyileşme olduğunu göstermiştir. Böylece stabilize edilmiş kompozit marjinal zeminin, üst yapılar için taban zemini olarak kullanılan alternatif bir inşaat malzemesi olabileceği gösterilmiştir [125].

Boominathan ve diğerleri, çelik teller gibi yüksek modüllü malzemeler, geotekstillere gibi düşük modüllü malzemeler ve her ikisinin bir kombinasyonu uygulanarak taban zemininin dinamik özelliklerini iyileştirmenin fizibilitesini standart bir zorlanmış dikey blok rezonans testinde incelemiştir. Bu çalışmada (i) yüksek mukavemetli tellerle güçlendirilmiş yumuşak çelik çerçeveden, (ii) ince bir sürtünme kumu tabakası içeren kum kaplı geotekstillere ve (iii) kaynaklı ağ ile güçlendirilmiş kum kaplı geotekstillere oluşan güçlendirilmiş temellere sahip "Güçlendirilmiş Toprak"ın uygulanabilirliği ve üstünlüğü ortaya konmuştur [124]. Ancak Ghazavi ve Roustaie, zeminin donma-çözülme döngülerinden etkilendiği soğuk iklimlerde, polipropilen liflerin çelik liflere tercih edilmesini tavsiye etmiştir [12].

3. Uygulamalar

Geoteknik mühendisliğinde doğal ve sentetik lifler, yol yapımı, istinat duvarları, şevlerin korunması, demiryolu dolguları, deprem ve zemin-temel mühendisliği gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Burada bazı vakalar hakkında kısa bir tartışma sunulmaktadır.

ABD Silahlı Kuvvetleri Mühendisler Birliği, yol üstyapılarında işlem görmemiş ve kimyasal olarak stabilize edilmiş zemin katmanlarının performansının GEOFIBERS® zemin takviyesi kullanılarak artırılabilceğini bildirmiştir. 30 cm kalınlığındaki lif takviyeli siltli kum kesit, aynı kalınlıkta takviyesiz kesitle kıyaslandığında trafik geçiş sayısında %33'lük bir artış sağlamıştır [109]. Polipropilen Geofiberler yol taban zeminleri ile kolaylıkla karıştırılabilir. Bu liflerin dâhil edilmesi maksimum yoğunluğu yaklaşık %5 artırırken sıkıştırılmış zemin karışımının optimum nem içeriğini de yaklaşık %5 azaltmaktadır. Ayrıca, tam ölçekli saha testlerinden, lifle stabilize edilmiş kumların geçici veya düşük hacimli yollar için geleneksel yol yapım malzemelerine uygun bir alternatif olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [83]. Son olarak, bazı araştırmacılar, yol yapımında sentetik veya doğal liflerin kullanılmasının, zayıf bir taban zemini üzerinde stabilize edilmemiş üstyapının direncine kıyasla, üstyapının tekerlek izine karşı direncini önemli ölçüde artırabileceğini bulmuştur [13].

Park ve Tan, 60 mm güçlendirilmiş siltli kum-toprak duvarda polipropilen lif kullanımının duvarın stabilitesini artırırken duvarın toprak basınçlarını ve yer değiştirmelerini azalttığını göstermiştir. Ayrıca, geogridler kısa lifle takviye edilmiş zeminde kullanıldığında bu etkinin daha anlamlı olduğunu belirtmiştir [126].

Esas olarak, rastgele dağıtılmış liflerle takviye edilmiş topraklar, arızalı şevlerin düzensiz şekline uyum sağladığından, bu şevlerin yerel onarımında yama olarak kullanılabilir. Depolama alanı örtüleri gibi toprak kaplamaların güçlendirilmesinde lif donatı, düzlemsel donatıda var olan ankraj ihtiyacını ortadan kaldırır [127]. Ayrıca kum ve lif karışımı, püskürtme beton gibi sorunlu bir şev üzerine püskürtülerek bir istinat yapısı oluşturulabilir.

Lif takviyesi, şevleri veya duvarları güçlendirmek için düzlemsel geosentetiklerle birlikte de kullanılmıştır. Lif takviyesi, dolgu malzemelerinin kayma dayanımını artırdığından gerekli düzlemsel takviye miktarını azaltır ve ikincil takviye ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Lif takviyesinin şev yüzeyindeki sığ göçmeyi ortadan kaldırmaya ve bakım maliyetini azaltmaya yardımcı olduğu bildirilmiştir [128].

İnşaat mühendisliğinde liflerin kullanılmasına ilişkin başka bir uygulama, derin temel yapım maliyetinin düşük bütçeli bina projeleri için uygunsuz olduğu, zayıf taşıma kapasitesine sahip zeminlerde temellerin inşasıdır. Bu durumlarda, çimentolu maddelerin eklenmesi veya lifler gibi yönlendirilmiş veya rastgele dağıtılmış ayırık elemanların dâhil edilmesi yoluyla yerel zeminin iyileştirilmesi için çeşitli alternatifler geliştirilebilir [129]. Bundan başka, lifler, yüksek su içeriğine sahip endüstriyel atık veya tarama çamurlarının susuzlaştırılmasının yanında, susuzlaştırılarak depolanan bu atıkların dayanımını ve uzun dönem stabilitesini arttırmak için de kullanılmaktadır [130].

Lif takviyeli zeminlerin tokluğunun ve sünekliğinin artması, depreme karşı oluşturulan yapılar için faydalıdır. Makiuchi ve Minegishi'ye göre, Japonya'da sentetik liflerin kullanıldığı iki tür zemin güçlendirme tekniği vardır [131]. Birinci teknikte, kohezif olmayan granüler zeminler için sürekli filamanlı iplikler kullanılmaktadır. Örneğin, TEXSOL ürünü ilk olarak Fransa'da geliştirilen bu gruba aittir [104]. İkinci zemin güçlendirme tekniği, 1997 yılında Japon Bayındırlık Araştırma Enstitüsü tarafından tanıtılan kısa boylu zimba kesikli liflerin kullanılmasıdır [104,132].

4. Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zeminlerin Üstünlükleri

Sistematik olarak güçlendirilmiş zeminlerle kıyaslandığında, rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminler bazı üstünlüklere sahiptir. Rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminin hazırlanması, genel olarak katkılar ile zeminlerin stabilize edilmesine benzer. Ayırık lifler, çimento, kireç, uçucu kül veya diğer katkı maddeleri gibi zemine eklenir ve karıştırılır. Rastgele dağıtılmış lifler, dayanım izotropisi sağlar ve sistematik olarak güçlendirilmiş zeminlerde ortaya çıkabilecek potansiyel zayıflık düzlemlerini sınırlar [99].

Lif malzemelerin maliyeti, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha uygundur. Kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin aksine, lif donatı kullanılarak yapılan güçlendirme hava koşullarından çok fazla etkilenmez [128]. Ayrıca, lif takviyesi için kullanılacak malzemeler yaygın olarak bulunabilir [74,128].

Lif takviyesinin temel faydalarından biri, ilk oluşumdan sonra gerilme çatlağının ilerlemesini engellemesidir. Liflerin eklenmesi, çekme çatlaklarının oluşumunu önleyerek kırılma mekanizmasını değiştirmektedir. Ancak, çatlaklar oluşmadan önce, liflerin malzeme davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığına inanılmaktadır [87]. Miller ve Rifai, sıkıştırılmış kil zeminin büzülme çatlağı azalmasının ve hidrolik iletkenliğinin lif içeriğindeki artışla birlikte arttığını bildirmiştir [133].

Çimento harcı ile birlikte kullanılan bitkisel liflerden, yüksek performanslı lifli levhalar yapılabilmektedir. Bitkisel lifler, toprakla birlikte yük taşıyıcı yapılar oluşturmak için kullanıldığında daha yüksek bir ekonomi elde edilebilir [15].

Lif ilavesinin kumun sıvılaşma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür [134]. Bu, lif inklüzyonlarının drenajsız yükleme sırasında sıvılaşmaya neden olması için gereken döngü sayısını artırdığı anlamına gelmektedir [89]. Ayrıca, katkı maddesi olarak bazı bitkisel liflerin kullanılması, yapı bloklarının termal iletkenliğini ve ağırlığını azaltmaktadır [17]. Bundan başka, rastgele dağıtılmış liflerin şişen zeminlerin şişme eğilimini sınırlamada faydalı olduğu belirtilmektedir [16].

Bazı araştırmacılar, liflerin kumlu silt için gerilme-şekil değiştirme davranışını şekil değiştirme yumuşamasından şekil değiştirme sertleşmesine doğru değiştirdiğini bildirmiştir. Lif kalıntıları ayrıca sıkıştırma işlemini engelleyerek, artan lif içeriği ile güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluğunda bir azalmaya neden olmaktadır.

5. Sonuç

Burada, daha çok zeminde ayırık rastgele dağıtılmış liflerin, yani kısa lifli zemin kompozitlerinin kullanımı ele alınmış olup zeminleri takviye etmek için kullanılan doğal ve sentetik liflerin çoğu incelenmiştir.

Bahsedilen çalışmalar, genel olarak kompozit zeminin dayanım ve sertliğinin lif takviyesi ile iyileştiğini göstermiştir. Dayanım ve rijitlikteki artışın (i) en-boy oranı, yüzey sürtünmesi, ağırlık oranı ve elastisite modülü gibi lif özelliklerinin; (ii) şekil, tane boyutu ve gradasyon gibi zemin özelliklerinin; (iii) hücre basıncı gibi test koşullarının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılabilir. İncelenen çalışmalar esas alınarak, lif takviyeli zeminin dayanımının en-boy oranı, lif içeriği ve zemin ile lif arasındaki yüzey sürtünmesinin artmasıyla arttığı söylenebilir.

