
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇELİK CÜRUF VE GEOGRİD KULLANILARAK YOL ALT TEMEL YAPISININ DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR İLE ARAŞTIRILMASI

Ahmet ERDAĞ

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet ERDAĞ

25/04/2025

ÇELİK CÜRUF VE GEOGRİD KULLANILARAK YOL ALT TEMEL YAPISININ DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARI İLE ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Ahmet ERDAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Bu çalışma, geogrid ile güçlendirilmiş çelik cüruf malzemelerinin yol alt temel tabakalarında deformasyon davranışı ve dayanım performansını inceleyerek, bu malzemelerin alternatif ve sürdürülebilir bir inşaat malzemesi olarak potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, elektrik ark ocağı (EAF) cürufu ve hava soğutmalı yüksek fırın (ACBF) cürufu olmak üzere iki farklı çelik endüstrisi yan ürünü, geogrid ile birlikte çeşitli kombinasyonlarda laboratuvar ölçekli testlere tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar, üç eksenli ve büyük ölçekli yükleme sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki cüruf türü, iri taneli yapısı ve yüksek mukavemeti sayesinde yol altyapılarında kullanım açısından uygun bulunmuştur. Özellikle EAF cürufu, ortalama tane çapı (D_{50}) 40 mm olan yapısıyla taneler arası kilitlenmeyi artırarak deformasyon direncini güçlendirmektedir. Kalıcı deformasyon ve esneklik modülü değerleri, AASHTO T 307 test prosedürü çerçevesinde değerlendirilmiş ve her iki cüruf türü, bazı koşullarda geleneksel malzemelere kıyasla üstün performans sergilemiştir. Geogrid donatısının sisteme dahil edilmesiyle birlikte deformasyon ve gerilme birikiminde kayda değer azalmalar elde edilmiştir. Örneğin, EAF cürufu içeren geogridli sistemde 100,000 yükleme döngüsü sonunda yükleme plakası altındaki birikmiş deformasyon 12 mm olarak ölçülürken, geogridsiz sistemde bu değer 35 mm'ye ulaşmıştır. Bu durum, geogrid katkısının deformasyonu yaklaşık %65 oranında azalttığını göstermektedir. Ayrıca, plakaya yakın bölgedeki deformasyon %58, gerilme birikimi ise %78 oranında azalmıştır. Geogrid takviyesi, esneklik modülü değerlerinde %10–25 arasında artış sağlamış ve bu artış, sistemin taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilemiştir. Elde edilen bulgular, hem EAF hem de ACBF çelik cüruflarının yol alt temel tabakalarında etkin şekilde kullanılabileceğini ve geogrid takviyesiyle birlikte performanslarının daha da geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, geogrid ile güçlendirilmiş çelik cüruf sistemlerinin sürdürülebilir, ekonomik ve dayanıklı yol altyapıları oluşturmak için güçlü bir alternatif sunduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Çelik cürufu, geogrid, esneklik modülü, kalıcı deformasyon, temel/alt temel
Sayfa Adedi	:	143
Danışman	:	Prof. Dr. Seyhan FIRAT

EXPERIMENTAL AND NUMERIC INVESTIGATION OF ROAD SUBBASE STRUCTURE USING STEEL SLAG AND GEOGRID

(Ph. D. Thesis)

Ahmet ERDAĞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

This study aims to evaluate the potential of geogrid-reinforced steel slag materials as an alternative and sustainable construction material by investigating their deformation behavior and strength performance in road sub-base layers. In this context, two different steel industry by-products, namely electric arc furnace (EAF) slag and air cooled blast furnace (ACBF) slag, were subjected to laboratory scale tests in various combinations with geogrid. The experimental studies were carried out using triaxial and large-scale loading systems. Both slag types were found to be suitable for use in road infrastructure due to their coarse grain structure and high strength. Especially EAF slag, with an average grain diameter (D_{50}) of 40 mm, enhances deformation resistance by increasing intergranular interlocking. The permanent deformation and resilient modulus values were evaluated in accordance with the AASHTO T 307 test procedure and both slag types showed superior performance compared to conventional materials under some conditions. Significant reductions in deformation and stress accumulation were achieved with the inclusion of geogrid reinforcement. For example, the accumulated deformation under the loading plate was measured to be 12 mm at the end of 100,000 loading cycles in the system with geogrid containing EAF slag, while this value reached 35 mm in the system without geogrid. This shows that the geogrid additive reduced the deformation by approximately 65%. In addition, the deformation in the region close to the plate was reduced by 58% and the stress accumulation by 78%. Geogrid reinforcement increased the resilient modulus values by 10-25% and this increase positively affected the bearing capacity of the system. The findings indicate that both EAF and ACBF steel slags can be used effectively in road sub-base layers and their performance can be further improved with geogrid reinforcement. Accordingly, it is concluded that geogrid reinforced steel slag systems offer a strong alternative to create sustainable, economical and durable road infrastructures.

Science Code	:	91105
Key Words	:	Steel slag, geogrid, resilient modulus, permanent deformation, base/subbase
Page Number	:	143
Supervisor	:	Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam boyunca tüm bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yol gösteren ve çalışmam sırasında karşılaşmış olduğum sıkıntılarda yanımda olan ve kıymetli zamanını ayıran tez danışmanım Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a, bu çalışma boyunca bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen tez komitesi üyelerim Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK ve Doç. Dr. Nejan HUVAJ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yurtdışında bulunduğum süre zarfında bana akademik anlamda çok şey katan, bilgisiyle, tecrübesiyle ve duruşuyla bana örnek olan Prof. Dr. Bora ÇETİN'e sonsuz teşekkür ederim. Michigan Eyalet Üniversitesi'nde beraber çalışma fırsatı bulduğum mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu kapsamında tez dönemimin on iki aylık bölümünde yurtdışında araştırma imkanı sağladığı için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Teze başladığım günden bugüne, her zaman bana destek olan başta Dr. Pınar Sezin Öztürk KARDOĞAN olmak üzere Doç. Dr. Kenan TOKLU'ya ve tüm Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca çekme dayanımı testlerindeki değerli destekleri için Dr. Ramazan BÜLBÜL'e ve Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında arkamda duran, kayıtsız şartsız beni destekleyen ve beni bugünlere getiren annem Özgül ERDAĞ'a ve babam Dursun ERDAĞ'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak doktora eğitimimin başından itibaren hep yanımda olan ve beni asla yalnız bırakmayan değerli eşim Yağmur Ezgi ERDAĞ'a da sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1.GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

2.1. Çelik Cüruf İle İlgili Çalışmalar 7

2.2. Geogrid İle İlgili Çalışmalar 21

3. KARAYOLU ÜSTYAPI TASARIMI VE GÖZLENEN YAPISAL HASARLAR 35

3.1. Esnek Bir Kaplamanın Yapısal Bileşenleri 35

3.1.1. Altyapı 36

3.1.2. Alt temel tabakası 36

3.1.3. Temel tabakası 37

3.1.4. Aşınma tabakası 37

4. GEOSENTETİKLERİN SINIFLANDIRILMASI VE MÜHENDİSLİKTE KULLANIM ALANLARI 47

4.1. Geosentetik Türleri 49

4.1.1. Geotekstil 49

4.1.2. Geogrid 50

4.1.3. Geomembran 51

4.1.4. Diğer geosentetikler 52

Sayfa

5. DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİ YAN ÜRÜNÜ OLARAK CÜRUF: OLUŞUM MEKANİZMALARI VE ÖZELLİKLERİ 55
5.1. Elektrik Ark Fırın (EAF) Cürufunun Üretim Süreci 56
5.2. Hava Soğutmalı Yüksek Fırın (ACBF) Cürufunun Üretim Süreci 57
5.3. Çelik Cürufun Dünyada Kullanım Alanları 58
5.4. Türkiye'de Çelik Cüruf Üretimi ve Kullanım Alanları 60
6. MATERYAL VE METOT 63
6.1. Çelik Cüruf Malzemesinin Genel Mühendislik Özellikleri 63
6.1.1. Fiziksel özellikler 63
6.1.2. Kimyasal ve minerolojik bileşim 65
6.1.3. Mekanik özellik 65
6.2. Malzemelerin Fiziksel Karakterizasyonu 66
6.2.1. Elek analizi ve hidrometre analizi 67
6.2.2. Atterberg limitleri 71
6.2.3. Özgül ağırlık 72
6.2.4. Kompaksiyon 75
6.2.5. Geogrid malzemesinin fiziksel özellikleri 80
6.3. Mineralojik ve Morfolojik Karakterizasyonu 81
6.3.1. X-Işını difraksiyonu 81
6.3.2. Mikroskobik inceleme 85
6.3.3. pH ve elektriksel iletkenlik 88
6.4. Malzemelerin Standart Mekanik Karakterizasyonu 90
6.4.1. Esneklik modülü kavramı 90
6.4.2. Deneysel yöntem ve bulgular 93
6.5. Büyük Ölçekli Laboratuvar Testi 110
6.6. Sayısal Modelleme Çalışmaları 125

Sayfa

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 129

KAYNAKLAR 133

ÖZGEÇMİŞ 143

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. Çelik cürufunun tipik fiziksel özellikleri 64

Çizelge 6.2. Çelik cürufunun tipik kimyasal bileşimi..... 65

Çizelge 6.3. Çelik cürufunun tipik mekanik özellikleri 66

Çizelge 6.4. Zemin türleri için tane boyut aralığı 68

Çizelge 6.5. EAF ve ACBF çelik cüruflarının özgül ağırlıkları 75

Çizelge 6.6. Malzemelere mühendislik özellikler..... 80

Çizelge 6.7. Geogrid malzemesinin genel özellikleri 81

Çizelge 6.8. Cüruf malzemelerinin pH ve elektriksel ölçüm sonuçları 90

Çizelge 6.9. Yol bozulmalarını etkileyen geoteknik faktörler 91

Çizelge 6.10. AASHTO (1993) standardına göre, k_1 ve k_2 katsayılarının tipik aralıkları 99

Çizelge 6.11. AASHTO T 307'ye göre temel/alt temel malzemeleri için esneklik modül test protokolü 105

Çizelge 6.12. Konvansiyonel nükleer yoğunluk ölçer ile yoğunluk ölçümü..... 115

Çizelge 6.13. Modellemede kullanılan malzemelere ait mühendislik parametreleri..... 127

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çelik cürufu yüzdesine bağlı olarak CBR değerlerindeki artışlar 8

Şekil 2.2. Yeniden oluşturulmuş çelik cüruf numunelerinin test sonuçları 12

Şekil 2.3. Çelik cüruf yüzdesinin: (a) serbest şişme; (b) basınç şişmesi üzerindeki etkisi 14

Şekil 2.4. Sayısal analizleri yapılan yol üst yapısı kesitleri 19

Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan kesitler..... 20

Şekil 2.6. Geogrid ile takviye edilmiş temel modelinin şematik diyagramı 26

Şekil 2.7. Geogrid ile takviyeli ve takviyesiz katmanlardaki esnek deformasyonundaki varyasyonlar..... 27

Şekil 2.8. a) Mikrokazık kurulumu, b) Geocell duvar, c) Eğimli alanda mikrokazık içine geogrid yerleştirilmesi ile dolgu malzemeleri zemin stabilizasyonu, d) Mikrokazık içine geocell duvarın yerleştirilmesi..... 29

Şekil 2.9. Geogrid konumlarına göre zemin yapısı..... 30

Şekil 3.1. Tipik bir esnek kaplama yapısında bulunan katmanlar 36

Şekil 3.2. Yol yapısında yorgunluk çatlağını temsil eden bir görsel 40

Şekil 3.3. Yol yapısında yansıma çatlağını temsil eden bir görsel 41

Şekil 3.4. Yol yapısında ayrışma kusurlarından olan çukurlar 42

Şekil 3.5. Yol yapısında çıkıntı deformasyonları temsil eden bir görsel 42

Şekil 3.6. Yol yapısında pompajı temsil eden bir görsel 43

Şekil 3.7. Yol yapısında düzensizliği temsil eden bir görsel 43

Şekil 3.8. Yol yapısında pürüzlülüğü temsil eden bir görsel 44

Şekil 3.9. Yol yapısında sıvılaşmayı temsil eden bir görsel 44

Şekil 3.10. Yol yapısında termal çatlakları temsil eden bir görsel 45

Şekil 4.1. Mühendislik uygulamalarında geosentetik kullanımına örnekler..... 47

Şekil 4.2. Çeşitli geosentetik ürünlerine ait görseller 48

Şekil 4.3. a) Dokuma kumaşlar, b) örme kumaşlar, c) dokusuz kumaşlar 50

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.4. Üretilen çeşitli geogrid malzemelerine ait görseller 51

Şekil 4.5. Geosentetik türlerine ait görseller: a) Geonet, b) Geopipe c) Geomat, d) Geocell, e) Geomembran, f) Geofoam 53

Şekil 5.1. Demir ve çelik üretim süreçlerinin akış şeması 55

Şekil 5.2. Kökenlerine göre sınıflandırılan cüruf türleri 56

Şekil 5.3. Tipik elektrik ark fırın cüruf görüntüsü 57

Şekil 5.4. Tipik hava soğutmalı yüksek fırın cüruf görüntüsü 58

Şekil 5.5. a) Dünya genelinde çelik cürufu üretimi ve (b) Japonya, Avrupa, ABD ve Çin gibi çeşitli ülkelerde çelik cürufunun kullanımı 60

Şekil 5.6. Ham çeliğin ülkelere göre toplam üretimi 61

Şekil 5.7. Türkiye'de çelik cüruf kullanım alanları 62

Şekil 6.1. Tipik bir çelik cüruf agregasına ait yüzey görüntüsü 64

Şekil 6.2. Çalışmada kullanılan cüruf türleri ve alt temel malzemesi: (a) EAF (b) ACBF (c) alt temel 67

Şekil 6.3. Mekanik elek sallama makinesi, iç içe geçmiş bir elek seti ile birlikte ve malzeme kurutma fırını 69

Şekil 6.4. Malzemelere ait hidrometre test deneyleri 70

Şekil 6.5. Çelik cürufların ve alt temel malzemesinin elek analizleri 71

Şekil 6.6. Casagrande aparati kullanılarak çelik cüruf malzemesinin likit limit testi 72

Şekil 6.7. İnce taneli malzemeler için piknometre uygulaması 73

Şekil 6.8. İri taneli malzemeler için özgül ağırlık testi 74

Şekil 6.9. Kompaksiyon testlerine ait deneysel görüntüler..... 78

Şekil 6.10. Malzemelerin kompaksiyon karakteristik özellikleri eğrisi 79

Şekil 6.11. Tez çalışmasında kullanılan geogride ait şematik görüntü..... 81

Şekil 6.12. X-ışını difraktometre aletinin şematik gösterimi 82

Şekil 6.13. EAF cürufunun X-ışını kırınım grafiği..... 84

Şekil 6.14. ACBF cürufunun X-ışını kırınım grafiği 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.15. SEM'in prensibini gösteren şematik diagram 87

Şekil 6.16. EAF cürufunun taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM): parçacık şekli ve yüzey dokusu 88

Şekil 6.17. ACBF cürufunun taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM): parçacık şekli ve yüzey dokusu..... 88

Şekil 6.18. pH ve elektriksel iletkenlik testlerine ait deneysel görüntüler..... 90

Şekil 6.19. Tekrarlı yükleme koşulları altında zemin tabanı dayanım modülünün (M_R) tanımı 93

Şekil 6.20. Esneklik modülü test planı..... 103

Şekil 6.21. Bu çalışmada kullanılan tekrarlı yük üç eksenli deney düzeneği: (a) yük hücresi, (b) zemin numunesi, (c) üç eksenli hücre, (d) basınç sistemi, (e) veri kontrol cihazı, (f) kullanıcı yazılım arayüzü. 103

Şekil 6.22. Çalışmada kullanılan tipik üç eksenli hücrenin şematik görünümü 104

Şekil 6.23. Cüruf için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki..... 106

Şekil 6.24. Cüruf-geogrid yapısı için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki..... 106

Şekil 6.25. Cüruf-alt temel yapısı için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki..... 107

Şekil 6.26. Cüruf-geogrid-alttemel kombinasyonu için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki 107

Şekil 6.27. 27.6 kPa çevresel basınç altında ve 10.000 yükleme döngüsü boyunca ACBF kombinasyonunun laboratuvar ortamında ölçülen kalıcı deformasyonu..... 109

Şekil 6.28. 27.6 kPa çevresel basınç altında ve 10.000 yükleme döngüsü boyunca EAF kombinasyonunun laboratuvar ortamında ölçülen kalıcı deformasyonu..... 110

Şekil 6.29. Plaka yük testi için test prosedürleri: (a) çelik kutu, (b) yükleme plakaları, (c) veri kaydedici, (d) test kutusunun üst görünümü, (e) geogrid takviyesi, (f) nükleer ölçüm cihazı testi..... 112

Şekil 6.30. Büyük ölçekli test sisteminin şematik görünümü..... 113

Şekil 6.31. Büyük ölçekli test kurulumu, (a) yan plaka yükü, (b) temel plaka yükü..... 114

Şekil 6.32. Büyük ölçekli testin hazırlık süreci 115

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.33. Konvansiyonel nükleer yoğunluk ölçümüne ait bir görsel 116

Şekil 6.34. Yükleme plakasındaki deformasyon ile döngü sayısı arasındaki ilişki 117

Şekil 6.35. Yükleme plakasına yakın deformasyon ile döngü sayısı arasındaki ilişki..... 118

Şekil 6.36. Yükleme plakasındaki gerilme oranı ile döngü sayısı arasındaki ilişki 119

Şekil 6.37. Yükleme plakasına yakın gerilme oranı ile döngü sayısı arasındaki ilişki..... 121

Şekil 6.38. Test sisteminin merkezi alanından yükleme testi öncesi (a) ve sonrası (b) çıkarılmış hasar görmüş geogridin görünümü..... 122

Şekil 6.39. Geogrid malzemesi (A) için çekme dayanımı testi grafiği 123

Şekil 6.40. Geogrid malzemesi (B) için çekme dayanımı testi grafiği 124

Şekil 6.41. Geogridde hasar konumları, (a) çekme yönüne paralel hasar, (b) bağlantı noktalarındaki hasar 124

Şekil 6.42. Eksenel simetriye dayalı olarak sonlu elemanlar analizi için oluşturulan geometri modelleri 126

Şekil 6.43. Statik analiz sonucu elde edilen deformasyon görüntüsü..... 128

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
c_c	Eğrilik katsayısı
c_u	Uniformluk katsayısı
D_{10}	Zeminin %10'unun geçtiği dane çapı
D_{30}	Zeminin %30'unun geçtiği dane çapı
D_{60}	Zeminin %60'unun geçtiği dane çapı
E	Young modülü
G_S	Tane özgül ağırlığı
k_1	Regresyon katsayısı
k_2	Regresyon katsayısı
k_3	Regresyon katsayısı
LL	Likit limit
M_R	Esneklik modülü
p_a	Atmosfer basıncı
PL	Plastik limit
w	Su içeriği
δ_{DKY}	Doygun kuru yüzey özgül ağırlık
δ_g	Görünen özgül ağırlık
δ_k	Kuru özgül ağırlık
ε_p	Plastik deformasyon
ε_r	Elastik deformasyon
σ_3	Çevreleyici basınç
σ_d	Deviatör gerilme
τ_{oct}	Oktahedral kayma gerilmesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
ACBF	Hava soğutmalı yüksek fırın cürufu
CBR	Kaliforniye taşıma oranı
EAF	Elektrik ark fırını
MDUW	Maksimum Kuru Birim Ağırlık
OMC	Optimum su içeriği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TFHRC	Turner-Fairbank Karayolu Araştırma Merkezi
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
XRD	X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Büyük şehirlerdeki nüfus artışı ve altyapı gelişimi, özellikle doğal kaynakların kıtlığı nedeniyle daha fazla inşaat malzemesine olan küresel talebi artırarak bir dizi soruna yol açmıştır. İşlenmemiş malzemelere erişim giderek zorlaşmakta ve maliyetli hale gelmektedir; bu nedenle atık malzemelerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, hükümetler ve kilit karar vericiler için popüler bir alternatif haline gelmektedir. Atık malzemeler, genellikle endüstriyel, ticari, inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan ve kalıcı bir değeri olmayan malzeme yan ürünleri olarak tanımlanmaktadır [1]. Farklı atık malzeme stokları büyümeye devam ederken ve depolama alanı sıkıntısı yaşanırken, çeşitli geri dönüştürülmüş atık malzemelerin yenilikçi yeniden kullanım uygulamaları giderek daha fazla araştırılmaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin inşaat ve altyapı uygulamalarında yeniden kullanımı, işlenmemiş malzeme talebini önemli ölçüde azaltabilir ve bu malzemelerin depolama sahalarından yönlendirilmesini sağlayabilir.

Demir, dünyada en bol bulunan ve dördüncü kayaç oluşturan element olup, yeryüzü kabuğunun yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Ayrıca modern şehirlerin hızla büyümesi için vazgeçilmez bir inşaat malzemesidir. Ancak demir doğada faydalı metalik formda bulunmayan ve sadece demir cevherinden elde edilen bir maddedir. Dünya genelinde yaklaşık 800 milyar ton demir cevheri kaynağı bulunmakta ve bu kaynaklar 230 milyar tondan fazla demir içermektedir [2]. Demir cevheri, çelik üreticileri tarafından yoğun talep görmekte ve dünya genelindeki demir cevherinin %98'inden fazlası çelik üretimi için çıkarılmaktadır. Sadece 2016 yılında, dünya genelinde çelik üreticileri tarafından 2 milyar tondan fazla demir cevheri çıkarılmış ve kullanılmıştır [3]. Çelik üretiminin ana kaynakları demir cevheri ve çelik hurdasıdır; dünya çelik üretiminin %70'i demir cevherinden, geri kalan %30'u ise çelik hurdasından yapılmaktadır. Çelik, inşaat mühendisliği altyapı projelerinde yaygın olarak kullanılan ve birçok kez geri dönüştürülebilen önemli bir inşaat malzemesidir. 2024 yılında tek başına 1445 milyon ton (mt) çelik geri dönüştürülmüş ve yeniden kullanılmıştır [4]. Bu rakam 1960'lardaki 500 mt'dan önemli bir artışı temsil etmektedir. Diğer endüstriyel süreçler tarafından üretilen atıklar gibi, demir ve çelik üretiminin de kendi yan ürünü olan cüruf bulunmaktadır. Bir ton çelik üretimi, kullanılan üretim tekniğine ve fırın tipine bağlı olarak yaklaşık 200 kg ile 400 kg arasında cüruf üretmektedir. Her yıl dünya genelinde 400 milyon ton cüruf üretilmektedir.

Çelik cürufu, aşınma direnci ve yüksek taşıma mukavemeti gibi agrega kullanımı için uygun mekanik özelliklere sahiptir [5-9]. Çelik cürufunun kullanım alanına göre birçok faydası vardır. Bunlardan bazıları; endüstrilerin katı atık bertaraf maliyetlerinin azaltılması, depolama alanı gereksinimlerinin azaltılması, inşaat için zemin malzemelerinin kazılmasıyla doğal kaynaklara verilen zararın en aza indirilmesi, üretim enerjisinin korunması ve nihayetinde sürdürülebilir inşaat ve ekonomik büyümedir. Bu faydalardan biri de yol mühendislerinin yerel malzemeleri kullanarak çevresel etkileri azaltıp maliyetli avantajlar sağlayabilmeleridir. Çelik cürufunun yol kaplamalarına entegre edilmesi, özellikle umut vadeden bir yaklaşımdır. Çelik cürufunu yol kaplamalarında geleneksel agregalara alternatif olarak incelenmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Uzun süreden beri, çelik cürufu yol yapımında çeşitli alanlarda kullanılmış ve uygulamalara konulmuştur. Yol mühendisliği alanında, metalurjik atıklar sıklıkla yol temel katmanlarında agrega olarak kullanılmaktadır [10-11]. Çelik cürufunun belirgin köşelilik, pürüzlü doku ve olağanüstü mekanik özellikleri (yüksek basınç dayanımı, aşınma direnci ve rijitlik), onu asfalt karışımlarında doğal agregalara uygun bir alternatif haline getirmektedir. Bu değişim, karışımların işlevselliğini ve yapısal özelliklerini artırmaktadır [12-13]. Bununla birlikte, çoğu durumda çelik cürufu, esas olarak yol kaplama tabakası yerine yol alt yapısı veya alt temel iyileştirmesi için kullanılmaktadır. Çelik cürufunun yol kaplamasında yaygın bir şekilde benimsenmesi, doğal agregaların kıtlığını hafifletmeye yardımcı olabilir. Bu kapsamda yol mühendisliğinde kullanımını genişletmek amacıyla, birçok çalışma çelik cürufunun asfalt karışımlarında yol kaplama tabakalarında kullanımına yer vermiştir [14-18]. Ancak, cürufların yol yapımında kullanımı nispeten yeni bir uygulama olduğundan, uzun dönem geogrid ile kullanımı üzerine sınırlı literatür çalışması bulunmaktadır.

