

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZALT GEOGRİD DONATI İLE
YUMUŞAK KİL ZEMİNLERİN GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

ŞUBAT 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZALT GEOGRİD DONATI İLE
YUMUŞAK KİL ZEMİNLERİN GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat SERT

ŞUBAT 2025

Yusuf DEMİR tarafından hazırlanan “Bazalt Geogrid Donatı İle Yumuşak Kil Zeminlerin Güçlendirilmesi ” adlı tez çalışması 19.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda (Yüksek Lisans tezi) olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Ertan BOL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Sedat SERT (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BAZALT GEOGRİD DONATI İLE YUMUŞAK KİL ZEMİNLERİN GÜÇLENDİRİLMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(19/02/2025)

Yusuf DEMİR





Eşime ve çocuklarıma



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi birikimi, rehberliği ve engin tecrübeleriyle yoluma ışık tutan, akademik bakış açımı geliştirmeme öncülük eden kıymetli Danışman Hocam Prof. Dr. Sedat SERT'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Hocam, bilimsel süreçlerdeki yol göstericiliğinin yanı sıra, karşılaştığım her zorlukta verdiği moral ve motivasyonla beni her zaman daha iyisini başarmaya teşvik etmiştir. Sabırla dinleyen, özenle yönlendiren ve her aşamada destekleyici yaklaşımını hissettiren kıymetli hocam sayesinde tez sürecim, sadece akademik anlamda değil, kişisel gelişim açısından da son derece verimli ve öğretici bir yolculuk olmuştur.

Hocamın bana kazandırdığı disiplin, perspektif ve çalışma azmi, hayatım boyunca rehberim olacaktır. Tezimin her detayında onun rehberliğinin izlerini görmek benim için büyük bir onur ve mutluluk kaynağıdır. Kendisine duyduğum minnettarlığı ifade etmek için kelimeler yetersiz kalsa da, onun desteği olmadan bu çalışmanın mümkün olmayacağını ifade etmek isterim.

Arazi deneylerinde bana büyük katkılar sunan Recep EYÜPLER'e, hem teknik yardımları hem de süreç boyunca gösterdikleri destek ve anlayış için teşekkürü bir borç bilirim.

Bu süreçte, hem manevi hem de teknik destekleriyle çalışmalarımın daha verimli ilerlemesine katkıda bulunan, sabrı ve özverisiyle sürecimi kolaylaştıran kıymetli kardeşim Enes Taha AYDOĞDU'ya ayrıca teşekkür etmek isterim. Onun katkıları, bu çalışmanın başarısında önemli bir yer tutmuştur.

Ayrıca, bu uzun ve emek dolu süreçte sabır ve anlayışlarıyla beni her zaman destekleyen, sevgileriyle motivasyon kaynağım olan sevgili eşim Sümeyra DEMİR'e ve kıymetli çocuklarım Ahmet Emin, Fatma Betül ve Ömer Halis DEMİR'e sonsuz şükranlarımı sunarım. Onların yanımda olduğunu bilmek, karşılaştığım her güçlüğü aşmamda bana güç vermiştir.

Son olarak, tezimin hazırlanmasında doğrudan ya da dolaylı olarak katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara gönülden teşekkür ederim.

Yusuf DEMİR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE ZEMİN DENEYLERİ	3
2.1. Zemin İyileştirmesi	3
2.2. Arazi Deneyleri	5
2.2.1. Standart penetrasyon testi (SPT).....	5
2.2.2. Koni penetrasyon testi (CPT).....	6
2.2.3. Presiyometre deneyi	7
2.2.4. Veyn deneyi	8
2.2.5. Plaka taşıma deneyi.....	10
3. GEOSENTETİK MALZEME TÜRLERİ VE İŞLEVLERİ.....	13
3.1. Geosentetik Türleri.....	13
3.1.1. Geotekstilller	13
3.1.2. Geogridler	14
3.1.2.1. Bazalt geogrid	15
3.1.3. Geomembranlar.....	16
3.1.4. Geohücreler	17
3.1.5. Geonetler	18
3.1.6. Geomatlar	19
4. BAZALT VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANIMI.....	21
4.1. Bazalt.....	21
4.2. Bazalt Fiber	21
4.2.1. Bazalt fiberin üretim aşamaları	21
4.3. Bazalt Geogrid.....	22
4.4. Bazalt Geogridin Mikro Yapısı	22
4.5. Bazalt Geogridin İnşaat İşlerinde Kullanımı.....	22
4.6. Bazaltın Zemin İyileştirilmesinde Kullanımı	22
5. MALZEMELER VE YÖNTEM.....	25
5.1. Malzemeler.....	25
5.1.1. Kil zemin ve dolgu malzemesi	25
5.1.2. Bazalt geogrid	28
5.2. Yöntem	30
5.2.1. Plaka taşıma deneyi.....	30
5.2.2. Fiziksel deneyler	39

5.2.2.1. Kıvam limitleri	39
5.2.2.2. Likit limit deneyleri.....	39
5.2.2.3. Plastik limit deneyleri.....	40
5.2.2.4. Elek analizi	40
5.2.2.5. Standart kompaksiyon deneyi	41
5.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri	43
5.2.3.1. TS1900-2'ye göre kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri	43
5.2.4. Deneyde kullanılan ekipmanlar.....	43
5.2.5. Deney numunesinin hazırlanışı	43
5.2.6. Sıkıştırma uygulaması	44
5.2.7. Suda bekletme işlemi	44
5.2.8. Deneyin uygulanışı.....	44
5.2.8.1. Kil zeminde CBR deneyleri	44
5.3. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme.....	47
5.3.1. Hesaplamalar	47
5.3.1.1. Kil ve dolgu malzemeli numunelerde CBR deneyleri	48
5.4. Hesaplamalar	50
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	53
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

BCR	: Taşıma kapasitesi oranı
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı (California bearing ratio)
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
GCL	: Geosentetik kil örtü
PL	: Plastik limit
PI	: Plastite indisi
PVA	: Polivinil alkol
PVAs	: Prefabrike düşey drenler
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
USCS	: Birleştirilmiş Sınıflandırma Sistemi (Unified Soil Classification Syst.)



SİMGELER

B	: Temel genişliği
c	: Kohezyon
D	: Temel çapı
dd	: Dikiş yönüne dik
D_f	: Temel gömme derinliği
dy	: Dikiş yönünde
e	: Boşluk oranı
ε	: Düşey birim boy değişimi
G_s	: Özgül ağırlık
H	: Yükseklik, deney kabı boyu
L	: Donatılar arası mesafesi
L_G	: Temel genişliği
M₁	: Kabin kütlesi
M₂	: Kap + yaş numune kütlesi
M₃	: Kap + kuru numune kütlesi
M_{toplam}	: Toplam ağırlık
M_{su}	: Suyun ağırlığı
M_{zemin}	: Zeminin ağırlığı
n	: Porozite
N	: Darbe sayısı, donatı sayısı
S_r	: Doygunluk derecesi
u	: Donatı derinliği
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız (Unconsolidated Undrained)
V	: Numune hacmi
V_e	: Boşluk hacmi
V_{hava}	: Havanın hacmi
V_{toplam}	: Toplam hacim
V_{su}	: Suyun hacmi
V_{zemin}	: Dane hacmi
w	: Su muhtevası

W_{alt}	: Kalıbın alt kısmındaki zeminin su muhtevası
$W_{üst}$	: Kalıbın üst kısmındaki zeminin su muhtevası
W_{ort}	: Ortalama su muhtevası
W_{opt}	: Optimum su muhtevası
W_s	: Kuru örnek ağırlığı
W_w	: Suyun ağırlığı
γ_{kmaks}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
ϕ	: Kayma direnci açısı
σ	: Toplam normal gerilme
τ_{max}	: Kayma direnci
ρ'	: Batık birim hacim ağırlık
ρ_d	: Doygun birim hacim ağırlık
ρ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
ρ_n	: Doğal birim hacim ağırlık

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Kıl ve dolgu zemine ait fiziksel özellikler.	26
Tablo 5.3. Üç farklı plaka taşıma deney sonuçları.	36
Tablo 5.4. Kıl zeminde kompaksiyon deneyi.	42
Tablo 6.1. Kuru ve yaş CBR deney sonuç özeti.	53





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemleri.	4
Şekil 2.2. Arazi deneyleri.	5
Şekil 3.1. Geotekstil.....	14
Şekil 3.2. Bazalt Geogrid.	16
Şekil 3.3. Geomembran.....	17
Şekil 3.4. Geohücre.....	18
Şekil 3.5. Geonet.....	19
Şekil 3.6. Geomat.....	20
Şekil 5.1. Hendek Akova semti.	26
Şekil 5.2. Sakarya ili Hendek ilçesi Akova semtinden alınan numuneler.	27
Şekil 5.3. Ufalanmış ve elenmiş kil ve dolgu zemin.	27
Şekil 5.4. Dolgu malzemesinin dane dağılım eğrisi.	28
Şekil 5.5. Kil zeminin dane dağılım eğrisi.....	28
Şekil 5.6. Bazalt geogridin bütün ve kesilmiş hali.....	29
Şekil 5.7. Plaka taşıma deneyine zemin hazırlama.	31
Şekil 5.8. Doğal kil zeminde plaka taşıma deneyi hazırlık aşamasına ilişkin görsel	32
Şekil 5.9. Plaka taşıma deney ekipmanlarının kurulması.	32
Şekil 5.10. Yükleme prosedürü ve saatlerin okunması.....	33
Şekil 5.11. Bazalt geogridin yerleştirilerek sabitlenmesi.....	34
Şekil 5.12. Dolgu malzemenin serilmesi ve sıkıştırılması.....	34
Şekil 5.13. Bazalt geogridin dolgu altında görünümüne ait görsel.....	35
Şekil 5.14. Bazalt geogrid destekli deney görseli.	35
Şekil 5.15. Plaka taşıma deneyinden bir görsel.	36
Şekil 5.16. Doğal killi zeminde plaka deneyi	37
Şekil 5.17. Doğal zemin ve dolgu zeminin plaka deney sonuçları	37
Şekil 5.18. Bazalt geogrid destekli deney sonuçları	38
Şekil 5.19. Üç farklı plaka deney sonuçları.	38
Şekil 5.20. Kil zemin kuru birim hacim ağırlık su muhtevası ilişkisi.	42
Şekil 5.21. CBR kalıbı ve geogrid yerleşim düzeni.....	45
Şekil 5.22. Numunelerin hazırlanması.....	46
Şekil 5.25. CBR deney aşamaları	46
Şekil 5.26. Doğal numunede yaş CBR deney okumaları.....	47
Şekil 5.27. Tüm numunelerde CBR deney okumaları.	48
Şekil 5.28. CBR kabına yerleştirilen numune ve geogrid.....	49
Şekil 5.29. CBR kabına yerleştirilen numunelerin suda bekletilmesi.	49
Şekil 5.30. CBR kalıbı ve geogrid yerleşimi.	50
Şekil 5.31. Doğal ve dolgulu zeminlerde yaş ve kuru CBR deney okumaları.	50
Şekil 5.32. Tüm numunelerde CBR deney okumaları.	51



BAZALT GEOGRİD DONATI İLE YUMUŞAK KİL ZEMİNLERİN GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Yumuşak kil zeminler taşıma gücü aşılması ve oturmaların fazlalığı gibi geoteknik problemlerle sıklıkla karşılaşılacak zemin türlerinin başında gelmektedirler. Zemin iyileştirmesine yönelik literatürde çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi geosentetiklerin kullanımıdır. Geosentetikler, zemin tabakalarını ayırma, güçlendirme, filtrasyon, drenaj, koruma ve erozyon kontrolü işlevlerini yerine getirmektedirler. Bu tez çalışmasında bazalt geogridin kil zeminin güçlendirilmesinde kullanımı ve sağlanan değişimin laboratuvarında Kaliforniya Taşıma Deneyi ve arazide plaka taşıma deneyi sonuçlarıyla irdelenmesi aktarılmaktadır. Çalışmada bazalt geogridin tercih edilmesinin nedeni doğal kayaktan elde edilen çevreci bir ürün olmasıdır. Deneylerde %69 ince içeren kumlu düşük plastisiteli kil (CL) kullanılmış, optimum su muhtevası %17 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı $16,65 \text{ kN/m}^3$ bulunmuştur. Laboratuvarında, bazalt geogridin 1 ve 2 sıra olarak yerleştirilmesiyle donatılan zeminde kuru ve yaş CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doğal durumda %7,24 ve %6,44 olarak elde edilen kuru ve yaş CBR değerleri, tek sıra bazalt geogrid kullanıldığında %15,19 ve %4,27, çift sıra bazalt geogrid kullanıldığında %16,71 ve %5,60 olarak elde edilmiştir. Yaş CBR deneylerinde şişme miktarları birbirine çok yakın olmak üzere 1.80 mm civarında bulunmuştur. Kuru durumda bazalt geogrid katkısının CBR direncini tekli kullanımda %110, çiftli kullanımda %130 arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak yaş CBR değerlerine bakıldığında düşüşlerin geogrid olmayan durumda %11, tekli geogrid olması durumunda %72 ve çiftli kullanımda ise % 67 civarında olduğu görülmüştür. Yaş durumda geogrid olmayan duruma göre tekli kullanımda % 34, çiftli kullanımdaysa %13 civarında düşüş belirlenmiştir. Bu durumda bazalt geogridin güçlendirme etkisinin suyun varlığında görülemediğini söylemek yanlış olmayacaktır. Plaka deneylerinde elde edilen yük-oturma eğrileri, bazalt geogridin zemin performansına olan olumlu katkısını çarpıcı şekilde ortaya koymuştur. Bu deneyler sonucunda bazalt geogrid destekli zeminlerin, yük taşıma kapasitesinde doğal zemine kıyasla anlamlı bir artış görüldüğü ve oturma miktarının önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Doğal yumuşak killi zeminler, sınırlı yük taşıma kapasitesine sahip olmaları nedeniyle yapısal projelerde çeşitli iyileştirme yöntemlerine gereksinim duymaktadır. Deneyler sonrasında bazalt geogridin farklı geogrid türlerine bir alternatif olarak kullanılabileceği, ancak su seviyesinin yükselmesi ihtimali olan durumlarda dikkatli olunması ve zeminden suyun drene edilerek uzaklaştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



REINFORCEMENT OF SOFT CLAY SOILS WITH BASALT GEOGRID

SUMMARY

Soft clay soils are among the most challenging geotechnical materials due to their low bearing capacity, excessive settlement, and susceptibility to deformation under applied loads. These properties often necessitate soil improvement techniques to enhance the performance of infrastructure built on such soils. Various methods have been developed to address these challenges, with geosynthetics emerging as an effective and versatile solution. Geosynthetics are widely used in geotechnical engineering due to their functions of reinforcement, separation, filtration, drainage, and erosion control. This study focuses on the use of basalt geogrid, a geosynthetic material, to reinforce soft clay soils and evaluates its effectiveness through a series of laboratory and field tests.

Basalt geogrids are produced from basalt fibers, which are derived from volcanic rocks. These fibers exhibit excellent mechanical properties, including high tensile strength, durability, and resistance to chemical and environmental degradation. Additionally, basalt geogrids are environmentally friendly, as they are made from natural materials and can be recycled. These attributes make basalt geogrids a promising alternative to traditional synthetic geosynthetics in soil improvement applications.

In this research, soft clay soil with 69% fine content and low plasticity (classified as CL according to the Unified Soil Classification System) was selected as the test material. The soil's physical properties were determined through laboratory tests, including liquid limits, particle size distribution, and compaction characteristics. The optimum water content and maximum dry unit weight of the soil were found to be 17% and 16.65 kN/m³, respectively. To assess the reinforcing effect of basalt geogrid, California Bearing Ratio (CBR) tests were conducted under both dry and soaked conditions.

The experimental program included three configurations: unreinforced soil, soil reinforced with a single layer of basalt geogrid, and soil reinforced with two layers of basalt geogrid. The geogrid layers were placed at specific depths within the soil specimens to optimize their reinforcing effect. In the unreinforced state, the dry and soaked CBR values of the soil were 7.24% and 6.44%, respectively. With the addition of a single geogrid layer, these values increased to 15.19% and 4.27%. When two geogrid layers were used, the dry and soaked CBR values further improved to 16.71% and 5.60%, respectively. These results demonstrate the significant enhancement in soil strength provided by basalt geogrid under dry conditions.

The study also examined the swelling behavior of the soil during soaked CBR tests. The swelling values for all configurations were approximately 1.80 mm, indicating minimal variation in this parameter despite the presence of geogrid reinforcement. However, a notable reduction in CBR values was observed under soaked conditions, particularly for geogrid-reinforced specimens. This reduction suggests that the

reinforcing effect of basalt geogrid diminishes in the presence of water, which could be attributed to the loss of interfacial friction between the geogrid and the surrounding soil.

To better understand the performance of basalt geogrid in soil reinforcement, load-settlement behavior was analyzed. The load-settlement curves revealed that the inclusion of basalt geogrid significantly reduced settlement and increased the bearing capacity of the soil. This improvement was more pronounced under dry conditions, where the geogrid effectively distributed the applied load and limited soil deformation. In contrast, the presence of water weakened the soil-geogrid interaction, reducing the overall effectiveness of the reinforcement.

Field tests were also conducted to validate the laboratory findings. Plate load tests were performed on natural and geogrid-reinforced soils to evaluate their bearing capacity and deformation characteristics. The results confirmed the laboratory observations, showing substantial improvements in bearing capacity and settlement reduction for geogrid-reinforced soils. These findings highlight the potential of basalt geogrid as a cost-effective and sustainable solution for reinforcing soft clay soils in various geotechnical applications.

The performance of basalt geogrids was also evaluated in terms of their interaction with the soil particles. The apertures of the geogrid allowed for an effective mechanical interlock with the soil, contributing to enhanced load transfer and reduced deformation. This interlock mechanism proved to be more efficient under dry conditions, as the absence of excess water ensured stable soil-geogrid contact. However, under soaked conditions, the increased moisture content reduced interfacial friction, thus limiting the reinforcement efficiency. These findings underscore the importance of considering environmental factors, such as water table fluctuations, during the design phase.