Direkt kesme, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri, ayırık lifler zemine ilave edildiğinde kayma dayanımının arttığını ve tepe sonrası dayanım kaybının azaldığını göstermiştir. Diğer bir deyişle, ayırık ve rastgele dağıtılmış lif inklüzyonları tepe kesme dayanımını önemli ölçüde artırmakta, tepe sonrası dayanım kaybını azaltmakta, kırılmaya kadar eksenel gerinimi artırmakta ve bazı durumlarda gerilme-şekil değiştirme davranışını şekil değiştirme yumuşamasından şekil değiştirme sertleşmesine doğru değiştirmektedir. Lif inklüzyonları ayrıca sıkıştırma işlemini engelleyerek, artan lif içeriği ile güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluğunda azalmaya neden

olmaktadır. Servisteki doygunluk ile ilişkili dayanım kayıpları, lif takviyesi ile önemli ölçüde azalmaktadır.

Liflerin kohezyonlu zeminlerde kullanımına ilişkin araştırmaların daha sınırlı olduğu görülmüştür. Her ne kadar liftakviyesinin kohezyonlu zeminlerin dayanımını artırdığı bildirilmiş olsa da, lifler ve killi zeminler arasındaki ara yüzeyde yük aktarım mekanizmaları net olarak anlaşılmadığından, bu tür takviyelerin ek değerlendirmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

Son zamanlarda birçok araştırmacı, lif ve diğer kimyasal bağlayıcıların granüler veya killi zeminler üzerindeki birleşik etkisini incelemeye çalışmıştır. Bunun temel nedeni, kimyasal bağlayıcıların zeminin stabilitesini artırırken, aynı zamanda zeminin sünek davranışını azaltmasıdır. Lifler, bu şekilde, kompozit zeminin kırılma faktörünü azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Kullanılabilirlik, ekonomiklik, kolay işlenebilirlik, hızlı gerçekleştirilebilirlik ve her türlü hava koşulunda yapılabilirlik kısa lifli kompozit zeminlerin genel üstünlükleridir. Zemin güçlendirmesinde lif kullanımının teknik faydaları arasında çekme çatlaklarının oluşumunun önlenmesi, hidrolik iletkenliğin ve sıvılaşma dayanımını artırılması, yapı malzemelerinin ısı iletkenliğinin ve ağırlığının azaltılması, şişen zeminlerin şişme eğiliminin sınırlandırılması ve zemin kırılma faktörünün azaltılması yer almaktadır.

6. Kaynaklar

1. Kazemian S, Barghchi M. Review of soft soils stabilization by grouting and injection methods with different chemical binders. *Scientific Research and Essays* 2012; 7(24):2104-2111.
2. Gowthaman S, Nakashima K, Kawasaki S. A state of the art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: past findings, present trends and future directions. *Materials* 2018;11(4):553.
3. Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi AA. Mechanical behaviour of a clay soil reinforced with nylon fibers, *Geotechnical and Geological Engineering* 2011;29:899-908.
4. Gaw B, Zamora S, Albano LD, Tao M. Soil reinforcement with natural fibers for low-income housing communities. Bachelor's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2011, 147p.
5. Dilrukshi RAN, Watanabe J, Kawasaki S. Strengthening of sand cemented with calcium phosphate compounds using plant-derived urease. *International Journal of Geomate* 2016;11(25):2461-2467.
6. Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials* 2012;30:100-116.
7. Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika Journal of Science and Technology* 2011;19(1):33-43.
8. Vidal H. The principle of reinforced earth. *Highway Research Record* 1969;282:1-16.
9. Lefaive E. Soil reinforced with continuous yarns: Texsol. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1985;1787-1790.
10. Yazıcı ME, Keskin SN. A review on soil reinforcement technology by using natural and synthetic fibers. *Erzincan University Journal of Science and Technology* 2021;14(2):631-663.
11. Yetimoglu T, Inanir M, Inanir E. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes* 2005;23:174-183.
12. Ghazavi M, Roustaei M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 2010;61:125-131.
13. Chauhan MS, Mittal S, Mohanty B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 2008;26:429-435.

14. Rowell M, Han S, Rowell S. Characterization and factors effecting fiber properties. *Natural Polymers and Agrofibers Composites* 2000;115-134.
15. Ghavami K, Filho R, Barbosa P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. *Cement and Concrete Composites* 1999;21:39-48.
16. Viswanadham BVS, Phanikumar B, Mukherjee RV. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2009; 27:73-76.
17. Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J. Development of fiber-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:111-116.
18. Kodicherla SPK, Nandyala D.K. Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade. *International Journal of Geo-Engineering* 2019; 10(1): 1-13, <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0099-1>.
19. Ramesh N, Krishna V, Mamatha V. Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil. *Geomechanics and Engineering* 2010;2:19-28.
20. Naresh J, Kiran VK, Jayaram M. An investigation on stabilization of laterite soil using coconut coir fibres. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2022; 982(1); 012041. DOI 10.1088/1755-1315/982/1/012041.
21. Peter L, Jayasree PK, Balan K, Raj SA. Laboratory investigation in the improvement of subgrade characteristics of expansive soil stabilised with coir waste. *Transportation Research Procedia* 2016;17: 558-566.
22. Prabakar J, Sridhar RS. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials* 2002;16:123-131.
23. Yohanna P, Johnson P, Victor BP, Badamasi A. Evaluation of geotechnical properties of black cotton soil reinforced with sisal fibre for waste containment application. *Engineering Science and Technology* 2022; 3(2): 151-168, <https://doi.org/10.37256/est.3220221354>.
24. Santhi K, Sayida MK. Behaviour of black cotton soil reinforced with sisal fibre, National Conference on Technological Trends (6th-7th November) 88-93
25. Mattone R. Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in baha-reque technique. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:611-616.
26. Yusoff M, Salit M, Ismail N, Wirawan R. Mechanical properties of short random oil palm fiber reinforced epoxy composites. *Sains Malaysiana* 2010;39(1):87-92.
27. Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *American Journal of Applied Sciences* 2008;5(3):209-220.

28. Bateni, F, Ahmad F, Yahya AS, Azmi M. Performance of oil palm empty fruit bunch fibres coated with acrylonitrile butadiene styrene. *Construction and Building Materials* 2011;25:1824-1829.
29. Al Adili A, Al-Soudany K. Effect of random inclusion of date palm leaf fibers on some soil properties. *Journal of Earth Sciences and Engineering* 2018; 11(01): SSN 0974-5904. DOI:10.21276/ijee.2018.11.0105
30. Ahmad F, Bateni F, Azmi M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:93-99.
31. Arifin YF, Misnawati, Normelani E. The use of natural fiber from oil palm empty fruit bunches for soft soil stabilization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2019; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 669 012026.
32. Jamellodin Z, Talib Z, Kolop R, Noor N. The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil. 3rd SANREM Conference, Kota Kinabalu, Malaysia 2010;68-72.
33. Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika Journal of Science and Technology* 2011;19(1):33-43.
34. Bairagi H, Yadav RK, Jain R. Effect of jute fibres on engineering properties of lime treated black cotton soil. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2014;3(2):1550-1552.
35. Singh, HP, Bagra, M. Improvement in cbr value of soil reinforced with jute fiber. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2013; 2(8): 3447-3452.
36. Aggarwal P, Sharma B. Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. In *Proceedings of International Conference on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, Turkey 2010.
37. Alqaisi ZH, Al-Soud MS, Dawood ZM, Faleh JM, Ahmed AA. Assessment of geotechnical properties of clay stabilized with jute fiber. *Journal of Applied Science and Engineering* 2022; 26(1): 61-68, [https://doi.org/10.6180/jase.202301_26\(1\).0007](https://doi.org/10.6180/jase.202301_26(1).0007).
38. Islam M, Iwashita K. Earthquake resistance of adobe reinforced by low cost traditional materials. *Journal of Natural Disaster Science* 2010;32:1-21.
39. Hossain A, Hossain S, Hasan K. Application of jute fiber for the improvement of subgrade characteristics. *American Journal of Civil Engineering* 2015;3(2):26-30.
40. Segetin M, Jayaraman K, Xu X. Harakeke reinforcement of soil-cement building materials: manufacturability and properties. *Building and Environment* 2007;42:3066-3079.

41. Ayininuola GM, Udoh EG. Geotechnical properties of flax fiber stabilized soil. *Journal of Earth Science and Engineering* 2018; 8: 75-82 doi: 10.17265/2159-581X/2018.02.003.
42. Cheah JS, Morgan TKB, Ingham JM. Cyclic testing of a full-size stabilized, flax-fibre reinforced earth (uku) wall system with openings. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China 2008.
43. Lin D, Huang B, Lin S. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. *Ecological Engineering* 2010;36:992-1006.
44. Coutts RSP, Ni Y. Autoclaved bamboo pulp fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Composites* 1995;17:99-106.
45. Ramaswamy S, Ahuja M, Krishnamoorthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *Cement and Concrete Composites* 1983;5:3-13.
46. Brahmachary TK, Rokonuzzaman M. Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value, *International Journal of Geo-Engineering* 2018; 9(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0079-x>.
47. Kanayama M, Kawamura S. Effect of waste bamboo fiber addition on mechanical properties of soil. *Open Journal of Civil Engineering* 2019;9:173-184.
48. Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:617-621.
49. Ashour T, Bahnasawey A, Wu W. Compressive strength of fiber reinforced earth plasters for straw bale buildings. *Australian Journal of Agriculture Engineering* 2010;1:86-92.
50. Kazragis A. Minimization of atmosphere pollution by utilizing cellulose waste. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 2005;13:81-90.
51. Tran KQ, Satomi T, Takahashi H. Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft Soils. *Transportation Geotechnics* 2018;16:76-84.
52. Roy P, Mukherjee P. Stabilization of contaminated soil by mixing of corn husk fibers. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019*; pp 701-716. Part of the *Lecture Notes in Civil Engineering* book series (LNCE, volume 136).
53. EsmailpourShirvani N, TaghaviGhalesari A, Tabari MK, Choobbasti AJ. Use of kenaf fiber reinforced soil (kfrs) to improve the engineering behavior of sand-clay mixtures. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting Location: Washington DC, United States Date: 2019-1-13 to 2019-1-17*.