Bu çalışma, çelik cüruf malzemesi ile stabilize edilmiş ve geogrid ile güçlendirilmiş alt temel katmanının mukavemetini ve taşıma kapasitesini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Demir ve çelik üretim cürufu agregalarının yol çalışmaları gibi inşaat uygulamalarında kullanımı, bu malzemelerin sürdürülebilir bir şekilde yeniden kullanılmasını sağlamak ve büyük miktarda bu atık malzemeleri depolama sahalarından yönlendirmek için pratik bir çözüm sunabilir. Bu kapsamda araştırmada, iki farklı demir ve çelik üretimi cürufunun mühendislik ve geoteknik özellikleri incelemiştir: Hava soğutmalı yüksek fırın cürufu (ACBF) ve elektrik ark ocağı cürufu (EAF). Cüruf agregalarının bağlayıcı olmaksızın geoteknik ve çevresel özellikleri değerlendirilmiş ve inşaat malzemesi olarak kullanım potansiyelleri incelenmiştir. Buna ek olarak deneysel çalışmalarda cürufların esneklik modülü ve kalıcı

deformasyon davranışları, yol yapılarında kullanılabilirliklerini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir.

Hedefler

Bu çalışmanın temel amacı, demir ve çelik üretim cüruflarının geogrid ile birlikte alt temel malzemesi olarak kullanılmasını değerlendirmek ve bu malzemenin geoteknik uygulamalarda faydalı kullanımlarını belirlemektir. Bu araştırmada test edilen demir ve çelik üretim cüruflarının EAF, ACBF ve %50 EAF ve %50 ACBF'den oluşan bir karışım (EAF50+ACBF50) olduğu görülmüştür. Ayrıca bu cürufların mühendislik özellikleri kapsamlı bir laboratuvar değerlendirmesiyle belirlenmiştir. Bu araştırmanın özel amaçları şunlardır:

- Demir ve çelik yapımında kullanılan cüruf agregalarının geoteknik özelliklerinin belirlenmesi
- Demir ve çelik yapımında kullanılan cüruf agregalarının alt temel uygulamalarında geogrid ile birlikte potansiyel kullanımları açısından değerlendirilmesi
- Cüruf agregalarının esneklik modülü parametrelerinin ve geogrid ile değerlendirilmesi

Önem

Yol yapım uygulamalarında farklı atık ve geri dönüştürülmüş malzeme türlerini kullanma konusunda artan bir talep vardır. Bir yan ürünü daha sürdürülebilir bir şekilde kullanmak için, mühendislik ve çevresel özellikler hakkında derinlemesine bir araştırma gereklidir. Bu kapsamda, bu demir ve çelik yapım yan ürünlerinin yol yapım malzemesi olarak kullanılmasının uygulanabilirliğini iyice değerlendirmek için kapsamlı bir çevresel, geoteknik ve mühendislik testleri gerçekleştirilmelidir. Endüstriyel atıkların inşaat uygulamalarında kullanılması, bu demir ve çelik yapım yan ürünlerinin atık yönetimi için sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir alternatifle sonuçlanacaktır, ancak bu malzemelerin mühendislik özellikleri geleneksel taş ocağı malzemeleriyle karşılaştırılabilir olmalıdır. Ayrıca cüruf agregalarının özellikle yollarda bir inşaat malzemesi olarak kullanılmasının uygulanabilirliği, bu yan ürünlerinin stoklarını önemli ölçüde azaltacak ve ayrıca bu atık malzemelerin daha üst düzey inşaat uygulamalarında sürdürülebilir bir şekilde yeniden kullanılmasını sağlayacaktır.

Araştırma yöntemi

Araştırma kapsamında cürufların geoteknik ve mühendislik özellikleri; tane boyut dağılımı (elek analizi ve hidrometre analizi), Atterberg limitleri, özgül ağırlık, pH değeri, kompaksiyon parametreleri, tekrarlı yük üç eksenli ve büyük ölçekli test ile araştırılmıştır. Ayrıca cüruf agregalarının kimyasal bileşimi ve mikro yapısı da X-ışını Floresan analizi (XRF) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca sayısal analizler ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel verilerin doğrulanması sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, geogrid ile güçlendirilmiş çelik cüruf malzemesinin yol alt temel yapılarındaki mühendislik performansını değerlendirmek amacıyla hem deneysel hem de sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Tez, konuya teorik bir temel sunan bölümlerden başlayarak, laboratuvar testlerine, sayısal modellere ve sonuçların mühendislik yorumlarına kadar sistematik bir ilerleyiş izlemektedir. Aşağıda, her bir bölümde ele alınan içerikler özetlenmiştir.

Bölüm 2, çelik cürufu ve geogrid malzemeleri üzerine yapılan önceki araştırmaların kapsamlı bir şekilde değerlendirildiği literatür taramasını içermektedir. Bu bölümde, çelik cürufunun yol mühendisliğindeki potansiyel kullanım alanları ve performansına ilişkin çalışmalar ile geogrid takviyesinin zeminlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

Bölüm 3'te, karayolu üstyapı tasarım ilkeleri gözden geçirilmiş ve saha uygulamalarında karşılaşılan yapısal hasar türleri incelenmiştir. Bu bağlamda, üstyapı elemanlarının tasarımındaki temel kriterler ve performansa etki eden faktörler açıklanmıştır.

Bölüm 4, geosentetik malzeme türlerinin sınıflandırılması ve mühendislikteki uygulamalarına odaklanmaktadır. Geotekstil, geogrid, geomembran gibi yaygın türler tanıtılmış; bu malzemelerin altyapı sistemlerindeki işlevsel rolleri detaylandırılmıştır.

Bölüm 5'te, demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olan çelik cürufunun oluşum süreci, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile birlikte açıklanmıştır. Elektrik ark fırını ve hava soğutmalı yüksek fırın prosesleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış; ayrıca çelik cürufunun hem dünya genelindeki hem de Türkiye'deki üretim ve kullanım durumu değerlendirilmiştir.

Bölüm 6, araştırmada kullanılan malzemelerin deneysel ve sayısal analiz yöntemlerini kapsamaktadır. Bu bölümde; fiziksel deneyler (elek analizi, özgül ağırlık, kompaksiyon vb.), mineralojik ve morfolojik analizler (XRD, mikroskopi, pH ve elektriksel iletkenlik) ve mekanik karakterizasyon testleri ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Ayrıca, büyük ölçekli laboratuvar deneylerinin kurulumu ve yürütülmesi ile sayısal modelleme çalışmalarının içeriği açıklanmıştır.

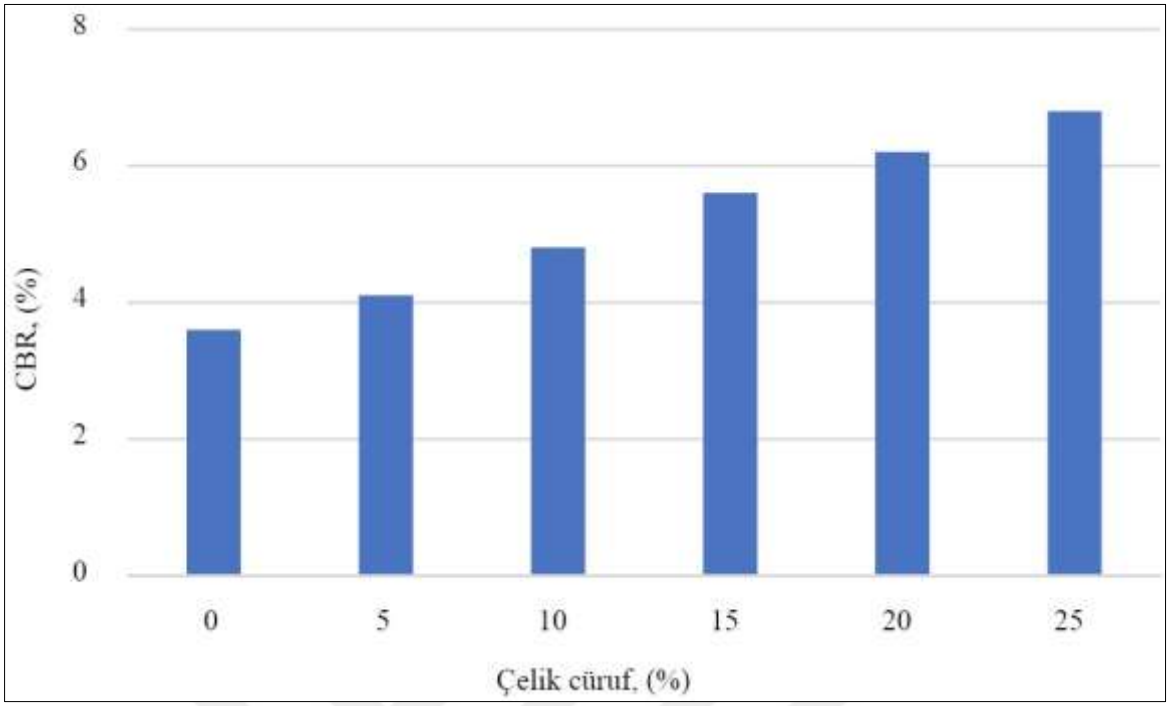
Bölüm 7'de, tüm deneysel ve sayısal çalışmaların bulguları bir araya getirilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yorumlar sunulmuş ve ileriye dönük uygulamalar için öneriler geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Çelik Cüruf İle İlgili Çalışmalar

Yol ve zemin mühendisliğinde, çevresel ve ekonomik nedenlerle alternatif malzeme arayışları giderek önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel yan ürünlerin altyapı uygulamalarında değerlendirilmesi hem kaynak verimliliği hem de sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Bu malzemelerden biri olan çelik cürufu, son yıllarda taşıma gücünün artırılması, zeminlerin iyileştirilmesi ve trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonların azaltılması gibi amaçlarla yapılan çalışmalarda sıkça incelenmiştir. Aşağıda, çelik cürufu kullanımıyla ilgili literatürde yer alan bazı önemli çalışmalar özetlenmiştir.

Kabeta ve Lemma (2023), çelik cürufunun zayıf killi zeminlerin mühendislik özelliklerine katkı maddesi olarak uygunluğunu değerlendirdikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çelik cürufu zemine sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında eklenmiştir. Gerçekleştirilen testler arasında özgül ağırlık, tane boyutu analizi, atterberg limit testi, sıkıştırma testi, serbest şişme, kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı (UCS) testleri yer almaktadır. Atterberg limit test sonuçlarına göre, şişen zemine %25 oranında çelik cürufu eklendiğinde, likit limiti %90,8'den %65,2'ye, plastik limiti %60,3'ten %42,5'e, plastisite indeksi ise %30,5'ten %22,7'ye düşmektedir. Aynı oranda çelik cürufu eklendiğinde, özgül ağırlık 2,67'den 3,05'e yükselmektedir. Serbest şişme değeri ise %104,6'dan %58,2'ye gerilemiştir. Standart proctor sıkıştırma testi sonuçlarına göre, maksimum kuru yoğunluk 1,504 g/cm³'ten 1,692 g/cm³'e yükselirken, optimum su içeriği %19,77'den %12,09'a düşmektedir. UCS testine göre, %25 çelik cürufu karıştırıldığında serbest basınç dayanımı 64,3 kPa'dan 170,6 kPa'ya çıkmıştır. Ayrıca, %25 çelik cürufu içeren zeminde CBR değeri %3,64'ten %6,82'ye yükselmiştir (Şekil 2.1). Sonuç olarak, çelik cürufunun, genleşen zemin özelliklerini iyileştirdiği ve geoteknik uygulamalar için uygun bir katkı maddesi olduğu tespit edilmiştir [19].



Şekil 2.1. Çelik cürufu yüzdesine bağlı olarak CBR değerlerindeki artışlar

Sas ve diğerleri (2015), çelik cürufunun yol yapımında alternatif bir malzeme olarak kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla, kimyasal özellikleri ve bazı temel geoteknik parametreleri incelenmiştir. Mühendislik uygulamalarında başarılı bir performans sağlanabilmesi için bu tür araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Araştırma neticesinde yapılan analizlerde çelik cürufun, young modülü (E) ve esneklik modül (M_R) değerlerinin alt temel gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür. Mekanik özellikleri, ıslatılmış ve ıslatılmamış (optimum su içeriğine sahip) koşullar altında test edilmiştir. Çelik cürufunun mekanik karakterizasyonu, sabit sıkıştırma ve nem içeriği koşullarında yapılan Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testleriyle elde edilmiştir. Ayrıca, çelik cürufunun döngüsel yüklenme davranışı, kontrollü düşük mukavemetli bir malzeme olarak karakterize edilmesi amacıyla döngüsel Kaliforniya taşıma oranı (cCBR) cihazı ile test edilmiştir. Saha çalışmaları kapsamında ise statik yük plakası (VSS) testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tespit edilen yüksek krom ve çinko içeriği, çelik cürufunun iç kristal yapısıyla yakından ilişkili olduğunu ve sonuçların, yol temel/alt temel yapılarında kullanıldığında herhangi bir tehlike oluşturmadığını göstermektedir [20].

Sarkar ve Hegde (2024), tekrarlı yükleme koşulları altında betonarme uygulamalarda potansiyel geri dolgu malzemeleri olarak çelik cürufu ile inşaat ve yıkım atığı (CDW) gibi

iki farklı atık malzemenin performansını değerlendirmiştir. Bu kapsamda, malzemelerin davranışını incelemek amacıyla konsolide-drenajsız tekrarlı üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geogrid takviyesinin bu malzemelerin tekrarlı yük altındaki performansına olan etkisi de araştırılmıştır. Geogrid ilavesi, hem çelik cürufu hem de CDW'nin dayanım özelliklerini iyileştirmiştir. İlk yükleme çevriminde, 1 Hz frekans altında, geogrid takviyesi ile çelik cürufu ve CDW'de sırasıyla %26 ve %20 oranında iyileşme elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, geogrid kullanımı, aşırı gözenek suyu basıncı gelişimini sınırlayıcı bir etki göstermiştir. Belirli bir frekansta gerçekleştirilen deneylerde, çelik cürufu ve CDW malzemelerinin kayma modül değerlerinin kumdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İlk yükleme döngüsünde, çelik cürufunun kayma modülü, kumla karşılaştırıldığında %54 oranında daha yüksek bulunmuş; benzer şekilde, CDW'nin kayma modülünde %26 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Geogrid takviyesi ile birlikte ilk çevrimde, kum, çelik cürufu ve CDW'nin dinamik kayma modüllerinde sırasıyla %18, %28 ve %25 oranlarında artış elde edilmiştir. Kum, çelik cürufu ve CDW'ye kıyasla daha yüksek sönüm oranı sergilemiştir; ancak, geogrid takviyesinin sönüm oranı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, çelik cürufu ve CDW'nin demiryolu yüklemeleri altındaki güçlendirilmiş zemin (RE) duvarlarında potansiyel uygulamalarını değerlendirmek üzere iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyon sonuçları, çelik cürufu veya CDW'nin geri dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, geleneksel dolgu malzemelerine kıyasla duvar deplasmanlarının önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Özellikle, çelik cürufu ve CDW kullanımıyla, yatay yer değiştirme değerlerinde kum kullanımına göre sırasıyla %48 ve %32 oranlarında azalma tespit edilmiştir [21].

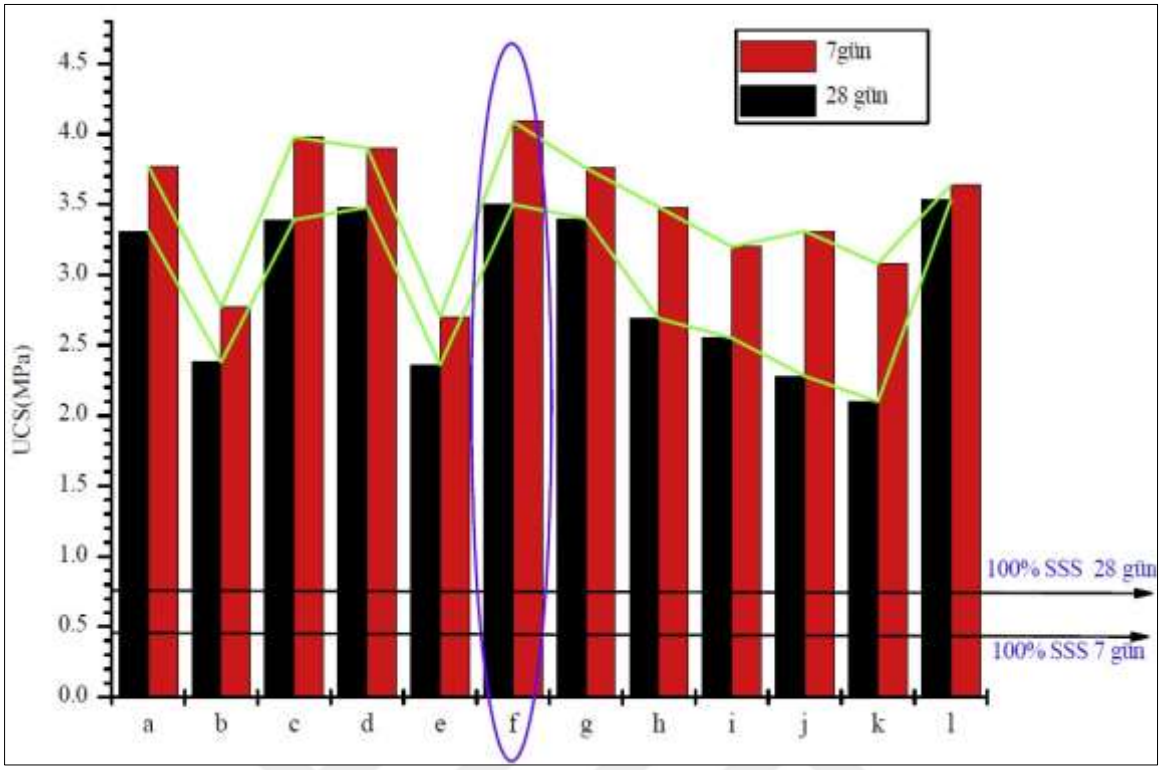
Putra (2014), yol kaplamaları için alt zemin olarak kullanılan genleşen zeminlerin performansını iyileştirmek amacıyla cüruf ve çimentonun zemin iyileştirici malzeme olarak uygunluğunu değerlendirmiştir. Bu kapsamda, genleşen zeminin mühendislik özelliklerini ve davranışını belirlemek amacıyla çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deneyler arasında tane boyutu dağılımı, standart Proctor kompaksiyon testi, özgül ağırlık tayini, Atterberg limitleri, serbest şişme, asitlik ve bazlık ölçümü ile geçirgenlik testi yer almaktadır. Zemin performansı ise Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testi, serbest basınç dayanımı (UCS) testi ve tekrarlı yükleme üç eksenli (RLT) testi aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışmada üç farklı karışım oranı test edilmiş ve uygun zemin iyileştirici malzeme oranı, UCS test sonuçlarının alt zemin için gerekli standartları karşılaması esas

alınarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, incelenen genleşen zemin için önerilen oran, 28 günlük kür süresi sonunda %13,5 cüruf ve %1,5 çimento olarak belirlenmiştir. Bu karışım, stabilize edilmemiş zemine kıyasla sekiz kat daha yüksek UCS değerleri sağlamıştır. Ayrıca, bu karışımın sağladığı CBR değeri, yol kaplaması tasarımı için öngörülen minimum değerin dört katı olarak tespit edilmiştir. Tekrarlı yükleme testi sonuçlarına göre, elde edilen elastisite modülünün deviator gerilimi ile ilişkili olduğu ve bu ilişkiyi en iyi şekilde açıklayan modelin, belirleme katsayısı $R^2 = 0,96$ olan hiperbolik korelasyon modeli olduğu ortaya konmuştur. Çalışma bulguları, endüstriyel bir yan ürün olan cürufun, zeminlerin dayanımını artırmada etkili bir iyileştirici malzeme olarak kullanılabileceğini ve aynı zamanda çevresel kirletici potansiyelinin azaltılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir [22].

Maghool ve diğerleri (2019) çalışmalarında, pota fırını (LF), elektrik ark fırını (EAF) ve %50 LF ile %50 EAF'den oluşan bir karışımın (LFS50+EAFS50) fiziksel, geoteknik ve mühendislik özelliklerini laboratuvar testleri ile değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında gerçekleştirilen laboratuvar testleri arasında kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı (UCS) testleri, doğrudan kesme testleri (DST), konsolide drenajlı (CD) üç eksenli testler ve tekrarlı üç eksenli (RLT) testleri yer almıştır. Çelik cürufunun kesme dayanımı tepkilerinin, LF ve LF50+EAF50 karışımının genleşme kaynaklı tepe dayanımı ile EAF'nin genleşme ile ilişkili gerinim sertleşmesi davranışına göre farklılık gösterdiğini bulmuşlardır. Yüksek kesme dayanımı parametreleri ve elde edilen yeterli sertlik göz önünde bulundurularak, çelik cürufunun bir geo-malzeme olarak kullanım potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır. LF ve LF50+EAF50'nin iyi derecelendirilmiş olması ve yüksek CBR değerlerine sahip olması, bu malzemeleri yol yapım uygulamaları için uygun hale getirmiştir. Ancak EAF'nin kötü derecelendirilmiş olduğu ve nispeten daha düşük CBR değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir; bu da EAF'yi mühendislik dolgusu ve boru yatağı gibi daha az kritik uygulamalar için daha uygun bir seçenek yapmıştır. Bu çalışma, özellikle LFS olmak üzere, söz konusu yan ürünlerin geo-malzeme olarak altyapı uygulamalarında kullanılabilirliğini ortaya koyarak, çelik üretim tesislerinde depolanmakta olan bu atık malzemelerin alternatif ve çevre dostu inşaat malzemelerine dönüştürülebileceğini göstermektedir [23].

Gu ve arkadaşları (2018), ikincil çelik cürufunun (SSS), yol kaplamaları için alt zemin iyileştirmesinde potansiyel bir malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır.