Additionally, the environmental benefits of basalt geogrids were highlighted in this study. Compared to traditional geogrids made from synthetic polymers, basalt geogrids are produced from a natural and abundant resource, making them a sustainable choice for soil reinforcement applications. Their high resistance to UV radiation and chemical degradation further enhances their suitability for long-term use in challenging environmental conditions. These properties position basalt geogrids as a promising alternative for geotechnical projects aiming to balance performance with sustainability.

The results of this research suggest several avenues for future studies. For example, the long-term durability of basalt geogrids under cyclic loading and varying environmental conditions should be investigated. Furthermore, the combination of basalt geogrids with other soil stabilization techniques, such as chemical additives or prefabricated vertical drains, could be explored to optimize the reinforcement effects. Such hybrid solutions may mitigate the limitations observed under soaked conditions and further enhance the applicability of basalt geogrids in waterlogged or high-moisture environments.

Another area for further exploration is the economic feasibility of large-scale applications of basalt geogrids. While their mechanical properties and environmental advantages are evident, a comprehensive cost-benefit analysis comparing basalt geogrids to conventional materials is essential. This would help establish guidelines for their use in infrastructure projects, particularly in regions with abundant basalt resources.

Moreover, numerical modeling and simulation techniques could be employed to further investigate the interaction between basalt geogrids and various soil types. Advanced finite element analysis tools can provide valuable insights into the stress distribution and deformation mechanisms in reinforced soil systems. Such analytical approaches would enhance the understanding of reinforcement behavior under complex loading and boundary conditions, and support the development of design guidelines tailored to different project requirements.

It is also recommended that future studies investigate the long-term environmental impacts of basalt geogrid usage, including lifecycle assessments and degradation patterns in different climates. Understanding how basalt geogrids perform over time, both structurally and environmentally, is crucial for establishing their reliability in sustainable infrastructure systems.

In conclusion, the study demonstrated that basalt geogrids significantly enhance the bearing capacity and stability of soft clay soils, particularly in dry conditions. While their performance under soaked conditions is comparatively limited, basalt geogrids remain a viable and sustainable option for a wide range of applications, including road construction, embankments, and retaining walls. Future research should focus on hybrid reinforcement techniques, combining basalt geogrids with other soil stabilization methods to mitigate the effects of water and further optimize performance. Moreover, long-term field studies are recommended to evaluate the durability and effectiveness of basalt geogrids under varying environmental and loading conditions. This research contributes valuable insights into the potential of basalt geogrids and provides a foundation for advancing sustainable soil improvement practices in geotechnical engineering.



1. GİRİŞ

Artan nüfusla birlikte yerleşimlerin geoteknik problemlerin yaşandığı yerlere kayması günümüzün kaçınılmaz bir gerçeğidir. Herhangi bir yere binaların yapılması o bölgeye ulaşım sağlanmasını, alt yapı tesislerinin kurulmasını gerektirmektedir. Bu durumda da zaman içinde taşıma gücü aşılması, oturmaların kabul edilemez düzeye çıkması, ortam zeminlerinin deprem sırasında sıvılaşması veya yumuşaması, kayalık ancak eğimli arazilerde farklı oturma problemi gibi çok sayıda geoteknik problem ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir yapılaşma öncesi ortam zeminlerinin incelenmesi ile olası problemlerin ortaya konması sonrasında iyileştirme seçeneği bodrum yapma, kazıklı temel yapma, destek sistemleri oluşturma gibi önlemlere alternatif olabilmektedir. Literatürde ve uygulamada çok sayıda iyileştirme çeşidi ve sınıflandırma yaklaşımları bulunmaktadır. İyileştirme yaklaşımlardan birinde Hausmann (1990), iyileştirme yöntemlerini mekanik, hidrolik, fiziksel-kimyasal, katkılı-yapısal destekli ve kitleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren yöntemler olarak ayırmıştır. Bir geosentetik türü olan geogridlerin kullanımı yapısal destek sağlaması açısından öne çıkmaktadır. Birçok dayanma yapısı ve ulaştırma yapıları ile ilgili problemlerde geogridler taşıma gücünü artırıcı olarak kullanılabilir. Genel manada geosentetikler, zemin tabakalarını ayırma, güçlendirme, filtrasyon, drenaj, koruma ve erozyon kontrolü işlevlerini yerine getirmektedirler. Bu çalışmada doğal bir malzeme olan bazalt kayasından üretilmiş geogridler arazide dolgu zemine eklenerek doğal ve güçlendirilmiş ortam plaka taşıma deneyine tabi tutulmuştur. Sonrasında ise geogridler laboratuvar ortamında kil zemine eklenerek Kaliforniya Taşıma Deneyleri yapılmış ve etkileri tartışılıp değerlendirilmiştir.



2. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE ZEMİN DENEYLERİ

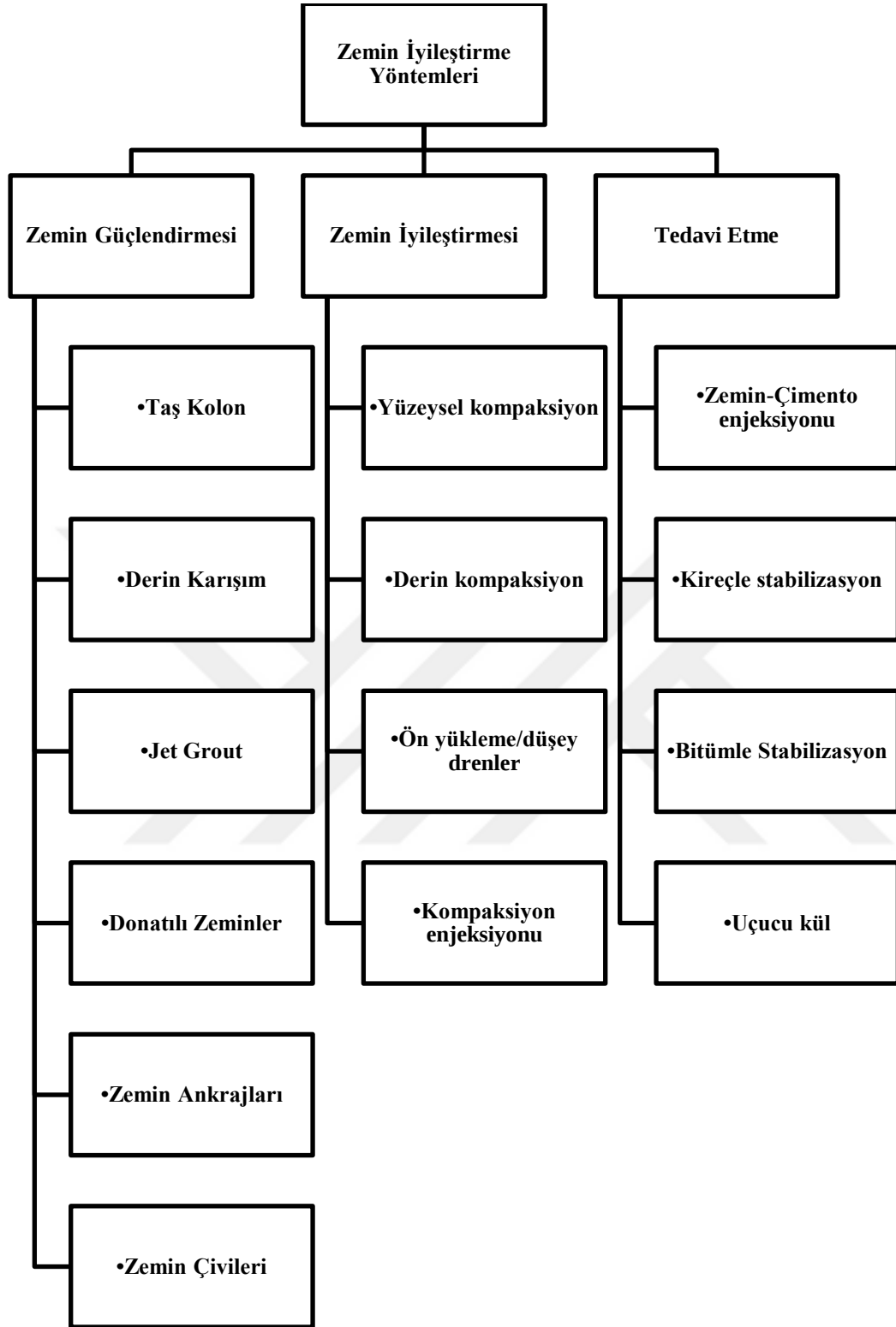
2.1. Zemin İyileştirmesi

Zemin güçlendirme veya zemin iyileştirme yetersiz zeminler üzerinde bulunan yapıları, meydana gelebilecek herhangi bir sarsıntıya daha hazır hale getirmek ve benzeri geoteknik problemler oluşmaması için yapılan iyileştirmelere verilen genel addır.

Zemin iyileştirmesi çok sayıda önemli nedenle gerçekleştirilen bir süreçtir ve bu sürecin temel amaçlarından bazıları, yapısal güvenlik, yapı dayanıklılığını sağlamak, ekonomik verimliliği artırmak ve çevresel uyumluluğu gözetmektir.

Şehirleşmenin nüfusa bağlı olarak gelişmesi, taşıma gücü zayıf tarımsal ve bataklık zeminler üzerine yapılaşmanın yayılmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla istenilen yapılar tasarlanırken herhangi bir geoteknik sorun yaşanmaması için zemin iyileştirmesi yapılması gerekmekte olup, zemin iyileştirme seçeneklerinden en ekonomik ve faydalı olanın tercih edilmesi zorunludur. Zemin güçlendirmesi aynı zamanda zeminin istenmeyen oturmalarını önlemeli ve ortamda temel taşıma gücünü artırmaya yönelik olmalıdır.

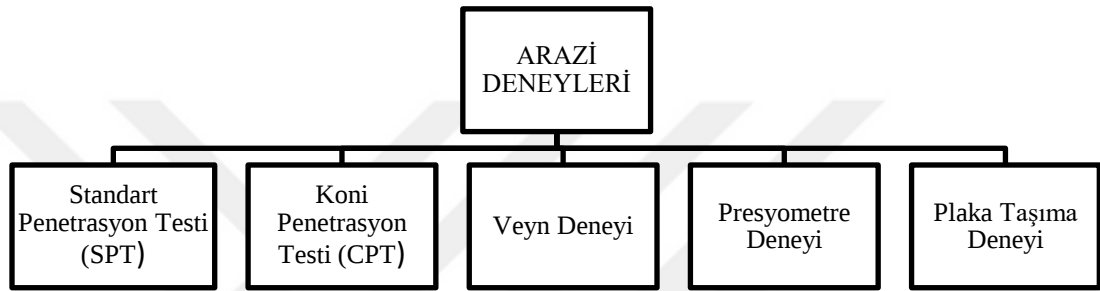
Doğal afetler, özellikle deprem sırasında, sivilaşma riskini azaltmak için de zemin iyileştirme süreçlerine ihtiyaç duyulur. Bu da, deprem riski yüksek bölgelerde hayati öneme sahiptir. Ayrıca, zemin iyileştirme, zayıf zemin koşullarını iyileştirerek inşaat maliyetlerini optimize eder ve yapıların daha uzun ömürlü olmasını sağlayarak uzun vadeli bakım ve onarım maliyetlerini azaltır. Mühendislik maliyeti açısından zemin iyileştirmesinin ilk maliyeti yüksek olsa da yapının servis ömrünü artıracığından uzun vadede çok ekonomiktir. Bunlar gibi çeşitli nedenlerden dolayı zemin iyileştirme, mühendislik ve inşaat projelerinin başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Zemin iyileştirme yöntemleri.

Tasarlanan bir yapı mevcut zemin üzerinde güvenli bir şekilde inşa edilemiyorsa zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir. Zeminlerin iyileştirilmesi, iyileştirilme derinliğine bağlı olarak iki ana gruba ayrılırlar. Bunlar yüzeysel iyileştirme ve derin iyileştirme. İyileştirme yapılan zeminde değerlendirme yapılmazsa projenin

başarısı ve iyileştirmenin istenen kriterlere uyup uymadığı belirlenemez. Bu durumun yaşanmaması için proje çalışmalarından önce standartlar ve yönetmeliklere göre arazide hassas biçimde deneylerin yapılarak ihtiyaç miktarı kadar numunenin laboratuvar ortamında hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Sonrasında laboratuvar deneylerinin yapılarak irdelenmesi ve deney sonuçlarına göre uygun zemin iyileştirme yönteminin belirlenerek proje aşamasına geçilmesi esastır. Özetle arazide ve laboratuvar da yapılan deneyler, zemin iyileştirmesi hakkında yorum yapılmasını sağlar ve hangi iyileştirme yönteminin seçilmesi gerektiği konusunda önemli rol oynar. Arazide yapılan deneyler Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Arazi deneyleri.

2.2. Arazi Deneyleri

2.2.1. Standart penetrasyon testi (SPT)

SPT, "Standard Penetration Test" (Standart penetrasyon testi) kısaltmasıdır. Bu test, inşaat mühendisliği ve geoteknik mühendisliği alanlarında, zemin özelliklerini belirlemek için kullanılan yaygın bir sondaj testidir. Zemin davranışını ve dayanımını anlamaya yönelik önemli veriler sağlar. SPT, genellikle zemin derinliği boyunca bir çubuğun bir huni şeklinde bir sondaj aracına yerleştirilip belirli bir mesafe ilerlemesiyle yapılır.

Testin temel adımları şunlardır:

1. Çubuk Yerleştirme: Bir sondaj çubuğu (tij) zemin içine yerleştirilir.
2. Penetrasyon: Çubuğun yerleştirilen zemine belirli bir kuvvetle sokulması sağlanır.
3. Veri Toplama: Çubuğun ilerleyişinin ölçülmesi ile zemin türüne ve sertliğine göre penetrasyon değerleri elde edilir.

Sonuçlar, zemin türünü, taşıma kapasitesini ve yer altı su seviyelerini anlamak için kullanılır. Bu test, zemin mühendisliğinde temel bir araçtır ve çoğu zemin etüt çalışmasında yer alır.

2.2.2. Koni penetrasyon testi (CPT)

CPT, "Cone Penetration Test" (Konik Penetrasyon Testi) kısaltmasıdır ve zemin etütlerinde kullanılan bir başka yaygın test yöntemidir. Bu test, yer altı zemininin özelliklerini belirlemek için yapılan bir testtir ve genellikle zemin dayanımını ve sıkışma özelliklerini değerlendirmeye yardımcı olur.

CPT, temel olarak bir konik uç (genellikle 60 derece açıyla) ve bir basınç sensörü ile donatılmış bir çubuğun, zemin içine belirli bir hızla itildiği bir testtir. Bu test sırasında, zemine uygulanan penetrasyon kuvveti ve toplam direncin ölçümleri yapılır. Bu sayede, zeminin sertlik derecesi ve diğer geoteknik özellikler hakkında bilgi edinilir.

CPT'nin adımları şunlardır:

1. Test Cihazı: Test için kullanılan çubuk, bir koni ucu (uç kısmı genellikle 10 cm² alana sahip) ve bir zemin direncini ölçen basınç sensöründen oluşur.
2. Penetrasyon: Konik uç, sabit bir hızla (genellikle 2 cm/s) zemin içine itilerek ilerletilir.
3. Veri Toplama: Çubuğun zemin içine ilerlerken gösterdiği direnç (konik uç direnci) ve zemin sıvı akışını ölçen veri sensörlerinden alınan veriler kaydedilir.

CPT'nin sağladığı veriler, özellikler:

- Zemin dayanımı,
- Zemin türü (kum, kil, sıvı su içeren katmanlar vs.),
- Zemin sıvılaşma potansiyeli,
- Zemin sıkışma özellikleri.

SPT'den farklı olarak CPT daha hızlı ve sürekli veriler sağladığı için genellikle daha hassas sonuçlar verir ve daha derinlere inilmesi mümkün olur. Ayrıca, CPT'nin daha az etkilenmesi nedeniyle zemin türünün tespiti açısından daha güvenilirdir. Bu test, özellikle derin zemin analizlerinde ve mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılır.

2.2.3. Presiyometre deneyi

Presiyometre Deneyi, zeminlerin deformasyon ve taşıma kapasitesini ölçmek için yapılan bir geoteknik testtir. Bu test, özellikle zeminlerin plastik ve elastik davranışlarını anlamak, zemin yer değiştirmeleri ve taşıma kapasitesini daha doğru tahmin etmek amacıyla kullanılır. Temelde, yer altındaki zemin katmanlarının ne kadar sıkılaşabileceği veya ne kadar yer değiştirebileceği gibi önemli parametreleri belirler.

Presiyometre Deneyinin Temel Özellikleri:

1. Cihaz Yapısı: Deney, "presiyometre" adı verilen bir cihazla yapılır. Bu cihaz, belirli bir çapa sahip bir silindirik prob içerir ve bu prob zemin içine itilerek, çevresindeki zeminle etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda, prob çevresindeki zeminin basınç ve yer değiştirme değerleri ölçülür.
2. Testin Uygulama Şekli: Test, zemin yüzeyinden belirli bir derinlikte yapılan sondaj işlemine yerleştirilen presiyometre probu ile yapılır. Prob, yerleştirildikten sonra belirli bir itme kuvvetiyle zemine itilerek çevresindeki zeminin basınç ve deformasyon ölçümleri yapılır.
3. Basınç ve Yer Değiştirme: Presiyometre, zemin içine yerleştirildikten sonra çevresindeki zemine belirli bir basınç uygulayarak zemin reaksiyonunu (yer değiştirme) ölçer. Bu süreç, zeminin çeşitli deformasyon karakteristiklerini analiz etmeyi sağlar.