54. Magesvar MU, Muthaiyan P, Yugasini S. Stabilization of soil using kenaf fibre and rice husk ash. *Materials Today: Proceedings 2023*; xxx(xxxx) xxx.
55. Ghadakpour M, Choobasti AJ, Kutanaei SS. Investigation of the kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil. *Transportation Geotechnics 2020*;22:85-96.
56. Mittal A, Shukla S. Effect of random inclusion of kenaf fibres on strength behaviour of poor subgrade soils. *Jordan Journal of Civil Engineering 2020*; 14(1): 43-56.
57. Al-Adili A, Azzam R, Spagnoli G, Schrader J. Strength of soil reinforced with fiber materials (papyrus). *Soil Mechanics and Foundation Engineering 2012*;48(6):241-247.
58. Zhou XY, Zheng F, Li HG, Lu CL. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings 2010*;42:1070-1074.
59. Sarsby RW. Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes 2007*;25:302-310.
60. Liu C, Lv Y, Yu X, Wu X. Effects of freeze thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes 2020*;48(4):581-590.
61. Brahmachary TK. Soil stabilization using fly ash and cotton fiber. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) International Open Access Journal 2017*; ISSN No: 2456 - 6470 1(6) www.ijtsrd.com
62. Kalkan E, Kartal HO, and Kalkan OF. Experimental study on the effect of hemp fiber on mechanical properties of stabilized clayey soil. *Journal of Natural Fibers 2022*; 19(16): 14678-14693 <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2068725>.
63. Najjar SS, Sadek S, Taha H. Use of hemp fibers in sustainable compacted clay systems. *Geo-Congress, Atlanta, 2014*:1415-1424.
64. Vafaei A, Choobasti AJ, Koutanaei RY, Vafaei A, Afrakoti MTP, Kutanaei SS. Experimental investigation of the mechanical behavior and engineering properties of sand reinforced with hemp fiber. *Arabian Journal of Geosciences 2022*; 15: 1679 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10966-x>.
65. Yazici MF, Keskin SN. Enhancing mechanical properties of low plasticity clay soil using hemp fibers: effects of fiber content and fiber surface coating. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 2023*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01208-5>.
66. Diab AA, Sadek S, Najjar S, Daya MHA. Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers. *Internati-*

- onal Journal of Geotechnical Engineering 2016; 10(3): 263-270, DOI: 10.1080/19386362.2015.1132122.
67. Danso H, Martinson DB, Ali M, Williams JB. Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks. The 1st International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France 2015.
 68. Asher JD, Sarang G. Soil stabilization using hydrated lime and randomly distributed bagasse fibers. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) 2017; 8(1): 512-518. Article ID: IJCIET_08_12_057.
 69. Dang LC, Fatahi B, Khabbaz H. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. Procedia Engineering 2016; 143: 658-665.
 70. Baldin CRB, Kawanami MY, Costa WGS, Bordignon VR, da Luz CC, Izzo RLdS. Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2023; 15(10): 2676-2686.
 71. Bordoloi S, Garg A, Sreedeeep S. Potential of uncultivated, harmful and abundant weedl as a natural geo-reinforcement material. Advances in Civil Engineering Materials 2016; 5: 276-288.
 72. Kumar S, Tabor E. Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 2003;127:774-782.
 73. Salim N, Al-Soudany K, Jajawi N. Geotechnical propertiesl of reinforced clay soil using nylons carry's bags by products. MATEC Web of Conferences 2018; 162: 1-6.
 74. Murray J, Frost D, Wang Y. The behavior of sandy soil reinforced with discontinuous fiber inclusions. Transportation Research Record 2000;1714:9-17.
 75. Gosavi M, Patil A, Mittal S, Saran S. Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement. Journal-Institution of Engineers India Part CV Civil Engineering Division 2004;84:257-62.
 76. Yetimoglu T, Salbas O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. Geotextiles and Geomembranes 2003;21:103-10.
 77. Puppala J, Musenda C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils. Transportation Research Board. In: 79th Annual Meeting, Washington, USA; 2000.
 78. Gaspard K, Mohammad LN, Wu Z. Laboratory mechanistic evaluation of soil cement mixtures with fibrillated-polypropylene-fibers. 82th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA; 2003.

79. Balagoudra RS, Krishna V, Yaligar HS, Jayasurya T, Shwetha GC. Soil stabilization using lime and polypropylene fiber material. *International Journal of Engineering Science and Computing* 2017;7(5): 11299-11303.
80. Tiwari N, Satyam N, Patva J. Engineering characteristics and performance of polypropylene fibre and silica fume treated expansive soil subgrade. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 2020; 6(2): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00199-x>.
81. Consoli C, Casagrande T, Prietto M, Thome A. Plate load test on fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2003;129:951-5.
82. Hamidi A, Hooresfand M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes* 2013; 36: 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.10.005>.
83. Santoni L, Webster L. Airfields and road construction using fiber stabilization of sands. *Journal of Transportation Engineering ASCE* 2001;127:96-104.
84. Ali T, Khan MA, Ali K. Consolidation behavior of clayey soil reinforced with geofiber, in: *Advances in Geotechnis and Structural Engineering*, Springer, Singapore, 2021: 119-129, https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_12.
85. Tang C, Shi B, Chen W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2007;25(3):194-202.
86. Ali M, Aziz M, Hamza M, Madni MF. Engineering properties of expansive soil treated with PP fibers. *Geomechanics and Engineering* 2020; 22(3): 227-236. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
87. Consoli C, Vendruscolo A, Fonini A, Rosa D. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes* 2009;27:196-203.
88. Murthi P, Saravanan R, Poongodi K. Studies on the impact of polypropylene and silica fume blended combination on the material behaviour of black cotton soil, *Materials Today: Proceedings* 2021; 39: 621-626, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.004>.
89. Diambra A, Ibraim E, Wood M, Russell A. Fiber reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:238-50.
90. Sengul T, Akray N, Vitosoglu Y. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils. *Construction and Building Materials* 2023; 400: 132590.

91. Zaimoglu A. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions and Science Technology* 2010;60:63-5.
92. Li J, Tang C, Wang D, Pei X, Shi B. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2014; 6: 133-137.
93. Tang C, Shi B, Zhao L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:54-62.
94. Khattak M, Alrashidi M. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering* 2006;7(1):53-62.
95. Militky J. Tensile failure of polyester fibers” in *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*, 2018, Second Edition. The Textile Institute Book Series, Pages 421-514.
96. Consoli C, Prietto M, Pasa S. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2002;128:462-472.
97. Maheshwari KV, Solanki CH, Desai AK. Performance of fiber reinforced clayey soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2011;16:1067-1087.
98. Changizi F, Haddad A. Stabilization of subgrade soil for highway by recycled polyester fiber. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 2014; 2(1): 93-105. <https://doi.org/10.22075/jrce.2014.215>.
99. Kumar A, Walia B, Mohan J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials* 2006;20:1063-1068.
100. Tang C, Shi B, Chen W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2007;25(3):194-202.
101. Kaniraj R, Havanagi G. Behavior of cement stabilized fiber reinforced fly ash soil mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2001;127:574-84.
102. Kumar A, Walia, Bajaj A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* 2007;19:242-8.
103. Mishra B, Gupta MK. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials* 2018;190:95-107.
104. Kaniraj SR, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* 2003;21:123-149.

105. Furumoto K, Miki H, Tsuneoka N, Obata T. Model test on the piping resistance of short fiber reinforced soil and its application to river levee. In *Geosynthetics - 7th ICG-NICE, France; 2002*.
106. Houtman R. Materials used for architectural fabric structures in *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing Series in Textiles 2015:101-121.
107. Sobhan K, Mashnad M. Tensile strength and toughness of soil-cement-fly ash composite reinforced with recycled high density polyethylene strips. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* 2002;14:177-84.
108. Choudhary K, Jha J, Gill S. A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates Journal of Engineering Research* 2010;15:51-7.
109. Tutumluer E, Kim I, Santoni L. Modulus anisotropy and shear stability of geofiber-stabilized sands. *Transportation Research Record* 2004;1874:125-35.
110. Hassan HJA, Rasul J, Samin M. Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology* 2021; 8(3):390-413, <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00145-4>.
111. Kim T, Kim J, Lee G. Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. *Geotextiles and Geomembranes* 2008;26:512-518.
112. Consoli C, Prietto M, Ulbrich A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 1989;124:1211-1214.
113. Maher H, Ho C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering* 1994;120:1381-1393.
114. Consoli C, Montardo P, Donato M, Prietto M. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fiber composites. *Ground Improvement* 2004;8:77-90.
115. Maher H, Ho C. Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal* 1993;16:330-338.
116. Patel SK, Singh B. Experimental investigation on the behaviour of glass fibre-reinforced cohesive soil for application as pavement subgrade material. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 2017; 3(2): 1-12, <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0090-x>.
117. Ahmad F, Mujah D, Hazarika H, Safari A. Assessing the potential reuse of recycled glass fibre in problematic soil applications. *Journal of Cleaner Production* 2012; 35: 102-107.
118. Mahdi Z, Al-Hassnawi N. Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 2018; 9: 12-21.