Çalışmada, farklı oranlardaki SSS, kireç ile karıştırılarak karışımların sıkıştırılabilirlik, dayanım ve genleşme oranı bakımından performansları değerlendirilmiştir. En uygun iyileştirme etkisi, %50 SSS, %45 zemin ve %5 kireç oranı ile elde edilmiştir. Ayrıca, SSS ile kireç karışımının dayanım gelişimini ortaya koymak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Çalışmanın devamında, SSS bileşenleri, Portland çimentosunun oksit bileşimi ve oranları referans alınarak kireç ve metakaolin ile desteklenmiş ve yeniden yapılandırılmıştır. Bu şekilde elde edilen karışımın 28 günlük serbest basınç dayanımı (UCS), başlangıç değeri olan 0,73 MPa'dan 4,09 MPa'ya yükselmiştir. SSS'nin reaktivitesini daha da artırmak amacıyla üç farklı katkı maddesi (NaOH, NaCl ve Na_2SO_4) kullanılmıştır. %5 katkı oranında, NaCl ve Na_2SO_4 ile aktive edilen numunelerin 28 günlük UCS değerleri sırasıyla 8,02 MPa ve 10,88 MPa olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, SSS'nin yeniden yapılandırılması ve kimyasal olarak aktive edilmesinin, alt zemin iyileştirme uygulamalarında performansı artırmak için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2.2'de, farklı yeniden yapılandırılmış SSS karışımlarının 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri karşılaştırılmaktadır. Grafik sonuçlarına göre, tüm karışımların UCS değerleri, katkısız (%100) SSS'ye kıyasla belirgin şekilde artış göstermiştir. Özellikle "f" tasarımı, 28 günlük kür süresi sonunda yaklaşık 3,5 MPa dayanım ile en yüksek performansı sergileyerek optimum karışım olarak belirlenmiştir. Bu karışımda %29,95 SSS, %60,33 kireç ve %9,73 metakaolin içeriği kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, SSS'nin uygun katkı malzemeleriyle birlikte yeniden yapılandırılmasının alt zemin stabilizasyonu açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır [24].



Şekil 2.2. Yeniden oluşturulmuş çelik cüruf numunelerinin test sonuçları

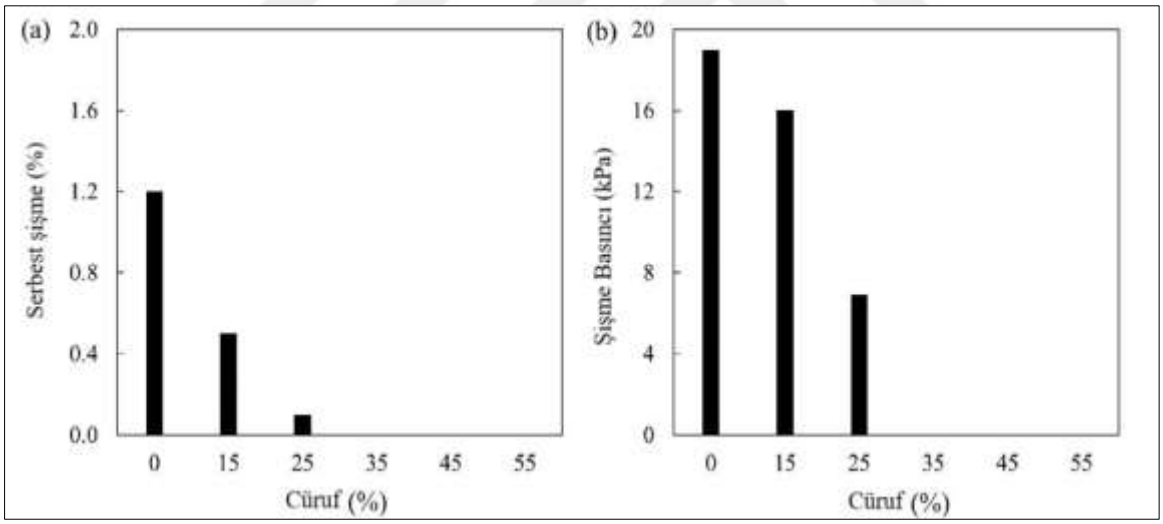
Yıldırım ve arkadaşları (2012), alt temel stabilizasyonu uygulamalarında kireç yerine çelik cürufu ve uçucu kül ile çelik cürufu ve yüksek fırın cürufu karışımlarının kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda, Indiana eyaletinde bir uygulama sahasından alınan yerinde killi zemin, özgül ağırlık, tane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS) ve CBR-şişme testleri ile karakterize edilmiştir. Çalışmada değerlendirilen karışımlar; %5 çelik cürufu + %5 uçucu kül, %7 çelik cürufu + %3 uçucu kül, %8 çelik cürufu + %2 uçucu kül ve %7 çelik cürufu + %3 yüksek fırın cürufu içeren zemin karışımlarıdır. Bu karışımların mekanik davranışları, kompaksiyon ve UCS testleri ile değerlendirilmiş, ayrıca şişme potansiyellerini belirlemek amacıyla CBR-şişme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en uygun ve ekonomik alt zemin karışımı %7 çelik cürufu + %3 uçucu kül oranı ile elde edilmiştir. Bu karışımın 2 günlük ve 7 günlük UCS değerleri sırasıyla 820 kPa ve 886 kPa olarak ölçülmüş; ayrıca bir boyutlu şişme gerinimi %0,13 gibi düşük bir seviyede kalmıştır. Karışıma ait çimentomsu reaksiyonların, yüksek fırın cüruflu karışımlara kıyasla daha güçlü olduğu gözlemlenmiştir. Seçilen karışımın uygulama sahası, Indiana, Crown Point yakınlarındaki 109. Cadde ile I-65 otoyolu kavşağında yer almakta olup, kavşağın güneybatı (SW) ve kuzeybatı (NW) kadranlarındaki bazı rampa kesimlerinde yerinde alt zemin

stabilizasyonu amacıyla kullanılmıştır. Karışım, önceden hazırlanarak sahaya taşınmış ve yerinde zemin ile karıştırılmıştır. Saha kompaksiyon kontrolü, konik penetrasyon testleri (DCPT) ve nükleer yoğunluk ölçüm testleri ile yapılmıştır. Alt zemin, temel tabakası ve beton yerleştirilmeden önce çatlaklar ya da deformasyon belirtileri açısından izlenmiş; herhangi bir yapısal sıkıntıya rastlanmamıştır. Stabilize edilmiş alt zemin, uygulama sahasında tatmin edici bir performans sergilemiştir [25].

Maghool ve arkadaşları (2016), çelik üretimi sırasında oluşan elektrik ark ocağı cürufu (EAFS) ve pota fırını cürufunun (LFS), yol yapım malzemesi olarak potansiyel kullanımını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir mühendislik ve çevresel test programı yürütmüşlerdir. Mühendislik değerlendirme kapsamında tane boyutu dağılımı, hidrometre, organik madde içeriği, pulluluk indeksi, Atterberg limitleri, özgül ağırlık, su emilimi, pH, minimum ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (titreşimli tabla yöntemiyle), modifiye Proctor kompaksiyon, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve Los Angeles aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çevreye olası kirletici yayılımını değerlendirmek amacıyla, her iki çelik cürufu türü üzerinde toplam ve süzülebilir (leachable) ağır metal analizlerini içeren çevresel uygunluk testleri yapılmıştır. Bu testler, malzemelerin çevresel açıdan güvenli olup olmadığını ve zamanla yeraltı suyu veya çevreye zararlı maddeler sızdırıp sızdırmayacağını belirlemeye yöneliktir. Çevresel test sonuçlarına göre, EAFS ve LFS malzemelerinin yol yapım uygulamalarında agrega olarak kullanılmasının çevresel bir risk oluşturmadığı tespit edilmiştir. LFS agregalarının, yüksek CBR değeri de dâhil olmak üzere tatmin edici jeoteknik ve çevresel performansları, bu malzemeyi kaldırım tabanı, alt tabanı ve mühendislik dolguları gibi yol inşaatı uygulamaları için ideal bir aday haline getirmiştir. Öte yandan, görece daha düşük CBR değerine sahip EAFS'nin ise yalnızca kaldırım alt tabanı ve mühendislik dolguları gibi daha az yapısal öneme sahip uygulamalarda kullanılmasının uygun olacağı ifade edilmiştir. Bu çalışmanın bulguları, çelik cürufu agregalarının yol yapımında kullanılarak sürdürülebilir bir yeniden kullanım yaklaşımı sunabileceğini ve bu atık malzemelerin önemli bir kısmının düzenli depolama alanlarına yönlendirilmesini önleyebileceğini göstermektedir [26].

Soltani-Jigheh (2022), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (GGBFS), ince taneli zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla kapsamlı bir deneysel çalışma yürütmüştür. Bu amaçla, zemin numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, kompaksiyon, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), serbest basınç dayanımı

(UCS) ve donma-çözülme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, cüruf oranı %0'dan %55'e kadar artırılarak yapılan testlerde, zemin plastisite indeksinin %44'ten %20'ye kadar azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, cüruf katkısı ile birlikte CBR değerlerinde anlamlı artışlar gözlemlenmiş; %55 cüruf içeren karışımda, 2,54 mm ve 5,08 mm penetrasyonlara karşılık gelen CBR artış oranları sırasıyla %140 ve %154 olarak kaydedilmiştir. Serbest basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde ise, %55 cüruf katkılı kil numunesi, stabilize edilmemiş zemine kıyasla maksimum %132 oranında dayanım artışı göstermiştir. Donma-çözülme döngüleri sonucunda, artan cüruf içeriğiyle birlikte zemin numunelerinde gözlenen su içerikleri ve hacim değişiklikleri azalmış; bu durum karışımların dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir. Şişme davranışı bakımından değerlendirildiğinde, Şekil 2.3'te görüldüğü üzere %15 ve %25 cüruf katkıları ile serbest şişme miktarı sırasıyla yaklaşık %58 ve %92 oranında azalmış; %35, %45 ve %55 oranında cüruf içeren numunelerde ise şişme tamamen ortadan kalkmıştır. Bu sonuçlar, GGBFS'nin ince taneli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede etkili bir katkı malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır [27].



Şekil 2.3. Çelik cüruf yüzdesinin: (a) serbest şişme; (b) şişme basıncı üzerindeki etkisi

Al-Deeky ve Hattamleh (2017), yüksek plastisiteli alt zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ince çelik cürufu agregasının (FSSA) katkı malzemesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak, kullanılan zemin ve FSSA'nın mekanik ve mühendislik özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından, zemin numunelerine %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında (kuru ağırlıkça) FSSA eklenmiş ve karışımlar hazırlanarak çeşitli laboratuvar testleri uygulanmıştır. FSSA katkısının etkinliği; tutarlılık sınırları, kompaksiyon özellikleri, serbest şişme miktarı, serbest basınç dayanımı (UCS) ve

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) üzerindeki iyileşmeler temel alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, %20 oranında FSSA katkısının, plastisite indeksinde %26,3 ve serbest şişme değerinde %58,3 oranında azalma sağladığını göstermiştir. Aynı katkı oranı, serbest basınç dayanımını %100, maksimum kuru birim hacim ağırlığı %6,9 ve CBR değerini %154 oranında artırmıştır. Bu bulgular, FSSA'nın yüksek plastisiteli alt zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmede etkili bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ve aynı zamanda çelik üretiminden kaynaklanan atık cürufların çevreye zarar vermeden yeniden değerlendirilmesi için sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır [28].

Bayat ve arkadaşları (2022), çelik cürufu içeren granüler kolon-zemin kompozitlerinin yanal yük taşıma kapasitesini değerlendirmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, çelik cürufundan oluşturulmuş kolonlar ile sıradan taş kolonlar (geosentetik kaplamalı ve kaplamasız) kullanılarak hazırlanan kolon-zemin kompozitleri üzerinde bir dizi büyük ölçekli doğrudan kesme testi yapılmıştır. Çalışmada; kolon malzemesinin türü (çelik cürufu ve kum), kolon çapı, kolon sayısı, kolon düzeni ve geosentetik kaplama uygulamasının, kolon-zemin kompozitlerinin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel bulgular, çelik cürufu kolonlarının kullanımı ile zemin sistemlerinin yanal yük taşıma performansında önemli ölçüde iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, hem endüstriyel atıkların yeniden kullanımına yönelik çevre dostu bir yaklaşım sunmakta hem de granüler kolon uygulamalarında alternatif malzeme kullanımı ile zemin iyileştirme yöntemlerine katkı sağlamaktadır [29].

Oluwasola ve diğerleri (2020) çalışmalarında, çelik cürufunun lateritik zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneler laboratuvar testlerine tabi tutulmuştur. Hem doğal numune hem de iyileştirilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler şunlardır: tane boyutu dağılımı, Atterberg limitleri, kompaksiyon, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı. Çalışma, çelik cürufu ile stabilize edilmiş lateritik zemin numunesinin optimum nem içeriğinin (OMC) doğal numuneye kıyasla azaldığını göstermektedir. Ayrıca, çelik cürufu artışının tutarlılık özelliklerinde bir azalmaya neden olduğu ortaya konmuştur. Bu durum, doğal zemin numunesine kıyasla zemin numunesinin plastisite indeksini ve büzülme sınırını azaltmaktadır. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) sonucu, doğal zemine kıyasla çelik cürufu yüzdesindeki artış nedeniyle CBR'de bir artış göstermektedir. Araştırma, çelik cürufu içeriği arttıkça serbest basınç dayanımında da bir

artış olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, lateritik zemine çelik cürufunun eklenmesi, geoteknik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmektedir [30].

Wang (1992), çalışmasında bazik oksijen cürufunun (BOS) kimyasal ve fiziksel özellikleri ile özellikle serbest kalsiyum oksit (F-CaO) içeriği ve bu bileşiğin neden olduğu hacimsel genleşme üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Araştırmacı, çelik cürufunda genleşmeye yol açan mekanizmaları teorik olarak incelemiş ve özellikle soğutulmuş katı BOS cürufunda MgO ve C_2S'nin kristal dönüşümünün genleşmeye anlamlı bir katkı sağlamadığını ifade etmiştir. Çalışmada, çelik cürufunun kararsızlığının temel nedeni olarak bağlanmamış kireç (F-CaO) belirlenmiş ve bu bileşiğe dayalı hacim genleşmesi ile gövde kuvveti için teorik hesaplamalar geliştirilmiştir. Wang, BOS cürufunun mühendislik uygulamalarında kullanımına yönelik çeşitli kabul edilebilirlik kriterleri önermiştir. Bu kriterler; F-CaO içeriği, genleşme özellikleri (hacim artışı ve iç gerilme) ve cürufu içeren matris malzemenin özelliklerine dayanmaktadır. BOS cürufunun yarı rijit matrislerde (örneğin yol temeli veya sıcak karışım asfalt betonları) kullanımı için teorik hacim genleşme hesaplamaları yapılmış ve bu hesapların laboratuvar verileri ile tutarlılığı gösterilmiştir. Araştırmada, belirli bir cüruf için F-CaO içeriğinin kritik değeri, daha önce önerilen ampirik verilerle büyük oranda örtüşmüştür. Bununla birlikte, cürufun kullanılacağı matrisin sınırlayıcı kuvvetine bağlı olarak bu kritik değerlerin değişebileceği vurgulanmıştır. Çelik cürufunun çimento betonundaki iri veya ince agrega olarak kullanımı için, genleşme stresine karşı betonun yapısal duyarlılığına dayalı teorik bir kabul kriteri sunulmuştur. Ayrıca, BOS cürufunun çimento klinkeriyle birlikte öğütülerek karıştırılmış çimentoda bir bileşen olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve öğütülme özelliklerinden bağımsız olarak izin verilebilir F-CaO sınır değerleri önerilmiştir. Deneysel çalışmalar, BOS cürufunun çeşitli uygulama türleri (örneğin: SSBC'de öğütülebilirlik, yol temellerinde hacim genleşmesi, beton uygulamalarında gövde kuvveti) özelinde performansını değerlendirmiştir. Bu bağlamda, BOS cürufunun belirlenen kriterlere uyduğu takdirde mühendislik uygulamaları için yeterli performans göstereceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu yaklaşımlar, çelik cürufunun optimum şekilde yeniden kullanımını sağlamayı mümkün kılarak iki temel fayda sunmaktadır:

- Endüstriyel yan ürünlerin inşaat sektöründe kullanımı sayesinde ekonomik tasarruf,

- Doğal kaynak tüketiminin ve atık bertarafının azaltılması yoluyla çevresel sürdürülebilirlik.

Ayrıca, bu yöntemlerin inşaat malzemelerinin mühendislik özelliklerini iyileştirme potansiyeli sayesinde, hem ekonomik hem de sosyal açıdan önemli değerler sunduğu belirtilmiştir [31].

Kumar ve Shukla (2023), çalışmaları kapsamında çelik cürufunun çeşitli inşaat uygulamalarındaki kullanımına ilişkin son gelişmeleri özetlemekte ve bu malzemenin, inşaat sektöründe geleneksel doğal agregalara alternatif olarak kullanılabilirliğini incelemektedir. Artan nüfus, sanayideki teknolojik gelişmeler ve ürün çeşitliliği, son yıllarda atık miktarında ve toksisitesinde önemli bir artışa neden olmuştur. Atık miktarının azaltılması ve geri dönüşüm yollarının değerlendirilmesi yönündeki çevresel baskılar, endüstriyel atıkların alternatif yapı malzemesi olarak kullanımına yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Bu bağlamda, yerel kaynakların tükenmesi ve taşımacılık maliyetlerinin yükselmesi, ekonomik açıdan uygun alternatif malzemelerin araştırılmasını gerekli kılmıştır. Çelik üretimi sırasında, özellikle elektrik ark ocağı (EAF) gibi fırınlardan büyük miktarda yan ürün olarak elde edilen çelik cürufu, kimyasal bileşimi ve üstün fiziksel-mekanik özellikleri sayesinde sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak dikkat çekmektedir. İnceleme çalışması, çelik cürufunun beton üretimi, tuğla, hafif agrega, seramik ve refrakter malzemeler gibi çeşitli yapı elemanlarında kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Çelik cürufu agregalarının, geleneksel kalker ve granit agregalarına kıyasla daha üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğu ve beton karışımlarında geleneksel iri agrega yerine kullanılabilecek yeterli potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çelik cürufu agregalarının daha yüksek özgül ağırlığa, yüksek sıcaklık bölgelerinde kullanılabilirliğe, daha iyi yüzey sürtünme katsayısına ve içsel sürtünme açısına sahip olduğu vurgulanmıştır. Asfalt karışımlarında çelik cürufu agregalarının kullanımı, daha yüksek stabilite ve daha düşük tekerlek izi oluşumu (rutting) gibi olumlu performans sonuçları vermiştir. İnce ferrokrom cürufu (FCS) katkısı, betonun sıcaklık stabilitesini iyileştirmekte, ancak iri taneli FCS agregalarıyla ilgili literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. FCS ince agregaları beton karışımlarında kısmen kullanılabilmekte, ancak tane boyutu dağılımındaki farklılıklar nedeniyle elde edilen sonuçlar tutarsız olabilmektedir. Ayrıca, FCS içeren beton karışımlarından sızan krom miktarının, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından belirlenen sınır değerlerin altında olduğu ve çevresel açıdan kabul edilebilir düzeyde bulunduğu belirtilmiştir [32].

Dayıoğlu ve arkadaşları (2023), çalışmaları kapsamında çelik cürufunun bağlı olmayan yol agregası olarak mekanik uygunluğunu değerlendirmiş ve performansını geleneksel dereceli agrega (GAB) malzemeleriyle karşılaştırmıştır. Bu amaçla, farklı yaşlanma özelliklerine sahip üç çelik cürufu numunesi ile farklı taş ocaklarından temin edilen beş doğal agrega numunesi kullanılarak karşılaştırmalı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, çelik cürufu ve doğal agregaların esneklik modülü ile kalıcı deformasyon davranışı incelenmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, çelik cüruflarının daha yüksek ince malzeme içeriği, daha düşük çakıl fraksiyonu ve daha yüksek optimum su muhtevasına sahip olmasına rağmen, esneklik modül değerlerinin GAB malzemeleri ile benzer aralıklarda olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çelik cürufu numunelerinin uzun süreli yüklemeler altında GAB malzemelerine kıyasla daha düşük plastik şekil değiştirme (kalıcı deformasyon) gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu da çelik cürufunun, özellikle uzun vadeli yükleme koşullarında, GAB'ye göre daha avantajlı olabileceğini ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca, hem saf çelik cürufu hem de bitüm kaplı cüruf parçacıklarının hızlandırılmış şişme testleri ile şişme potansiyelleri değerlendirilmiştir. Tüm çelik cürufu numunelerinin, yedi gün sonunda ASTM D2940 standardında belirtilen %0,5 şişme limitini aştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, önceki çalışmalardan farklı olarak, çelik cürufundaki yaşlanma sürecinin nihai şişme davranışı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, şişme davranışının daha çok yüzey alanı ve ince taneli fraksiyon gibi fiziksel parametrelerle ilişkili olabileceğini göstermektedir. Her ne kadar mekanik test sonuçları çelik cürufunun doğal agregaların yerine baz veya alt temel tabakası olarak kullanılabileceğini gösterse de, çalışmada ayrıca çevresel uygunluk açısından çelik cürufunun pH ve potansiyel kirletici içeriklerinin laboratuvar ve saha koşullarında değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [33].

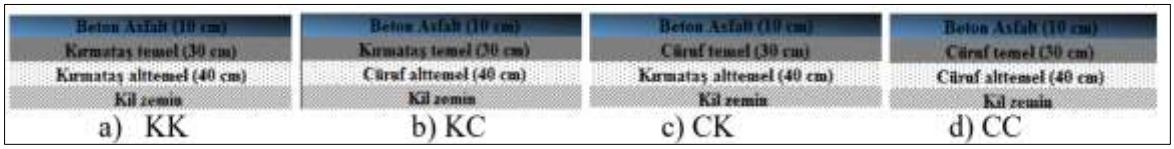
Özsoy ve diğerleri (2023) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, yol temel ve alttemel katmanlarında çelik cüruf kullanılarak yolun toplam düşey deformasyon değişiminin, doğal agrega kullanılan kesitlerle karşılaştırmalı bir şekilde incelendiği ifade edilmiştir. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplama tabakasının altında, 30 cm kalınlığında granüler bir temel, 40 cm kalınlığında alttemel katmanlar ve kilden oluşan taşıyıcı doğal zemin ile inşa edilen yol üst yapısı, 3D sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal analizlere tabi tutulmuştur (Şekil 2.4). Seçilen taşıt türünün lastik yerleşim planı dikkate alınarak yapılan 3D modelin dinamik ve statik analiz sonuçları, uygun model tasarımı ve doğru malzeme seçimi ile yol performansının artırılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, yol temel ve alttemel

katmanlarında çelik cüruf kullanıldığında tekrarlı trafik yükleri altında yapılan dinamik analizlerde düşey deformasyon değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, geogrid donatı katman sayısı ve yerleşim konumuna bağlı olarak çelik cürufu kullanılan kesitlerin emniyetli taşıma yükü değerlerinde %10-70 aralığında artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, yol katmanları arasında geogrid takviyelerin kullanılması sayesinde trafik yüklerinin daha geniş bir alana dağıtılarak yolun çekme dayanımının artırıldığını ve emniyetli taşıma yükünün yükseltildiğini göstermektedir. Çelik cüruflarının yol inşaatlarında agrega olarak kullanılmasıyla, atıkların düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesine yönelik ihtiyaç azalmakta; bu sayede doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesiyle sürdürülebilir bir sistemin sağlandığı ifade edilmektedir [34].



Şekil 2.4. Sayısal analizleri yapılan yol üst yapısı kesitleri

Karadağ ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, çelikhane cürufunun yol üst yapısında temel ve alttemel malzemesi olarak potansiyeli değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında kontrol kesiti olarak kırmataş temel ve kırmataş alttemel malzemeden oluşan bir yol kesiti analiz edilmiştir. Çelikhane cürufu, hem temel hem de alttemel katmanlarda birlikte ve ayrı ayrı kullanılmıştır. Toplamda dört farklı yol kesitinin, 400 kPa yük altında 20.111 tekrarlı yükleme ile iki boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak aksisimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Cürufun dinamik kayma modülünü belirlemek amacıyla rezonant kolon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel katmanlarında doğal agrega yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle cürufun alttemelde kullanıldığı KC kesiti, düşey deformasyonlar açısından en iyi performansı sergilemiştir (Şekil 2.5) [35].



Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan kesitler

Yıldırım ve Prezzi (2009), çalışmalarında farklı çelik üretim süreçlerinden elde edilen iki tür çelik cürufunun geoteknik mühendislik özelliklerini belirlemeyi ve bu cürufların alt zemin stabilizasyonu ile set inşaatındaki potansiyel kullanımını değerlendirmişlerdir. Araştırma kapsamında, taze ve yaşlandırılmış bazik oksijen fırını (BOF) cürufu ile taze elektrik ark fırını (EAF) cürufu örnekleri, özgül ağırlık, tane boyutu analizi, X-ışını kırınımı, sıkıştırma, maksimum ve minimum yoğunluk, büyük ölçekli doğrudan kesme, konsolide edilmiş drenajlı üç eksenli ve şişme testleri gibi çeşitli laboratuvar testleriyle karakterize edilmiştir. Ayrıca, çelik cüruflarının (BOF ve EAF) mühendislik özellikleri üzerindeki derecelendirmenin etkileri de incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, yaşlandırılmış BOF cürufuna %5 ve %10 oranında Sınıf-C uçucu kül eklenmiş, taze EAF cürufuna ise %5, %10 ve %20 Sınıf-C uçucu kül ilave edilerek çeşitli karışımlar oluşturulmuştur. Karışımların mukavemet kazanım özelliklerini değerlendirmek amacıyla farklı kürleme süreleri sonrası serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, taze ve yaşlandırılmış BOF cürufu ile %10 Sınıf-C uçucu kül karışımı ve taze EAF cürufu ile %5, %10 ve %20 Sınıf-C uçucu kül karışımı için uzun süreli şişme testleri yapılmıştır. Taze ve yaşlandırılmış BOF cürufuna %10 öğütülmüş kauçuk eklenmesinin, karışımların uzun süreli şişme davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. BOF cürufunun optimum nem içeriği %4-8, maksimum kuru birim ağırlığı ise 19,5-21,8 kN/m³ aralığında bulunmuştur. Büyük ölçekli doğrudan kesme testi sonuçlarına göre, taze ve yaşlandırılmış BOF cüruflarının kritik durum sürtünme açısı 45,3°-48,1° arasında ölçülmüştür. İzotropik olarak konsolide edilmiş drenajlı üç eksenli test (CIDTX) sonuçlarına göre, %90 bağıl sıkıştırmada hazırlanan yaşlandırılmış BOF cürufu örneklerinin tepe sürtünme açıları, sırasıyla 50, 110 ve 200 kPa etkili sınırlama gerilimlerinde 47,3°, 45,2° ve 43,5° olarak belirlenmiştir. EAF cürufunun optimum nem içeriği %10-13, maksimum kuru birim ağırlığı ise 16,8-20,0 kN/m³ aralığında bulunmuştur. Büyük ölçekli doğrudan kesme testi sonuçları, taze EAF cürufunun kritik durum sürtünme açısının yaklaşık 40,6° olduğunu göstermiştir. Sınıf-C uçucu külü ve BOF cürufunun yanı sıra, Sınıf-C uçucu külü ve EAF cürufunun sıkıştırılmış karışımları da zaman içinde mükemmel mukavemet kazanımı özellikleri sergilemiştir. Uzun vadeli şişme testleri, %10

Sınıf-C uçucu kül eklenmesinin, hem BOF hem de EAF cürufu numunelerinin şişmesini ihmal edilebilir seviyelere düşürdüğünü ortaya koymuştur [36].

Bu çalışmalar, çelik cürufunun geoteknik mühendislikte stabilize edici ve yapı malzemesi olarak kullanımına dair çeşitli araştırma ve incelemeleri içermektedir. Çelik cürufu, yol yapımı ve altyapı projelerinde çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmakta; araştırmalar, cürufun zemin iyileştirme ve stabilizasyon gibi farklı uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca araştırmalarda, çelik cürufunun çevresel ve mühendislik özelliklerini iyileştirme potansiyelini ve yol yapılarında sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanımını vurgulamaktadır. Çelik cürufları, agregalar oluşturmak için toz haline getirilip ezilerek işlenebilir ve çeşitli uygulamalara sahip olabilir. Değerlendirilen çalışmalar, cürufun kimyasal özelliklerinin uygulama alanını belirlediğini göstermektedir. Kireç, magnezyum, fosfor ve silisyum içeriği ne kadar yüksekse, cürufun asit iyileştirme malzemesi olarak kullanılma olasılığı da o kadar artmaktadır. Daha düşük kireç ve magnezyum içeriğine sahip cüruflar ise yol yapımı, betonlama, patikalar ve set inşaatı için tercih edilmektedir.

2.2. Geogrid İle İlgili Çalışmalar

Zemin stabilitesini artırmaya yönelik uygulamalarda, geosentetik takviyeler arasında yer alan geogridlerin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle yol üstyapılarında, tekrarlı yüklemelere maruz kalan alt temel sistemlerinde geogrid donatısı, taşıma kapasitesini artırmak ve kalıcı deformasyonları azaltmak amacıyla etkili bir çözüm sunmaktadır. Geogridler, agregalarla mekanik kilitlenme oluşturarak yapısal rijitliği artırmakta ve yük dağılımını daha homojen hâle getirmektedir. Literatürde, geogrid takviyesinin farklı granüler malzemelerle birlikte kullanıldığı sistemlerde performansı anlamlı ölçüde artırdığı ve deformasyon davranışını iyileştirdiği birçok çalışmada ortaya konmuştur. Aşağıda, geogrid katkısıyla yürütülen bazı temel çalışmalara ve bu çalışmaların mühendislik uygulamalarına katkılarına yer verilmektedir.

Suku ve çalışma arkadaşları (2017), asfaltlanmamış yol kesimlerinde geogrid takviyesinin performansa etkisini, özellikle temel tabakası kalınlığını azaltma potansiyeli açısından incelemişlerdir. Araştırma kapsamında, aşırı yüklemelere maruz kalan yol kesimlerinin dayanımını değerlendirmek amacıyla tekrarlı plaka yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler aracılığıyla, granüler temel içerisinde geogrid yerleştirilmesi için en uygun derinlik

belirlenmiş ve hem takviyeli hem de takviyesiz bölümlerin esnek deformasyon davranışları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, temel tabakasının esneklik modülünün tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca, geogrid kullanımının kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi detaylı biçimde değerlendirilmiş; tekerlek izinin (rut) derinliği üzerinden yapılan karşılaştırmalarla, geogrid takviyesinin deformasyonu azaltmadaki etkinliği ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, takviye uygulamasının alt zemindeki gerilmeleri nasıl azalttığı ve temel boyunca gerilme dağılımını nasıl etkilediği de araştırılmıştır. Sonuçlar, geogrid takviyesinin yalnızca performansı iyileştirmekle kalmadığını, aynı zamanda temel tabakasının kalınlığını azaltarak malzeme kullanımında ekonomik fayda sağladığını göstermiştir [37].

Alimohammadi ve çalışma arkadaşları (2021), geogridlerin yol yapılarında güçlendirme performansını değerlendirmek amacıyla Entegre Mobil Hızlandırılmış Test Sistemi'ni (IMAS) kullanmışlardır. Bu sistem, yaklaşık 1.52 metre çapında ve 0.91 metre derinliğinde rijit bir kutu ile otomatik yükleme çerçevesinden oluşmakta olup, çok sayıda döngüsel yükleme gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, farklı geogrid türleri, bu takviyelerin temel tabakası içerisindeki yerleşim konumları ve temel agrega kalınlıkları değiştirilerek toplamda sekiz farklı deney konfigürasyonu oluşturulmuştur. IMAS sistemi, bir kaldırım yapısının hizmet ömrü boyunca karşılaşacağı tekrarlı araç yüklerini simüle ederek temel sistemlerin uzun vadeli performansını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Elde edilen bulgular, geogrid takviyesinin kaldırım yapı sistemlerinin dayanımını ve deformasyon direncini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Özellikle çift eksenli ve üç eksenli geogridlerin, yükleme döngüleri sonunda oluşan kalıcı deformasyonu sırasıyla ortalama %47 ve %68 oranlarında azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek dayanımlı geogridlerin temel tabakası içerisinde düşük dayanımlı olanlara kıyasla en az 34.5 kPa (yaklaşık 5 psi) daha fazla basınç sağlayarak daha etkili bir kısıtlama oluşturduğu belirlenmiştir [38].

Jayalath ve çalışma arkadaşları (2021), kompozit geogrid (CGG) takviyesinin asfaltlanmamış yol kesimlerindeki yapısal performansa etkilerini incelemek amacıyla ölçekli bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 1.0 m uzunluğunda, 1.0 m genişliğinde ve 1.2 m yüksekliğinde bir çelik kutu kullanılmıştır. Deneylerde %2.5 CBR değerine sahip ıslatılmamış alt zemin 500 mm kalınlığa kadar yerleştirilmiş, bu tabakanın üzerine kompakte edilmiş granüler temel uygulanmıştır. Temel tabakası için 200 mm, 300

mm ve 400 mm olmak üzere üç farklı kalınlık kullanılmıştır. Hazırlanan kaplama modelleri, maksimum 550 kPa basınca kadar tekrarlı yüklemelere maruz bırakılmıştır. Elde edilen bulgular, 200 mm kalınlığındaki takviyeli temel tabakasının, 300 mm kalınlığındaki takviyeli ve takviyesiz bölümlere kıyasla daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, CGG takviyesinin alt zemindeki deformasyonu azaltmada ve özellikle zayıf zemin üzerinde yer alan ince granüler temel yapılarında düşey gerilmeleri hafifletmede etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak, temel kalınlığının artmasıyla birlikte takviyenin sağladığı avantajların azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, geogrid tabakasının rijit bir sınır gibi davranması ve yapısal başarısızlığın genellikle bu tabakanın üst kısmında meydana gelmesiyle açıklanmıştır [39].

Morto ve çalışma arkadaşları (2023), geosentetik takviyeli zeminler üzerine yapılmış önceki deneysel ve sayısal çalışmaları derleyen kapsamlı bir literatür incelemesi sunmuşlardır. Çalışmada, zeminlerin düşük çekme mukavemeti özelliklerinden yola çıkılarak, taşıma kapasitesinin artırılması, stabilitenin iyileştirilmesi ve oturma ile yanal deformasyonların azaltılması gibi zemin iyileştirme hedeflerine odaklanılmıştır. Bu bağlamda, polimer esaslı geosentetik malzemelerin zemin takviyesinde kullanımına ilişkin yöntemler değerlendirilmiştir. Geosentetik uygulamaları, geleneksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla hem zemin davranışını olumlu yönde etkilemekte hem de maliyetleri azaltma potansiyeline sahiptir. İnceleme kapsamında, özellikle statik yükler altında geogrid ile takviye edilmiş zeminlerde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ele alınmıştır. Değerlendirilen bulgular, kumlu zeminlerde düzlemsel geogrid takviyesinin hem monoton hem de kümülatif oturma miktarlarını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Bu iyileşmenin, temel sistemlerinin daha ekonomik ve verimli şekilde tasarlanmasına olanak sağladığı vurgulanmıştır [40].

Zheng ve çalışma arkadaşları (2021), zemin ve geosentetik malzemeler arasındaki etkileşim mekanizmasını incelemek amacıyla laboratuvar tabanlı bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir. Mevcut çalışmalardan elde edilen bulgular, geosentetik takviyenin esnek kaplama sistemlerinin performansını iyileştirdiğini; bu sayede temel tabaka kalınlıklarının azaltılabileceğini veya hizmet ömrünün uzatılabileceğini göstermektedir. Ancak araştırmacılar, literatürde yer alan çalışmalar arasında kapsamlı karşılaştırmaların yetersiz kaldığını vurgulamışlardır. Bu eksiklikten yola çıkarak yapılan inceleme, geogrid takviyesinin performansa katkılarının çeşitli parametrelerle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu parametreler arasında geogrid malzemesinin sertliği ve geometrik

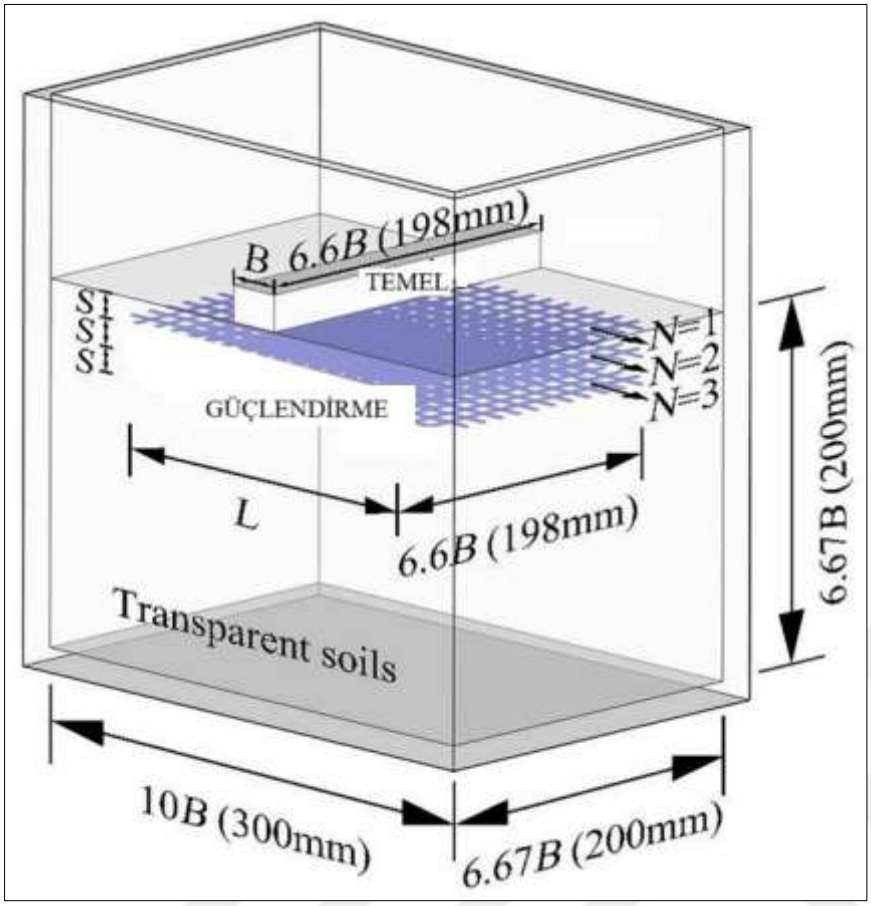
özellikleri, takviyenin temel içerisindeki yerleşim derinliği, asfalt ve agreganın kalınlığı ile alt zeminin rijitliği yer almaktadır. Yazarlar, incelenen deneysel veriler ışığında Granüler Eşdeğer (GE) faktörünü tahmin etmeye yönelik regresyon tabanlı bir model geliştirmiştir. Bu model, AASHTO 1993 tasarım metoduna dayalı olarak yürütülen laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçların geriye dönük hesaplamalarıyla oluşturulmuştur. Takviyeli ve takviyesiz kesitlerin eşdeğer temel kalınlıkları karşılaştırılarak GE faktörü üzerinden değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, geogridlerin yapısal katkılarını sayısal olarak ifade edebilmek, bu katkıları kullanarak çakıl ve/veya asfalt tabaka kalınlıklarını optimize etmek ve böylece bakım maliyetlerini azaltırken hizmet ömrünü artırmaktır. Elde edilen sonuçlar, uygun yerleştirilmiş geogridlerin kaldırım tasarımlarına entegre edilmesinin proje bazında önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir [41].

Sharbaf ve Ghafoori (2021) tarafından yürütülen çalışmada, delinmiş ve çekilmiş iki farklı geogrid türü kullanılarak güçlendirilmiş esnek kaplamaların, yol temel tabakası kalınlığını azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, çelikten imal edilmiş silindirik bir kalıp içinde toplam altı laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, test kesitlerinin çeşitli noktalarına yerleştirilen basınç hücreleri ile yükleme sisteminin üzerine konumlandırılan doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT) aracılığıyla deformasyon ve gerilme verileri toplanmıştır. Döngüsel yüklemeler, 305 mm çapındaki dairesel bir çelik plaka aracılığıyla, 0.77 Hz frekansında ve 40 kN büyüklüğünde bir hidrolik aktüatör ile uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, her iki geogrid türünün de kullanılmasıyla esnek kaplama sisteminde yüzey izlerinin ve alt zemin ile temel tabakası arasındaki düşey gerilmelerin azaldığını ortaya koymuştur. İz derinliği analizlerine göre, geogrid takviyesi; kullanılan geogrid tipine, kesit özelliklerine ve uygulanan yük düzeylerine bağlı olarak, yükleme çevrim sayısını 1.5 ila 7.5 katına kadar artırmıştır. Ayrıca, düşey gerilme verileri üzerinden hesaplanan temel tabaka indirgeme değerleri, güçlü zemin koşullarında geogrid kullanımının temel tabakası kalınlığını yaklaşık %7 oranında azaltabildiğini göstermiştir [42].

Gunasekara (2021), Queensland, Avustralya'da yerel malzemelerle inşa edilen asfaltlanmamış yol platformlarında geogrid ve geokompozit takviyesinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada önce kullanılan alt zemin, temel ve takviye malzemeleri karakterize edilmiş; kompozit geogrid

(CGG) numunelerinin geniş enli çekme testleri ve alt zemin ile temel malzemesinin çevrimsel yük altında davranışı tekrarlı yükleme üç eksenli (RLT) testleri ile incelenmiştir. Küçük ölçekli deneyler (305 mm çap, 510 mm yükseklik) ve büyük ölçekli kaplama modelleri (1.0 m × 1.0 m × 1.2 m) üzerinde yapılan çevrimsel yüklemeler (550 kPa, 0.33 Hz), %2.5 CBR alt zemin ve %91 sıkışma derecesine sahip temel malzemesi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, CGG takviyesinin, özellikle 200 mm kalınlığındaki temel tabakası ile kullanıldığında, çift eksenli geogridlere kıyasla daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Bu derinliğin altındaki ilk geogrid yerleşimlerinin ise deformasyon davranışını olumsuz etkileyebileceği belirlenmiştir. RLT testleri, alt zeminin esneklik modülünün (M_R) 27–57 MPa arasında değiştiğini ortaya koymuş ve yük tekrarlarına bağlı olarak geliştirilen kurucu model ile M_R tahminleri yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, CGG takviyeli 200 mm granüler temel tabakasının, CBR ≥ %3 olan asfaltlanmamış zeminler için 150.000 eşdeğer standart aks yüküne kadar uygun olduğu önerilmiştir [43].

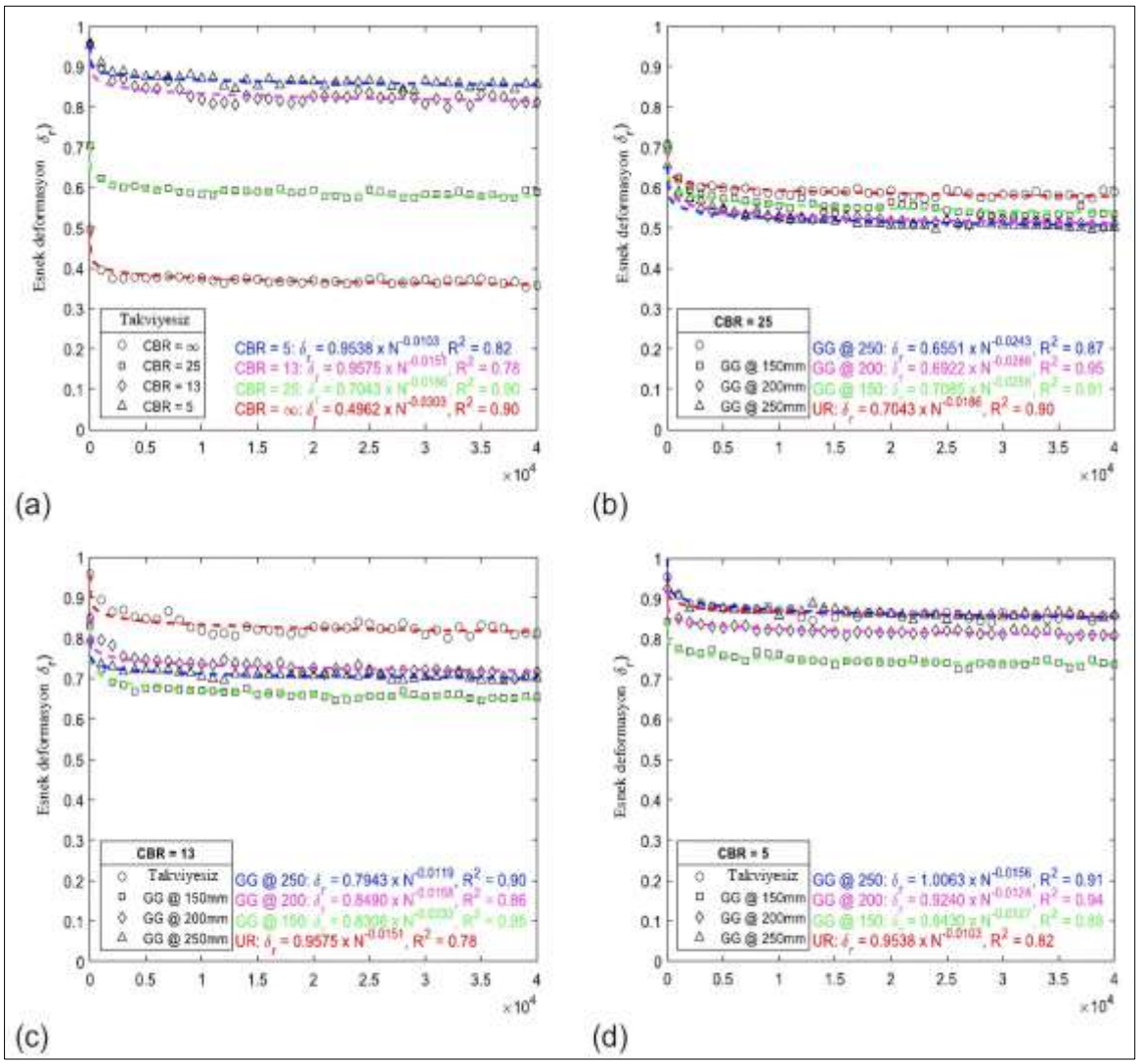
Gao ve çalışma arkadaşları (2022), farklı türdeki geogridlerin (tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli) ve çeşitli takviye katmanı sayıların (N = 1, 2, 3) temel davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla küçültülmüş ölçekli şeffaf zemin model testleri gerçekleştirmiştir (Şekil 2.6). Çalışmada, temel deformasyonlarının detaylı şekilde analiz edilebilmesi için lazer verici ve dijital kamera kullanılarak elde edilen görüntüler, dijital görüntü işleme teknikleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, üç eksenli geogrid ile takviye edilen temellerin, tek eksenli ve çift eksenli geogrid takviyeli temellere kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Temel oturması sırasında kayma çatlaklarının ve yüzey kabarmasının, zemin içerisindeki yatay ve düşey yer değiştirmelerin aşağıdan yukarıya doğru yayılımıyla kademeli olarak geliştiği gözlemlenmiştir. Yerel kesme hasarı öncelikle temel tabanında ortaya çıkmakta ve ardından genel kesme hasarına dönüşmektedir. Bu çalışma, geogrid takviyesi altında toprak yer değiştirmesinin yayılım mekanizmasını görsel ve nicel olarak ortaya koymakta; ayrıca, şerit temel yüklemeleri altında geogrid takviyesinin mikroskobik ölçekteki etkilerini de açıklamaktadır [44].