Presiyometre Deneyinin Faydaları:

- Daha Hassas Değerlendirme: Sadece zemin türünü değil, aynı zamanda deformasyon ve yer değiştirme özelliklerini de ölçerek daha doğru sonuçlar verir. Bu, özellikle büyük yapıların temellerinin tasarlanmasında önemlidir.
- Zemin Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi: Zeminlerin taşıma kapasitesini ve ne kadar yük taşıyabileceğini tespit etmek için faydalıdır.
- Zemin Sıkışma: Test, zemin sıkışma davranışları ve elastik özellikleri hakkında bilgi verir, böylece zemin katmanlarının sıkışabilirliğini ölçmek mümkündür.

Kullanım Alanları:

- Temel Tasarımı: Yüksek binalar, köprüler gibi büyük yapıların temel tasarımında presiyometre testi kullanılarak zemin taşıma kapasitesi değerlendirilir.
- Zemin İyileştirme: Zemin iyileştirme çalışmalarında, zeminin deformasyon davranışları anlaşılır ve uygun iyileştirme yöntemleri seçilir.
- Zemin Stabilitesi: Özellikle inşaat öncesinde zemin stabilitesini analiz etmek için bu test kullanılır.

Presiyometre deneyi, SPT (Standard Penetration Test) ve CPT (Cone Penetration Test) gibi diğer testlerden daha detaylı sonuçlar verebilir çünkü bu testle zeminlerin sadece dayanımını değil, aynı zamanda deformasyon karakteristiklerini de doğrudan ölçmek mümkündür.

2.2.4. Veyn deneyi

Veyn Kanatlı Kesici Deneyi, zeminlerin kesme dayanımını ölçmek için kullanılan basit ve yaygın bir yöntemdir. Bu test, özellikle yumuşak zeminler ve killi zeminlerde zeminin plastik ve sıvılaştıran davranışlarını incelemek için kullanılır.

Testin Temel Prensipleri:

Veyn testi, bir veyn (pervane şeklinde bir cihaz) aracılığıyla zemin örneğine dönme hareketi uygulayarak, zeminle etkileşimde bulunan pervanenin dönme direncini ölçmeyi hedefler. Bu direncin büyüklüğü, zeminin kesme dayanımını gösterir.

Veyn Deneyinin Yapılışı:

1. Cihazın Yerleştirilmesi: Veyn test cihazı, genellikle dört yapraklı bir çark veya pervane şeklinde bir uçtan oluşur. Bu pervane, zemin içine belirli bir derinlikte yerleştirilir.
2. Dönme Hareketi: Pervane, zemin içinde dönme hareketi yapacak şekilde bir çubuğa bağlanır. Zemin içine yerleştirilen pervane, yavaşça döndürülerek zeminle etkileşime sokulur.
3. Kesme Direnci Ölçümü: Pervanenin dönmeye başladığı andan itibaren, dönme direnci ölçülür. Bu direnç, zeminle etkileşimdeki kesme dayanımını gösterir. Bu işlem belirli bir derinlik boyunca tekrarlanarak zemin katmanlarının özellikleri hakkında bilgi elde edilir.

4. Veri ve Hesaplama: Elde edilen dönme direnci, zemin katmanlarının kesme dayanımı ile ilişkilendirilir. Bu dayanım, genellikle shear strength (kesme dayanımı) olarak adlandırılır.

Veyn Testi'nin Kullanım Alanları:

- Yumuşak Zeminler: Veyn testi, özellikle kil gibi yumuşak ve sıvılaştan zeminlerde yaygın olarak kullanılır. Kil gibi zeminlerde kesme dayanımını ölçmek zordur, ancak bu test sayesinde daha hassas sonuçlar elde edilebilir.
- İnşaat ve Zemin İyileştirme: Zeminlerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi, temel tasarımı ve zemin iyileştirme çalışmaları için kullanılır.
- Sıvılaşma Analizleri: Özellikle zemin sıvılaşması (liquefaction) riskinin belirlenmesinde faydalıdır. Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, Veyn testi ile sıvılaşma sonrası kesme dayanımı ölçülerek, zemin davranışı daha iyi anlaşılır.

Avantajları:

- Basit ve Hızlı: Veyn testi, zeminlerin kesme dayanımını ölçmek için basit ve hızlı bir yöntemdir. Diğer karmaşık test yöntemlerine göre daha az ekipman gerektirir.
- Yumuşak Zeminler için Uygun: Kil, silt gibi yumuşak zeminlerde oldukça etkili sonuçlar verir.
- Yerinde Yapılabilir: Test, sahada (in situ) yapılabilmesi nedeniyle özellikle saha koşullarına göre doğrudan sonuçlar elde edilebilir.

Dezavantajları:

- Yüzeysel Veri: Test, genellikle yüzeysel zeminler için uygundur ve derinlik arttıkça daha az güvenilir olabilir.
- Yüksek Hassasiyet Gereksinimi: Dönme hareketi çok hassas bir şekilde yapılmalı ve direnç ölçümleri dikkatlice alınmalıdır. Aksi takdirde, sonuçlar yanıltıcı olabilir.

Sonuçların Kullanımı:

- Zemin Karakterizasyonu: Zeminlerin kesme dayanımını belirlemek için bu test kullanılarak, yer altı zemininin davranışı hakkında değerli bilgiler edinilir.

- Temel Tasarımı ve İnşaat: İnşaat projelerinde zemin stabilitesi, temel tasarımı ve sıvılaşma analizleri için Veyn testi verileri çok önemlidir.

Sonuç olarak, Veyn Deneyi (Vane Shear Test), özellikle yumuşak zeminlerin kesme dayanımını değerlendirmek için önemli bir test yöntemidir ve zemin mühendisliğinde sıkça kullanılır.

2.2.5. Plaka taşıma deneyi

Plaka taşıma deneyi, inşaat mühendisliğinde zeminlerin taşıma kapasitesini ve oturma davranışlarını belirlemek amacıyla kullanılan temel saha deneylerinden biridir. Bu deney, zemin yüzeyine yerleştirilen bir plakanın kontrollü bir şekilde yüklenmesi ve bu yükleme sırasında meydana gelen oturmaların hassas ölçümlerle kaydedilmesi ile elde edilir. Zemin deformasyonlarının yük altında gösterdiği farklı davranışlar, yükleme-boşaltma durumları ile detaylı şekilde incelenir, böylece taşıma kapasitesi ve oturma gibi veriler hesaplanır. Bu nedenle, plaka taşıma deneyi, altyapı ve üstyapı projelerinde güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü tasarımlar geliştirmek için kullanılan arazi deneylerden biri olarak kabul edilir. Plaka taşıma deneyi için öncelikle zemin yüzeyi, plakanın yerleştirildiği alan pürüzlülüğünden arındırılarak düzgün bir alan hazırlanır. Bu adım, deneyin özenini artırmak ve plakanın zemine uygun şekilde yerleştirilmesini sağlamak amacıyla oluşturulur. Deney ekipmanları, çelik bir plaka, yükleme sistemi ve yükün basılacağı bir mesnet ile kurulur. Plakanın kalınlığı ve çapı, TS 1900 standardına uygun olarak tercih edilir. Hassas deformasyon ölçmek için ölçüm saatleri plakanın üzerine sabitlenir ve zemin üzerindeki deformasyonları ölçmek üzere sıfır okuması alınarak ölçme işlemine başlanır. Deney, plakanın üzerine belirli seviyelerde yük uygulanması ile başlatılır. Yükleme işlemi genelde hidrolik bir krik o ile gerçekleşir ve her bir yükleme seviyesinde plaka altındaki oturma miktarı ölçülerek notlar alınır. Yükleme ve boşaltma aşamaları sırasında zemin deformasyonlarını ve zemin davranışlarını belirlemek için ölçme işlemine devam edilir. Ölçülen yük-oturma değerleri, yük-oturma eğrilerinin grafik haline dönüşmesinde kullanılır. Bu eğrilerden, zeminin taşıma kapasitesi, deformasyon davranışı ve elastisite modülü gibi geoteknik parametreleri hesaplanarak çıkarılır. Yük-oturma eğrisinin doğrusal olmayan bölümü, zeminin plastik deformasyon eğilimlerini çıkarır. Deney sonuçları, zeminlerin deformasyon davranışlarının ve taşıma kapasitesinin detaylı değerlendirmesini verir. Mesela, zemin elastisite modülü,

yükleme seviyelerinde elde edilen oturma değerleri hesaplanabilir. Yine, zeminin taşıma kapasitesi, yük-oturma eğrisinin kırılma noktasından tespit edilir. Bu veriler, zeminin iyileştirilmesi ve temel projelerine uygunluğunu değerlendirmek için önem arz eder. Plaka taşıma deneyinin sonuçları, zemin güçlendirme yöntemlerini değerlendirmede önemli veri sunar. Zemin deformasyon davranışının ve taşıma kapasitesinin esaslı analizi, altyapı projelerinde ekonomik ve güvenli tasarım     mlerine imkan tanır. Böylece, plaka taşıma deneyinin inşaat mühendisliğinde zemin iyileştirme ve temel tasarım projelerinde kullanımı, zemin karakteristiklerini daha iyi kavramak ve ideal tasarımı belirlemek açısından önemlidir.





3. GEOSENTETİK MALZEME TÜRLERİ VE İŞLEVLERİ

3.1. Geosentetik Türleri

Geosentetik malzemeler, modern inşaat projelerinde zemin stabilizasyonu, su yönetimi ve yapı güçlendirme gibi çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, sentetik polimerlerden üretilmekte olup dayanıklılık, esneklik, su ve hava geçirgenliği gibi özelliklere sahiptir. Geosentetik malzemeler, üretim yöntemlerine, malzeme türlerine ve kullanım amacına göre farklı kategorilere ayrılmaktadır.

Geosentetik malzemeler, çeşitli mühendislik uygulamalarında farklı işlevler gören çeşitlere ayrılabilir. En yaygın geosentetik türleri şunlardır:

Geotekstiller: Zemin stabilizasyonu, filtrasyon, ayırım ve drenaj için kullanılır.

Geogridler: Zemin stabilizasyonu ve yük taşıma kapasitesinin artırılmasında etkilidir.

Geomembranlar: Su yalıtımı ve sızıntı kontrolü sağlar.

Geohücreler: Yük dağılımı ve toprak stabilizasyonu için kullanılır.

Geonetler: Drenaj ve su yönetimi uygulamalarında tercih edilir.

Geomatlar: Toprak erozyonunu önlemek ve yamaç stabilizasyonu sağlamak amacıyla kullanılır.

Geofoamlar: Hafif dolgu malzemesi olarak kullanılır.

Geokompozitler: Birden fazla geosentetik malzemenin birleşiminden oluşan, çok yönlü malzemelerdir.

3.1.1. Geotekstiller

Geotekstiller, genellikle polipropilen veya polyester gibi sentetik malzemelerden üretilen, dokunmuş veya dokunmamış yapıda tasarlanmış özel tekstil malzemeleridir (Şekil 3.1). Bu malzemeler, filtrasyon, ayırım, drenaj, koruma ve güçlendirme gibi birçok işlevi yerine getirir.

Geotekstiller yumuşak zeminlerde stabiliteyi artırarak zemin stabilizasyonu sağlar. Suyun geçişine izin verirken toprak partiküllerini tutarak filtrasyon görevini üstlenir. Farklı zemin katmanlarının karışmasını önler ve suyu toprak altına tahliye ederek drenaj sağlar. Ayrıca zararlı maddelere karşı bariyer oluşturarak koruma sağlama işlevini yerine getirir.



şekil 3.1. Geotekstil.

3.1.2. Geogridler

Geogridler, polimer malzemelerden üretilen ve ağ şeklinde tasarlanmış malzemelerdir. Çekme dayanımı yüksek olan geogridler, zemin stabilizasyonu ve yapı güçlendirme projelerinde kullanılır.

Geogridler zeminin yük taşıma kapasitesini artırarak güçlendirme sağlar. Yol yapımında altyapıyı güçlendirir ve yüzey dayanıklılığını artırır. Erozyonu engelleyerek yamaç stabilizasyonuna katkıda bulunur. Ayrıca, farklı malzeme katmanlarının karışmasını önleyerek malzeme ayrıştırmaya görevini üstlenir.

3.1.2.1. Bazalt geogrid

Geosentetik malzemeler, modern inşaat mühendisliğinde toprak stabilizasyonu, zemin güçlendirme ve altyapı projelerinde yaygın olarak kullanılan önemli malzemelerdir. Geleneksel geogridler genellikle sentetik malzemelerden üretilmekte olup, bunlar arasında cam elyafı, polyester ve polipropilen gibi materyaller öne çıkmaktadır. Ancak, bu malzemelerin çevresel etkileri ve dayanıklılıkları, alternatif malzemelere duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bu noktada, bazalt liflerinden üretilen geogridler, üstün mekanik özellikleri ve çevre dostu yapıları ile ön plana çıkmıştır (Şekil 3.2). Bazalt, doğal bir volkanik kayaç olup, bu kayacın lifiyle yapılan geogridler, hem yüksek performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bazalt geogridleri, bazalt liflerinin ısıtılması ve çekilmesi yoluyla üretilir. Bu süreç, liflerin yüksek çekme mukavemeti ve dayanıklılığını sağlar. Ayrıca, bazalt lifleri kimyasal maddelere karşı dirençli olup, asidik ve alkali ortamlarda uzun süreli performans gösterir. Bu özellik, bazalt geogridlerinin zorlu çevre koşullarında kullanılabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, bazalt malzemesi doğada bolca bulunan ve çevreye zarar vermeyen bir kayaç çeşitidir. Bu durum, bazalt geogridlerinin çevre dostu özelliklerini pekiştirir, çünkü üretim süreçlerinde zararlı kimyasallar kullanılmaz ve geri dönüşümü oldukça kolaydır.

Bazalt geogridlerinin inşaat sektöründe kullanımı diğer sektörlerle göre daha fazladır. Özellikle zemin güçlendirme uygulamalarında, zayıf ve gevşek toprakları stabilize ederek taşıma kapasitesini artırmada etkilidir. Bu geogridler, eğimli alanlarda toprak kaymalarını engellemek ve erozyonu önlemek amacıyla da sıklıkla kullanılır. Ayrıca, bazalt geogridleri, yol yapımı ve yüzey güçlendirme projelerinde de yaygın olarak tercih edilir. Yol yüzeylerine entegre edilerek, yolun ömrünü uzatır ve bakım ihtiyacını azaltır. Diğer bir önemli kullanım alanı ise duvarların arkasındaki toprak yükünü taşıyan ve stabilizeyi artıran destek sistemlerinde yer almasıdır.

Bazalt geogridlerinin geleneksel malzemelere göre sağladığı pek çok avantaj bulunmaktadır. Bu avantajlardan en önemlisi, bazaltın yüksek sıcaklıklar ve kimyasal maddelere karşı gösterdiği dirençtir. Geleneksel cam elyafı veya polyester geogridleri, zamanla aşınma ve yıpranma gösterebilirken, bazalt geogridleri bu tür olumsuz koşullara karşı daha dayanıklıdır. Ayrıca, bazaltın doğal bir malzeme olması, çevre dostu projelerde kullanılmasını teşvik eder. Üretim sırasında zararlı kimyasalların kullanılmaması ve malzemenin geri dönüştürülebilir olması, çevresel sürdürülebilirlik

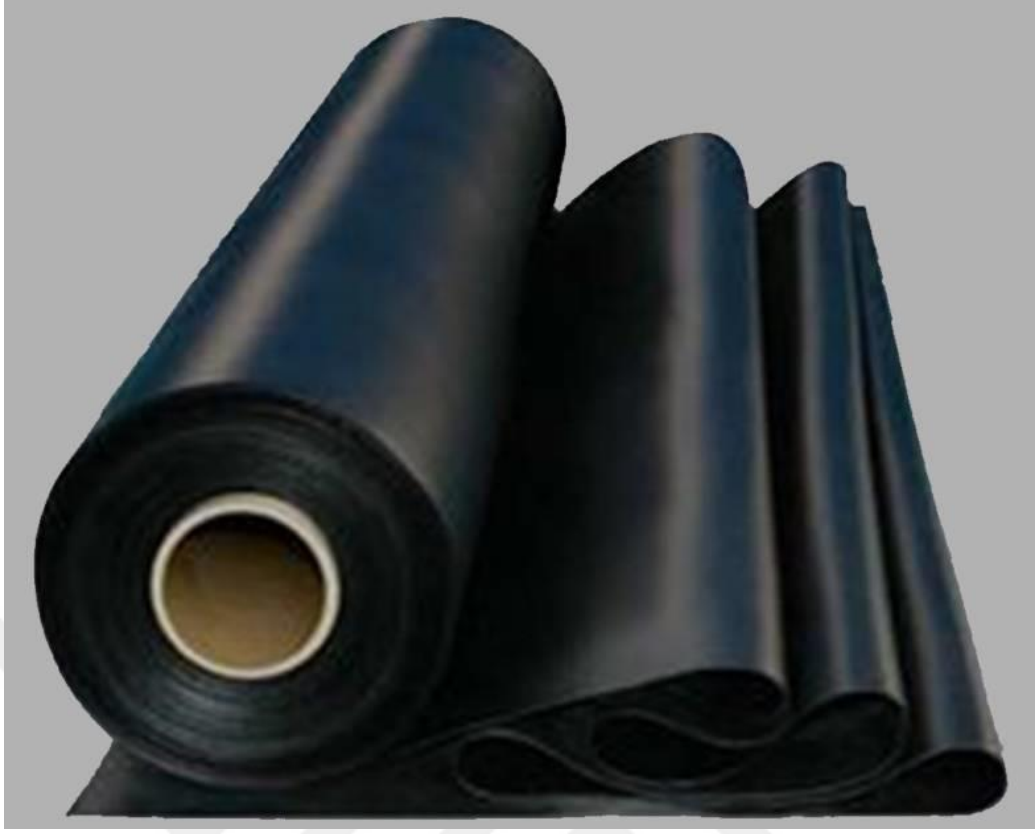
açısından büyük bir avantaj sağlar. Bunun yanı sıra, bazalt geogridleri, geleneksel malzemelere kıyasla daha uzun ömürlüdür ve bakım gereksinimlerini azaltır, bu da uzun vadede ekonomik fayda sağlar.



Şekil 3.2. Bazalt Geogrid.