119. Baruah H. Effect of glass fibers on red soil. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science* 2015; 3(1): 217-223.
120. Al-Refefai T. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* 1991;10:319-333.
121. Park S, Kim Y, Choi S, Shin E. Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 2008;28:213-220.
122. Park S. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials* 2011;25:1134-1138.
123. Raju S, Kolathayar S, Sharma AK. Strength behavior of subgrade soil mixed with sand manufacturing dust and fiber. *Journal of GeoEngineering* 2018; 13(2): 79-84. [http://dx.doi.org/10.6310/jog.201806_13\(2\).4](http://dx.doi.org/10.6310/jog.201806_13(2).4).
124. Boominathan S, Senathipathi K, Jayaprakasam V. Field studies on dynamic properties of reinforced earth. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1991;10:402-406.
125. Praveen GV, Kurre P, Chandrabai T. Improvement of CBR value of steel fiber reinforced cement modified marginal soil for pavement subgrade admixed with Fly Ash, *Materials Today: Proceedings* 2021; 39: 639-642, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.814>.
126. Park T, Tan A. Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber. *Geotextiles and Geomembranes* 2005;23:348-361.
127. Zornberg G, Kavazanjian E. Prediction of the performance of a geogrid-reinforced slope founded on solid waste. *Soils and Foundations* 2002;42:129-130.
128. Li C. Mechanical response of fiber-reinforced soil, PhD thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin; 2005.
129. Consoli C, Bassani A, Festugato L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:344-351.
130. Şengül T, Çetin D, Bhatia SK, Khachan M. Polimer ve lif kullanımının geotüp içindeki C sınıfı bir külün susuzlaştırma ve sıkışma davranışları üzerindeki etkileri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi*, 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
131. Makiuchi K, Minegishi K. Strain-induced toughness and shearing characteristics of short-fiber reinforced soils. In *International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japan; 2001.
132. Medjo R, Riskowski G. Effects of fibers and cement on the mechanical behavior of soil-cement reinforced with sugar cane bagasse. *Housing Science* 1994;18:79-89.
133. Miller J, Rifai S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. *Journal of Environmental Engineering ASCE* 2004;130:981-985.

134. Ghiassian H, Ghazi F. Liquefaction analysis of fine sand reinforced with carpet waste fibers under triaxial tests. In 2th International Conference of New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus, 2009.

Mikrobölgeleme ve Mikrotremor Ölçümü

Muammer Tün¹

Özet

Doğa ve insan kaynaklı tehlikelere maruz kalan yerleşim alanları ve sistemlerde, zarar görülebilirlik koşullarına bağlı olarak öngörülebilen veya öngörülemeyen kayıplar gerçekleşebilmektedir. Bu kayıpların miktarı, meydana gelen olayın afet olarak tanımlanmasında doğrudan etkili bir değişkendir. Bir bölgenin yerleşime uygunluk değerlendirmeleri kapsamında, özellikle afet risk yönetimi çalışmaları çerçevesinde mikrobölgeleme araştırmaları yürütülür. Yerbilimsel verilerin, araştırma sahasını temsil edebilecek dağılımda toplanması için araştırma alanının eşit hücrelere bölünmesi, karelaçlama olarak ifade edilir.

Geoteknik zemin araştırmalarında, sondaj çalışmaları ile sığ zemin özellikleri belirlenirken anakaya derinliğinin 800-1000 m derinliğine ulaştığı basen yapılarında risk analizinde geoteknik araştırmaları tamamlayıcı jeofizik yöntemlerden yararlanır. Mikrotremor ölçümleri kullanılarak zemin hakim frekansı, anakaya derinlik geometrisi, sismik hız profili belirlenir. Sonuç olarak deprem yer hareketi gibi karmaşık bir etkinin ortaya konulmasına yardımcı olacak, zemin sınıflaması, odaklanma etkisi ve frekans bağımlı yapı-zemin etkileşimi gibi risk değerlendirmelerinin yapılması mümkündür. Bu bölümde, mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında yürütülen mikrotremor ölçüm yöntemi ve uygulama alanları tartışılacaktır.

1.1. Mikrobölgeleme

Bir bölgenin doğa kaynaklı tehlikelere karşı yerleşime uygunluk değerlendirmeleri afet risk yönetimi çalışmalarının önemli bir aşamasıdır. Mikrobölgeleme, mekânsal planlama çalışmaları yapılırken; yerleşime açılması düşünülen boş alanlardaki tüm afet tehlikelerini, yapılaşmış alanlarda ise tüm afet risklerini, büyük ölçekli haritalar üzerinde belirleyerek, güvenli arazi kullanımı ve bölgeleme kararlarının alınmasına, kentsel dönüşüm ve zarar azaltma planlaması çalışmaları için ise; stratejik amaçlar, hedefler ve öncelikler

1 Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, mtun@eskisehir.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-7118-9977>

belirlenmesine girdi sağlayan çok disiplinli çalışmalardır (Ergünay 2008). Mikrobölgeleme çalışmaları ilk olarak 1960'lı yıllarda yerleşime açılması planlanan alanlardaki deprem tehlikesinin belirlenerek deprem kaynaklı zararların azaltılması amacıyla başlatılmış ve sismik mikro-bölgeleme olarak adlandırılmıştır (Ergünay 2008). Mikrobölgeleme çalışmaları 1:1000-1:5000 ölçeklerinde yapılmaktadır. Deprem yer hareketi kaynaklı sıvılaşma tehlikesi, taşıma gücü kaybı, kütle hareketleri, yüzey faylanması gibi tehlike alanları büyük ölçekli haritalar üzerinde gösterilebilir. Mikro-bölgeleme çalışmaları deprem tehlikesi kaynaklı etkilerin haritalanması olarak ifade edilmesine karşın yerleşime uygunluk değerlendirilmesi kapsamında tüm doğa ve teknolojik tehlike kaynaklarının dikkate alınması gerektiği göz ardı edilemez. Dolayısıyla, mikro-bölgeleme çalışmalarının disiplinler üstü yaklaşımla bütünlük tehlike değerlendirmesi çerçevesinde planlanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu kapsamda mikro-bölgeleme çalışmaları çalışma sahasının tehlikeye maruziyet koşullarına bağlı olarak aşağıdaki alanlarda yapılması gerektiği değerlendirilmektedir. Mikro-bölgeleme çalışmaları yerleşime uygunluk ve dirençlilik çalışmalarına altlık veri sağlaması beklenir. Mikro-bölgeleme haritaları, tehlike kaynakları, maruziyet koşulları ve zarar görülebilirlik değişkenleri kullanılarak yapılan afet risk analizlerine altlık veri oluşturur. Bu bölümde sismik ve geoteknik mikro-bölgeleme çalışmaları kapsamında mikrotremor ölçümlerinin yeri ve önemi tartışılmıştır.

Tehlike türleri, coğrafi bölgelere göre değişkenlik gösterebilir. Birleşmiş Milletler Afet Risk Azaltma Ofisi'nin raporuna göre 318 farklı tehlike ortak bir sınıflandırma dili kullanılarak uluslararası bütünlük bir kullanıma uyumlu hale getirilmiştir (UNDRR 2020). Tehlikelerin farklı coğrafi bölgelerdeki etkileri, tehlike kaynağının şiddeti veya büyüklüğü, iklimsel koşullar, atmosferik koşullar, yerel zemin koşulları, sosyokültürel yapı, bölge ekonomisi, nüfus yoğunluğu ve kentin dirençliliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Dolayısıyla bir bölgede mikro-bölgeleme çalışmasına başlamadan önce araştırma sahasında daha önceden meydana gelen ve afete dönüşen tehlike türlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Ülkemizde ve dünyada sıklıkla görülen bazı afetler grafik gösterimle birlikte Şekil 1'de verilmiştir.



(a)



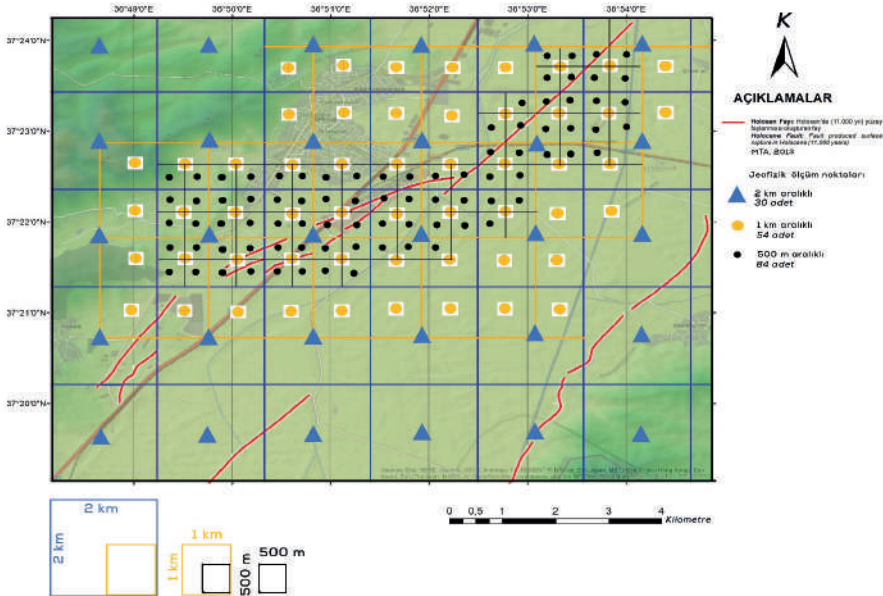
(b)

Şekil 1. (a) Ülkemizde ve dünyada sıklıkla görülen bazı afetlerin grafik gösterimi
 (b) Dünyada 1980--2019 yılları arasında rapor edilen afet etkileri Kaynak: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (CREd and UNDRR 2020)

Tablo 1. Mikro-Bölgeleme çalışmasının kapsamı

| Doğa Mikro-bölgelemesi | Teknoloji Mikro-bölgelemesi | Kent ve Nüfus Mikro-bölgelemesi |
|---|--------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Meteorolojik | <input type="checkbox"/> Endüstriyel | <input type="checkbox"/> Kırılgan Nüfus |
| <input type="checkbox"/> Klimatolojik | <input type="checkbox"/> Maden | <input type="checkbox"/> Dayanaksız Üst yapı ve Altyapı |
| <input type="checkbox"/> Jeolojik | <input type="checkbox"/> Ulaştırma | <input type="checkbox"/> Yoğunluk |
| <input type="checkbox"/> Geoteknik | <input type="checkbox"/> Enerji | <input type="checkbox"/> Arkeolojik |
| <input type="checkbox"/> Hidrolojik | <input type="checkbox"/> İletişim | |
| <input type="checkbox"/> Sismik | | |
| <input type="checkbox"/> Biyolojik | | |
| <input type="checkbox"/> Tarım | | |
| <input type="checkbox"/> Orman | | |