Şekil 2.6. Geogrid ile takviye edilmiş temel modelinin şematik diyagramı

Desbrousses ve diğerleri (2023), demiryolu balast sistemlerinde geosentetiklerin stabilizasyon performansı üzerindeki alt zemin dayanımı ve geogrid yerleşim derinliğinin etkilerini değerlendirmek amacıyla büyük ölçekli döngüsel yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, geogrid içermeyen ve sırasıyla 150 mm, 200 mm ve 250 mm derinliklere yerleştirilen geogrid ile takviye edilmiş bağ–balast düzenekleri üzerinde toplam on üç deney yapılmıştır. Deney sonuçları, geogrid ile takviye edilen sistemlerin performansının, bu sistemleri destekleyen alt zeminin sıkıştırılabilirliğine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Yeterli taşıma gücüne sahip alt zeminler üzerinde, geogrid yerleşim derinliğinin etkisi sınırlı kalmakta; ancak alt zemin zayıfladıkça, geogrid konumu performans üzerinde daha belirleyici hâle gelmektedir. Özellikle yükleme yüzeyine daha yakın yerleştirilen geogridlerin, daha derin konumlandırılanlara kıyasla daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, geogridlerin bağın kalıcı ve elastik oturma davranışlarını iyileştirdiği; ancak sönümleme oranı üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı ifade edilmiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere, çevrim sayısı ile birlikte esnek deformasyon değerinde meydana gelen azalma, özellikle yumuşak zeminlerde ve yüzeye yakın

yerleştirilen geogrid konfigürasyonlarında daha belirgindir. Bu durum, alt zemin ile geogrid etkileşiminin performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir [45].



Şekil 2.7. Geogrid ile takviyeli ve takviyesiz katmanlardaki esnek deformasyonundaki varyasyonlar

Javdanian ve Gohari (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geogrid ile takviye edilmiş zemin yamaçlarının sismik davranışları, sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal modellemenin doğruluğu, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri ile desteklenerek güçlendirilmiş yamaçların dinamik tepkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı deprem kayıtları altında, donatı katmanlarının geometrik düzenlemesi ve çekme dayanımının zemin yamaçlarının kalıcı sismik yer değiştirmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, geogridlerin çekme dayanımının akma ivmesi (yield acceleration) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen kalıcı yer

değiştirme değerleri mevcut yöntemlerle karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Son olarak, geogrid takviyesinin ivme büyütme (acceleration amplification) üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, donatı katmanlarının çekme dayanımındaki artışın akma ivmesini artırdığını; ancak bu artışın belirli bir noktadan sonra azalan bir eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur [46].

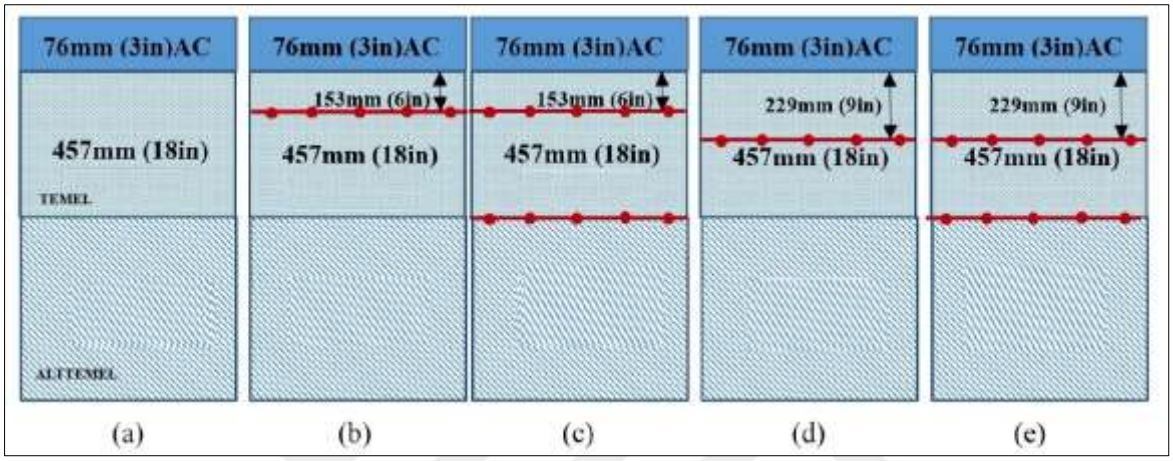
Kumar ve diğerleri (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, mikrokazık, geocell ve geogrid sistemlerinin entegre biçimde kullanıldığı mühendislik ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir yamaç stabilizasyon yöntemi önerilmiştir. Araştırma, Nepal'in Katmandu kentinin güneybatısında yer alan Chandragiri Tepesi'ndeki aktif bir yamaç kayması alanında yürütülmüştür. Saha verilerine dayanarak, geoteknik sorunlar Phase-2 yazılımı kullanılarak sayısal analizlerle değerlendirilmiş; geocell temelleri, mikrokazık sistemleri ve geogrid donatılarının tasarımları bu kapsamda ele alınmıştır (Şekil 2.8). Sayısal analiz sonuçları, bu üç sistemin birlikte kullanımının yamaç stabilitesini anlamlı düzeyde artırdığını göstermiştir. İnşa edilen sistemde, her biri 3,8 metre yüksekliğinde olan geocell yerçekimi duvarları belirli adımlarla yerleştirilmiş; bu duvarların altına, granüler malzeme ile doldurulmuş çok katmanlı geogrid uygulamaları entegre edilmiştir. Ayrıca, geocell duvarı iç kısımdan mikrokazıklarla desteklenerek, bu kazıklar hem ankraj hem de taşıyıcı eleman işlevi görmüş ve eğimdeki kayma riskine karşı ek güvenlik sağlamıştır [47].



Şekil 2.8. a) Mikrokazık kurulumu, b) Geocell duvar, c) Eğimli alanda mikrokazık içine geogrid yerleştirilmesi ile dolgu malzemeleri zemin stabilizasyonu, d) Mikrokazık içine geocell duvarın yerleştirilmesi

Jasim ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, zayıf alt zeminler üzerine inşa edilen asfaltlı ve asfaltlı olmayan yolların performansını artırmak amacıyla geosentetik malzeme önerilmiştir. Bu araştırmanın iki ana hedefi bulunmaktadır. İlk olarak, alt zemin üzerinde inşa edilen geleneksel esnek yolların güçlendirilmesinde geogridin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. İkinci olarak, bir yol sisteminde geogrid entegrasyonu için en uygun konumun belirlenmesi hedeflenmiştir. Esnek yol yapılarında geogridin etkinliğini ölçmek için kalın tabanlı yol yapısı kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yollarda geogridin en iyi yerleştirilme konumunu belirlemek için iki farklı geogrid konumu uygulanmıştır. Önerilen yol yapılarında, geogrid konumları değiştirilirken sabit bir yükleme koşulu sağlanmıştır (Şekil 2.9). Bu süreç, geogridin yol performansındaki etkisini, örneğin bağlı olmayan katmanlarda uzunlamasına ve enine kesme

deformasyonunun azaltılmasını göstermiştir. Çalışma sonucunda iki önemli bulgu elde edilmiştir. İlk olarak, yol performansı, tabakanın üst üçte birine yerleştirilen tek bir geogrid tabakası ile iyileştirilebilmektedir. İkinci olarak ise, yapısal kararlılığa ulaşmak için alt tabaka ve taban tabakası arayüzünün bir geosentetik stabilizasyon tabakası gerektirebileceği sonucuna varılmıştır [48].



Şekil 2.9. Geogrid konumlarına göre zemin yapısı

Hao ve diğerleri (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, şerit temel altında yeni bir yatay-düşey (H-V) geogrid takviyeli temelin taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi amacıyla, sürtünme ile zemin ve H-V geogridinin yatay düzlemi arasındaki kilitleme mekanizmalarını ve H-V geogridin düşey düzlemdeki sınırlamalarını içeren teorik bir çözüm önerilmiştir. Bu teorik çözümde, denklemin girdileri zemin özellikleri (örneğin, birim ağırlık, zemin içsel sürtünme açısı, Terzaghi'nin taşıma kapasitesi katsayısı) ve H-V geogrid özellikleri (örneğin, çekme dayanımı, geometri, açıklık boyutu ve geogridin boyutu) yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, teorik denklemin H-V geogridinin ve geleneksel geogrid takviyeli temelin taşıma kapasitesini doğru bir şekilde tahmin ettiğini ortaya koymuştur. Geleneksel geogridlerden farklı olarak, H-V geogridinin düşey bileşeni etkili bir zemin direnci sağlamıştır. H-V geogridin düşey eleman yüksekliği 0'dan 0,04 m'ye yükseltildiğinde, H-V geogrid temelinin taşıma kapasitesi geleneksel geogrid takviyeli temele kıyasla yaklaşık 1,44 kat artış göstermiştir. Düşey eleman aralığı, şerit temel genişliğinin 1,60 katından 1,33 katına düşürüldüğünde ise, taşıma kapasitesi geleneksel geogrid takviyeli temele göre 1,20 katından 2,63 katına çıkmıştır [49].

Wu ve diğerleri (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geogrid takviyesinin bağlanmamış granüler kaplama temel malzemeleri üzerindeki etkileri, yüklü tekerlek test cihazı (LWT) kullanılarak incelenmiştir. LWT testinde, sıkıştırılmış temel tabakası numunesi, gerçek durumu simüle etmek amacıyla LWT'nin uyguladığı tekrarlayan tekerlek yükleri altında test edilmiş ve temel numunesinin tekerlek izi derinlikleri, yükleme yolu boyunca ölçülmüştür. Farklı açıklık ve sertlik özelliklerine sahip dört tip geogrid, nehir kumu ve çakıl temel tabakası ile birlikte test edilmiştir. LWT testlerinin etkinliğini doğrulamak için, aynı geogrid ve temel malzemeleri üzerinde karşılaştırma amaçlı yaygın olarak kullanılan döngüsel plaka yükleme testleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, geogrid takviyesinin potansiyel faydalarını değerlendirmek amacıyla üç teknik indeks kullanılmıştır: Trafik Fayda Oranı (TBR), Tekerlek İzi Azaltma Oranı (RRR) ve Sapma Oranı (ROD). LWT testlerinden elde edilen sonuçların, genel olarak döngüsel plaka yükleme testlerinden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu bulunmuştur. Bu durum, LWT testinin farklı geogrid ve temel tabaka kombinasyonlarının takviye etkilerini karakterize etmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Çalışmada önerilen ilgili teknik indeksler, geogrid takviyesi bulunan ve bulunmayan numuneler üzerinde de geçerli olmuştur. Hem LWT hem de döngüsel plaka yükleme testleri, geogrid takviyeli temel tabakalarının, geogrid takviyesi bulunmayan temel tabakalarına göre tekerlek izi direncinde önemli bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur [50].

Tawati (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geogridlerin asfaltlanmamış yollardaki etkinliği ölçülmüş, güçlendirme mekanizmaları değerlendirilmiş ve hangi geogrid özelliklerinin performans iyileştirmesiyle doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, geogrid açıklık şekli, geogrid çekme modülü ve temel kurs tabakasının kalınlığı gibi değişken parametreler kullanılarak on adet tam ölçekli asfaltlanmamış yol test bölümü oluşturulmuştur. Test bölümlerinden beşi 200 mm nominal temel tabaka kalınlığı ile, diğer beşi ise 250 mm nominal kalınlık ile inşa edilmiştir. Her bir temel tabaka kalınlığı için, performanslarını değerlendirmek amacıyla dört test bölümü farklı geogridlerle güçlendirilirken, bir test bölümü güçlendirilmemiştir. Geogridler, dokusuz bir geotekstil ayırıcının üstündeki alt zemin-temel tabakası arayüzüne yerleştirilmiştir. Trafik yükü, tek dingilli damperli kamyon kullanılarak uygulanmıştır. Her bir test bölümünün performansını değerlendirmek için tekerlek izi derinliği ve yüzey deformasyonu ölçümleri alınmıştır. Ayrıca, test bölümleri trafik yükü altında yol tepkisini ölçmek amacıyla cihazlandırılmıştır. Dinamik ve kalıcı geogrid gerilmeleri, geogrid kaburgalarına takılı folyo gerilme ölçerlerle

ölçülmüştür. Alt zemine aktarılan dinamik ve kalıcı düşey gerilmeleri ölçmek için alt zemin katmanının tepesine toprak basınç hücreleri yerleştirilmiştir. Ölçülen performans, geogridlerin yüzeydeki izleri etkili bir şekilde azalttığını ve alt zemine aktarılan dinamik düşey gerilmeleri azalttığını göstermiştir. Elde edilen trafik fayda oranı 3,6'ya kadar çıkmış ve taban katmanı kalınlığında %6 ile %25 arasında azalmalar gözlemlenmiştir; daha sert geogrid ve daha küçük taban katmanı kalınlığı için daha yüksek fayda değerleri elde edilmiştir. Performanstaki iyileşmenin, %2'lik çekme dayanımı ve çapraz makine yönündeki birleşim dayanımı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Geogrid gerilme verileri, geogridin yol boyunca sürekli gerilim altında olmadığını ortaya koymuştur. Saha test sonuçları, kesme dirençli arayüz veya yanal kısıtlama mekanizmalarının geçerliliğini açıkça desteklemiştir [51].

Jayalath ve diğerleri (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 305 mm çapında ve 520 mm yüksekliğinde dairesel bir kalıp kullanılarak, güçlendirilmemiş ve geogrid takviyeli asfaltlanmamış yolların iz bırakma performansını değerlendiren bir dizi küçük ölçekli döngüsel yükleme testinin sonuçları sunulmuştur. Test aparatı, literatürde bildirilen daha büyük kutu testlerine kıyasla daha az çabayla daha fazla sayıda test yürütme kapasitesine sahip olup, daha iyi istatistiksel güvence sağlamaktadır. Bu döngüsel yükleme testleri, seçilen geogrid takviye türlerini (kompozit veya çift eksenli) granüler tabakanın içine ve/veya taban-alt zemin arayüzüne yerleştirerek, farklı kalınlıklarda granüler bir taban üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, taban-alt zemin arayüzüne yerleştirilen geogrid takviyesinin, granüler taban kalınlığı ince olduğunda kalıcı dikey deformasyonu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, granüler tabanın ortasında yer alan çift eksenli geogridin, taban-alt zemin arayüzüne yerleştirilen kompozit veya çift eksenli geogrid ile karşılaştırıldığında tekerlek izi derinliğini azaltmada daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Geogrid takviyesinin potansiyel faydaları, taban kalınlığındaki artışla azalmaktadır; çünkü takviye, rijit bir sınır işlevi görmekte ve üst tabakada hasar oluşumuna neden olmaktadır. Asfaltlanmamış granüler döşemelerde daha iyi rut direnci sırasıyla çift donatıda, ardından granüler tabanın ortasında çift eksenli geogridde, ardından granüler tabanın ortasında kompozit geogridde, daha sonra taban-alt zemin ara yüzünde kompozit geogridde ve en son taban-alt zemin ara yüzünde çift eksenli geogridde gözlemlenmiştir. Bu deneysel çalışmanın bulguları, test sayısını optimize ederek gelecekteki araştırmalar için büyük ölçekli döngüsel yükleme laboratuvarı veya saha testleri tasarlama ve planlamada

kaldırım araştırmacıları için faydalı bir kaynak sunmaktadır. Bu sayede gerekli malzeme miktarının, maliyeti ve çabayı azaltabileceği söylenebilir [52].

3. KARAYOLU ÜSTYAPI TASARIMI VE GÖZLENEN YAPISAL HASARLAR

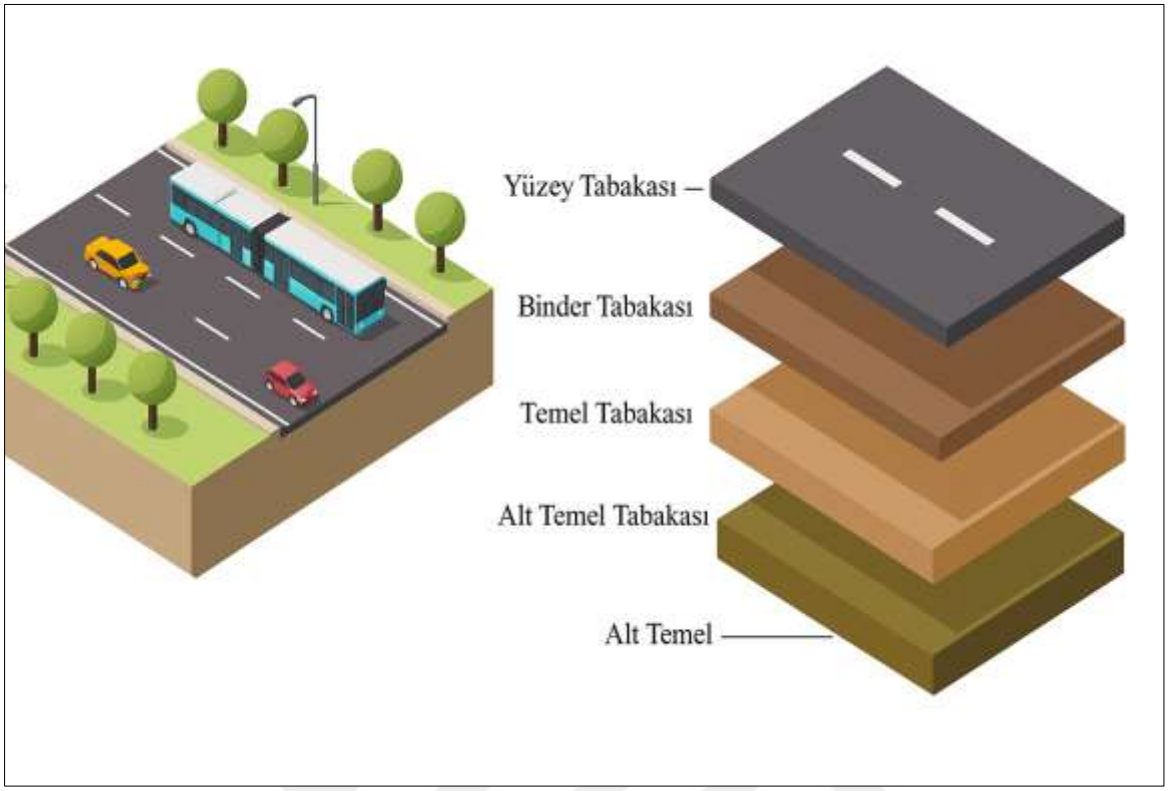
Bu bölümde, karayolu üstyapılarının tasarım esasları ile birlikte hizmet süresi boyunca karşılaşılan yapısal hasar türlerine değinilecektir. Üstyapı tasarımında dikkate alınan parametreler, trafik yükleri ve çevresel koşulların yapısal performansa etkisi ele alınırken; çatlama, oturma, yüzey bozulmaları gibi yaygın hasar mekanizmaları literatür doğrultusunda değerlendirilecektir.

Yol kaplamaları, iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Rijit ve esnek. Rijit kaplamaların aşınma yüzeyi genellikle portland çimento betonu kullanılarak inşa edilir ve bu sayede altındaki taşıyıcı malzemedeki düzensizliklere karşı kiriş benzeri bir yapı oluşturulur. Diğer taraftan, esnek kaplamaların aşınma yüzeyi genellikle bitümlü malzemelerden yapılmakta olup, küçük düzensizlikler oluştuğunda dahi altındaki malzeme ile sürekli temas halinde bırakılır [53].

Genel olarak, esnek kaplamalar bir bitümlü yüzey, bunun altında yer alan bir granüler malzeme katmanı ve bir ince malzeme katmanından oluşur. Rijit kaplamalar ise Portland çimento betonu kullanılarak inşa edilir ve alt temel ile beton yüzeyi arasında bir temel tabakasının bulunup bulunmaması durumu söz konusu olabilir [54].

3.1. Esnek Bir Kaplamanın Yapısal Bileşenleri

Esnek kaplamalar, altyapı (hazırlanmış yol tabanı), alt temel, temel ve aşınma yüzeyinden oluşur (Şekil 3.1). Aşınma yüzeyi, sıcak karışım asfalt ile yapıldığında daha sert hale gelir ve kaplamanın dayanımına daha fazla katkıda bulunur.



Şekil 3.1. Tipik bir esnek kaplama yapısında bulunan katmanlar

3.1.1. Altyapı

Kaplamanın yatay hizası boyunca yer alan doğal malzemedir (kaplama yapısının temeli olarak hizmet eder). İnşa edilen kaplama tipine bağlı olarak, istenilen dayanım özelliklerine ulaşmak için altyapı malzemesinin işlenmesi gerekebilir. Altyapı:

- Yol kaplama katmanlarına temel olarak hizmet eder ve uniform bir destek sağlar.
- Kaplamanın tüm yükünü ve trafik hizmet yükünü taşır.

3.1.2. Alt temel tabakası

Altyapının hemen üzerinde yer alan alt temel bileşeni, genellikle altyapı inşasında kullanılan malzemeden daha üstün kalitede bir malzemeden oluşur. Eğer altyapı malzemesinin kalitesi alt temel malzemesi gereksinimlerini karşılıyorsa, alt temel bileşeni ihmal edilebilir [53]. Alt temel malzemesi gereksinimlere uymadığında, stabilizasyon olarak bilinen ve mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla zeminleri işleme süreci kullanılabilir. Aslında, mevcut malzeme gerekli özelliklere ulaşmak için başka malzemelerle işlenmelidir.

Alt temel tabakanın pek çok işlevi vardır:

- Altyapının taşıma kapasitesini artırmak ve temel tabaka ile aşınma tabakasının yük dağılımını iyileştirmek.
- Alt temel tabakası, ayrıca ince sınıflanmış altyapı zemininin temel tabakaya girmesini engeller.
- Suyun kapiler yükselmesini önler ve kaplamaya giren suyun serbest drenajını sağlar.
- Alt temel malzemesi, biriken suyu toplamak ve uzaklaştırmak için uygun sistemlere sahip, suyu kolayca drenaj eden bir yapıda olmalıdır.
- Ayrıca altyapıyı don olaylarına karşı korur ve kaplamanın yüksekliğini, doğal su tablasıyla hizalamaya yardımcı olur.

3.1.3. Temel tabakası

Temel tabakası, alt temel tabakasının üzerine (alt temel tabakası kullanılmıyorsa altyapının üzerine) yerleştirilir. Kum, kırma taş, kırılmış veya kırılmamış çakıl ve kırılmış veya kırılmamış cüruf gibi granüler malzemelerden oluşur. Genellikle, temel tabakası malzemeleri, alt temel tabakası için belirlenen gereksinimlerden daha sıkı standartlara sahiptir. Bazı durumlarda, ağır hizmet kaplamalarının sertlik özelliklerini artırmak için temel tabakası asfalt veya portland çimentosu ile işlenebilir.

Temel tabakasının özellikleri:

- Yol kaplamasının temeli olarak görev yapar ve trafik yükünü güvenli bir şekilde alt temel ve altyapıya iletir.
- Trafik etkisi nedeniyle yüksek kesme gerilmelerine dayanır.
- Altyapının doğrudan üzerine inşa edildiğinde, istenmeyen altyapı toprağının kaplamaya girmesini engeller.

3.1.4. Aşınma tabakası

Aşınma tabakası, temel tabakanın hemen üzerinde bulunan kaplama kesitinin üst katmanıdır. Esnek kaplamalarda aşınma tabakası genellikle mineral agregalar ve asfaltik malzemelerin

karışımından oluşur. Kaplamanın bozulma sürecini hızlandırabilecek çeşitli faktörlere dayanabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Aşınma tabakası:

- Düzgün ve uniform bir rijit yüzey sağlar.
- Trafikten kaynaklanan aşındırıcı kuvvetlere karşı dayanıklıdır.
- Toz rahatsızlığını önler.
- Kaplamanın yapısal bir bileşeni olarak görev yapar [54].

Farklı yol yüzeyi türleri kullanılsa da, tüm bileşenler yol sistemini oluşturur ve bu bileşenlerden herhangi birinin doğru bir şekilde tasarlanmaması veya inşa edilmemesi, sistemin hizmet verimliliğinin azalmasına veya erken arızalanmasına neden olabilir.