3.1.3. Geomembranlar

Geomembranlar, genellikle su yalıtımı ve sızıntı kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan, kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı yüksek malzemelerdir (Şekil 3.3). HDPE, LDPE ve PVC gibi çeşitleri bulunur. Geomembranlar, barajlar, su depoları ve kanal projelerinde suyun kontrolünü sağlar. Zararlı maddelerin yer altına sızmasını engelleyerek atık yönetimi sunar. Eğimli alanlarda toprak kaymasını engelleyerek erozyon kontrolü görevini yerine getirir.



Şekil 3.3. Geomembran.

3.1.4. Geohücreler

Geohücreler, hücresel yapıya sahip, çekme dayanımı yüksek malzemelerdir (Şekil 3.4). Bu malzemeler, ekonomik faydaları nedeniyle yol yapımı ve zemin stabilizasyonu projelerinde tercih edilmektedir. Hafif yapısı maliyet etkin bir çözüm sunarken, kolay kurulum ve çeşitli zemin türlerine uyumluluk sağlar.

Geohücreler yüklerin eşit bir şekilde dağılmasını sağlayarak zemin stabilizasyonuna katkı sağlar. Yol yapımında yumuşak zeminlerin stabilitesini artırır. Toprak kaymasını engelleyerek erozyon kontrolü sunar.

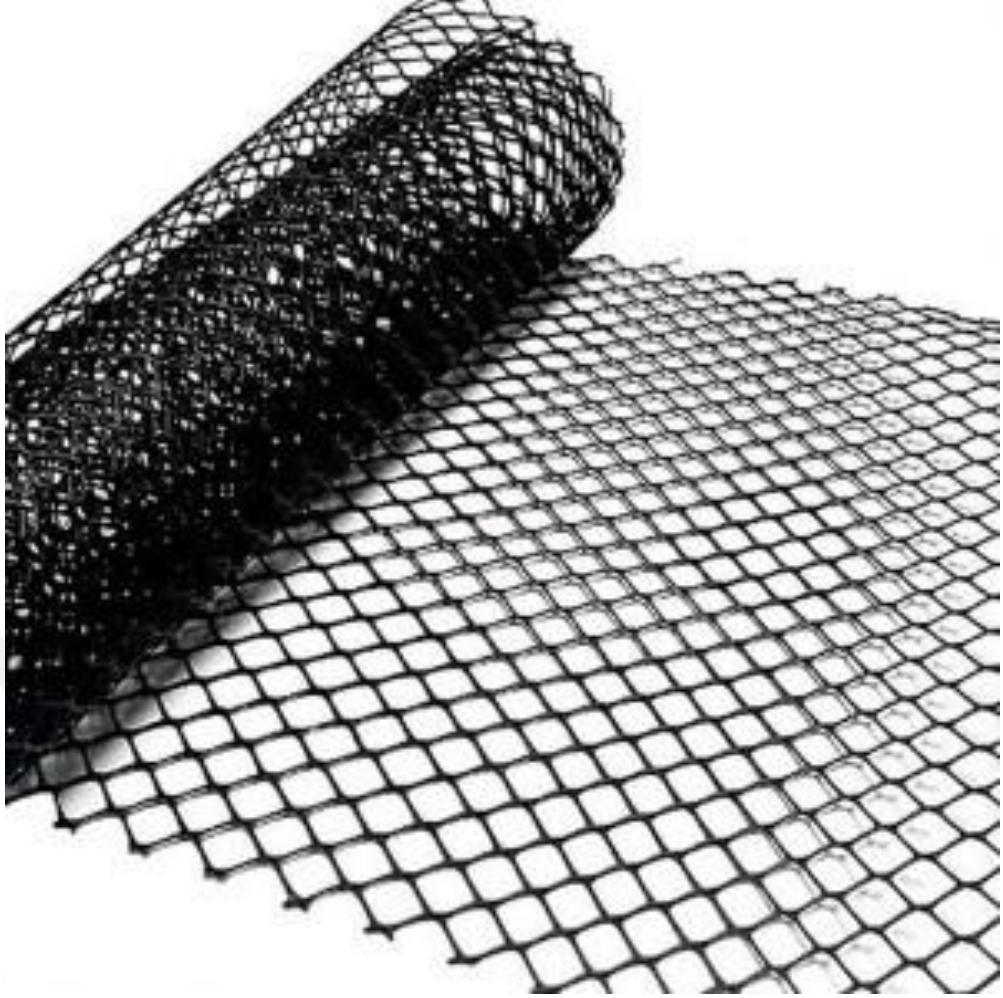


Şekil 3.4. Geohücre.

3.1.5. Geonetler

Geonetler, drenaj ve su yönetimi için tasarlanmış, ağ benzeri yapıya sahip malzemelerdir (Şekil 3.5).

Geonetler, yer altı sularını yönlendirerek etkili bir drenaj sistemi sunar. Su birikimini engelleyerek zemin stabilitesine katkıda bulunur. Eğimli alanlarda erozyonu kontrol etmek için kullanılır.

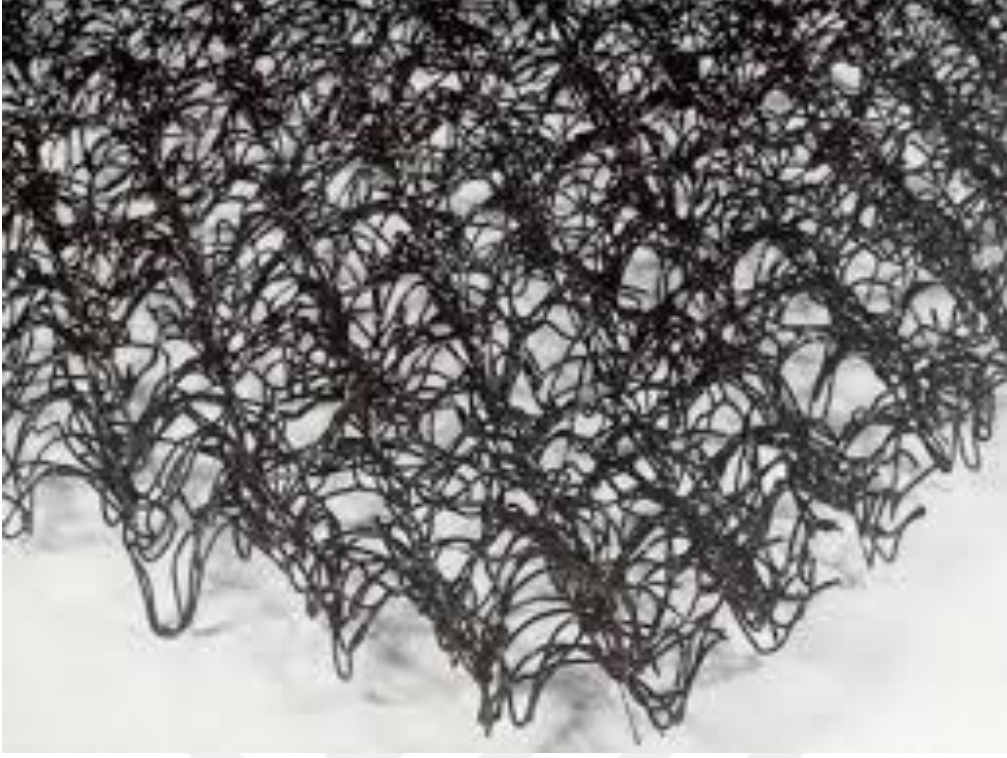


Şekil 3.5. Geonet.

3.1.6. Geomatlar

Geomatlar, toprak erozyonunu engellemek ve yamaç stabilizasyonu sağlamak amacıyla kullanılan, genellikle ağ benzeri yapıya sahip malzemelerdir (Şekil 3.6).

Geomatlar yüzeydeki toprak kaybını engelleyerek erozyon kontrolü sağlar. Eğimli alanlarda stabiliteyi artırarak yamaç stabilizasyonuna katkı sunar. Peyzaj düzenlemeleri ve yeşillendirme projelerinde toprak koruma işlevi görür.



Şekil 3.6. Geomat.

4. BAZALT VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANIMI

4.1. Bazalt

Bazalt, yerkürenin en yaygın magmatik kayaç türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Yer kabuğunun önemli bir bileşeni olan bu volkanik kayaç, dünya genelinde geniş alanlarda bulunmaktadır. Kimyasal kompozisyonu incelendiğinde, bazaltın yapısında temel olarak silisyum dioksit (%45-55), alüminyum oksit (%10-15), demir oksit (%5-14), kalsiyum oksit (%5-12) ve magnezyum oksit (%2-6) bulunmaktadır. Bu kimyasal bileşim, bazalta karakteristik özelliklerini kazandırmakta ve inşaat mühendisliği uygulamalarında tercih edilmesini sağlamaktadır.

4.2. Bazalt Fiber

Bazalt fiber, modern mühendislik teknolojilerinin önemli bir ürünü olarak öne çıkmaktadır. Üretim sürecinde, bazalt kayacı 1450-1500°C sıcaklıkta ergitilerek özel tasarlanmış nozullardan geçirilmekte ve ince filamentler halinde çekilmektedir. Bu ileri teknoloji ürünü malzeme, üstün mekanik özellikleri sayesinde dikkat çekmektedir. Bazalt fiberin en önemli karakteristik özellikleri arasında yüksek çekme dayanımı, kimyasal etkilere karşı direnci, termal kararlılığı ve çevresel sürdürülebilirliği yer almaktadır.

4.2.1. Bazalt fiberin üretim aşamaları

Bazalt fiber üretimi, sistematik ve kontrollü bir süreç gerektirmektedir. İlk aşamada, hammadde hazırlığı yapılmakta olup, bu süreçte bazalt kayacı kırılarak uygun boyutlara getirilmekte ve safsızlıklardan arındırılmaktadır. İkinci aşamada, hazırlanan malzeme yüksek sıcaklıkta (1450-1500°C) ergitilerek homojen bir yapı elde edilmektedir. Son aşamada ise, ergimiş bazalt, platin-rodyum alaşımlı özel bushinglerden geçirilerek hızlı soğutma işlemine tabi tutulmakta ve istenilen özelliklerde filamentler oluşturulmaktadır.

4.3. Bazalt Geogrid

Bazalt geogrid, bazalt fiberlerden üretilen ve zemin güçlendirme uygulamalarında kullanılan gelişmiş bir geosentetik üründür. Bu malzeme, yüksek çekme mukavemeti, düşük uzama karakteristiği, ultraviyole ışınlarına karşı dayanımı ve kimyasal kararlılığı ile öne çıkmaktadır. Bu özellikler, bazalt geogridin çeşitli geoteknik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

4.4. Bazalt Geogridin Mikro Yapısı

Bazalt geogridin mikro yapısı, malzemenin performansını doğrudan etkileyen kompleks bir sistem oluşturmaktadır. Bu yapı, fiber oryantasyonu, düğüm noktalarının karakteristiği, açıklık boyutları ve yüzey özelliklerinin optimize edilmiş bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Mikroyapısal özellikler, malzemenin zemin ile etkileşimini ve mekanik performansını belirlemektedir.

4.5. Bazalt Geogridin İnşaat İşlerinde Kullanımı

Bazalt geogrid, inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yol ve havaalanı inşaatlarında, istinat duvarlarının güçlendirilmesinde, şev stabilizasyonunda, demiryolu alt yapı çalışmalarında ve temel güçlendirme uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda bazalt geogrid, yapısal performansı artırarak projelerin güvenilirliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirmektedir.

4.6. Bazaltın Zemin İyileştirilmesinde Kullanımı

Zemin iyileştirme çalışmalarında bazalt ürünlerin kullanımı, geoteknik mühendisliğinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu uygulamalar, zeminlerin taşıma gücünün artırılması, oturmaların minimize edilmesi, yanal deformasyonların kontrol altına alınması ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması gibi kritik geoteknik problemlerin çözümünde etkili olmaktadır. Bazalt bazlı ürünlerin kullanımı, sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler sunarak modern geoteknik mühendisliğinin gereksinimlerini karşılamaktadır.

Eğimli bir ortamda inşa edilen sürekli temellerin taşıma gücü geogrid katkısı etkisi altında incelenmiş ve temel genişliğinin %40'ı değerinde bir derinliğe konulan geogridin en büyük artışı sağladığı belirlenmiştir (Das ve ark., 2000). Temel genişliğinin

%172'si gibi bir derinlikten sonra geogridin olumlu etkisinin görülememesi de araştırma sonucunda elde edilmiştir.

Demiröz ve ark. (2008) geogrid ile güçlendirilmiş kum ortamda temel taşıma gücünü irdelemişlerdir. Deneysel çalışmada temelin genişliği ve gömme derinliği, geogrid donatılarının boyu ve tabaka sayısı ile donatının konulduğu derinlik değişken olarak kullanılmıştır. Bu faktörlerden temel genişliği taşıma gücünü yöneten en baskın parametre olarak öne çıkmıştır. Bunun dışında etkinlik sırası gömme derinliği, donatı derinliği, donatıların kaç tabaka olarak yerleştirileceği ve donatı boyu şeklinde ortaya çıkmıştır.

Şenol ve ark. (2008) kaplama olmadan inşa edilen yollarda geogrid kullanımını incelemişlerdir. Yol boyunca alt temel malzemesi kaynağının olmaması ve ocak mesafesinin uzak olması halinde geogrid kullanımının ekonomik olduğunu belirtmişlerdir.

Singh ve Gill (2012) çalışmalarında, düşük plastisiteli bir kili geogrid ile donatılandırmışlar ve Kaliforniya Taşıma Deneyleri yaparak sonuçları irdelemişlerdir. Optimum noktada hazırlanan numunelere geogrid tek katman halinde (derinlikler 0.2-0.4-0.6-0.8H) yerleştirilmiştir. Çalışmada geogrid ilavesinin CBR değerinde %100'e varan artışlar sağladığı bulunmuş, en iyi sonucun geogridin yüzeyden 0.2H kadar aşağıya konulması durumunda elde edildiği bildirilmiştir.

Toz ve Sert (2019) çalışmalarında bazalt geogridin silt zeminin CBR dayanımını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bazalt geogridin silt zemin kalınlığının belli bölgelerine konması durumunda kuru durumda CBR dayanımını %160'ı aşan oranlarda artırdığını ortaya koymuşlar ve doğal bir gereç olması nedeniyle de çevreci özelliğini öne çıkarmışlardır.



5. MALZEMELER VE YÖNTEM

Beşinci bölümde bazalt geogrid ile zemin iyileştirilmesi için kullanılan malzemelerin nitelikleri, zeminlerde yararlanma şekli ve deneylerde kullanılan malzemelerin hazırlanışları detaylı bir biçimde aktarılmıştır. Deneylerdeki uygulamalar anlatılmış ve deney sonuçları irdelenerek tablo ve grafikler halinde verilmiştir. Arazide dolgulu zemin üzerinde ve zemin ile dolgu arasına bazalt geogrid yerleştirildikten sonra plaka taşıma deneyleri yapılarak geogridin zemine olan katkısı incelenmiştir. Laboratuvar da ise doğal zemine tek ve çift tabaka bazalt geogrid yerleştirilerek Kaliforniya Taşıma Deneyleri (CBR) yapılmış ve bazalt geogrid malzemenin zemine olan katkısı irdelenmiştir.

5.1. Malzemeler

Arazi ve laboratuvar deneyleri için Sakarya ilinden killi zemin, Plentmiks (PMT) dolgu malzemesi temin edilmiş ve bu zeminleri iyileştirmek üzere bazalt kayaktan üretilen geogrid kullanılmıştır.

5.1.1. Kil zemin ve dolgu malzemesi

Laboratuvar deneylerinde kullanılan killi zemin, Sakarya ili Hendek ilçesi Akova semtinden alınmıştır. Şekil 5.1’ de kilin temin edildiği yer görülmektedir. Bu zemin, yüksek plastisiteli yapısıyla mühendislik açısından problemli zemin sınıfına girmektedir. Alınan kil zemin, deneylere hazırlanmak üzere bir dizi işlem den geçirilmiştir.

Deney sel çalışmalar başlamadan önce, kullanılan kil zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılan bu testler arasında likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yer almıştır. Bu deneyler, kil zeminin sınıfını ve temel fiziksel özelliklerini belirlemek için önemli bir temel sağlamıştır. Ayrıca, zeminin optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını tespit etmek amacıyla standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Tablo 5.1’de zeminin fiziksel özellikleri detaylı şekilde verilmiştir.

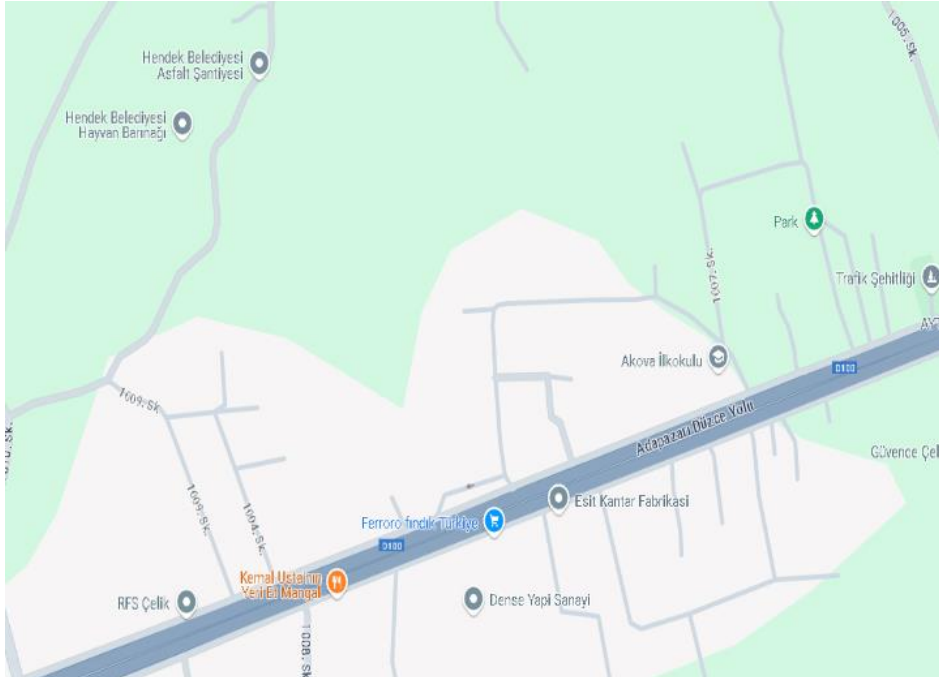
Tablo 5.1. Kil ve dolgu zemine ait fiziksel özellikler.