Mikro-bölgeleme çalışmalarının projelendirilmesindeki kritik aşamalar Tablo 2’de verilmiş olup mikro-bölgeleme çalışmalarının en önemli aşaması veri toplamadır. Mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında, araştırma sahasında toplanan verilerden elde edilen sonuçların doğru yorumlanması doğru karar almaya imkân sağlar. Bu aşamada araştırmanın amacı yani araştırma probleminin net bir şekilde belirlenmesi gerekir. Problemin ortaya konulmasıyla birlikte veriye dayalı bilginin elde edilmesi mikrobölgeleme çalışmalarının temelini oluşturur. Herhangi bir yer bilimsel değişkenin alansal değişimi incelenirken öncelikle veri toplama sıklığı planlanır (Şekil 2). Bu planlama sürecinde öncelikle, belirlenmek istenen problem, veri toplama yöntemi, morfoloji ile birlikte yerel zemin özellikleri dikkate alınır. Genellikle gridlenen araştırma sahasındaki her bir eleman veya birim hücrede ölçüm alınması ve değerlendirilmesi oldukça zor ve yüksek maliyetlidir. Bu nedenle, daha geniş aralıklı dolayısıyla az sayıda ölçüm ile başlayarak değişkenin anomali verdiği alanlar belirlenerek veri toplama planlaması yapılır. Örneğin, bir basen yapısındaki çalışma sahasında sedimanter tabakaların kalınlığı ve derinlik geometrisi araştırmasında verinin farklı doğrultulardaki değişim trendine bakılarak ölçüm planlamasına başlanır. Değişim trendinin ve veri anomalisinin tespit edildiği alanlarda ölçüm sıklığı artırılarak değişkenin alansal ve yönsel değişimleri incelenir. Sonuç olarak, araştırma sahasındaki yer bilimsel bir parametrenin belirli bir belirsizlik içerisinde ölçümü yapılmış olur.



Şekil 2. Mikrobölgeleme çalışmalarında gridleme ile veri toplama geometrisi uygulama örneği haritası

Tablo 2. Mikro-bölgelem çalışması proje aşamaları

| | |
|---|--|
| 1 | • Tehlike kaynaklarının belirlenmesi |
| 2 | • Veri toplama yöntemlerinin belirlenmesi |
| 3 | • Mekansal veri tabanı tasarımı |
| 4 | • Arazide veri toplama planlaması ve uygulaması |
| 5 | • Veri işlem ve jeoistatistik analiz |
| 6 | • Sayısal haritalama, modelleme ve yorumlama |
| 7 | • Sonuçların bütünlük değerlendirilmesi ve paydaşlarla birlikte tartışılması |
| 8 | • Raporlama ve Sunuş |

1.2. Mikrotremor Ölçümü

Mikrotremor ölçümünde ortam gürültüsü 3 bileşenli kayıtcı ile ortalama 30 dk süreli kaydedilir (Şekil 3). Tek istasyon mikrotremor ölçüm yönteminde (HVSr- Horizontal to Vertical Spectral Ratio) doğal ve insan kaynaklı titreşimlerin kaydedilerek frekans ekseninde yatay bileşenin düşey bileşene spektral oranı hesaplanır (Bonnetfoy-Claudet, Cornou et al. 2004, Cornou, Kristek et al. 2004). Yöntemin ilk olarak (Omori 1908) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılmaya başlanmış ve Kanai'nin çalışmalarında geliştirilerek kullanılmaya devam edilmiştir (Kanai, Tanaka et al. 1954, Kanai 1961, Kanai and Tanaka 1961, Nogoshi and Igarashi 1970, Nogoshi and Igarashi 1971) çalışmalarıyla kullanılmaya devam edilmiştir. Yöntemin kullanımı (Nakamura 1989) çalışmasıyla birlikte yaygınlaşmıştır. Zemin hakim frekansının belirlenmesinde kullanılabileceği görülen HVSr yöntemi, ilerleyen yıllardaki bilim ve teknolojiye gelişmelerle birlikte zemin mühendislik problemlerinin çözümüne yönelik uygulama alanlarında tercih edildiği görülmektedir (Lermo and Chávez-García 1994, Malagnini, Tricarico et al. 1996, Seekins, Wennerberg et al. 1996, Teves-Costa, Matias et al. 1996). Mikrotremor ölçümünün alınması ve güvenilirlik koşulları ve aralıklarına ilişkin kılavuz SESAME, (2004) projesi kapsamında geliştirilmiştir.



(a)



(b)

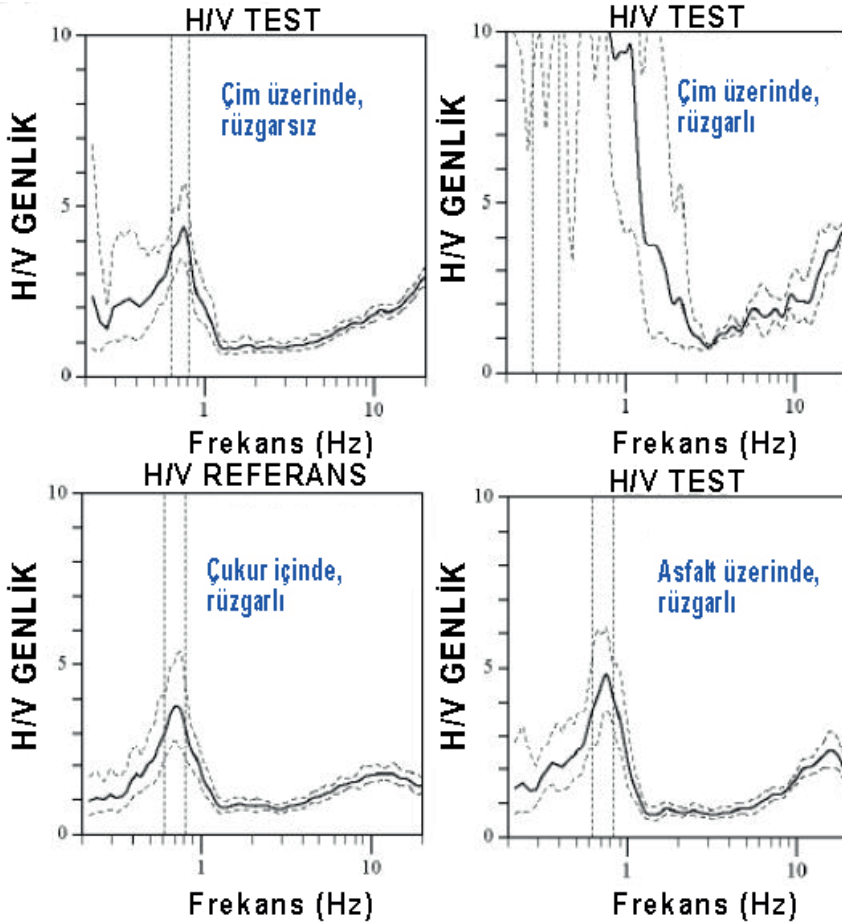
Şekil 3. (a) Beton zemin üzerinde mikrotremor ölçümü alınırken bir fotoğraf (b) toprak zeminde mikrotremor ölçümü alınırken bir fotoğraf; Sensör: GURALP CMG 6TD

Farklı zemin ve atmosferik hava koşullarında kaydedilen mikrotremor verilerinin H/V spektral oranı grafik verileri ve karşılaştırmalı yorumları önceki çalışmalarda detaylı olarak tartışılmıştır (Chatelain, Guillier et al. 2008). Bu araştırma sonuçlarına göre rüzgar, yağmur gibi dış ortam gürültüsünden arındırılmış kayıtlarda H/V genlik eğrilerinin daha net bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 4). Bu karşılaştırma çim ile rüzgarın etkisinin veri kalitesinde çok fazla olumsuz etki oluşturduğunu, çukur içinde veya asfalt zemin üzerinde ise rüzgarın büyük bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Mikrotremor ölçümü alınırken nelere dikkat edilmesi gerektiğine ilişkin kısa teknik notlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Mikrotremor ölçümlerinde uyulması gereken bazı hususlar (Atakan, Bard et al. 2004, Atakan, Duval et al. 2004, SESAME 2004)