Bozulma, hizmet verimliliğini azaltan veya yapısal bozulmayı gösteren koşulları ifade eder. Arıza, görece bir terimdir. Arıza, bir yol kesiminin, performans süresi boyunca beklenenden fazla çökme veya çatlama yaşaması ya da performans süresi boyunca herhangi bir zamanda yolun bir bölümünün yapısal olarak hasar görmesi durumunda ortaya çıkar.

Bir yol kesiminin arızalanabileceği birçok durum vardır ve yol bozulması ve arızası için birçok neden bulunmaktadır. Yoder ve Witczak (1975), iki tür yol bozulması veya arızası tanımlar. İlk tür, yapısal arızadır; bu durumda, yapının tamamının çökmesi veya bir veya daha fazla yol bileşeninin bozulması, yolun yüzeyine uygulanan yükleri taşıyamaz hale gelmesine yol açar. İkinci tür arıza, fonksiyonel arızadır; bu durumda yol, pürüzlülüğü nedeniyle sürücüleri veya yolcuları rahatsız etmeden veya araçlar üzerinde yüksek gerilimler oluşturmadan amacını yerine getiremez. Bu arıza koşullarının nedenleri arasında yetersiz bakım, aşırı yükler, iklimsel ve çevresel koşullar, kötü drenaj sonucu oluşan zayıf alt zemin koşulları ve bileşen malzemelerinin parçalanması sayılabilir. Aşırı yükler, yüklerin aşırı tekrarı ve yüksek lastik basınçları, yapısal veya fonksiyonel arızalara neden olabilir.

Yol arızaları, alt zeminlerinin granüler temel içine girmesi sonucu yetersiz drenaj ve azalmış stabilite ile de meydana gelebilir. Bozulma, zemin, temel katman veya yüzeyde kayma arızasına neden olan aşırı yüklerden de kaynaklanabilir. Diğer arıza nedenleri, yüzey yorgunluğu ve aşırı oturma, özellikle alt zeminin diferansiyel oturmasıdır. Alt zeminde ıslanma ve kuruma, donma ve çözülme veya yetersiz drenaj gibi durumlar nedeniyle hacim

değişiklikleri, yol bozulmasına neden olabilir. Temel ve alt zemin suyunun yetersiz drenajı, yol problemlerinin başlıca nedenlerinden biridir. Eğer alt zemin doygun hale gelirse, trafik yükleri altında fazla boşluk suyu basınçları gelişir ve bu da alt zemin yumuşamasına yol açar. Dinamik yük altında, ince taneli zeminler, alt temel ve/veya temele doğru pompalanabilir.

Yanlış inşaat uygulamaları da yol bozulmasına neden olabilir. İnşaat sırasında alt zemin ıslaklığı, su birikimine ve inşaat tamamlandıktan sonra çökme bölgelerinde alt zemin yumuşamasına yol açabilir. Kirli agrega kullanımı veya temel agregaların inşaat sırasında kirlenmesi, yetersiz drenaj, istikrarsızlık ve donma hassasiyeti oluşturabilir. Yetersiz alt zemin hazırlığı nedeniyle inşaat sırasında tasarım kalınlığının azaltılması, dalgalı alt zemin yüzeyleri, uygun katman kalınlıklarının yerleştirilmemesi ve alt zemin girişi nedeniyle temel malzemelerin beklenmedik kaybına yol açabilir.

Yoder ve Witczak (1975), yol bozulmasının önemli bir nedeninin inşaat sırasında nitelikli mühendisler ve teknikerler tarafından yetersiz gözlem ve saha kontrolü olduğunu belirtmektedir. İnşaat tamamlandıktan sonra, yanlış veya yetersiz bakım da yol bozulmasına yol açabilir. Yüzey su sızmasını önlemek için çatlak ve derzlerin uygun aralıklarla kapatılması gerekir. Kenarların bakımı da yol performansını etkiler.

Yol performansını ölçen hemen hemen tüm önlemler, yolun yüzeyindeki gözlemlere dayanmaktadır; örneğin, yüzey çökmesi, asfalt veya düz çimento betonu çatlakları, sürüş kalitesi gibi. Bu yüzey bozulmalarının bazıları doğrudan asfalt veya yüzey katmanlarındaki eksikliklerden kaynaklanırken, çoğu durumda bu bozulmalar en azından kısmen altındaki bağlı olmayan katmanlardaki eksikliklerden kaynaklanmaktadır. Yol tasarımı, nihayetinde yol bozulmalarını en aza indirmeyi ve böylece yol performansını maksimize etmeyi amaçladığı için, zemin mekaniği faktörlerinin bu bozulmaları nasıl etkilediğini anlamak önemlidir.

Birçok yol bozulması için baskın zemin mekaniği faktörü, bağlı olmayan malzemelerin sertliği ve/veya dayanımıdır. Gerçekte, iyi tasarlanmış bir hizmetteki yol üzerinde oluşan gerilmeler, bağlı olmayan malzemelerin arıza dayanımının oldukça altındadır. Bu nedenle, bağlı olmayan yol malzemeleri için gerçek dayanım parametreleri (yani, üç eksenli testlerden elde edilen kohezyon ve sürtünme açısı) genellikle gerekli değildir veya ölçülmez.

California Taşıma Oranı (CBR) gibi dayanım indeksleri, geçmişte sertlik ve kalıcı deformasyona karşı direnç açısından malzeme kalitesinin genel bir göstergesi olarak yaygın bir şekilde ölçülmüştür. Daha güncel eğilimler, bu kalite indekslerini, doğrudan sertlik testi ile esneklik modülü (M_R) ile değiştirmektedir [55-56].

Bu bölümde, performans süresinden önce erken arızaya neden olabilecek birçok faktörün bulunduğu ve bu faktörlerin çoğunun geoteknik sorunlarla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu sorunlar aşağıda kısaca tanımlanmıştır.

Yorgunluk çatlağı

Bu bozulma türü, tekrarlayan yükleme sonucunda yol yüzeyinde çatlakların oluşmasıdır. Esnek kaplamalarda teker izlerinde boyuna veya timsah derisi şeklini andıran bir desende (birbirine bağlı veya iç içe geçmiş çatlaklar) timsah çatlağı olarak ortaya çıkabilir. Beton kaplamalarda ise enine çatlaklar (ve bazen boyuna çatlaklar) oluşabilir. Hem esnek hem de rijit kaplamalarda yorgunluk çatlağı, yüzey katmanı malzemesinin doğal yorgunluk direnci ve katmanın altındaki döngüsel çekme gerilmelerinin büyüklüğü olmak üzere iki faktör tarafından belirlenir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yol yapısında yorgunluk çatlağını temsil eden bir görsel [57]

Yansıma çatlağı

Asfalt veya beton yüzeylerdeki yansıma çatlağı, alttaki tabakalardaki ek yerleri veya çatlaklar üzerinde meydana gelir. Yorgunluk çatlağı gibi, rijit kaplamalar üzerine uygulanan

asfalt kaplamalardaki yansıma çatlağı da asfalt betonunun doğal yorgunluk direnci ve alttaki rijit kaplama ek yerinin üzerindeki çekme ve kayma gerilmelerinin büyüklüğü ile ilişkilidir. Ekleme noktasında yetersiz zemin desteği (örneğin boşluklar) geçiş yapan bir araç altında plakalar arasında farklı hareketlere neden olarak üst kaplamada yüksek gerilmelere yol açar. Su girişi, yetersiz drenaj ve ek yerinin altındaki bağlayıcı olmayan temel malzemesinin aşınması, yansıma çatlağını etkileyen temel jeoteknik faktörlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Yol yapısında yansıma çatlağını temsil eden bir görsel [58]

Çukurlar

Alt temel veya alt temel/alt tabaka katmanlarındaki bir arıza nedeniyle yüzey tabakasında destek kaybı oluştuğunda meydana gelir. Çukurlar, genellikle don kabarmasıyla ilişkilidir; bu olay, donma sırasında alt tabakada buz lenslerinin oluşması sonucu yol yüzeyinin yukarı itilmesine yol açar (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Yol yapısında ayrışma kusurlarından olan çukurlar [59]

Çıkıntı deformasyonları

Genellikle birbirine yakın aralıklarda (1 m'den kısa) bulunan çatlaklarla sınırlanmış olan sürekli donatılı beton kaplamada kırık bir alan olarak tanımlanır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yol yapısında çıkıntı deformasyonları temsil eden bir görsel [60]

Pompalama

Temelin malzemesinin (ıslak veya kuru) ek yerleri veya çatlaklardan ya da rijit plakaların kenarlarından dışarı çıkmasıdır; bu durum, plakanın trafik altındaki dikey hareketlerinden veya yarı rijit kaplamalardaki çatlaklardan kaynaklanır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yol yapısında pompajı temsil eden bir görsel [61]

Düzensizlik

Bir beton plakada (PCC), genellikle enine ek yerlerinde veya çatlaklarda, bitişik plaka ile ilişkili olarak yükselme veya alçalma şeklinde ortaya çıkar (Şekil 3.7)



Şekil 3.7. Yol yapısında düzensizliği temsil eden bir görsel [62]

Pürüzlülük

Yüzey pürüzlülüğü, büyük ölçüde teker izleri boyunca görülen düzensiz kalıcı deformasyonlar ve çatlaklardan kaynaklanır. Sonuç olarak, kalıcı deformasyonları ve

çatlamayı etkileyen tüm jeoteknik faktörler, yüzey pürüzlülüğünü de etkiler. Özellikle yol boyunca zemin malzemelerinin sertlik/güç düzensizliği yüzey pürüzlülüğüne önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Yol yapısında pürüzlülüğü temsil eden bir görsel [63]

Sıvılaşma

Herhangi bir zeminin, genellikle artan boşluk suyu basıncı ve azalan kayma direnci sonucunda katı halden sıvı hale dönüşmesi sürecine sıvılaşma denir (ASTM, 2001). Ani sıvılaşma, yapının bir darbe veya başka bir gerilme türüyle çökmesi sonucu meydana gelebilir ve bu durum ani, ancak geçici bir sıvı öncesi basınç artışı ile ilişkilidir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yol yapısında sıvılaşmayı temsil eden bir görsel [64]

Termal çatlaklar

Mevsimsel veya günlük sıcaklık değişimleri nedeniyle asfalt kaplama yüzeyinde, genellikle tam genişlikte enine çatlaklar şeklinde oluşur. Bu çatlaklar, alt tabaka ile sürtünme sonucu oluşan sürtünme kuvvetiyle kısıtlanan yol yüzeyindeki hacim değişiklikleri sonucunda meydana gelir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10**.** Yol yapısında termal çatlakları temsil eden bir görsel [65]

4. GEOSENTETİKLERİN SINIFLANDIRILMASI VE MÜHENDİSLİKTE KULLANIM ALANLARI

Geosentetik terimi, genellikle düzlemsel olan ve zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan üretilmiş malzemeleri ifade eder. Geosentetik ürünler genellikle polimerik malzemelerden yapılır, ancak doğal lifler de bu kategoriye dahil edilmektedir. Geosentetikler ilk olarak 1950'lerin sonlarında zemin uygulama işlerinde kullanılmıştır [66-67]. Geoteknik mühendisliğinde geotekstillerin uygulama örnekleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Mühendislik uygulamalarında geosentetik kullanımına örnekler

Düşey yükler, zemin içerisinde düşey ve kesme gerilmesi bileşenleri oluşturur. Zeminin özellikleri nedeniyle, kesme gerilmesi bileşenleri, yalnızca düşey gerilmenin uygulandığı duruma kıyasla zeminin taşıma kapasitesini daha yoğun bir şekilde azaltabilir. Ayrıca, zemin parçacıkları yatay gerilme bileşenlerinin neden olduğu yanal yer değiştirmeye maruz kalabilirler. Katmanların taşıma kapasitesinden daha yüksek bir yük veya zamanla daha düşük yüklerin neden olduğu plastik deformasyonların büyümesi nedeniyle kabul edilemez deformasyonlar meydana gelebilir. Zemin tabakası içindeki deformasyonlar nasıl meydana gelirse gelsin, aşırı ve kabul edilemez deformasyonlar yapının kesme hasarına neden olmaktadır [68]. Ayrıca, kaplama katmanlarının bozulması, alt zeminden gelen ince parçacıklar tarafından temel tabakanın kirlenmesi, agrega malzemesinin kırılması, agrega malzemesinin yanal hareketleri, kademeli plastik gerilmeler ve alt zeminin içindeki aşırı gözenek suyu basıncı nedeniyle meydana gelebilir [68-69].

Geosentetikler, tabakalarda yukarıda belirtilen arızaları sınırlamak için yerleştirilen polimer ürünlerdir. Bu ürünler, geoteknik mühendisliğinin farklı uygulamalarında kullanılmaktadır. Dolgularda ve yol yapımında takviye elemanı olarak kullanılabilirler. Geosentetiklerin yol

çalışmalarındaki temel işlevleri takviye, ayırma ve filtreleme olarak ayrılabilir. Gerekirse ve yolun koşullarına ve gereksinimlerine bağlı olarak, sızdırmazlık işlevi olan geosentetikler de kullanılabilir.

Geosentetiklerin farklı tip ve biçimleri mevcuttur ve bunlar (geogrid, geocell, geotekstiller, vb.) polyester (PET), polivinil alkol (PVA), polipropilen (PP), polietilen (PE) veya aramid (AR) gibi çeşitli hammaddelerden yapılabilirler. Bu ham maddeler, sünme davranışı ve kopmada uzama, malzemeye özgü çekme dayanımı ve sertlik, alkali koşullara direnç ve yoğunluk gibi diğer fiziksel özellikler açısından birbirlerinden farklıdır (Şekil 4.2) [70].



Şekil 4.2. Çeşitli geosentetik ürünlerine ait görseller [70]

Geosentetiklerin artan kullanımlarına ve uygulama alanlarına atfedilen temel özellikleri şunlardır:

- Biyolojik ve kimyasal bozulmaya karşı yüksek direnç

- Zemin örtüsü altında uzun vadeli dayanıklılık
- Yüksek esneklik
- Minimum hacim
- Hafiflik
- Depolama ve taşıma kolaylığı
- Kurulum kolaylığı
- İnşaat sürecini hızlandırma
- Ekonomik ve çevre dostu çözüm oluşturma
- Yapılara iyi estetik görünüm sağlama

Geosentetiklerin üretiminde kullanılan ham maddeler yukarıda belirtilen olumlu özelliklerin birçoğundan sorumludur. Hemen hemen tüm durumlarda geosentetiklerin üretildiği ham maddeler polimeriktir. Ham maddeler, geo'nun yeryüzünü (yer), sentetiklerin ise polimerik malzemesini (termoplastik) ifade eden 'geosentetikler' terimini açıklamaya yardımcı olur [71].

4.1. Geosentetik Türleri

Geosentetikler, ayırma, güçlendirme/stabilizasyon, filtreleme, drenaj ve tutma gibi çeşitli işlevler sağlayan çok sayıda farklı türe sahip büyük bir çeşitliliği barındırmaktadır [72].

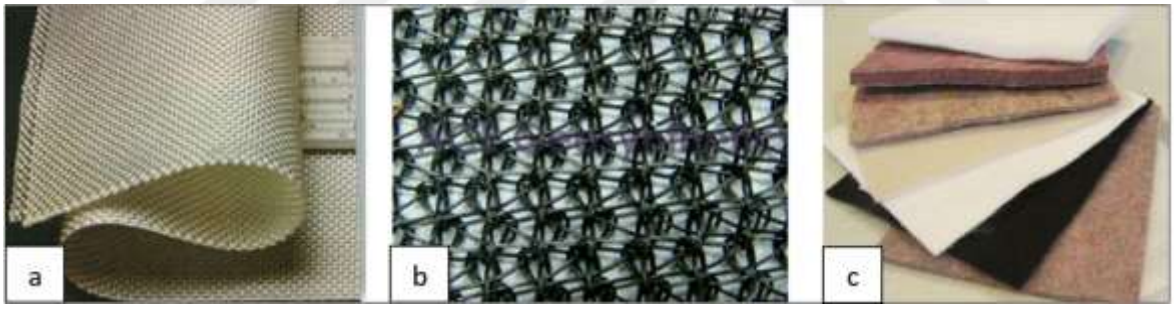
4.1.1. Geotekstil

Geotekstiller insanlık tarihindeki ilk tekstil ürünlerinden biridir. Antik Mısırda yapılan kazılar, çim ve ketenden yapılmış hasırların kullanıldığını göstermektedir. Geotekstiller, firavunlar döneminde yolları ve kenarlarını stabilize etmek için yol yapımında kullanılmıştır. Bu erken dönem geotekstiller, özellikle yollara uygun olmayan malzemeler ile yapıldığında yol kalitesini iyileştirmek için zemin ile karıştırılmış doğal liflerden, kumaşlardan veya bitkilerden yapılmıştır.

Geotekstiller ancak yakın zamanda modern yol yapımında kullanılmaya ve değerlendirilmeye başlanmıştır. Günümüzde geotekstiller, çok sayıda standarda uyması gereken oldukça gelişmiş ürünlerdir. Kullanımları hızla inşaat, geoteknik, çevre, kıyı ve

hidrolik mühendisliğinin hemen hemen tüm alanlarına yayılmıştır. Geotekstiller inşaat mühendisliği projesi, yapısı veya sisteminin ayrılmaz bir parçası olarak zemin, kaya, veya herhangi bir geoteknikle ilgili malzemeyle temas halinde kullanılan geçirgen tekstil malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Genellikle geosentetik ailedeki en büyük gruplardan biri olarak kabul edilir, birincil ve ikincil işlevlerin en geniş yelpazesini sağlar. Adından da anlaşılacağı gibi geleneksel tekstillere benzerler, ancak doğal malzemeler yerine sentetik liflerden oluşurlar. Geotekstiller düzlemsel, geçirgendir ve esnek bir levha biçiminde bulunurlar. Bir geotekstilin en önemli özelliklerinden biri, üretilen düzlemler boyunca ve ayrıca kalınlıkları içinde sıvı akışına karşı gözenekli olmalarıdır. Genellikle polyester veya polipropilen gibi polimerlerden yapılırlar. Bu malzemeler üç farklı kategoride hazırlanmaktadır. Bunlar:

- Dokuma kumaşlar
- Dokusuz kumaşlar
- Örme kumaşlardır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. a) Dokuma kumaşlar, b) örme kumaşlar, c) dokusuz kumaşlar

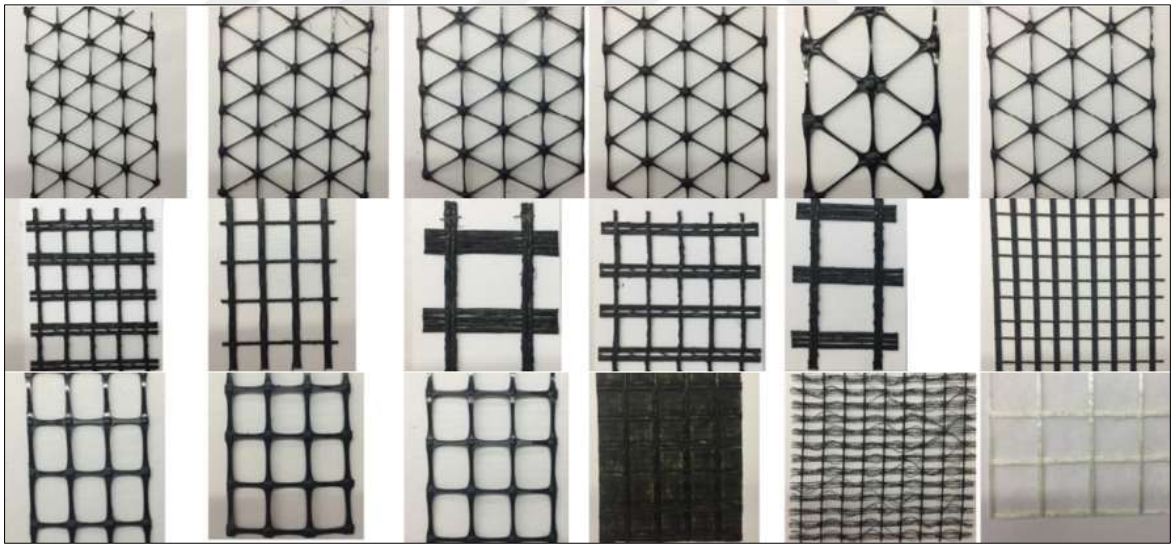
Dokumasız geotekstiller ayırma tabakası olarak kullanılabilir. Dokuma geotekstiller hem takviye hem de ayırma işlevi sağlayabilir. Sadece çok az sayıda örme türü üretilmektedir. Örme geosentetiklerin tümü, örme tekniğinin dokuma gibi başka bir geosentetik üretim yöntemiyle birlikte kullanılmasıyla oluşturulur [73].

4.1.2. Geogrid

Geogridler, tanım gereği ekstrüzyon, bağlama veya iç içe geçme yoluyla birbirine bağlanabilen, açıklıkları bileşenlerden daha büyük olan, inşaat mühendisliği

uygulamalarında zemin/kaya ve/veya diğer geoteknik malzemelerle temas halinde kullanılan, entegre olarak bağlanmış çekme elemanlarının düzenli açık ağlarından oluşan düzlemsel polimerik yapılardır. Üretildikleri malzemeler polietilen (PET), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), aramid (AR) ve polivinil alkol PVA'dır [74].

Geogrid, çevredeki agrega parçacıklarının geçebildiği açıklıklara sahip, birbirine bağlı çekme kaburgalarından oluşan yüksek dayanımlı ekstrüde edilmiş bir geosentetik malzemedir [75-76]. Geogridlerin özellikleri, değişen geometrik, mekanik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle farklılık göstermektedir [77-78]. Geometrik özellikler, kaburga aralıkları, derinlik, genişlik, uzunluk ve şekil ile birlikte açıklık şekilleri ve boyutlarını içerir. Dikdörtgen açıklık şekillerine sahip çift eksenli geogridler, iki yönde çekme dayanımı sağlarken, üçgen açıklık şekillerine sahip üç eksenli geogridler, üç yönde çekme dayanımı sağlar. Açıklık boyutu, agrega parçacıklarının geogride ne ölçüde nüfuz edebileceğini doğrudan belirler (Şekil 4.4) [79].