Numune	Renk	w _L	w _P	PI	Sınıf	% G	% S	FC
Kil	Kızılkahve	27 - 33	16 - 17	11 - 16	CL	0	31 - 21	69 - 79
Dolgu	Gri	NP	NP	NP	GW - GM	73	19	8

Diğer bir malzeme ise kırma taş, kırılmış cüruf, kırılmış çakıl ve ince malzemelerden elde edilen plentmiks PMT dolgu malzemesidir. Tablo 5.1’de görüldüğü üzere dolgu zeminin %8’i ince daneden, %73’ü çakıldan ve %19’u kumdan oluşmaktadır. Dolgu zeminin simgesi GW-GM olup açık adı düzgün dane dağılımlı çakıl ve az silt ve az kumdur. Malzemenin granülometrik özellikleri şu şekildedir; D₁₀ değeri 0,50 mm, D₃₀ değeri 2,4 mm ve D₆₀ değeri 9 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, zemin özellikleri açısından önemli parametre olan c_u=18 ve c_r=1,28 değerindedir.

İlk aşamada, zeminin doğal nem içeriğinin azaltılması amacıyla havada kurutma işlemi yapılmıştır. Bu süreçte kil zemin açık alanda serilerek güneş ışığı ve çevresel şartlarla kurutulmuştur. Daha sonra kurutulan zemin, iri parçaların küçültülmesi amacıyla mekanik olarak ufalanmış ve deneylerde kullanılabilecek uygun dane boyutuna getirilmesi için elenmiştir.

Kil ve dolgu zeminin bu süreçlerdeki aşamaları, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’ te görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.1. Hendek Akova semti.

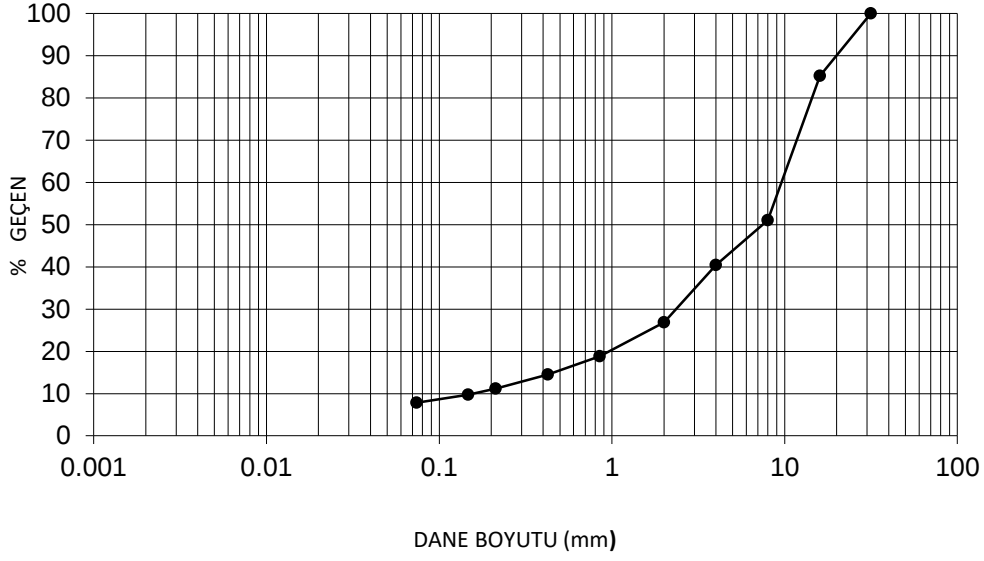


Şekil 5.2. Sakarya ili Hendek ilçesi Akova semtinden alınan numuneler.

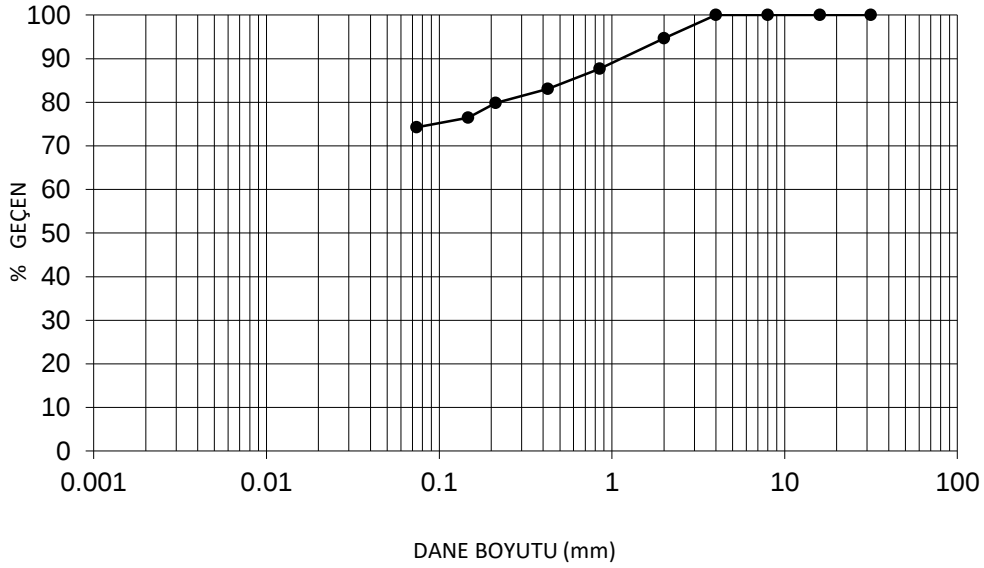


Şekil 5.3. Ufalanmış ve elenmiş kil ve dolgu zemin.

- Fiziksel Özellikler: Zemin, likit ve plastik limit değerleri ile plastisite indeksi açısından değerlendirilmiştir. Bu değerler, zeminin su içeriği değişimine verdiği tepkileri ve şekil değiştirme özelliklerini anlamak için önemlidir.
- Dane Dağılımı: Elek analizi ile zeminin dane dağılımı belirlenmiş ve sınıflandırması yapılmıştır. Dolgu malzemesinin ve kil zeminin dane dağılım eğrileri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’ te verilmiştir.



Şekil 5.4. Dolgu malzemesinin dane dağılım eğrisi.

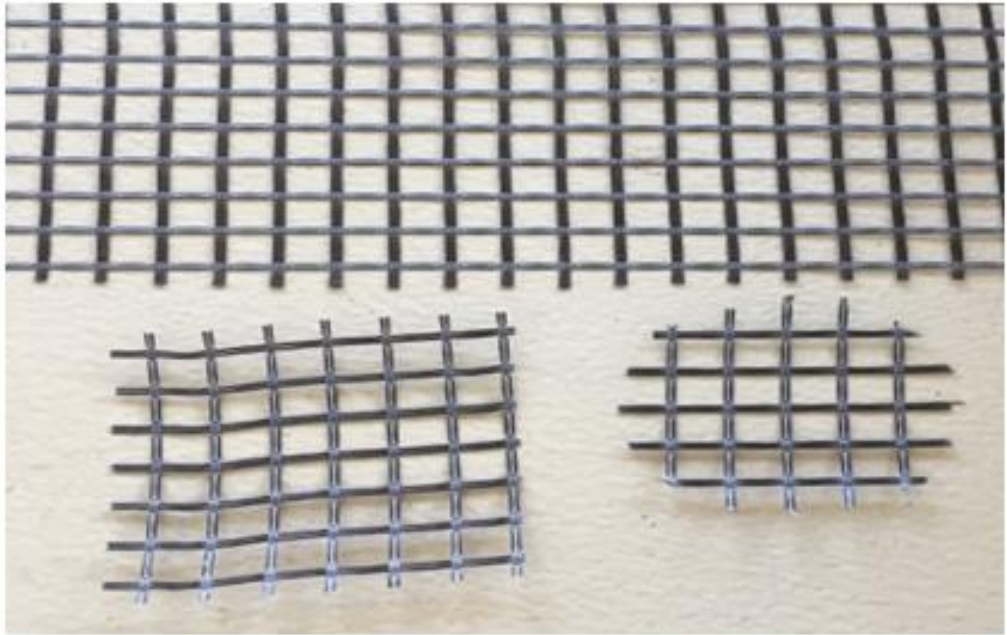


Şekil 5.5. Kil zeminin dane dağılım eğrisi.

5.1.2. Bazalt geogrid

Bu çalışmada kullanılan bazalt geogrid, Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Denizli, Türkiye) tarafından sağlanmıştır. Bazalt geogrid, bazalt kayaktan elde edilen liflerin yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle üretilmiş, ardından bu lifler örgü haline getirilerek çekme dayanımı yüksek bir malzeme oluşturulmuştur. Bu tür geogridler, özellikle zemin iyileştirme projelerinde ve taşıma kapasitesini artırmaya yönelik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bazalt geogrid, ticari olarak genellikle rulo haline getirilip satılmakta ve uygulama sırasında zemin yüzeyine serilerek kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan geogrid, deneysel gerekliliklere uygun hale getirilmiş ve istenilen şekil ve boyutlarda kesilmiştir. Özellikle laboratuvarında dairesel kesimlerin tercih edilmesi, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerinde homojen bir etkileşim alanı oluşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6'da kullanılan bazalt geogridin bütün ve kesilmiş haline ait görseller sunulmaktadır.



Şekil 5.6. Bazalt geogridin bütün ve kesilmiş hali.

Bazalt geogridin tercih edilmesinin başlıca nedenleri, bu malzemenin yüksek çekme dayanımı, uzun ömürlü yapısı ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığıdır. Ayrıca, kimyasal maddelere karşı dirençli olması ve geri dönüştürülebilir yapısı, bu malzemeyi çevresel sürdürülebilirlik açısından da cazip hale getirmektedir.

Tablo 5.2’de bazalt geogridin temel özellikleri verilmiştir. Bu bilgiler, malzemenin deneysel çalışmalardaki performansını değerlendirmek ve zemin iyileştirme uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymak için önemlidir. Bazalt geogridin zemin iyileştirme üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için deneysel sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiş ve ilgili bulgular sonuç bölümünde tartışılmıştır.

Tablo 5.2. Bazalt geogridin özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Ham madde	-	Bazalt
Renk	-	Kahverengi
Gözenek açıklığı	mm/mm	25/25
Kalınlık	mm	1
Ağırlık	g/m ²	320
Elastisite modülü	GPa	26.20
Kopma anında uzama	%	2.20

5.2. Yöntem

5.2.1. Plaka taşıma deneyi

Bazalt geogridin kil zemine olan etkisini arazide değerlendirmek için Plaka taşıma deneyleri yapılmıştır. Plaka taşıma deneyi, zeminlerin yük taşıma kapasitesinin ve oturma davranışlarının nicel olarak belirlenmesinde temel bir öneme sahiptir. Bu çalışma bölümünde, doğal yumuşak killi zeminlerde gerçekleştirilen üç farklı plaka taşıma deneyi kapsamında elde edilen bulgular sunulmakta ve bazalt geogrid kullanımının zemin özelliklerine olan katkıları detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Deneysel çalışmaların ayrıntılı süreçleri, ölçüm ve değerlendirme yöntemleriyle birlikte çeşitli grafik, tablo ve görsellerle desteklenmiştir. Bu çalışma kapsamında,

öncelikle doğal killi bir zemin üzerinde plaka taşıma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeni ve prosedürleri aşağıda detaylandırılmıştır:

Zemin Hazırlığı: Doğal killi (ve sonraki deneyde dolgu) zemin üst yüzeyi, Şekil 5.7’de yüzeysel bozuklukları giderme ve düz bir alan elde etme amacıyla düzenlenmiştir.



Şekil 5.7. Plaka taşıma deneyine zemin hazırlama.

Deney Ekipmanı ve Kurulum: Deneyde kullanılan çelik plaka, dikkatlice zemin üzerine yerleştirilmiş ve gerekli yükleme ile ölçüm cihazları monte edilmiştir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da doğal kil zeminde plaka taşıma deneyi hazırlık aşamasına ait bir görsel sunulmaktadır.



Şekil 5.8. Doğal kil zeminde plaka taşıma deneyi hazırlık aşamasına ilişkin görsel.



Şekil 5.9. Plaka taşıma deney ekipmanlarının kurulması.

Yükleme Prosedürü: Artan seviyelerde yük uygulanmış, her yükleme aşamasında zeminin oturma davranışı detaylı bir şekilde kaydedilmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Yüklem prosedürü ve saatlerin okunması.

Bazalt Geogrid Uygulaması: Doğal (görece yumuşak) killi zeminin iyileştirilmiş yük taşıma kapasitesini ve azalmış oturma davranışını ölçmek amacıyla, zemin üzerine bazalt geogrid yerleştirilmiş ve ardından plentmiks temel (PMT) malzemesi uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma aşağıdaki adımlar doğrultusunda uygulanmıştır:

Zeminin üzerine homojen bir dağılım gözetilerek Şekil 5.11’de bazalt geogrid yerleştirilmiştir. Sıkıştırılmış doğal zeminin üzerine konan bazalt geogrid köşelerden ahşap kamalar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Bunun üzerine de plentmiks PMT dolgu malzemesi serilip silindirle sıkıştırılmıştır.



Şekil 5.11. Bazalt geogridin yerleştirilerek sabitlenmesi.

PMT Malzemesi ve Sıkıştırma: Geogrid tabakası üzerine Şekil 5.12’de gösterildiği üzere belirli bir kalınlıkta PMT malzemesi serilmiş ve silindir yardımıyla katman sıkıştırılmıştır. Şekil 5.13’te bazalt geogridin dolgu altında görünüşü ve Şekil 5.14’te deney sırasında çekilen bir fotoğraf sunulmaktadır.



Şekil 5.12. Dolgu malzemenin serilmesi ve sıkıştırılması



Şekil 5.13. Bazalt geogridin dolgu altında görünümüne ait görsel.



Şekil 5.14. Bazalt geogrid destekli deney görseli.

Verilerin Kaydedilmesi: Önceki deney prosedürlerine uygun olarak yükleme ve oturma davranışı kaydedilmiştir (Şekil 5.15). Üç farklı deney gerçekleştirilerek yük oturma verileri doğrultusunda yük oturma eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 5.15. Plaka taşıma deneyinden bir görsel.

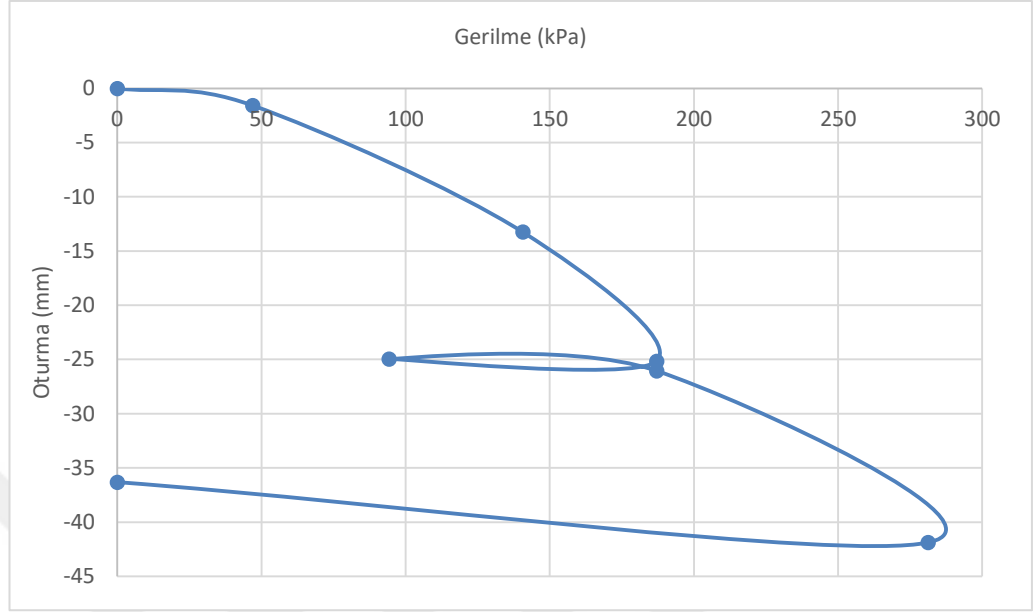
Deneyin bulguları, doğal yumuşak killi zeminin yük taşıma kapasitesinin görece düşük olduğunu ortaya koymuştur. Tüm deneylerden elde edilen çıktılar Tablo 5.3’de özet olarak verilmektedir.

Tablo 5.3. Üç farklı plaka taşıma deney sonuçları.