| Parametre | Tavsiyeler | |
|-------------------------------------|--|-------------------------|
| | Beklenen minimum f_0 (Hz) | Min. kayıt süresi (dk.) |
| Kayıt süresi | 0.2 | 30 |
| | 0.5 | 20 |
| | 1 | 10 |
| | 2 | 5 |
| | 5 | 3 |
| | 10 | 2 |
| Ölçüm aralığı | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikrobölgeleme: Geniş bir aralık ile başlangıç (örn.: 500 m'lik grid) ve yanal değişimin artması durumunda 250 m aralığa düşülebilir. ▪ Tek yer tepkisi: Bir f_0 değeri türetmek için kesinlikle tek ölçüm noktası kullanma, en az 3 ölçüm noktasında testi yap | |
| Kayıt parametreleri | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Üreticiler tarafından önerilen sensör seviyesi ▪ Sinyal doygunluğa ulaşmadan mümkün olan maksimum kazanç seviyesini sapta | |
| Zemin ile sensör arası kuplaj | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mümkün olduğunda sensörü doğrudan asıl zemin üzerine kur ▪ Sensörü çok yumuşak zemin (çamur, sürtülmüş toprak, uzun boylu ot, vb.) veya yağmurdan sonra suya doygun zemin üzerine kurmaktan kaçın | |
| Yapay Zemin ile Sensör arası kuplaj | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sünger, karton gibi yumuşak malzemeli yüzeylerden kaçın ▪ Sensörün kurulumunu ve düzeçlenmesini engelleyecek dik yamaçlarda, kum ile dolu bir kap veya kum yığını üzerine sensörü kur. ▪ Kar veya buz üzerinde meydana gelebilecek lokal bir erimeden dolayı sensörün devrilmesinden sakınmak için, metal veya ağaç bir plaka veya kum ile dolu bir kap üzerine sensörü kur. | |
| Çevredeki yapılar | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rüzgar esintisinden dolayı (yaklaşık ≥ 5 m/s), binalar, ağaçlar gibi yapıların yanında kayıt almaktan kaçın. Bu durum eğriler içinde bazı düşük frekanslar olarak görülür ve H/V sonuçlarını etkiler. ▪ Kanalizasyon kapakları, boru hatları, araç park yerleri gibi yeraltı yapıları üzerinde ölçüm almaktan kaçının. | |
| Hava koşulları | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rüzgar: 5 m/s'den daha hızlı rüzgarlardan sensörü koruyun. Bu önlem yapıların yakınında değilseniz yardımcı olacaktır. ▪ Yağmur: Yoğun yağmur altında ölçüm almaktan sakının. Hafif yağmur fark edilir ölçüde etkiye sahip değildir. <p>Sıcaklık: üreticinin talimatlarına uygun olarak sensörü ve kayıtçıyı kontrol et.</p> | |
| Bozulmalar | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tekil kaynaklar: İnşaat makineleri, endüstriyel makineler, pompalar, jeneratörler gibi gürültü kaynaklarının yakınında ölçüm almaktan sakının. ▪ Geçiciler: Ayak sesleri, arabalar gibi geçici gürültüler durumunda, etki ortadan kalktıktan sonra veri analizi için yeterli olacak pencere uzunluğu sağlayacak kayıt süresini sağla. | |

Mikrotremorların kaynağı ile ilgili olarak (Gutenberg 1958) titreşim hareketinin frekansına bağlı olarak farklı tipte kaynakları tanımlayan bir tablo hazırlamışlardır. Mikrotremor kaynaklarının frekans aralığına ilişkin bilgi Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Aynı yerde ölçülen H/V eğrilerinin karşılaştırılması. (Chatelain ve diğ., 2008).

Tablo 4. Frekansa göre gürültü kaynakları (Gutenberg 1958, Asten 1978, Asten and Henstridge 1984).

| | Gutenberg, 1958 | Asten, 1978 |
|--|-----------------|-------------|
| Kıyılarda oluşan dalgalar | 0.05-0.1 Hz | 0.5-1.2 Hz |
| Ay tutulması/büyük ölçekli meteorolojik salınımlar | 0.1-0.25 Hz | 0.16-0.5 Hz |
| Okyanuslarda oluşan siklonlar | 0.3-1 Hz | 0.5-3 Hz |
| Yerel meteorolojik olgular | 1.4-5 Hz | |
| Volkan kökenli titreşimler | 2-10 Hz | |
| Kent içindeki günlük aktivite | 1-100 Hz | 1.4-30 Hz |

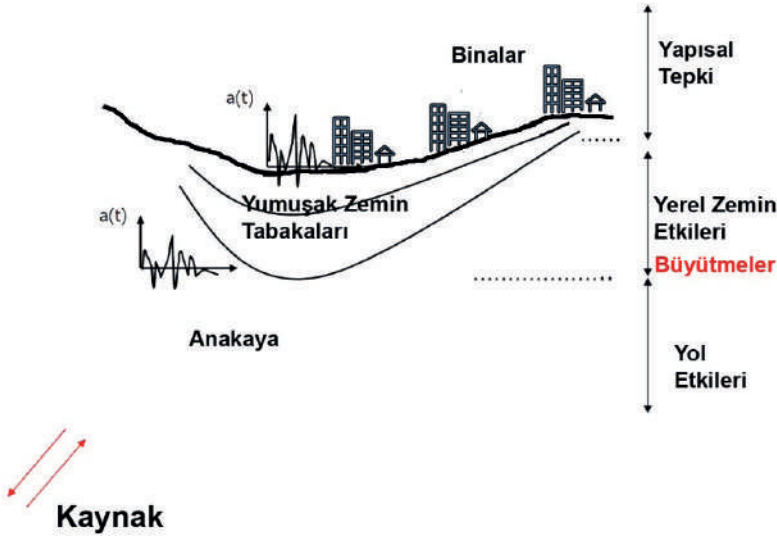
Mikrotremor ölçümünün uygulama kolaylığı ve düşük maliyetli olması yöntemin kullanımında oldukça etkili olmuştur. Sedimanter havzaların basen yapısının hakim frekans ve ana kaya derinlik geometrisi değişkenleri kapsamında belirlenmesi deprem yer tepkisi analizlerinde oldukça önem kazanmıştır. Deprem kaynaklı deprem dalgalarının yeraltı yapısal özellikleri kaynaklı odaklanma etkisi nedeniyle kuvvetli yer hareketi miktarında büyütme gerçekleştiği bilinmektedir. Şekil 5’de kaynaktan yayılan bir deprem dalgasının içinden geçtiği jeolojik ortam boyunca maruz kalacağı etkiler grafik gösterim ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Odaklanma etkisine neden olabilecek yumuşak zemin tabakası ile anakaya derinlik sınırı geometrisinin zemin hakim frekansı ve sediman kalınlığı ilişkisini kullanarak yorumlayan bir çok araştırma bulunmaktadır. Farklı çalışma sahalarında alınan mikrotremor ölçümlerinden elde edilen hakim frekans değerleri ile üst sediman kalınlıkları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan birçok çalışma vardır (Ibs-von Seht and Wohlenberg 1999, Delgado, López Casado et al. 2000a, Parolai, Bormann et al. 2002, D’AMICO, Picozzi et al. 2004, Hinzen, Weber et al. 2004, García-Jerez, Luzón et al. 2006, Motamed, Ghalandarzadeh et al. 2007, Birgoren, Ozel et al. 2009, Dinesh, Nair et al. 2010, Gosar and Lenart 2010, Özalaybey, Zor et al. 2011, Sukumaran, Parvez et al. 2011, Karabulut 2012, Tün 2013, Tün, Pekkan et al. 2016, Tün, Pekkan et al. 2016, Gupta, Parvez et al. 2020, Kumar and Mahajan 2020, Rupar and Gosar 2020, Stanko and Markušić 2020) (Şekil 6).

Bu ilişki

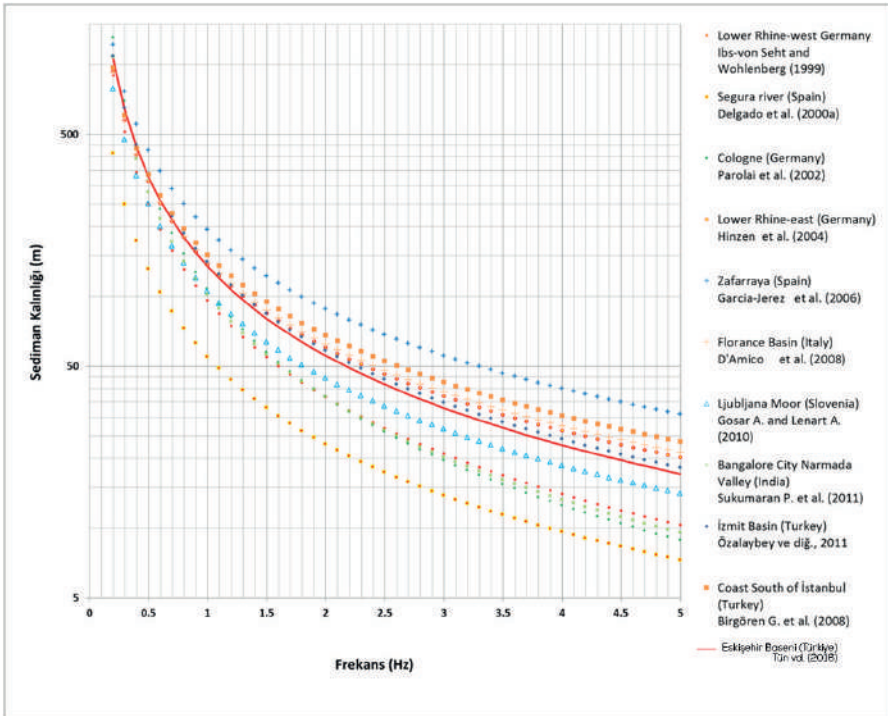
$$h = af_r^{-b}$$

1

doğrusal olmayan bir regresyon bağıntısı ile ifade edilmiştir.



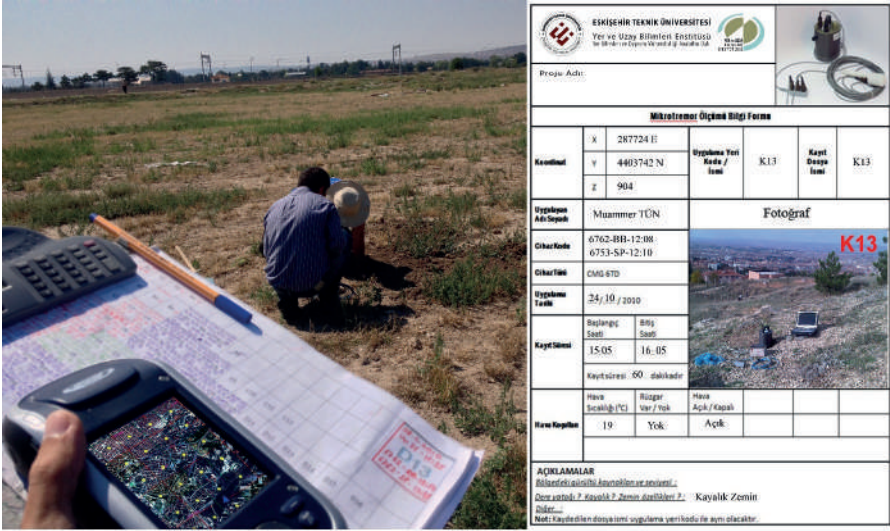
Şekil 5. Deprem kaynağından yayılan deprem dalgalarının yol etkisi, sıfır sedimanter zemin tabakalarının etkisinin gelişebileceği yapısal bir ortamın grafik gösterimi.