Şekil 4.4. Üretilen çeşitli geogrid malzemelerine ait görseller [80]

4.1.3. Geomembran

Geomembranlar, nispeten geçirimsiz olan ve bariyer veya astar şeklinde sıvı göçünü kontrol etmek için kullanılan ince sentetik tabakalardır, bu nedenle bir geomembranın birincil işlevi sıvı veya buhar bariyeri olarak tutmadır. Sadece çevresel ve tutma uygulamalarında değil,

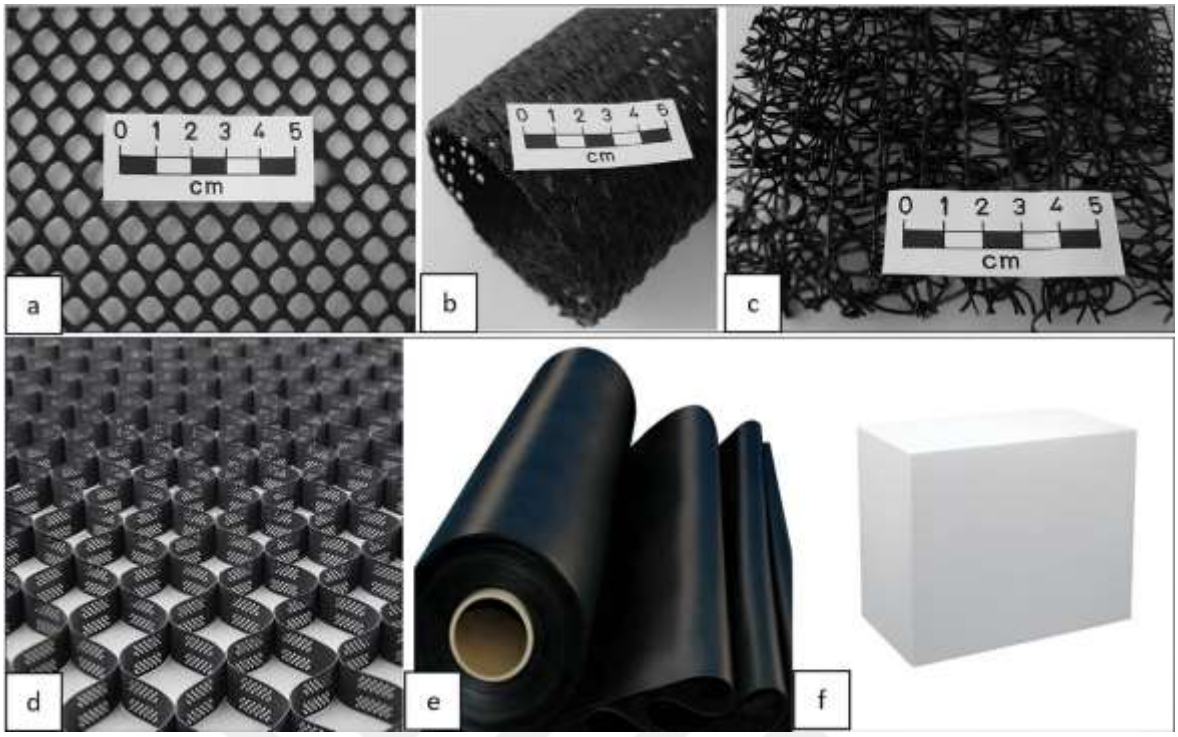
aynı zamanda ulaşım, geoteknik ve hidrolik uygulamalarda da kullanılan çok çeşitli olası uygulamalara sahiptirler. Geomembranlar, geosentetik ailesinin önemli bir üyesidir ve küresel satışlar ve elde edilen gelirler açısından hem geogridler hem de geotekstillerle rekabet eder.

Bu ürenler, onları oldukça geçirimsiz kılan kimyasal bağları nedeniyle inşaat mühendisliğinde geniş inşaat alanlarında kullanılır. Bu nedenle, projenin gereksinimlerine göre, kaya veya zemin gibi farklı malzeme çeşitleriyle kullanılabilirler.

4.1.4. Diğer geosentetikler

Daha önce bahsedilen geosentetiklerin dışında aşağıdakileri içeren bir dizi başka ürünler de mevcuttur (Şekil 4.5). Bunlar:

- Geonetler, nispeten büyük sıvı veya gaz akışlarını taşımak için kullanılan açık ızgara benzeri malzemeler. Çeşitli açılarda benzer kümelerin üzerinde bulunan, integral olarak bağlı paralel kaburga kümelerinden oluşan düzenli ve yoğun bir ağdan oluşan düzlemsel, polimerik bir üründür. İlk bakışta, geonetler geogridlere benzer görünür; ancak, geonetler geogridlerden farklıdır, esas olarak malzeme veya yapılandırmaları açısından değil, sıvıların veya gazların düzlem içi drenajını gerçekleştirme işlevleri açısından farklıdır.
- Geopipe, sıvı veya gazların drenajı için kullanılan delikli veya katı duvarlı polimerik borulardır.
- Geocell, zemin ve bazen betonla doldurulmuş, birbirine bağlı hücreler oluşturmak üzere bir araya getirilen polimerik levha şeritlerinden oluşmaktadır.
- Geofoam- ısı yalıtımı veya hafif dolgu olarak kullanılan polistiren köpüğün genleşmesiyle oluşturulan bloklar veya levhalardır. Bu ürün, hafif dolgular, ısı yalıtkanları ve drenaj kanalları olarak kullanılmak üzere yüksek boşluk içeriğine sahip levha veya blok formunda hafif bir malzeme elde etmek için bir köpük maddesinin kullanımıyla yarı sıvı formda polimerin uygulanmasıyla üretilen polimerik bir malzemedir.
- Geomesh, genellikle düz örgülü bir yapıya sahip, büyük gözenek boyutları olan, birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen, esas olarak erozyon kontrol çalışmalarında kullanılan geosentetik ürünlerdir.

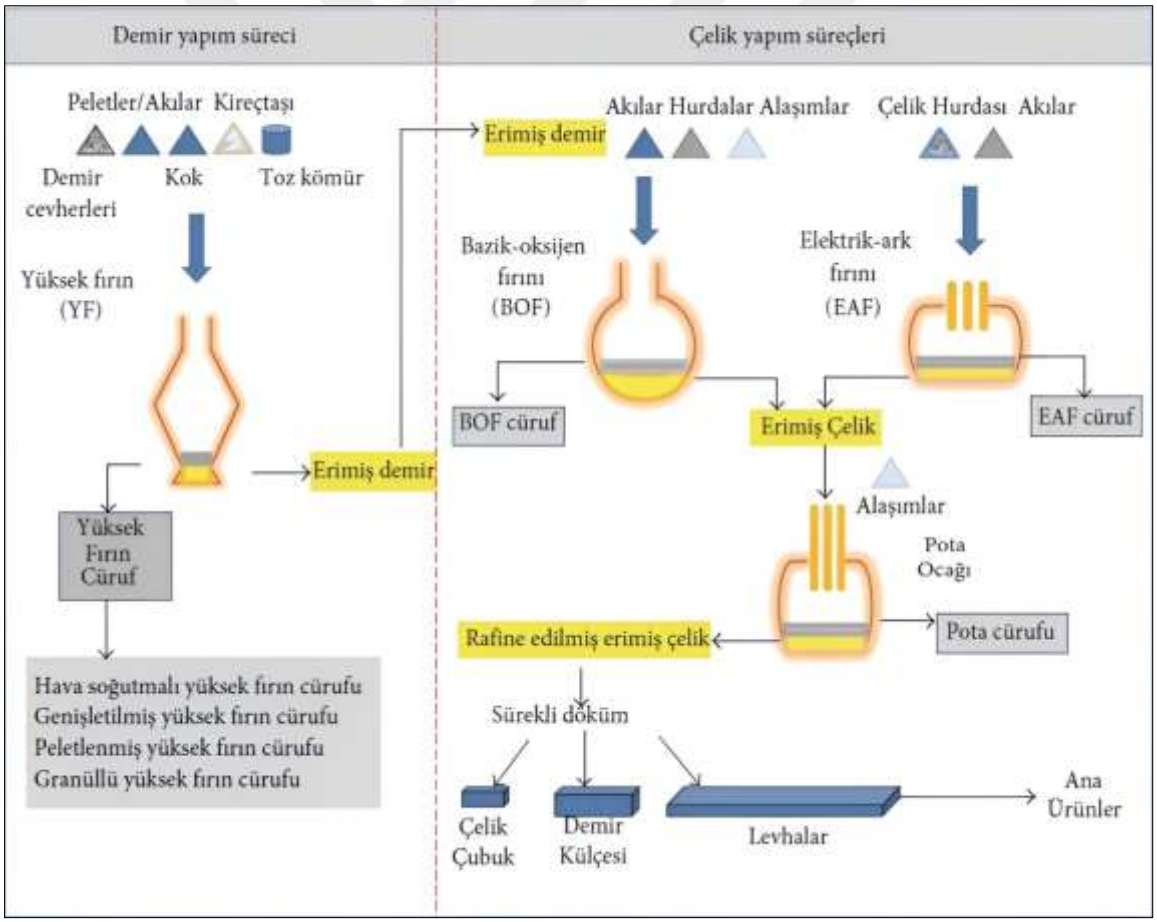


Şekil 4.5. Geosentetik türlerine ait görseller: a) Geonet, b) Geopipe c) Geomat, d) Geocell, e) Geomembran, f) Geofoam [81-83]

5. DEMİR VE ÇELİK ENDÜSTRİSİ YAN ÜRÜNÜ OLARAK CÜRUF: OLUŞUM MEKANİZMALARI VE ÖZELLİKLERİ

Çıkarma, inceltme ve metalurjik işlemler sırasında oluşan katı atıklara "cüruf" denir. Cüruf tamamen saf olmayan metaller eritildiği zaman yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde biriken daha hafif metallere verilen isim olarak da tanımlanabilir [84].

Cüruf, metalurjik işlemlerin yan ürünüdür ve tipik olarak metal cevherinden gelen gang, akı malzemesi ve yanmamış yakıt bileşenleri içermektedir. Genellikle demir dışı ve demirli cüruf olarak sınıflandırılır; demir dışı cüruf, bakır, kurşun-çinko, nikel ve fosfor metalurjik işlemlerinden türetilenleri içerirken demirli cüruflar, demir ve çelik üretiminde türetilenlerdir (Şekil 5.1).

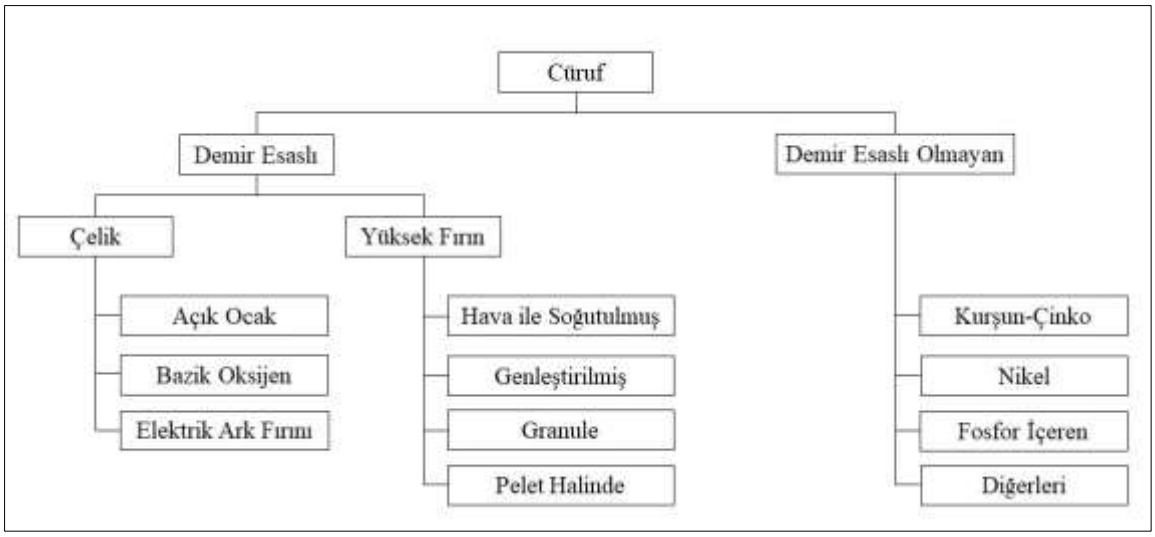


Şekil 5.1. Demir ve çelik üretim süreçlerinin akış şeması [85].

Çelik cürufları genellikle üretildikleri fırının türüne göre sınıflandırılır. Cürufun özellikleri, ham çeliği üretmek için kullanılan işlem türüne, cürufun soğutma koşullarına ve

değerlendirme işlemine bağlıdır. Birincil işlemde ham çelik iki şekilde üretilir. İlk yöntemde, demir yüksek fırındaki (BF) cevherden üretilir. İkinci yöntemde, cüruflar hurda bazlı çelik endüstrisinde üretilir. Hurda bazlı çelik endüstrisi üretiminin ilk aşaması elektrik ark fırın (EAF) cürufu üretir ve ikinci aşama erimiş çeliği rafine etmek için gerçekleştirilir. Pota fırını (LF) ile üretilen cüruf, çelik rafinasyonunun sonucudur ve bu nedenle genellikle krom, kurşun veya çinko gibi ağır bir metal taşıyıcısıdır [86].

Şekilde demir üretiminin yan ürünü olan cürufun sınıflandırılması sunulmaktadır (Şekil 5.2). (Hammerling 1999).



Şekil 5.2. Kökenlerine göre sınıflandırılan cüruf türleri [87]

5.1. Elektrik Ark Fırın (EAF) Cürufunun Üretim Süreci

EAF cürufu, hurda metalden elektrik ark ocağında (EAF) erimiş çelik üretimi sırasında oluşur, burada hurda metal refrakter astarlı kaplarda kireçle birlikte eritilir. Erimiş çeliğe enjekte edilen karbon, karbondioksit olarak uzaklaştırılır ve köpüklü cürufa katkıda bulunur. Daha sonra, hurda metaldeki silisyum ve diğer kalan safsızlıklar eklenen kireç ve enjekte edilen oksijenle birleşerek erimiş çeliğin üzerinde bir cüruf tabakası oluşturur [88]. Bu nedenle, EAF cürufu hurda metalden elde edilen erimiş çeliği rafine etmede önemli bir rol oynar [89]. EAF bölümünde eritme tamamlandıktan sonra cüruf boşaltılır ve çöplüklere dökülür. Erimiş çeliğin tonu başına yaklaşık %10 - %15 ağırlık oranında EAF cürufu

oluştuğu ve her yıl büyük miktarda cürufun bertaraf edilmesi gerektiği tahmin edilebilir (Şekil 5.3) [89-90].

Tipik olarak, paslanmaz çelik rotasından elde edilen EAF cürufları, karbon çeliği üretiminde elde edilen cüruflardan belirgin şekilde daha düşük bir demir içeriğine sahiptir.



Şekil 5.3. Tipik elektrik ark fırın cüruf görüntüsü [91]

Genel olarak, EAF cürufunun kimyasal bileşimi BOF cürufuna benzerdir. EAF cürufunun ana bileşenleri CaO, FeO, SiO_2, Al_2O_3 ve MgO'dur. Erimiş çelikten ayrıldıktan sonra, EAF cürufu yavaşça hava ile soğutularak kristalin cüruf oluşturulur. Geçmişte, esas olarak mevcut olan büyük hacimli BF cürufu nedeniyle, EAF cürufunun kullanımı cazip değildi ve gübre olarak kullanımı, çöplük alanlarına atılmasını önlemenin tek olası yoluydu. Ancak, temel olarak elektrik ark ocaklarından gelen çelik üretiminin sürekli artan payı nedeniyle, bu özel cüruf türü inşaat mühendisliği sektöründe bir yapı malzemesi gibi çok sayıda alanda uygulamada kullanılmıştır. EAF cürufu ayrıca ağır metal yüklü akarsuların (atık su vb.) arıtma uygulamalarında kullanılabilen, düşük maliyetli etkili bir adsorpsiyon maddesi olarak bildirilmiştir [92-98].

5.2. Hava Soğutmalı Yüksek Fırın (ACBF) Cürufunun Üretim Süreci

Demir ve çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan ACBF, kireç taşının (veya dolomitin) akışkan madde olarak kullanıldığı bir işlem olan demir cevherinin eritilmesi sırasında üretilmaktedir (Şekil 5.4). ACBF'nin bileşimi önemli ölçüde değişse de (demir üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin kimyasına bağlı olarak), esas olarak dört ana oksitten oluşur: CaO, SiO_2, Al_2O_3 ve MgO (Morian vd., 2012).



Şekil 5.4. Tipik hava soğutmalı yüksek fırın cüruf görüntüsü [98]

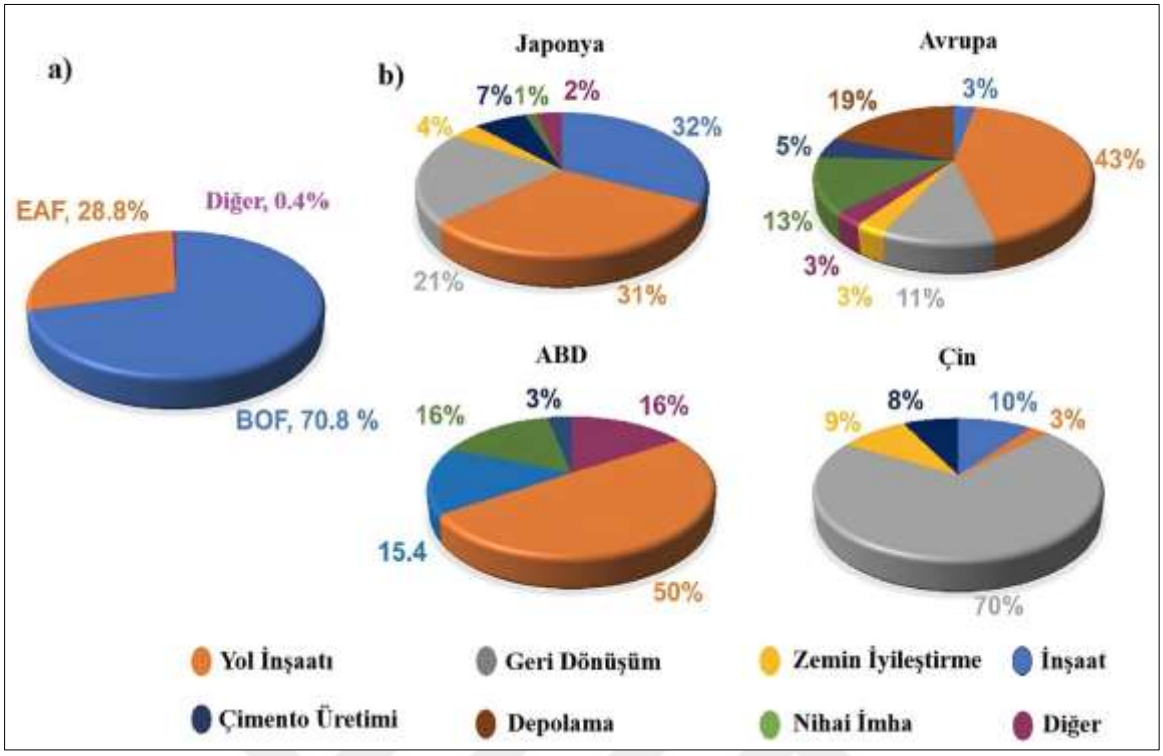
Genel olarak, ACBF'nin kükürt içeriği %1 ila %2 (kütlece) arasında değişmektedir. ACBF'de bulunabilen çeşitli kükürt formları arasında, kristalin kalsiyum sülfür (CaS - aynı zamanda oldhamite olarak da bilinir), çimentolu sistemlerde ACBF'nin agrega olarak performansı açısından potansiyel olarak önemli bir rol oynar (Morian vd., 2012). Özellikle, (Hammerling, 1999), oldhamite'nin yüksek pH ortamında oldukça çözünür olduğunu göstermiştir [98].

5.3. Çelik Cürufun Dünyada Kullanım Alanları

Yüksek stabilite ve aşınma direncine karşı dayanım gibi özellikler, çelik üretiminde oluşan cürufların farklı alanlarda kullanım için uygun ürünler olduğunu göstermektedir [99]. Günümüzde cüruflar genellikle demiryolu balastı olarak, beton agregası ve asfalt agregası olarak, yol temel ve alt temel malzemesi olarak, çimento sanayiinde, briket ve tuğla yapımında, cüruf yünü ve prefabrik elemanların yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [100].

Günümüzde, Avrupa'da üretilen çelik cürufunun yaklaşık %77'si yeşil çimento üretmek veya agrega ve bloklar gibi inşaat malzemesi olarak faydalanmak için ikame malzeme niteliğinde kullanılmaktadır (Jiang ve diğerleri, 2018). Şekil 2.18'de Japonya, Avrupa, A.B.D ve Çin'de yaygın kullanım alanlarına ait grafik verilmiştir. Kullanılmayan çelik cürufları çelik üretim tesisinde depolanarak ardından bertaraf tesislerinde imha edilirler.

Bu grafiğe göre, Avrupa, yaklaşık 18,4 milyon ton çelik cürufu üretmektedir ve bunun %85,6'sı yol yapımında (%46,0), metalurjik kullanımda (%15,3), ara depolamada (%8,6), diğer (%6,6), çimento/beton katkı maddesinde (%4,4), gübrede (%2,7) ve hidrolik mühendisliğinde (%2,2) kullanılmaktadır (EUROSLAG, 2016). Benzer şekilde, ABD yaklaşık 10 milyon ton çelik cürufu üretmektedir ve bunun %85,4'ü yol tabanlarında/yüzeylerinde (%40,8), diğer veya belirtilmemiş (%24,7), asfalt betonda (%15,1), klinker hammaddesinde (%2,4), çeşitli (%2,0) ve beton ürünlerinde (%0,4) kullanılmaktadır (ABD Jeoloji Araştırması, 2017). Avustralya'da çelik cürufu %77,3 oranında kullanılmakta olup öncelikli olarak çimentolu malzemeler (%77) ve yol yapımı (%13) için kullanılırken, yaklaşık %9'u çöplüklerde israf edilmekte veya inşaat uygulamalarında kullanılmaktadır (Australasian Iron and Steel Slag Association, 2020). Japonya 2016 yılında yaklaşık ~ 14,1 milyon ton çelik üretti (Nippon Slag Association, 2016) ve şu anda %98,4 ile çelik cürufu geri dönüşümünde lider konumdadır. Japonya, yol yapımı (%32,4), inşaat mühendisliği (%30,9), iç geri dönüşüm (%20,8) ve diğer kullanımlar (%15,9) dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çelik cürufunu kullanmaktadır (Guo vd., 2018). Çin dünya çapındaki çeliğin yaklaşık %50'sini üretiyor ve 2016 yılında çelik cürufunun yalnızca %29,5'ini kullandı. Bu, 300 milyon ton çelik cürufuna eşittir (Guo vd., 2018). Japonya'nın %1,6'lık bertaraf oranının aksine, Çin yaklaşık %70,5'ini bertaraf ediyor. Çin'deki diğer kullanımlar arasında inşaat mühendisliği (%10,1), çimento üretimi (%9,3), dahili geri dönüşüm (%7,5) ve yol inşaatı (%2,6) yer almaktadır (Guo vd., 2018). Şekil 3'te Japonya, Avrupa, Çin, ABD ve Avustralya'da 2000-2018 yılları arasındaki çelik cürufu kullanımı gösterilmektedir (Şekil 5.5) [101].