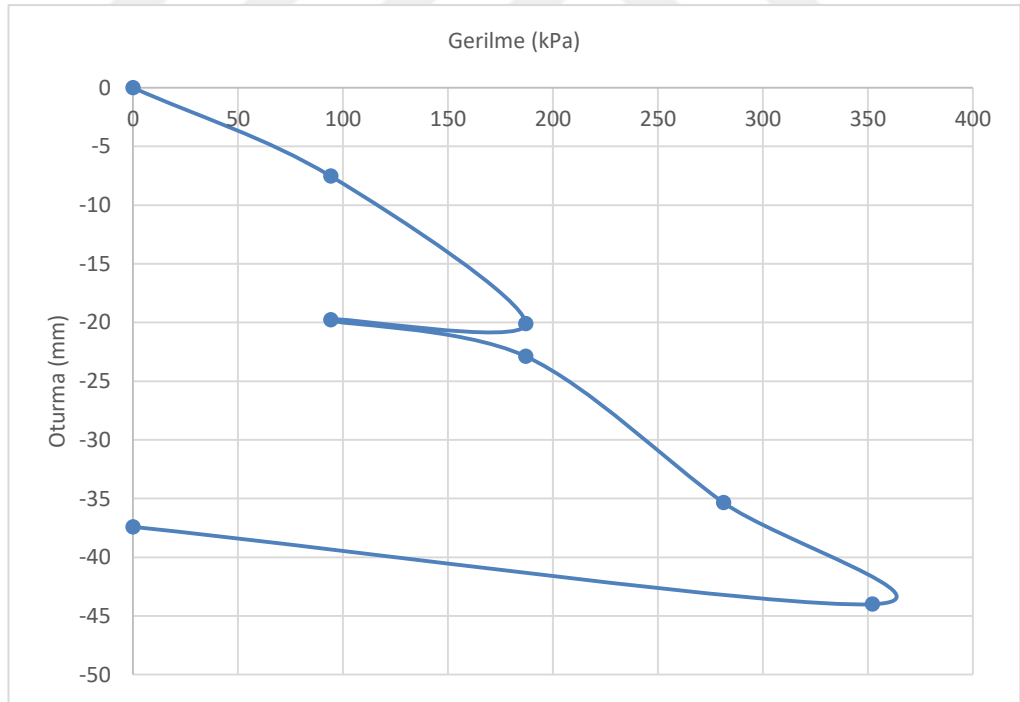
1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Gerilme (kPa)	Oturma (mm)	Gerilme (kPa)	Oturma (mm)	Gerilme (kPa)	Oturma (mm)
0	0	0	0	0	0
46.9	-1.58	94.2	-7.54	94.2	-6.23
140.6	-13.25	187	-20.1	187	-17.58
187	-25.17	94.2	-19.77	94.2	-17.27
94.2	-24.95	187	-22.88	281.2	-18.59
187	-26.04	281.2	-35.34	375.4	-26.98
281.2	-41.88	352.2	-44.00	496.6	-36.25
0	-36.31	0	-37.41	0	-25.48

Şekil 5.16’da sadece doğal zeminin olduğu durum, Şekil 5.17’de doğal zemin üzerinde dolgu bulunan durum ve Şekil 5.18’de geogridin doğal zemin ve dolgu arasında

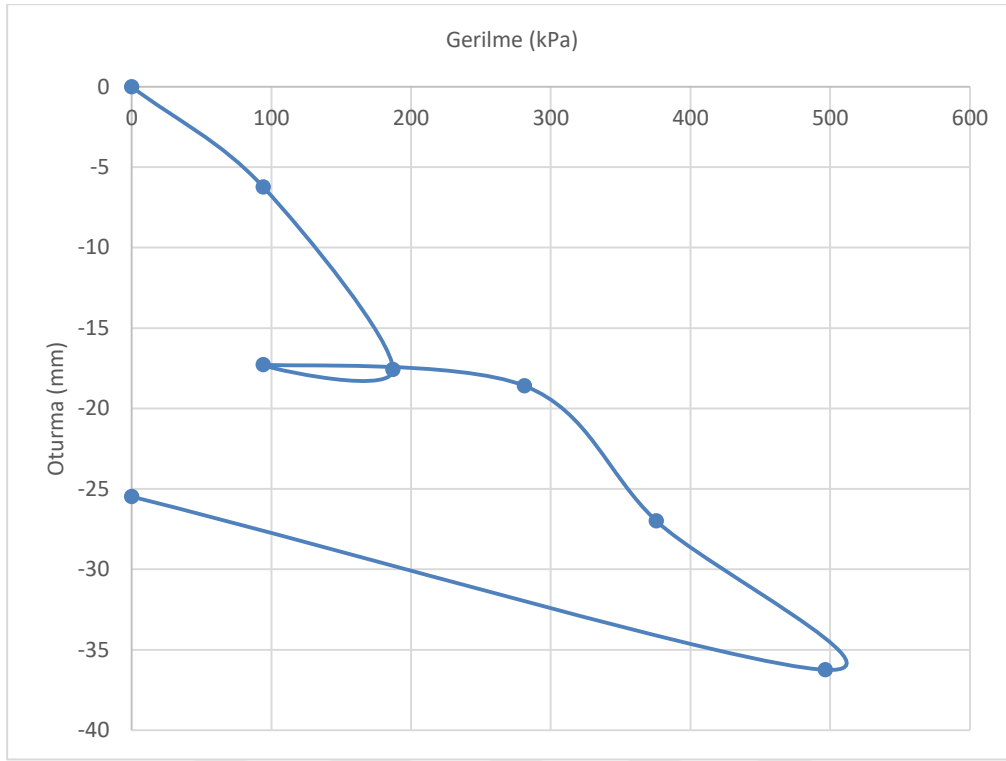
bulunduğu durum için yapılan plaka taşıma deneylerine ait yük oturma eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.19’da ise tüm deney sonuçları bir arada sunulmaktadır.



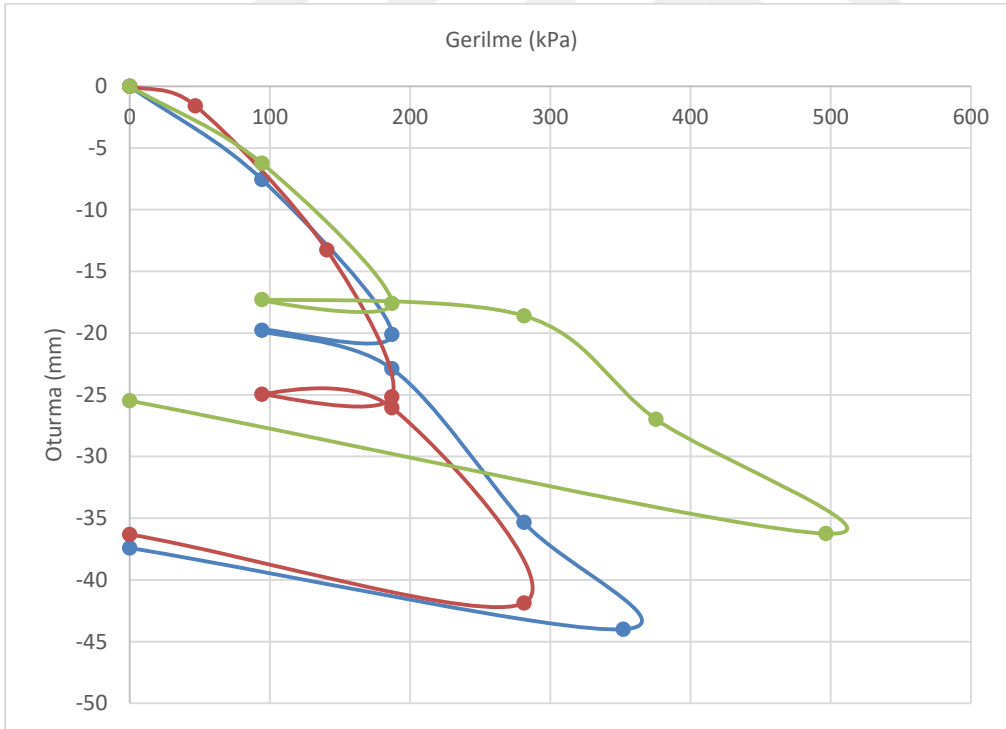
Şekil 5.16. Doğal killi zeminde plaka deneyi



Şekil 5.17. Doğal zemin ve dolgu zeminin plaka deney sonuçları



Şekil 5.18. Bazalt geogrid destekli deney sonuçları



Şekil 5.19. Üç farklı plaka deney sonuçları.

Sonuçların Değerlendirilmesi: Deneylerden elde edilen yük-oturma eğrileri, bazalt geogridin zemin performansına olan olumlu katkısını çarpıcı şekilde ortaya koymuştur.

Bu deneyler sonucunda oluşturulan Tablo 5.3 ve şekiller birlikte değerlendirildiğinde bazalt geogrid destekli zeminlerin, yük taşıma kapasitesinde doğal zemine kıyasla anlamlı bir artış görüldüğü ve oturma miktarının önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Doğal yumuşak killi zeminler, sınırlı yük taşıma kapasitesine sahip olmaları nedeniyle yapısal projelerde çeşitli iyileştirme yöntemlerine gereksinim duymaktadır. Bu kapsamda bazalt geogrid kullanımı:

- Zeminlerin yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış sağlamaktadır.
- Oturma davranışlarını önemli ölçüde iyileştirmektedir.
- Zemin stabilitesini geliştirerek uzun vadeli dayanıklılık ve performans sunmaktadır.

5.2.2. Fiziksel deneyler

Çalışmanın ikinci aşamasında fiziksel deneyler kapsamında, ince daneli zeminlerin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla bir dizi sınıflama testi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, doğal kil numuneleri üzerinde uygulanmış ve zeminlerin kıvam limitleri ile granülometri özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla, kıvam limitlerinin belirlenmesi için Casagrande yöntemi ve düşen koni testleri kullanılmış, ayrıca plastik limit deneyleri yapılmıştır. Malzeme granülometrisi ise elek analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu testlerin sonuçları, zemin sınıfının ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak belirlenmesinde temel teşkil etmiştir.

5.2.2.1. Kıvam limitleri

İnce daneli zeminlerin kıvam özellikleri, su içeriğine bağlı olarak değişen mekanik davranışlarını yansıtan önemli bir parametredir. Zeminler belirli bir su içeriğinde katı gibi davranırken, su miktarının artışıyla birlikte sıvı davranış özellikleri göstermeye başlar. Zeminlerin farklı su içeriklerinde sergilediği bu mekanik geçişler, kıvam limitleri kavramıyla açıklanmaktadır. Kıvam limitleri deneyleri, TS1900-1 standardında tanımlanan prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar TS1500/2000 standartlarına göre değerlendirilmiştir.

5.2.2.2. Likit limit deneyleri

Likit limitin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, öncelikle yaklaşık 200 gram kil numunesine belirli bir miktar su ilave edilmiş ve karışım homojen hale getirilmiştir. Daha sonra hazırlanan bu karışım, hava geçirmez bir kap içerisinde 24

saat bekletilerek suyun kil partiküllerine eşit şekilde nüfuz etmesi sağlanmıştır. Homojen hale getirilen numune, likit limit belirleme yöntemlerine uygun olarak test edilmiştir.

Casagrande yöntemi çerçevesinde, numune Casagrande cihazına yerleştirilmiş ve oluk açma bıçağı kullanılarak 13 mm genişliğinde bir oluk oluşturulmuştur. Cihaz, saniyede iki darbe hızında ve 10 mm yükseklikten düşecek şekilde ayarlanmış; oluğun kapanma sayıları kayıt altına alınmıştır. Bu işlem, artan su içerikleriyle birlikte tekrarlanmış ve her deney sırasında alınan numunelerin su içerikleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, vuruş sayısına karşılık gelen su içeriği grafiği oluşturularak değerlendirilmiş ve 25 vuruşa denk gelen su içeriği, zeminin likit limiti olarak belirlenmiştir.

Düşen koni yöntemi ise farklı bir yaklaşımla uygulanmıştır. Aynı şekilde hazırlanan numuneler, deney kabına yerleştirilmiş ve deney cihazındaki koni zeminin yüzeyine serbestçe bırakılmıştır. Beş saniye süreyle batma miktarı ölçülmüş ve bu işlem, farklı su içerikleri için dört kez daha tekrarlanmıştır. Ölçümler sonrasında su içeriği ile batma derinliği arasında bir ilişki grafiği oluşturulmuş ve 20 mm batmaya denk gelen su içeriği, zeminin likit limiti olarak kaydedilmiştir.

5.2.2.3. Plastik limit deneyleri

Plastik limit, zemin numunesinin yuvarlanırken 3 mm kalınlığına ulaştığında çatlamaya başladığı kritik su içeriği olarak tanımlanmaktadır. Bu testte, kil numunesi önce buzlu cam bir yüzey üzerine serilmiş ve yüzeysel kuruma sağlanmıştır. Kuruyan numune, daha sonra top şekline getirilerek yuvarlanmaya başlanmıştır. Numune, 3 mm çapında silindirler haline gelene kadar yuvarlanmış ve bu aşamada meydana gelen çatlaklar gözlemlenmiştir. Çatlama oluştuğunda, numuneler su içeriğinin ölçülmesi amacıyla alınmış ve etüvde kurutularak plastik limit değeri hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarına göre, kil zeminlerin plastik limiti %16-17 su içeriği olarak tespit edilmiştir.

5.2.2.4. Elek analizi

Elek analizi zeminlerin tane boyut dağılımlarını bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Kaba daneli zeminlerin tane dağılımı elek analiziyle bulunur. Bu deneyler, TS 1900 standardına göre gerçekleştirilerek kil zemin üzerinde uygulanmıştır. Elek analizi deneyinde, belirli dane boyutlarına göre belirlenmiş elek modülleri kullanılarak zemin elenir. Deney, elekler üzerinde kalan zemin daneleri hassas

terazilerle tartılır ve her bir elek için dane yüzdeleri hesaplanır. 0,074 mm boyutundan daha küçük daneler ise tavaya elenir ve ince deneli zemin sınıfına girer. Elde edilen sonuçlar, zeminin iri dane ve ince dane oranlarını ortaya çıkarır. Dane boyut dağılımına ait eğriler, zemin davranışını kavramada önemli bir veri olan dane dağılımını grafikleştirmek amacıyla kullanılır.

5.2.2.5. Standart kompaksiyon deneyi

Standart kompaksiyon deneyi, zeminlerin sıkışabilirlik niteliklerini ve inşaat mühendislik projeleri için ideal zemin-su ilişkisini belirlemek maksadıyla yapılan bir laboratuvar testidir. Bu deney, TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılır. İnce daneli zeminlerde deney esnasında, ağırlıkları 2,5 kg olan beş farklı zemin numunesi kaplara alınır. Bu tez çalışmasında da her numuneye, su eklenerek karıştırılmış ve eşit bir karışım elde edilmiştir. Bu karışımlar, zemin parçaları arasındaki suyun eşit biçimde dağılmasını sağlamak maksadıyla plastik poşetler dahilinde 24 saat saklanmıştır. Sonra, yüksekliği 115,5 mm ve iç çapı 105 mm olan silindirik bir kalıba 3 tabaka şeklinde yerleştirilmiştir. Her tabaka, 2,5 kg ağırlığındaki bir tokmakla, 305 mm yükseklikten serbest bırakılarak 25 defa sıkıştırılmıştır.

Kompaksiyon deneyinde, farklı su muhtevalarına sahip numunelerin, sabit yük altında ne kadar sıkışabildiği hesaplanarak zemin özellikleri incelenir. Bu deneyde, sıkıştırılmış zemin numunelerin fiziksel nitelikleri belirlenir ve kuru birim hacim ağırlık ile su muhtevası arasındaki oluşan ilişki grafik olarak irdelenir. Bu irdeleme, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası verilerini bulmak için bir yaklaşımdır. Yaş birim hacim ağırlığının hesaplanması ise kompaksiyon işlemi akabinde, kalıp ve zemin aynı anda tartılarak yaş birim hacim ağırlığı γ_n aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\gamma_n \text{ (kN/m}^3\text{)} = (M_{\text{kalıp zemin}} - M_{\text{kalıp}}) / V_{\text{kalıp}} \times 9,81 \quad (5.1)$$

Yaş birim hacim ağırlığı tespit edildikten sonra, zeminin kuru birim hacim ağırlığı γ_k şu denklemle hesaplanır:

$$\gamma_k = \gamma_n / (1 + w) \quad (5.2)$$

Zeminin su muhtevası (w) aşağıdaki denklemle bulunur:

$$W = (M_{\text{kap + yaş}} - M_{\text{kap + kuru}}) / (M_{\text{kap + kuru}} - M_{\text{kap}}) \times 100 \quad (5.3)$$

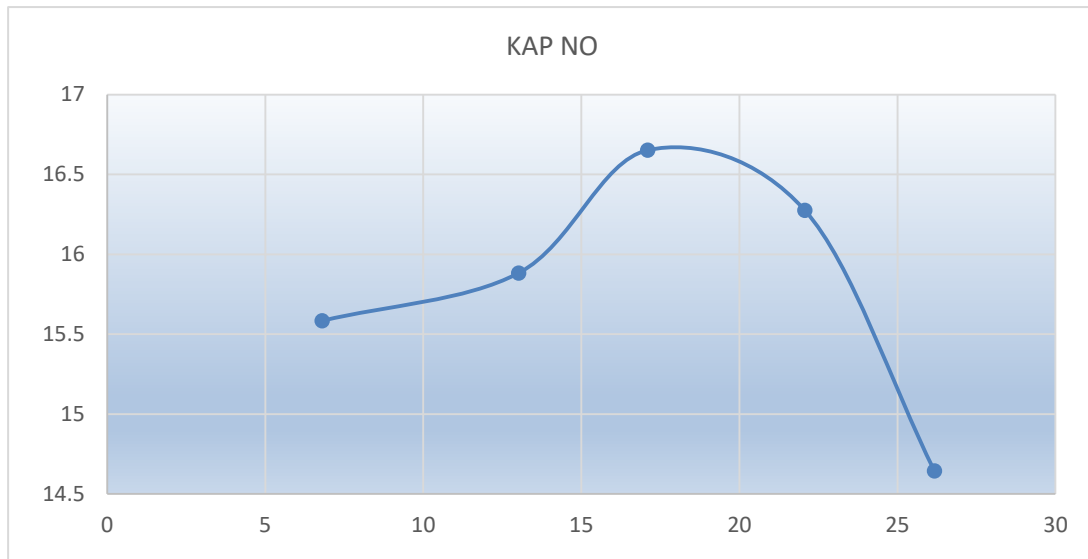
Zemin numunesi için sıfır hava boşluğu (γ_z) eğrisi teorik olarak şu denklemlerle hesaplanır:

$$\gamma_{zav} \text{ (kN / m}^3 \text{)} = \rho_w / (G_s^{-1} + w) \times 9,81 \quad (5.4)$$

Sıkıştırılmış zeminlerden alınan numuneler su muhtevası belirlenmiş ve bu verilere dayanarak kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiği meydana getirilmiştir. Tablo 5.4'te özetlenen data yardımıyla oluşturulan grafiklerden, zemin numunesinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerleri tespit edilmiştir (Şekil 5.20). Yükselen sıkıştırma enerjisi, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığını yükseltirken optimum su muhtevasını azaltmıştır.