Şekil 6. Farklı araştırmacıların farklı çalışma alanları için geliştirdikleri hakim frekans-ana kaya derinliği değişim grafikleri.

1.2.1. Mikrotremor Ölçüm Planlaması ve Veri Toplama

Mikro-bölgeleme çalışmasına yöntem belirlendikten sonraki önemli aşamalardan birisi sahada bu verinin toplanmasına yönelik planlamanın yapılmasıdır. Harita üzerinde yapılan planlamalar saha gerçekliği ile karşılaşıldığında ulaşım ve uygulamada güçlükleri meydana gelebilir. Bu nedenle saha ölçüm planlamalarında mümkün olduğunca bu güçlüklerin giderilmesine yönelik B planı mutlak yapılmalıdır. Mikrotremor ölçümlerinde, 2 nokta arasının kuş uçuşu 500 m olduğu düşünülürse bir noktadan diğerine varış zamanı araçla ortalama 5 dakika planlanabilir. Ancak iki nokta arasında yüksek eğimli arazi, bataklık, akarsu, endüstriyel tesis, çevrili özel mülk, askeri bölge gibi koşullarda bu ulaşım süresi 1 saati geçebilir. Ölçüm planlamasında, ölçüm alınacak yerlerin sayısal harita üzerinde önceden işlenmesi (Şekil 7) ve kodlanması mutlaka yapılmalıdır. Planlanan ölçüm yerinden saha koşulları nedeniyle olası bir sapma durumunda yerinde gelişmiş el GPS'leri ile veri tabanına aktarılması gerekir. Tüm bu koşullar geniş bir araştırma sahasında ortalama 1000 ölçüm noktası için değerlendirilmelidir. Mikrotremor ölçümü alınırken sensörün konumlandırılacağı zeminin toprak, kaya, asfalt, beton gibi özellikleri tanımlanmalıdır. Sensörün kuzey yönlenmesi ve düzenci kontrol edilmeli, rüzgar, nem, sıcaklık, atmosfer basıncı gibi hava koşulları not edilmelidir. Ayrıca ortamda endüstriyel, trafik, yüksek gerilim, trafo gibi yüksek gürültü kaynakları varsa form üzerine işlenmelidir (Şekil 7b).



(a)

(b)

Şekil 7. (a) Örnek bir uygulama noktasında ölçüm alınırken ölçüm yerinin kodu, cihaz kodu, ölçüm saati forma ve el GPS'indeki sayısal harita üzerine veri tabanına girilmelidir (b) Her ölçüm noktası için mikrotremor ölçüm formu doldurulmalıdır

1.2.2. Tek İstasyon Mikrotremor Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

(Bour, Fouissac et al. 1998) çalışmasında Nogoshi-Nakamura tekniğinin aşağıdaki varsayımlara dayandığı belirtilmiştir. Mikrotremorlar birkaç farklı dalganın bir araya gelmesinden oluşur, fakat baskın olan, daha derin ve sert bir alt tabakanın üzerindeki yumuşak yüzey tabakalarında yayılan Rayleigh dalga türüdür. Rayleigh dalgalarının gürültü (titreşimler) hareketi üzerindeki etkisi (ERW), yüzeydeki düşey spektrum (V_S) içinde yer alırken, tabaka tabanında yoktur (V_B).

$$E_{RW} = \frac{V_S}{V_B} = \frac{\text{yüzey}}{\text{taban}} \quad 2$$

Mikrotremor hareketlerinin düşey bileşeni, üst sedimanter ortamı oluşturan yumuşak zemin tabakaları tarafından büyütme etkisine maruz kalmaz. 0.2-20 Hz frekans aralığı için hareketin yatay ve düşey bileşenlerinin spektral oranı, tabakanın tabanında 1'e yaklaşır.

$$\frac{H_B}{V_B} = 1 \quad 3$$

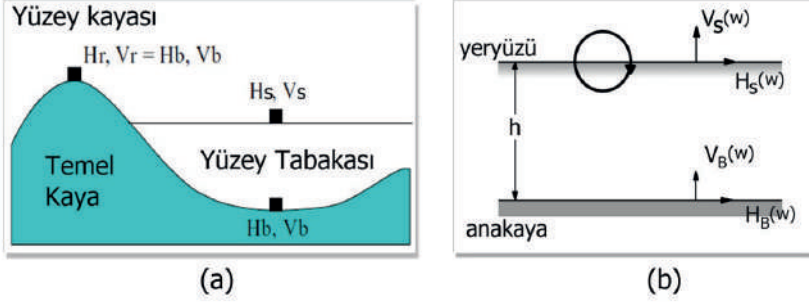
Yüzey jeolojisinden kaynaklı yerel etkiler genellikle yumuşak zemin tabakasının yüzeyindeki deprem kaydının yatay bileşeni (H_S) ile mostra veren anakayadaki yatay bileşen) arasındaki oran (S_1) ile açıklanabilir.

$$\frac{H_S}{H_B} = S_1 (\text{Yerel Zemin Etkisi}) \quad 4$$

H_B , V_B ; temel kayadaki düşey ve yatay spektrumlarıdır. H_S , V_S ; Rayleigh dalgalarının yüzeydeki düşey ve yatay doğrultudaki spektrumlarıdır (Şekil 8). Eğer Rayleigh dalgasının etkisi yoksa, $V_S = V_B$ olacaktır. Eğer $V_S > V_B$ ise bu sonuç yüzey dalgalarının etkisi olarak düşünülür. Rayleigh dalga etkisi

$$E_{RW} = \frac{V_S}{V_B} = \frac{\text{yüzey}}{\text{taban}} \quad (\text{Rayleigh Dalga Etkisi}) \quad 5$$

olarak tahmin edilir



Şekil 8. (a) Sedimanter basen yapısı (Nakamura 2000) (b) Nakamura (1989) tarafından önerilen mikrotremorların yayılımı ile ilgili basit model.

Tek istasyon mikrotremor ölçümlerinin değerlendirilmesinde H/V Spektral Oran (Nakamura) Yöntemi kullanılarak yatay bileşenin düşey bileşene spektral oranı alınır. Mikrotremor ölçümünde, yeraltında üst sediman tabakalar tarafından örtülü anakaya ile üst sedimanın empedans farkı nedeniyle ortaya çıkan sonuçlar dikkate alınır. Dolayısıyla, bu yöntem ile sediman-ana kaya sınır geometrisi tespit edilebilir. H/V spektral oranından elde edilen pikin genliği, ardışık iki tabaka arasındaki hız kontrastıyla ilişkilendirilir.

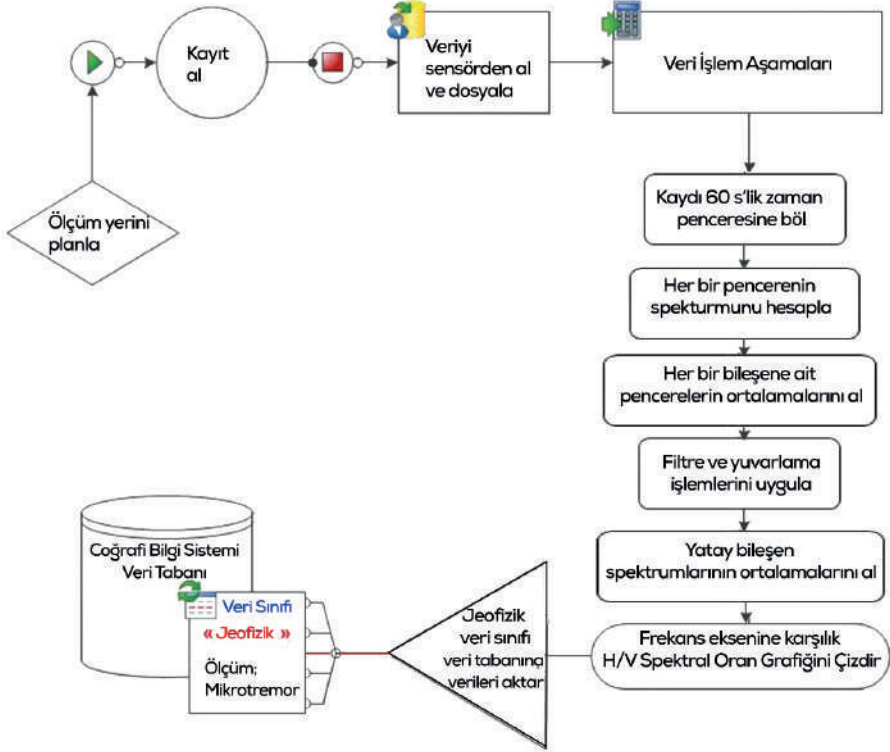
Bu koşullar altında, yumuşak yüzeY tabakasının üzerinde kaydedilen gürültülerde, yatay ve düşey bileşenleri arasındaki spektral oran, Rayleigh dalgalarının etkisini (E_{RW}), jeolojik yapıdan kaynaklanan etkiyi koruyarak yok eder (Bour, Fouissac et al. 1998).

$$S_2 = \frac{S_1}{E_{RW}} = \frac{H_S}{V_S}$$

6

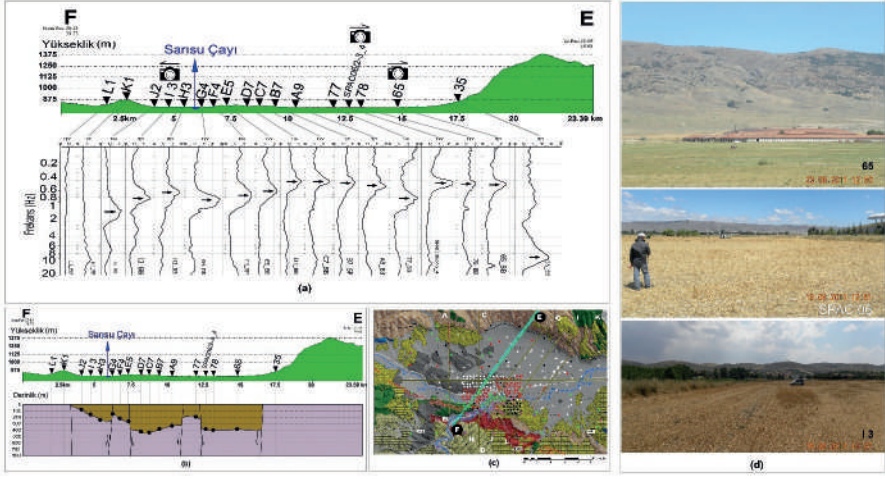
Bu oran H/V spektral oranı olarak adlandırılır.

Tek istasyon mikrotremor verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan işlem akışı Şekil 9'de verilmiştir. Her bir ölçüm noktasında en az 30 dakika veri kaydedilmesi önerilir. Mikrotremor ölçümünde en ideal kayıt zemin ortamının doğal titreşimcik kaydının alınması olmasına karşın geçici ortam gürültüleri de kaydedilecektir. Bu nedenle, mikrotremor kaydının en az 30 dakika süreli olarak alınması önerilir.



Şekil 9. Tek istasyon mikrotremor ölçümü veri toplama, veri işlem ve kayıt iş akış diyagramı (Tün 2013)

(Tün, Pekkan et al. 2016) araştırma makalesinde Eskişehir baseni ana kaya derinlik geometrisi mikrotremor ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve jeolojik yapı ile uyumu tartışılmıştır (Şekil 10). Ayrıca (Tün, Pekkan et al. 2022) araştırma makalesinde alüvyon sığ sedimanı oluşturan alüvyon tabakasındaki H/V oran eğrilerindeki büyüklüklerin istatistiksel dağılımı incelenerek eski alüvyon ve yeni alüvyon ayrımının yapıldığı görülmektedir.



Şekil 10. Eskişehir Baseni anakaya derinlik geometrisi ve mikrotremor ölçüm yerlerini gösteren barita (Tun, Pekkan et al. 2016)

KAYNAKLAR

- Asten, M. and J. Henstridge (1984). "Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins." *Geophysics* **49**(11): 1828-1837.
- Asten, M. W. (1978). "Geological control on the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms." *Bulletin of the Seismological Society of America* **68**(6): 1623-1636.
- Atakan, K., et al. (2004). J-SESAME: A standardized software solution for the H/V spectral ratio technique. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Atakan, K., et al. (2004). The H/V spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment. 13th world conference in Earthquake Engineering, Vancouver, Paper.
- Birgoren, G., et al. (2009). "Bedrock Depth Mapping of the Coast South of Istanbul: Comparison of Analytical and Experimental Analyses." *Turkish Journal of Earth Sciences* **18**(2): 315-329.
- Bonnefoy-Claudet, S., et al. (2004). Simulation of seismic ambient noise: I. Results of H/V and array techniques on canonical models. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1-6 August.
- Bour, M., et al. (1998). "On the use of microtremor recordings in seismic microzonation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **17**(7): 465-474.
- Chatelain, J. L., et al. (2008). "Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings." *Bulletin of Earthquake Engineering* **6**(1): 33-74.
- Cornou, C., et al. (2004). Simulation of seismic ambient vibrations: II. H/V and array techniques for real sites. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 2004, Paper.
- CRED and UNDRR (2020). UNDRR Press release on the report "The Human Cost of Disasters 2000-2019", CRED, UNDRR, Geneva.
- D'AMICO, V., et al. (2004). "Quick estimates of soft sediment thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy." *Journal of earthquake engineering* **8**(06): 895-908.
- Delgado, J., et al. (2000a). "Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool." *Journal of Applied Geophysics* **45**(1): 19-32.
- Dinesh, B., et al. (2010). "Estimation of sedimentary layer shear wave velocity using micro-tremor H/V ratio measurements for Bangalore city." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**(11): 1377-1382.

- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013, Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- Ergünay, O. (2008). "Mikrobölgeleme Çalışmaları ve Afet Senaryoları." Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri: 73-77.
- García-Jerez, A., et al. (2006). "Characterization of the sedimentary cover of the Zafarraya basin, southern Spain, by means of ambient noise." Bulletin of the Seismological Society of America **96**(3): 957-967.
- Gosar, A. and A. Lenart (2010). "Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors." Bulletin of Earthquake Engineering **8**(3): 501-518.
- Gupta, S. V., et al. (2020). "Site Effects Investigation in Srinagar City of Kashmir Basin Using Microtremor and Its Inversion." Journal of Earthquake Engineering: 1-22.
- Gutenberg, B. (1958). "Microseisms." Advances in Geophysics **5**: 53-92.
- Hinzen, K. G., et al. (2004). "On the resolution of H/V measurements to determine sediment thickness, a case study across a normal fault in the lower Rhine embayment, Germany." Journal of earthquake Engineering **8**(06): 909-926.
- Ibs-von Seht, M. and J. Wohlenberg (1999). "Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments." Bulletin of the Seismological Society of America **89**(1): 250-259.
- Kanai, K. (1961). "4. An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motions."
- Kanai, K. and T. Tanaka (1961). "On microtremors." Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo **39**(VIII): 97-115.
- Kanai, K., et al. (1954). "Measurement of the microtremor I." Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo **32**: 199-209.
- Karabulut, S. (2012). İstanbul Kenti İçin Yer Tepkisi Ve 3 Boyutlu (3-B) Kayma Dalga Hiz (Vs) Yapısının Belirlenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi. **Doktora Tezi**.
- Kumar, P. and A. K. Mahajan (2020). "New empirical relationship between resonance frequency and thickness of sediment using ambient noise measurements and joint-fit-inversion of the Rayleigh wave dispersion curve for Kangra Valley (NW Himalaya), India." Environmental Earth Sciences **79**: 1-14.
- Lermo, J. and F. J. Chávez-García (1994). "Are microtremors useful in site response evaluation?" Bulletin of the Seismological Society of America **84**(5): 1350-1364.

- Malagnini, L., et al. (1996). "Explosion, earthquake, and ambient noise recordings in a Pliocene sediment-filled valley: inferences on seismic response properties by reference-and non-reference-site techniques." *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**(3): 670-682.
- Motamed, R., et al. (2007). "Seismic microzonation and damage assessment of Bam city, Southeastern Iran." *Journal of earthquake Engineering* **11**(1): 110-132.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface." *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports* **30**(1): 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland New Zealand.*
- Nogoshi, M. and T. Igarashi (1970). "On the propagation characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface." *J. Seismol. Soc. Japan* **23**: 264-280.
- Nogoshi, M. and T. Igarashi (1971). "On the amplitude characteristics of microtremor (part 2)." *J. Seismol. Soc. Japan* **24**: 26-40.
- Omori, F. (1908). "On Micro-Tremors." *Bulletin of Earth Inv. Com.* **2**(I-II).
- Özalaybey, S., et al. (2011). "Investigation of 3-D basin structures in the İzmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods." *Geophysical Journal International* **186**(2): 883-894.
- Parolai, S., et al. (2002). "New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)." *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**(6): 2521-2527.
- Rupar, L. and A. Gosar (2020). "MAPPING THE THICKNESS OF QUATERNARY SEDIMENTS IN THE ISKA ALLUVIAL FAN (CENTRAL SLOVENIA) USING MICROTREMOR METHOD." *Acta Geodynamica et Geromaterialia* **17**(2): 177-191.
- Seekins, L. C., et al. (1996). "Site amplification at five locations in San Francisco, California: A comparison of S waves, codas, and microtremors." *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**(3): 627-635.
- SESAME, H. (2004). V User Guidelines, Sesame European research project WP12-Deliverable D23. 12, European Commission-Research General Directorate Project No, EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Stanko, D. and S. Markušić (2020). "An empirical relationship between resonance frequency, bedrock depth and V S30 for Croatia based on HVSR forward modelling." *Natural Hazards* **103**(3): 3715-3743.

- Sukumaran, P., et al. (2011). "Profiling of late Tertiary-early Quaternary surface in the lower reaches of Narmada valley using microtremors." *Journal of Asian Earth Sciences* **41**(3): 325-334.
- Teves-Costa, P., et al. (1996). "Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **15**(3): 201-209.
- Tün, M. (2013). Interpretation Of Ground Response And Shear-Wave Velocity (V_s) Structure In Microzonation Studies: A Case Study In Eskişehir. Engineering Faculty, Department of Geophysics Engineering, Istanbul University, Doctorate Thesis. **DR**.
- Tün, M., et al. (2022). "The depth of alluvial sediments and subsurface profiling along the Eskişehir Basin in Central Turkey using microtremor observations." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **81**(5): 169.
- Tün, M., et al. (2016). "An investigation into the bedrock depth in the Eskişehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method." *Geophysical Journal International* **207**(1): 589-607.
- UNDRR (2020). Hazard Definition and Classification Review Technical Report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), UNDDR, Geneva, Switzerland.

Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç Onur

 ÖZGÜR
YAYINLARI

ISBN 978-975-447-834-1

9 789754 478341