Tablo 5.4. Kil zeminde kompaksiyon deneyi.

Deney No	1	2	3	4	5
Kalıp+Taban+Zemin Ağırlığı	5871	5995	6142	6177	6045
Kalıp + Taban Ağırlığı	4292	4292	4292	4292	4292
Sıkıştırılmış Zemin Ağırlığı	1579	1703	1850	1885	1753
Yaş Birim Hacim Ağırlık	16,64	17,94	19,49	19,86	18,47
Kap No	53	51	419	479	227
Kap Ağırlık	54,63	55,23	68,093	53,763	54,32
Kap + Yaş Örnek Ağırlığı	310,75	272,74	397,41	367,47	563,91
Kap + Kuru Örnek Ağırlığı	294,45	247,69	349,32	310,76	458,21
Su Muhtevası (%)	6,79	13,01	17,10	22,06	26,17
Kuru Birim Hacim Ağırlık	15,58	15,88	16,65	16,27	14,64



Şekil 5.20. Kil zemin kuru birim hacim ağırlık su muhtevası ilişkisi.

5.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, zemin malzemelerinin taşıma kapasitesini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu deney, dolgu malzemesinin alt temel ve üst temel tabakalarında kullanılabilirliğini, asfalt kaplama kalınlığının tasarımı ve zeminin dolgu olarak uygunluğunu belirlemek için önemli bir kriter sağlar. CBR deneyi, zemin dayanımının Kaliforniya kırma taşının dayanımına yüzdesel olarak oranlanması esasına dayanır.

5.2.3.1. TS1900-2'ye göre kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri

CBR deneyi, TS 1900-2 standardının 5. bölümünde tanımlanmıştır. Deney, 1935 mm² kesit alanına sahip bir pistonun belirli bir hızla zemine nüfuz ettirilmesiyle elde edilen yük-penetrasyon ilişkisini temel alır. Bu değerler, Kaliforniya kırma taşına kıyasla oranlanarak CBR değeri hesaplanır. Ancak, 20 mm'den büyük dane boyutuna sahip zeminlerde ve CBR değeri %5'in altında olan zeminlerde bu yöntemin uygulanması uygun değildir.

5.2.4. Deneyde kullanılan ekipmanlar

Deneyde kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

- Göz açıklığı 4,75 mm ve 20 mm olan elekler,
- İç çapı 152 mm, yüksekliği 127 mm ve 50 mm yüksekliğinde yakası olan kalıp,
- Kesit alanı 1935 mm² ve uzunluğu 250 mm olan piston,
- Elektrikli tokmak, komparatör saati, cetvel, A tipi palet bıçağı, saç ayak ve terazî,
- 2,5 kg ve 4,5 kg ağırlığında tokmaklar,
- 5000 mm² basınç alanına sahip 25 ton kapasiteli yükleme cihazı,
- Vazelin veya silikon gres.

5.2.5. Deney numunesinin hazırlanışı

CBR deneyleri, 20 mm elek açıklığından geçen zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilir. Numune genellikle doğal su muhtevasında test edilir. Ancak farklı su muhtevasında test yapılması gerektiğinde zemine istenen miktarda su eklenir ve

homojen şekilde karıştırılır. Hazırlanan numune, nem kaybını önleyecek bir kap içerisinde 24 saat bekletilmelidir.

5.2.6. Sıkıştırma uygulaması

CBR deneyi için sıkıştırma işlemleri statik veya dinamik yöntemlerle yapılır. Statik sıkıştırma yöntemi iki farklı şekilde uygulanabilir: Yöntem 1: Zemin kütlesi, kalıba dökülüp çubuk yardımıyla sıkıştırılır ve yüzey düzleştirilir. Daha sonra zemin üzerine süzgeç kağıdı ve bir disk yerleştirilerek kalıp tamamen doldurulur. Yöntem 2: Zemin üç parçaya ayrılarak her bir parça ayrı ayrı sıkıştırılır. Bu yöntem, homojen bir sıkıştırma elde etmek için tercih edilir. Dinamik sıkıştırma, titreşimli tokmak veya manuel tokmakla üç farklı yöntemle uygulanır. Tokmak ağırlığı ve uygulanan vuruş sayısı zemin özelliklerine göre belirlenir.

5.2.7. Suda bekletme işlemi

Numunelerin suda bekletilmesi, şişme davranışının ölçülmesi veya doygunluk koşullarının sağlanması gerektiğinde yapılır. Bu işlem için kalıp, delikli bir taban plakası ile donatılır ve suya yerleştirilir. Numune, 96 saat boyunca suda bekletilir ve bu süre boyunca şişme miktarı komparatör saati ile ölçülür.

5.2.8. Deneyin uygulanışı

CBR deneyi, zemin numunesinin yükleme cihazına yerleştirilmesiyle başlar. Zemin, CBR değerine bağlı olarak uygun bir yükle (örneğin %30'un altındaki değerler için 44,15 N, %30'un üzerindeki değerler için 220,73 N) ve dakikada 1,2 mm hızla penetre edilir. Deney, 7,5 mm penetrasyon seviyesine ulaşılan kadar devam eder. Sonuçlar, zeminin alt ve üst kısımlarından alınan numuneler üzerinde yapılan su muhtevası ölçümleri ile desteklenir. CBR testi sonuçları, zemin malzemesinin mühendislik uygulamalarında kullanıma uygun olup olmadığını belirlemek için temel bir referans sağlar.

5.2.8.1. Kil zeminde CBR deneyleri

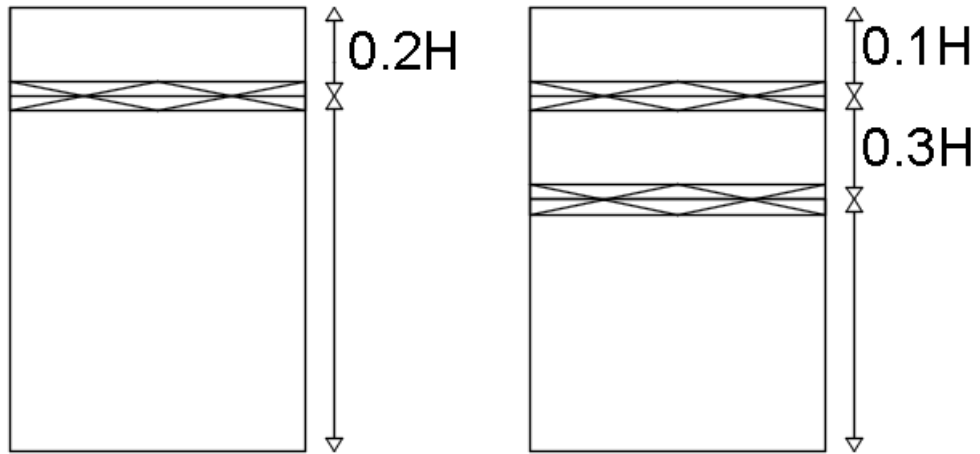
Bazalt geogridin kil zemine olan etkisini laboratuvarında değerlendirmek için TS 1900-2 standardına uygun olarak Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Sakarya'nın Hendek ilçesinden temin edilen kil zemin kullanılmıştır. Bu deneyler kapsamında, öncelikle doğal zemin üzerinde hem kuru hem de yaş ortam koşullarında CBR testleri uygulanmıştır. Ardından, zemin numunelerine

tek ve çift tabaka bazalt geogrid ilave edilerek aynı testler tekrarlanmıştır. Deneylerde doğal bazalttan üretilmiş bazalt geogrid kullanılmıştır. Dairesel CBR kalıbına konacak olan geogrid daireysel şekilde kesilmiştir.

Geogrid uygulamaları, farklı yerleşim düzenleri ile yapılmıştır. CBR kalıbının toplam yüksekliği H olarak alınmış ve tek tabaka geogrid, kalıbın $0,2 H$ yüksekliğinde zemine yerleştirilmiştir. Çift tabaka geogrid katkısı ise $0,1 H$ ve $0,3 H$ derinliklerine yerleştirilerek test edilmiştir. Bu yerleşim düzeni, zemin-geogrid etkileşimini farklı derinliklerde incelemek ve katkısının olup olmadığını belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

Şekil 5.21’de kullanılan geogridin CBR kalıbında yerleşim düzenleri şematik olarak sunulmuştur. Bu görsel, geogrid yerleşim düzenini ve testlerin uygulama sürecini daha iyi anlamak için önemli bir referans sağlamaktadır.

Her bir düzen için hem kuru hem de yaş koşullarda CBR testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneyler, doğal zemin, tek tabaka geogrid katkılı zemin ve çift tabaka geogrid katkılı zemin olmak üzere toplam altı farklı durumda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21. CBR kalıbı ve geogrid yerleşim düzeni.

Öncelikle doğal kil, sonrasında biri tek sıra, diğeri çift sıra bazalt geogrid içeren toplamda 6 adet numune pres ile CBR kalıbına yerleştirilip kuru ve yaş şartlarda Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 5.22’de numunelerin hazırlanmasına yönelik fotoğraflar sunulmaktadır. Sıkıştırma işlemi,

TS1900-2, Taşıma Oranı Tayini Deneyi, Statik Sıkıştırma, Metot 1'e göre yapılmış ve ıslak CBR deneyleri için numuneler 96 saat süreyle suda bekletilmiştir.



Şekil 5.22. Numunelerin hazırlanması.

Şekil 5.23.'de numunelerin suda 96 saat bekleme süreci, sonrasında numunenin kalıpta şişmiş hali, kesme aşaması ve kesme sonucunda oluşan batmanın görüntüsü topluca verilmiştir.



Şekil 5.25. CBR deney aşamaları

5.3. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

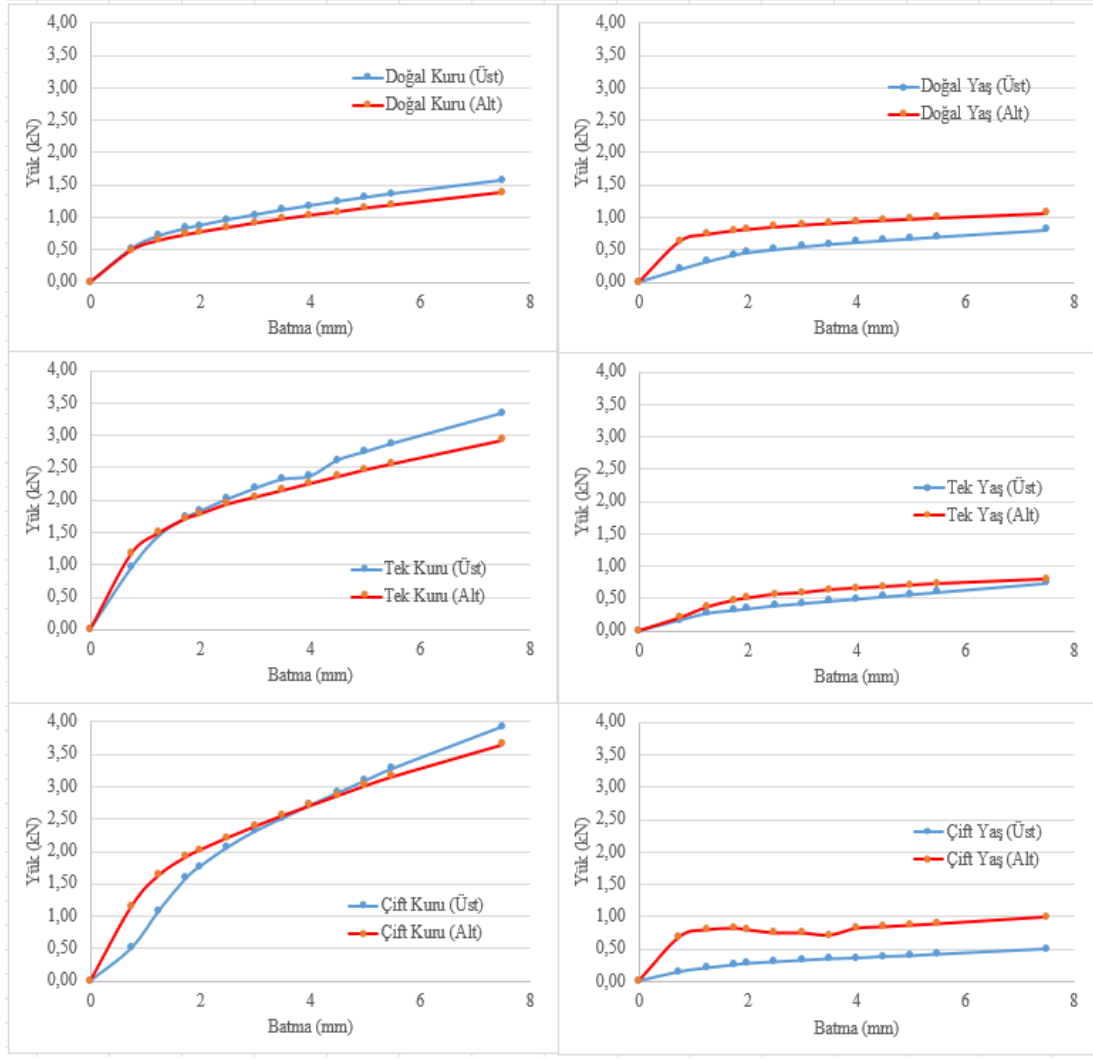
5.3.1. Hesaplamalar

Doğal kil zeminde yapılan CBR deneylerinden yaş CBR deneyine ait okumalar örnek olarak Şekil 5.26’da sunulmaktadır. Burada standart okuma değerleri 2.5 mm için 13.24 kN ve 5 mm için 19.96 kN olarak verilmektedir.

Penetrasyon (mm)	Üst Okuma	Yük (kN)	Alt Okuma	Yük (kN)	Standart Yük (kN)	CBR %
0	0	0	0	0	0	
0,75	91	0,19	297	0,63		
1,25	148	0,31	347	0,74		
1,75	197	0,42	375	0,80		
2	215	0,46	385	0,82	11,50	
2,5	237	0,50	402	0,85	13,24	3,85
3	257	0,55	416	0,88		
3,5	276	0,59	427	0,91		
4	290	0,62	440	0,93	17,60	
4,5	303	0,64	450	0,95		
5	316	0,67	459	0,97	19,96	3,36
5,5	330	0,70	468	0,99		
7,5	380	0,81	501	1,06		

Şekil 5.26. Doğal numunede yaş CBR deney okumaları.

Şekil 5.27’de üçü kuru üçü yaş durumda olmak üzere 6 adet CBR deneyinde elde edilmiş üst ve alt okumalar grafikler halinde verilmektedir. Burada ilk bakışta dikkat çeken özellik kuru durumda geogrid kullanımının batma için gerekli yük değerini açık bir şekilde arttırdığıdır. Bunun yanında yaş okumalarda geogridli numunelerde yük değerindeki düşüşün daha fazla olduğu da dikkat çekmektedir.



Şekil 5.27. Tüm numunelerde CBR deney okumaları.

5.3.1.1. Kil ve dolgu malzemeli numunelerde CBR deneyleri

Deneylerde Sakarya'nın Hendek ilçesinden temin edilen kil zemin ve kırma taş, kırılmış cüruf, kırılmış çakıl ve ince malzemelerden elde edilen dolgu malzemeli numune kullanılmıştır. Sonrasında kil ve dolgu malzemesinin bazalt geogridin 1 ve 2 sıra olmak üzere farklı konumda yerleştirilmesiyle donatılandırılmış zemin üzerinde kuru ve yaş CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde doğal bazalttan üretilmiş bazalt geogrid kullanılmıştır. Dairesel CBR kalıbına konacak olan geogrid dairesel şekilde kesilmiştir. Çift yönde taşıyıcı özelliği olan geogridin kalıba yerleştirilmesine ait fotoğraflar Şekil 5.28'de verilmiştir.



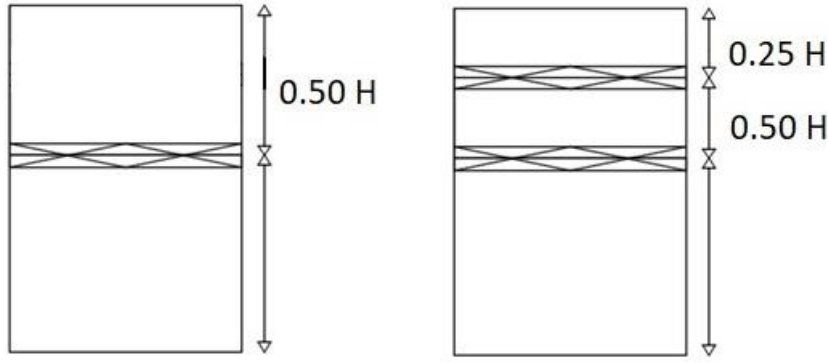
Şekil 5.28. CBR kabına yerleştirilen numune ve geogrid.

Öncelikle doğal kil, sonrasında kil ile dolgu zemin biri tek sıra, diğeri çift sıra bazalt geogrid içeren toplamda 8 adet numune pres ile CBR kalıbına yerleştirilip kuru ve yaş şartlarda Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneylerine tabi tutulmuştur (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. CBR kabına yerleştirilen numunelerin suda bekletilmesi.

Sıkıştırma işlemi, TS1900-2, Taşıma Oranı Tayini Deneyi, Statik Sıkıştırma, Metot 1'e göre yapılmış ve ıslak CBR deneyleri için numuneler 96 saat süreyle suda bekletilmiştir. Geogridler Şekil 5.30'da görüldüğü gibi tek ve çift tabaka halinde yerleştirilmiştir. CBR kalıbının boyu H olmak üzere; Tek tabaka geogrid, kalıbın 0.5H noktasına, Çift tabaka geogrid, 0.25H ve 0.5H noktalarına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.30. CBR kalıbı ve geogrid yerleşimi.

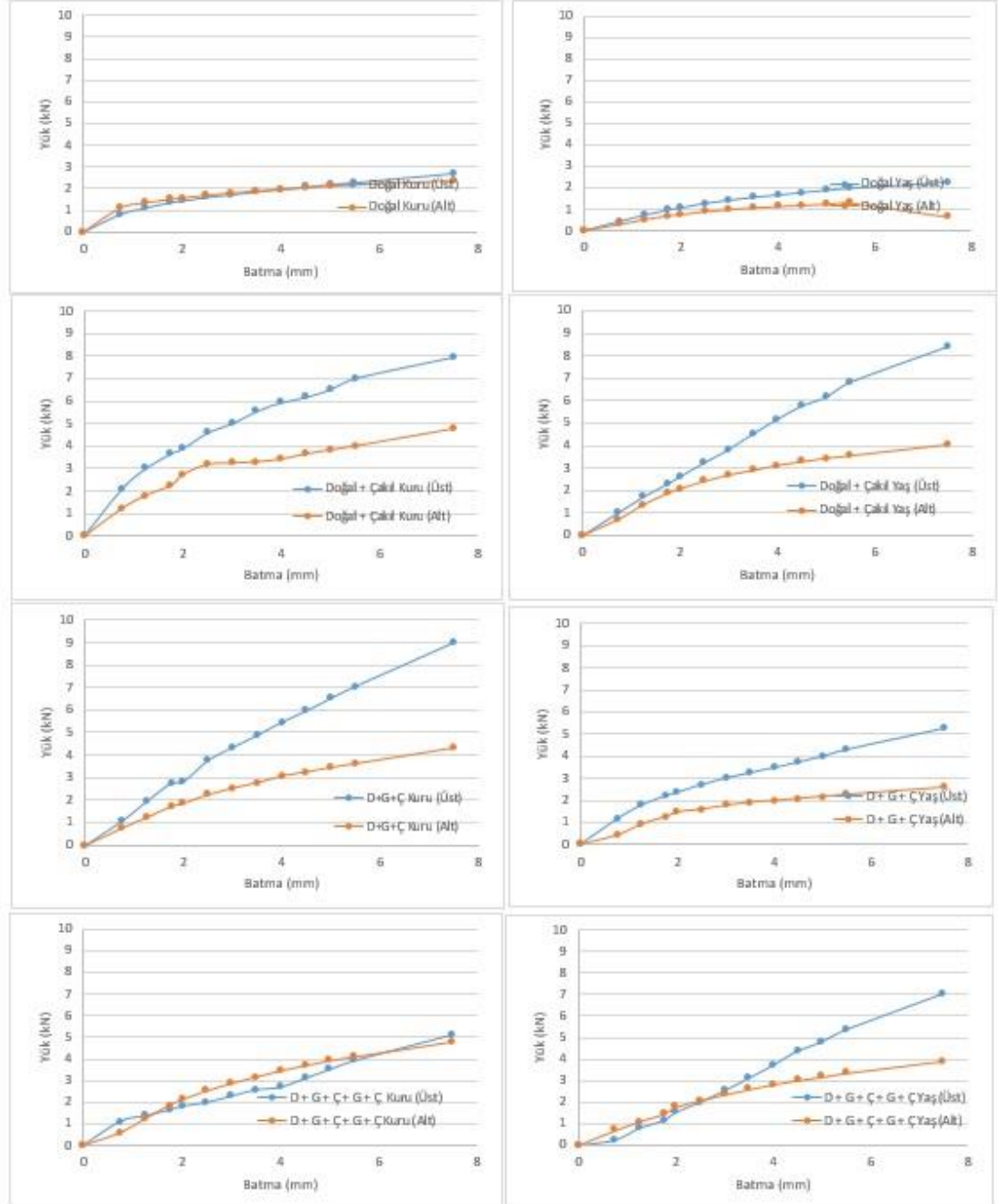
5.4. Hesaplamalar

Kil ve dolgu malzemeli zeminde yapılan yaş ve kuru CBR deneylerine ait okumalar Şekil 5.31'de örnek olarak sunulmaktadır. Burada CBR değerleri kuru numunelerde en büyük %34.66 ve yaş numunelerde %30.83 olarak hesaplanmıştır.

KURU NUMUNELER		Standart Yük (kN)	Okuma	Katsayı (N)	Yük (N)	CBR (%)
DOĞAL ZEMİN	2.5 mm	13.24	145	11.765	1705.925	12.88
	5 mm	19.96	188	11.765	2212	11.08
DOĞAL ZEMİN + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	390	11.765	4588	34.66
	5 mm	19.96	555	11.765	6530	32.71
DOĞAL + GEOGRİD + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	320	11.765	3765	28.44
	5 mm	19.96	555	11.765	6530	32.71
DOĞAL + GEOGRİD + ÇAKIL+ GEOGRİD + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	215	11.765	2529	19.10
	5 mm	19.96	335	11.765	3941	19.75
YAŞ NUMUNELER		Standart Yük (kN)	Okuma	Katsayı (N)	Yük (N)	CBR (%)
DOĞAL ZEMİN	2.5 mm	13.24	109	11.765	1282.385	9.69
	5 mm	19.96	161	11.765	1894	9.49
DOĞAL ZEMİN + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	275	11.765	3235	24.44
	5 mm	19.96	523	11.765	6153	30.83
DOĞAL + GEOGRİD + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	230	11.765	2706	20.44
	5 mm	19.96	339	11.765	3988	19.98
DOĞAL + GEOGRİD + ÇAKIL+ GEOGRİD + ÇAKIL	2.5 mm	13.24	177	11.765	2082	15.73
	5 mm	19.96	407	11.765	4788	23.99

Şekil 5.31. Doğal ve dolgulu zeminlerde yaş ve kuru CBR deney okumaları.

Şekil 5.32’de dördü kuru dördü yaş durumda olmak üzere 8 adet CBR deneyinde elde edilmiş üst ve alt okumalar grafikler halinde verilmektedir. Burada ilk bakışta dikkat çeken özellik kuru durumda geogrid kullanımının batma için gerekli yük değerini açık bir şekilde arttırdığıdır. Bunun yanında yaş okumalarda geogridli numunelerde yük değerindeki düşüşün daha fazla olduğu da dikkat çekmektedir.



Şekil 5.32. Tüm numunelerde CBR deney okumaları.



6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Doğal zemindeki CBR sonuçlarına bakıldığında doğal durumda %7,24 ve %6,44 olarak elde edilen kuru ve yaş CBR değerleri, tek sıra bazalt geogrid kullanıldığında %15,19 ve %4,27, çift sıra bazalt geogrid kullanıldığında %16,71 ve %5,60 olarak elde edilmiştir. Yaş CBR deneylerinde her bir durum için şişme miktarları birbirine çok yakın olmak üzere 1.80 mm civarında bulunmuştur. Bu konfigürasyonlarda şişme değerlerinde bir azalma görülemedi. Kuru durumda CBR değerlerine bakıldığında bazalt geogrid katkısının CBR direncini tekli kullanım için %110, çiftli kullanım için %130 civarında arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak yaş CBR değerlerine bakıldığında geogrid olmayan durumda düşüşün %11 civarında olduğu, tekli geogrid olması durumunda düşüşün %72'ye, çiftli kullanımda ise %67'ye vardığı görülmüştür. Yaş durumda geogrid olmayan duruma göre tekli kullanımda %34, çiftli kullanımda ise %13 civarında bir düşüş olduğu ilginç bir bulgu olarak belirlenmiştir. Bu durumda bazalt geogridin güçlendirme etkisinin suyun varlığında görülemediğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Tablo 6.1. Kuru ve yaş CBR deney sonuç özeti.

	Üst Okuma				Alt Okuma			
	2.5 Mm		5 Mm		2.5 Mm		5 Mm	
	Oran (%)	Artış (%)	Oran (%)	Artış (%)	Cbr (%)	Artış (%)	Oran (%)	Artış (%)
Geogrid Yok Kuru	7,24	--	6,51	--	6,34	--	5,70	--
Tek Tabaka Geogrid Kuru	15,19	109,81	13,73	110,91	14,66	131,23	12,38	117,19
Çift Tabaka Geogrid Kuru	15,55	114,78	15,44	137,17	16,71	163,56	15,09	164,74
Geogrid Yok Yaş	3,80	--	3,36	--	6,44	--	4,88	--
Tek Tabaka Geogrid Yaş	2,93	-22,89	2,83	-15,77	4,27	-33,70	3,54	-27,46
Çift Tabaka Geogrid Yaş	2,22	-41,58	1,95	-41,96	5,60	-13,04	4,30	-11,89

Doğal ve dolgu malzemeli numunelerdeki yapılan çalışmada, dolgu malzemeleri ve geogrid uygulamalarının CBR değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin mühendisliği uygulamalarında dolgu ve doğal zemin kombinasyonlarının performansını anlamak için önem taşımaktadır. İlk olarak, doğal zemin numunesi üzerinde yapılan testlerde, kuru ve yaş CBR değerleri sırasıyla %12.88 ve %9.69 olarak saptanmıştır. Yarı yarıya koyulan dolgu malzemesi ile yapılan deneylerde, elde edilen CBR değerleri %34.66 kuru ve %30.83 yaş olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, dolgu malzemesinin doğal zeminle kombinasyonunun, zemin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Doğal numune ile dolgu zemin arasında 0,5 H seviyesinde tek sıra bazalt geogrid kullanıldığında, CBR değerleri %32.71 kuru ve %20.44 yaş olarak elde edilmiştir. Bu durum, geogrid'in zemin stabilitesini artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Geogrid uygulaması, yük dağılımını iyileştirerek zemin deformasyonunu azaltmakta ve taşıma kapasitesini artırmaktadır. Son deneyde, 0,5 H seviyesinde doğal numune üzerine bir adet bazalt geogrid ve 0,25 H seviyesinde dolgu numune ilave edilerek, ikinci bazalt geogrid sabitlenmiş ve kalan 0,25 H seviyesinde dolgu numune ilave edilerek sıkıştırma işlemi yapılarak hazır hale getirilmiştir. Bu durumda elde edilen CBR değerleri %19.75 kuru ve %23.99 yaş olarak belirlenmiştir. Çift sıra geogrid uygulaması, beklenenin aksine CBR değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum, geogrid'in aşırı yük altında daha az etkili olabileceğini, dolgu malzemesinin uygunluk derecesinin yeterli olmadığını veya bazalt geogrid yeraltı su seviyesinin olduğu durumlarda katkısının olmadığını düşündürmektedir.

Deneyler sonrasında bazalt geogridin farklı geogrid türlerine bir alternatif olarak kullanılabileceği, ancak su seviyesinin yükselmesi ihtimali olan durumlarda dikkatli olunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Plaka taşıma deneylerinde ise bazalt geogrid ile güçlendirilmiş zeminlerin mühendislik performansına olan etkileri, üç farklı plaka yükleme deneyiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen yük-oturma eğrileri ve deneysel veriler, bazalt geogrid takviyesinin zemin taşıma kapasitesi üzerindeki olumlu katkısını açıkça ortaya koymuştur. Deney sonuçları, doğal yumuşak killi zeminin sınırlı taşıma kapasitesine sahip olduğunu, ancak bazalt geogrid takviyesiyle bu kapasitenin anlamlı biçimde arttığını göstermektedir. Üç farklı deneyde, uygulanan gerilme düzeylerine karşılık gelen oturma miktarları karşılaştırıldığında, geogrid takviyeli zeminlerin hem daha yüksek

taşıma kapasitesi sunduğu hem de oturma davranışında belirgin iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Örneğin, ikinci deneyde 281.2 kPa gerilmede -41.88 mm oturma meydana gelirken, aynı gerilme birinci deneyde -35.34 mm ve üçüncü deneyde yalnızca -18.59 mm olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuç, geogridin oturma azaltıcı etkisinin deneyden deneye değişkenlik gösterse de, özellikle üçüncü deneyde maksimum performansa ulaştığını ortaya koymaktadır. Bazalt geogrid takviyesi, zemin içinde bir çekme elemanı görevi görerek yüklerin daha geniş alana yayılmasını sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde taşıma kapasitesinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle 375.4 kPa ve 496.6 kPa gibi yüksek gerilme seviyelerinde dahi zemin, göçme davranışı göstermemiş; bunun yerine oturma davranışında sönümleyici bir etki sergilemiştir. Bu durum, geogrid destekli zeminlerin yüksek gerilmelere karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Geogrid takviyesi, oturma miktarını yalnızca azaltmakla kalmamış, aynı zamanda oturma eğrisinin daha lineer ve kontrollü bir eğilim göstermesini sağlamıştır. Bu durum, yapısal yüklerin daha stabil şekilde zemine iletilmesine ve oturma kaynaklı yapısal deformasyon riskinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Yumuşak killi zeminler, geleneksel olarak yüksek oturma potansiyelleri ve düşük taşıma kapasiteleri nedeniyle yapı projelerinde zemin iyileştirme tekniklerine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma, bazalt geogrid uygulamasının bu ihtiyaçlara etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Geogridlerin zemin içine entegre edilmesiyle elde edilen dayanım artışı, yalnızca kısa vadeli yüklemeler için değil, aynı zamanda uzun vadeli servis yükleri altında da zemin stabilitesini artırmaktadır. Bu da altyapı ve üstyapı projelerinde sürdürülebilir mühendislik çözümleri açısından önemli bir avantajdır.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Bazalt geogrid katkısı kuru numunelerde tüm okumalarda CBR değerini artırmıştır (kil zemini iyileştirmiştir).
- Yaş numunelerde tüm okumalarda düşüş görülmüştür. Bazalt geogridin kullanıldığı durumlarda bu düşüş çok daha fazla olmuştur. Bu da yaş durumda geogridin CBR değerine olumsuz etki yaptığını işaret etmektedir.
- Bazalt geogrid takviyesinin yumuşak killerde taşıma kapasitesini artırdığını ve oturma miktarını azalttığını göstermiştir.
- Doğal zemin ile dolgu zemin arasına koyulan bazalt geogrid katmanı yükü zemine daha etkin dağıtarak zemin taşıma eğrisini daha yüksek hale getirmiştir.
- Bu bulgular, yapısal zemin iyileştirmede bazalt geogrid kullanımını desteklemektedir.
- Tasarım aşamasında geogrid yerleşim derinliği, dolgu kalınlığı ve geogrid özellikleri (çekme dayanımı, esneklik modülü vb.) optimize edilmelidir.
- Ayrıca laboratuvar sonuçlarının sahadaki davranışı doğrulanmalı; farklı geogrid katman sayıları veya malzeme kombinasyonlarıyla ek deneyler yapılmalıdır.
- Genel olarak, bazalt geogrid takviyesi, çevre dostu ve yüksek mukavemetli bir çözüm olarak yumuşak killerde zemin iyileştirmesinde etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir.
- Elde edilen bu sonuçlara göre, bazalt geogridin su seviyesinin yükselmeyeceği ortamlarda kullanılması durumunda kil zeminin iyileşmesini sağlayacağı anlaşılmıştır.
- Doğada bulunan bir kayaçtan üretilmesi sebebiyle polipropilen vb. geogridlere göre çevreci özelliğe sahip olan bazalt geogridin zemin iyileştirmesinde alternatif olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Benek, M., Güzel, A., Geotekstiller Üzerine Bir İnceleme ve Uygulama Örnekleri, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- Das, B.M., Omar, M.T., Atalar. C., Geogrid - Takviyeli Kil Şevlerin Üzerinde Yer Alan Sürekli Temellerin Toplam Taşıma Kapasitesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Konferansı, 223-232, İstanbul, 2000.
- Demiröz, A., Tan, Ö., Erkan, İ.H., Geogrid Donatılı Kumların Taşıma Gücünü Etkileyen Tasarım Faktörlerinin Optimizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Konferansı, 789-798, Konya, 2008.
- Duman, E.K., Balkaya, M., Yumuşak Kil Zemin Üzerine İnşa Edilen Yol Dolgularında EPS Geofoam ve Geogrid Kullanımının Dolgu Deplasmanlarına Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2024
- Hausmann, M.R., Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill College, NewYork, 1990.
- Küçükosmanoğlu, M., Sert, S., Bazalt Fiberin Kil Zeminin Şişebilirliğine Etkisi. Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı., İstanbul, 287-296, 2019.
- Ndepote, C. P. (Danışman: Sert, S.), Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerde Kayma Direncine Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017.
- Ndepote, C. P., Sert, S. Use of basalt fibers for soil improvement. Acta Physica Polonica A, 130(1), 355-356, 2016.
- Ocakbaşı, P. (Danışman: Sert, S.), Bazalt Fiber Katkısının Killi Zeminlerin Drenajsız Kayma Direncine Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019
- Singh, P., Gill, K.S., CBR Improvement of Clayey Soil with Geogrid Reinforcement , International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol.2, No.6, pp. 456-462, 2012.
- Şenol, A., Gümüşer, C., Bostancıoğlu, M., Kaplamasız Yollarda Geogrid Kullanımının Farklı Hesap Yöntemleriyle Ekonomik Analizi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, 649-658, Konya, 2008.
- Toz, M. (Danışman: Sert, S.), Bazalt Geogridin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2020
- Toz, M., Sert, S., Bazalt Geogridin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı, Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 277-286, İstanbul, 2019.
- TSE. 2000. TSE1500 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması, Ankara. TSE. 2006.

- TSE. 2006. TS1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.
- TSE. 2006. TS1900-2 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yusuf DEMİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2007, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakülte, İnşaat Bölüm
- Yüksek Lisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği EABD, Geoteknik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2007-2013 yılları arasında Adapazarı Belediyesinde İnşaat Mühendisi olarak çalıştı.
- 2013-2020 Mühendislik Mimarlık Proje ve Taahhüt Alanında çalıştı.
- 2020-2023 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Dairesi Başkanlığında çalıştı.
- 2023-Halen Sakarya Büyükşehir Belediyesi SASKİ Genel Müdürlüğünde Yönetim Kurulu Üyeliği görevini yürütmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Demir, Y., Sert, S., Arslan, E. (2024, 26-30, Aralık) Bazalt Geogridle Donatılandırılmış Kil Zeminlerin Kaliforniya Taşıma Deneyi (CBR) Sonuçlarının İrdelenmesi, Ege 12. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Tam Metin Kitabı, Cilt 1, Sf 786-795, İzmir.