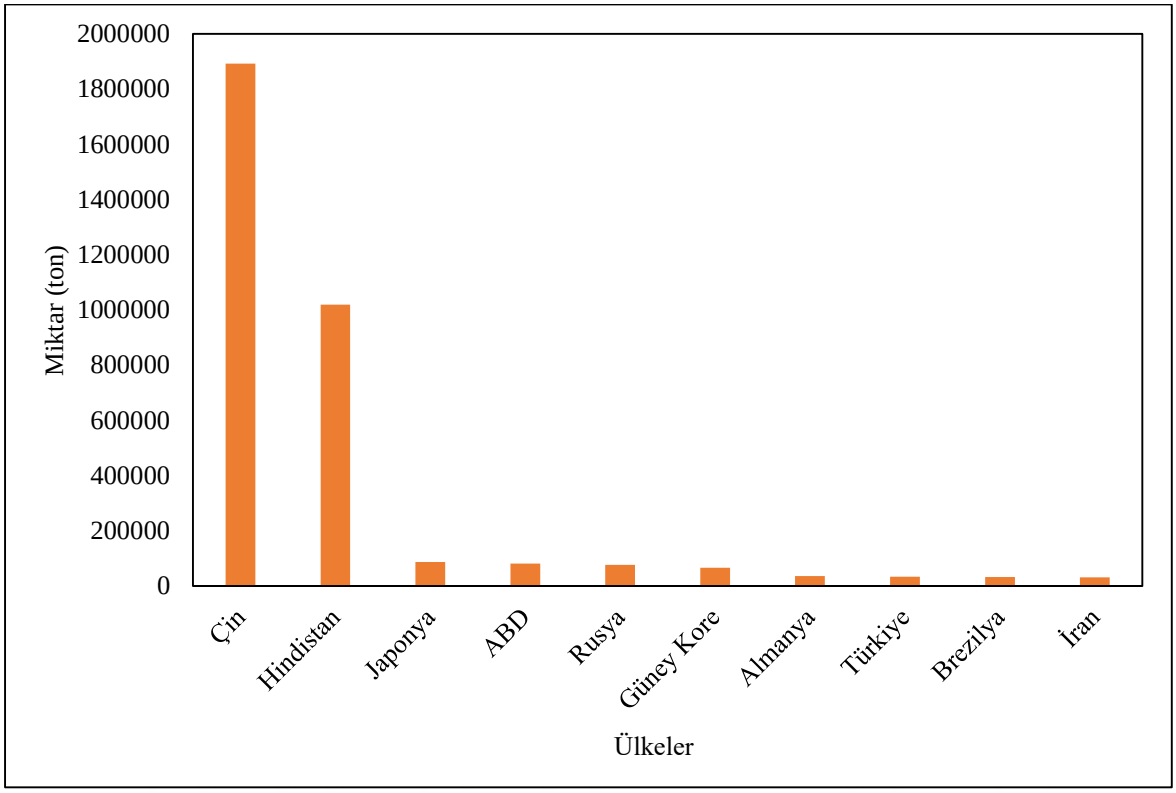
Şekil 5.5. a) Dünya genelinde çelik cürufu üretimi ve (b) Japonya, Avrupa, ABD ve Çin gibi çeşitli ülkelerde çelik cürufunun kullanımı [102]

5.4. Türkiye'de Çelik Cüruf Üretimi ve Kullanım Alanları

Türkiye'de Çelik üretimi ilk defa 1928 yılında, savunma sanayinin çelik ihtiyacını karşılamak amacıyla Kırıkkale'de başlamıştır. Türkiye'nin ilk entegre demir çelik tesisi olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları (KARDEMİR) 1939 yılında işletmeye açılmıştır. Daha sonra Türkiye'nin yassı çelik ürünleri talebini karşılamak için, ikinci entegre tesisi olan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları (ERDEMİR) ise 1965 yılında üretime başlamıştır. 1977 yılında, uzun çelik ürünleri ve yarı ürün talebini karşılayabilmek amacıyla, Türkiye'nin üçüncü entegre tesisi, İskenderun Demir Çelik Fabrikaları (İSDEMİR) işletmeye açılmıştır [103].

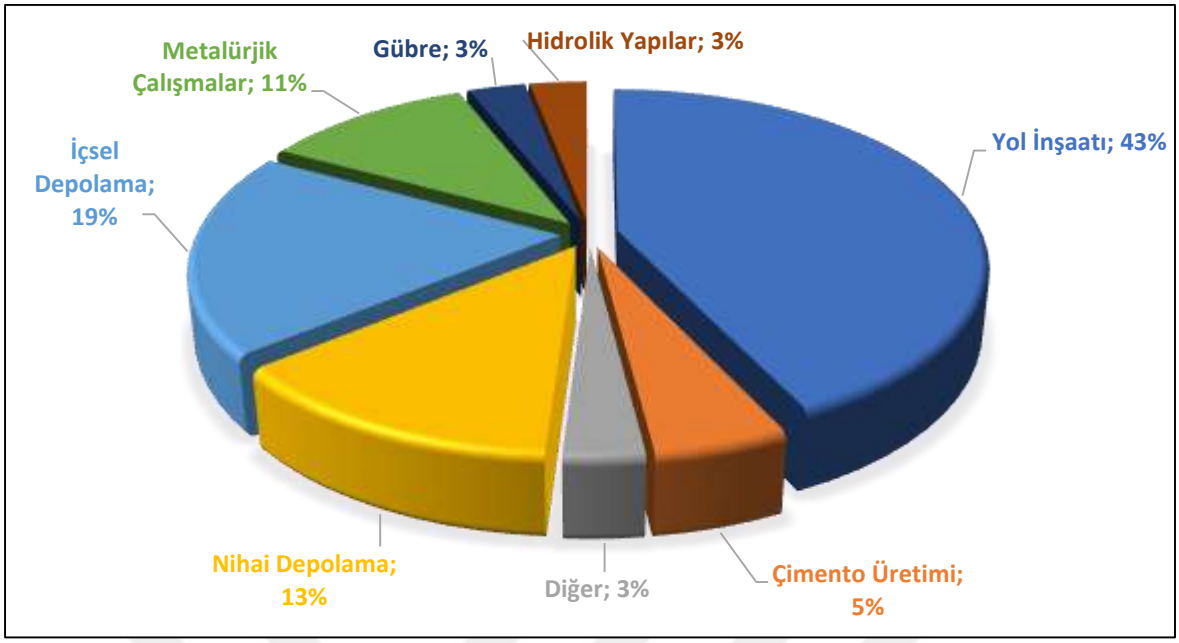
Ülkemizde Marmara, Ege, Karadeniz, Akdeniz, İç Anadolu Bölgelerinde 2021 yılı itibariyle toplamda 40 demir çelik tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerden 12 tanesi Akdeniz bölgesinde yer alırken sırayı 9 tesisle Marmara bölgesi ikinci, 9 tesis ile Ege bölgesi üçüncü sırada, 7 tesis ile Karadeniz bölgesi dördüncü sırada ve 3 tesis ile İç Anadolu bölgesi son sırada yer almaktadır. Tesislerin 26'sı EAF (Elektrik Ark Fırını), 11'i indüksiyon ocaklı ve 3'ü BOF (Bazik Oksijen Fırını) olarak dağılım göstermektedir [104].

Şekil 5.6, dünya genelindeki ülkelerin ham çelik üretim miktarlarını karşılaştırmalı olarak sunmakta ve bu üretimlerin toplam içindeki paylarını detaylandırmaktadır.



Şekil 5.6. Ham çeliğin ülkelere göre toplam üretimi [105]

Şekil 5.7 ise Türkiye'de çelik cürufunun kullanım alanlarına göre sektörel dağılımını ayrıntılı bir şekilde incelemekte, bu malzemenin farklı endüstrilerdeki uygulama oranlarını ve potansiyel kullanım senaryolarını görselleştirmektedir. Dünya Çelik Derneği (World Steel Association) tarafından yayımlanan 2024 yılı Ocak ayı verilerine göre, küresel ham çelik üretimi, bir önceki yılın aynı dönemine kıyasla %1,6 oranında azalarak 148,1 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Aynı dönemde, dünyanın en büyük üreticisi konumundaki Çin'in ham çelik üretimi %6,9 azalarak 77,2 milyon ton seviyesine gerilemiştir. Hindistan ise %7,3 oranındaki üretim artışıyla 12,5 milyon tona ulaşarak ikinci sırada yer almıştır. Japonya'nın üretimi ise %0,6 oranında artışla 7,3 milyon ton olarak kaydedilmiştir. Türkiye'nin ham çelik üretimi ise 2024 yılı Ocak ayında, önceki yılın aynı ayına kıyasla %24,7 oranında artarak 3,2 milyon tona yükselmiştir. Bu artış oranı, Türkiye'nin küresel çelik üretimindeki payını güçlendirdiğini göstermektedir.



Şekil 5.7. Türkiye'de çelik cüruf kullanım alanları [106].

6. MATERYAL VE METOT

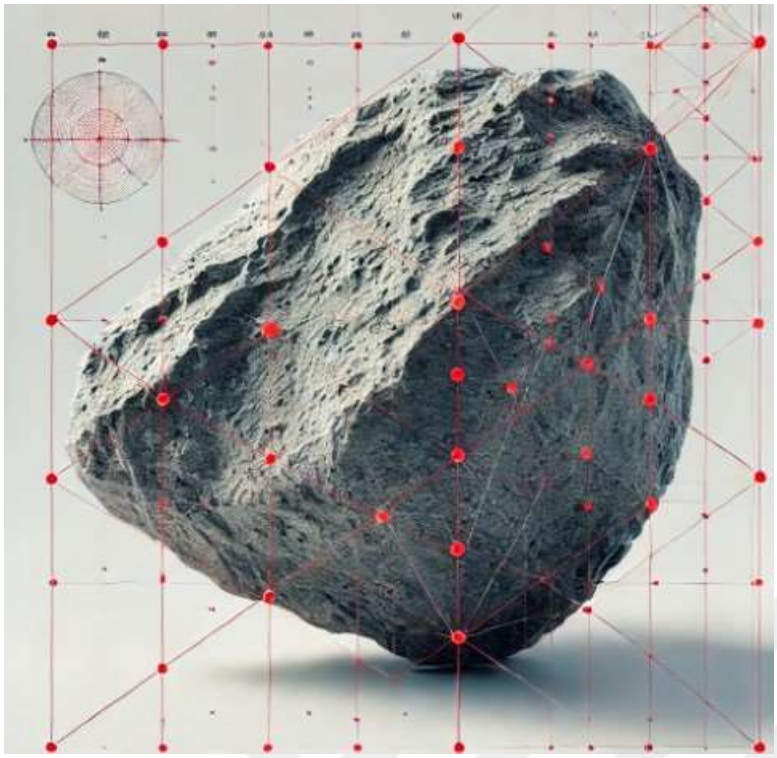
Bu bölümde, çalışmada kullanılan çelik cüruf, geogrid ve alt temel malzemelerine ait mühendislik özellikleri sunulmakta ve hazırlanan deneysel modellerin detayları açıklanmaktadır. Malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiş, ardından farklı kombinasyonlarla hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlı yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deney düzeneği, test prosedürü ve veri analiz yöntemlerine ilişkin bilgiler de bu kısımda ayrıntılı olarak verilmiştir.

6.1. Çelik Cüruf Malzemesinin Genel Mühendislik Özellikleri

Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Bakanlığı ve Federal Karayolu İdaresi, Turner Fairbank Karayolu Araştırma Merkezi (TFHRC) ile birlikte çelik cürufunun bazı özelliklerini listelemiştir [107-109].

6.1.1. Fiziksel özellikler

Çelik cürufu agregaları oldukça köşeli, kabaca kübik parçalardır ve düz veya uzatılmış şekillere sahiptirler (Şekil 6.1). Ayrıca çok sayıda bağlantısız hücreye sahip, pürüzlü ve gözenekli bir yapıya sahiptirler, bu da eşit hacimdeki daha düzgün agregalara göre daha büyük bir yüzey alanı sağlar.



Şekil 6.1. Tipik bir çelik cüruf agregasına ait yüzey görüntüsü

Çelik cürufu, yüksek içsel sürtünme açısına ve yüksek kesme dayanımına sahiptir. Pürüzlü dokusu ve şekli, taşınma ve inşaat sırasında az bozulma olanağı sağlar. Yüksek hacimsel özgül ağırlığa ve %3'ten az su emme kapasitesinin yanı sıra çelik cürufunun çoğu fiziksel özelliği, geleneksel sert kaya agregalarından daha iyidir. Aşağıda çelik cürufunun bazı olumlu özellikleri listelenmiştir.

- Güçlü ve dayanıklıdırlar.
- Mükemmel köşeli şekillere sahiptirler, bu da çok güçlü kilitlenme özellikleri geliştirir.
- Aşınmaya ve darbeye karşı yüksek direnç gösterirler.

Çizelge 6.1, çelik cürufunun bazı tipik fiziksel özelliklerini listelemektedir.

Çizelge 6.1. Çelik cürufunun tipik fiziksel özellikleri [108]

Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	3,2-3,6
Yaklaşık Kuru Çubuk Ağırlık Birimi (kg/m^3)	1600-1920
Su Emme	~ %3

6.1.2. Kimyasal ve mineralojik bileşim

Yüksek fırın cürufu genellikle dört ana oksit içerir: kireç, manyezya, silika ve alümina. Küçük miktarlarda bulunan elementler arasında kükürt, demir, manganez, alkaliler ve birkaç iz element yer alır. Cürufun kimyasal bileşimi genellikle X-ışını floresansı ile belirlenen temel analizden hesaplanan basit oksitler cinsinden ifade edilir. Çizelge 6.2, tipik bir oksijen fırınından elde edilen çelik cürufunda bulunan çeşitli bileşiklerin aralıklarını göstermektedir. Cürufun mineralojik formu, çelik üretim sürecindeki soğuma hızına büyük ölçüde bağlıdır.

Çizelge 6.2. Çelik cürufunun tipik kimyasal bileşimi [108]

Bileşen	Bileşim (%)-TFHRC	Bileşim (%)-NSA
CaO	40-52	42
SiO_2	10-19	15
FeO	10-40	24
MnO	5-8	5
MgO	5-10	8
Al_2O_3	1-3	1-5
P_2O_5	0,5-1	0,8
S	<0,1	0,08
Metalik Fe	0,5-10	-
*NSA:Ulusal Cüruf Derneği *TFHRC: Turner Fairbank Otoyol Araştırma Merkezi		

Çelik cürufunun soğuma hızı genellikle daha düşük tutulur, böylece kristalin bileşiklerin oluşması sağlanır. Çelik cürufundaki baskın bileşenler dikalisyum silikat, trikalisyum silikat, dikalisyum ferrit, merwinite, kalsiyum alüminat, kalsiyum-magnezyum demir oksitleri, bazı serbest kireç ve magnezyadır. Çelik cürufu hafif alkalin özellik gösterir ve çözeltinin pH değeri genellikle 8 ile 10 arasında değişir.

6.1.3. Mekanik özellikler

TFHRC'ye göre, işlenmiş çelik cürufu, inşaatta agrega olarak kullanımı için uygun mekanik özelliklere sahiptir; bunlar arasında iyi aşınma direnci, iyi sağlamlık özellikleri ve yüksek taşıma gücü bulunmaktadır (Çizelge 6.3).

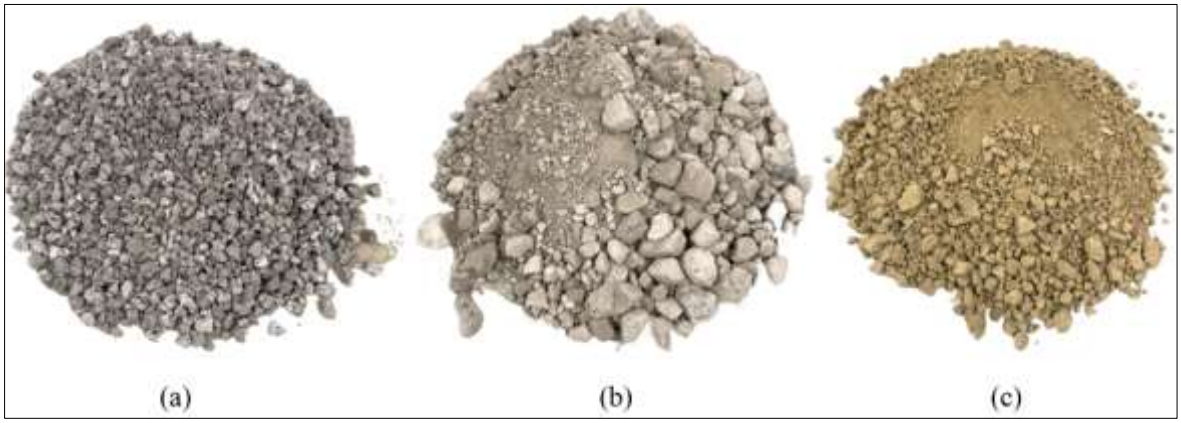
Çizelge 6.3. Çelik cürufunun tipik mekanik özellikleri [108]

Özellik	Değer
Los Angeles Aşınma (ASTM C131), %	20-25
Sodyum Sülfat Sağlamlık Kaybı (ASTM C88),%	<12
İçsel Sürtünme Açısı	40°-50°
Sertlik	6-7
Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), %	~300

6.2. Malzemelerin Fiziksel Karakterizasyonu

Laboratuvar deneyleri, iki farklı çelik cürufu ile alt temel zemin malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çelik cürufları, farklı çelik üretim tesislerinden temin edilmiş olup, bu malzemelerin özellikleri ve elde edildikleri süreçler dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 6.2). İlk kullanılan malzeme, elektrik ark ocağı cürufu (EAF) olarak adlandırılan bir atıktır. Elektrik ark ocağı, geleneksel temel oksijen fırınlarından farklı olarak, çelik üretiminde gerekli olan ısının sağlanması ve çeliğin safsızlıklardan arındırılması için elektrik enerjisini kullanır. Bu fırınlar, enerji verimliliği açısından avantaj sağlamasıyla bilinir. İkinci kullanılan malzeme ise hava soğutmalı yüksek fırın cürufu (ACBF) olup, bu cüruf, yüksek fırından çıkan erimiş cürufun atmosferik koşullar altında bir cüruf çukurunda katılaşmasıyla elde edilmektedir. Katılaşma sürecini hızlandırmak için cüruf üzerine belirli bir miktar su püskürtülerek hızlı soğuma sağlanır, ardından bu malzeme işleme tesisine nakledilir.

Üçüncü deney malzemesi olarak kullanılan alt temel ise, siltli kil yapısında bir zemin türüdür ve Minnesota Yol Araştırma Projesi (MnROAD) kapsamında belirlenen bir bölgeden temin edilmiştir. Bu zemin türü, alt yapı çalışmalarında yaygın olarak kullanılan zeminlerin özelliklerini yansıtması açısından tercih edilmiş olup, laboratuvar testleri sırasında performans özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 6.2. Çalışmada kullanılan cüruf türleri ve alt temel malzemesi: (a) EAF (b) ACBF (c) Alt temel

6.2.1. Elek analizi ve hidrometre analizi

Çoğu malzemeler çeşitli boyutlardaki partiküllerin karışımından oluştuğu için, bu malzemeleri karakterize etmenin yöntemlerinden biri, partikül boyut dağılımını belirlemektir, yani bir malzeme örneğindeki partikül boyutlarının kütlece yüzdesi olarak tanımlanmasıdır. Partikül boyut dağılımını belirlemek için iki ana yöntem bulunmaktadır; Elek analizi ve Hidrometre analizi.

Elek analizinde, TS EN ISO 17892-4'e göre, bir zemin örneği farklı açıklık boyutlarına sahip elekler serisinden geçirilerek sarsılır ve minimum örnek kütlesi, en büyük anlamlı partikül boyutuna bağlıdır (Şekil 6.3) [110]. Elekler, en büyük açıklığa sahip 75 mm'lik eleğin en üste ve en küçük açıklığa sahip 63 μm'lik eleğin en alta yerleştirildiği bir sıra ile düzenlenir. Elek yığını mekanik bir sarsıcıya yerleştirilir ve zemin örneği en üstteki eleğe konur. Zemin örneği en az 10 dakika sarsıldıktan sonra, her elekte kalan zemin ağırlığı kaydedilir ve sonuçlar, x ekseninde partikül boyutunun logaritmik ölçekle, y ekseninde ise ağırlıkça partikül yüzdesinin bulunduğu bir diyagrama çizilir. Elek testi tamamlandığında, eğer malzemenin %10'undan fazlası 63 μm'lik elekten geçmişse, zemin örneğinin partikül boyut dağılımını tam olarak belirlemek için hidrometre analizi yapılması gerekmektedir [114]. Bu testte, en ince elekten geçen zemin örneği suda dağıtılır ve 1000 ml'lik bir silindirde çökelmeye bırakılır. Bir termometre ve bir hidrometre silindire yerleştirilir ve zemin partikülleri çökelirken hidrometre okumaları, zaman ve sıcaklık kaydedilir. Stokes denklemi, partiküllerin terminal hızı, partikül çapı, sıvı viskozitesi ve diğer faktörler arasındaki ilişkiyi tanımlar [111]. Stokes denklemi kullanılarak zemin partiküllerinin efektif

çapı hesaplanabilir ve hidrometre analizi sonuçları, elek testi sonuçlarına benzer şekilde sunulur. Test edilen zemine bağlı olarak, partikül boyutlarının tüm aralığını kapsamak için hem elek hem de hidrometre analizine ihtiyaç duyulabilir. Çizelge 6.4, literatürde bulunan çeşitli zemin türleri için partikül boyut aralıklarını özetlemektedir [112].

Çizelge 6.4. Zemin türleri için tane boyut aralığı [112]

Materyal Türü		Boyut (mm)
Kayalar		>200
İri Çakıllar		60-200
Çakıl	Kaba	20-60
	Orta	6-20
	İnce	2-6
Kum	Kaba	0.6-2
	Orta	0.2-0.6
	İnce	0.06-0.2
Silt	Kaba	0.02-0.06
	Orta	0.006-0.02
	İnce	0.002-0.006
Kil		<0.002

Granüler malzemelerin mekanik performansını belirleyen en kritik parametrelerden biri, tane boyutu dağılımıdır. Özellikle çelik cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerde, tane boyutu dağılımı, malzemenin mühendislik uygulamalarındaki davranışını doğrudan etkiler. Çelik cürufu, çelik üretim sürecinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkar ve bu üretim süreci tam olarak kontrol edilemediğinden, cürufun tane boyutu dağılımı da doğal süreçlerle belirlenir. Erimiş cüruf, cüruf çukurlarında katılaşarak, soğuma sırasında parçalanır ve bu parçalanma sonucunda çeşitli boyutlarda parçacıklar oluşur. Bu süreç, kaya büyüklüğündeki büyük parçacıklardan mikron düzeyinde silt boyutuna kadar geniş bir yelpazede tane boyutları oluşturur.

Çelik cürufunun bu geniş tane boyutu aralığı, granülometri açısından oldukça değişken bir yapı sunar ve dolayısıyla mühendislikte kullanımı için uygun sınıflandırmalar yapılması gerekir. Tane boyutu dağılımını belirlemek için elek analizi büyük bir önem taşır ve bu çalışmada ASTM D6913/D6913M-17 standardına uygun olarak bu analiz uygulanmıştır. İşleme tesislerinde, çelik cürufu genellikle iki ya da üç farklı boyut aralığında elenerek kaba, orta ve ince sınıflar halinde ayrılır. Kaba sınıf, genellikle 64 mm ile 200 mm arasında değişen kaya boyutundaki parçacıklardan oluşur. Orta sınıf ise, 64 mm'ye kadar olan çakıl

boyutundaki parçacıkları içerir. İnce sınıf, iyi derecelenmiş kum karakteristiği gösterir ve belirli oranlarda çakıl ve silt boyutunda parçacıklar içerir. Bu ince sınıf içerisinde, No. 4 eleğinde (4.75 mm) kalan çakıl boyutundaki parçacıklarla birlikte, No. 200 eleğini (0.075 mm) geçen silt boyutundaki parçacıklar yer alır.

Çelik cürufu örneklerinde, silt boyutundaki parçacıkların oranı genellikle %10-15 arasında değişmektedir [113-114]. Bu çeşitliliği etkili bir şekilde değerlendirebilmek ve granülometrik yapıyı tanımlayabilmek için, tane boyutu analizinin dikkatli bir şekilde yapılması gereklidir. Tane boyutu dağılımı, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu için, bu analizlerin sonucunda çelik cürufunun geoteknik uygulamalarda nasıl kullanılabileceğine dair önemli bilgiler elde edilmektedir.



Şekil 6.3. Mekanik elek sallama makinesi, iç içe geçmiş bir elek seti ile birlikte ve malzeme kurutma fırını

Buna ek olarak, malzemelerinin silt ve kil oranlarını doğru bir şekilde tespit etmek amacıyla hidrometre analizi (ASTM D7928-21e1) yapılmıştır (Şekil 6.4). Bu analiz, malzemelerin daha ince taneli bileşenlerinin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Tane boyutu dağılımı (granülometri) ile ilgili malzeme davranışında tutarlılığı sağlamak amacıyla, malzemelere ASTM D1241–15 standardına düzenleme yapılmıştır. Bu işlem, temel malzemelerin istenen mühendislik performansını sergilemesi için gerekli olan tane dağılımının elde edilmesini sağlamaktadır. Malzemeler, tedarik edildikleri haliyle, yani herhangi bir tane boyutu düzenlemesi yapılmaksızın, orijinal granülometri ile kullanılmıştır.

Bu yöntem, malzemelerin doğal durumları ile mühendislik tasarım standartları arasındaki farkları gözlemleyebilmek için önemli bir karşılaştırma imkanı sunmuştur.



Şekil 6.4. Malzemelere ait hidrometre test deneyleri

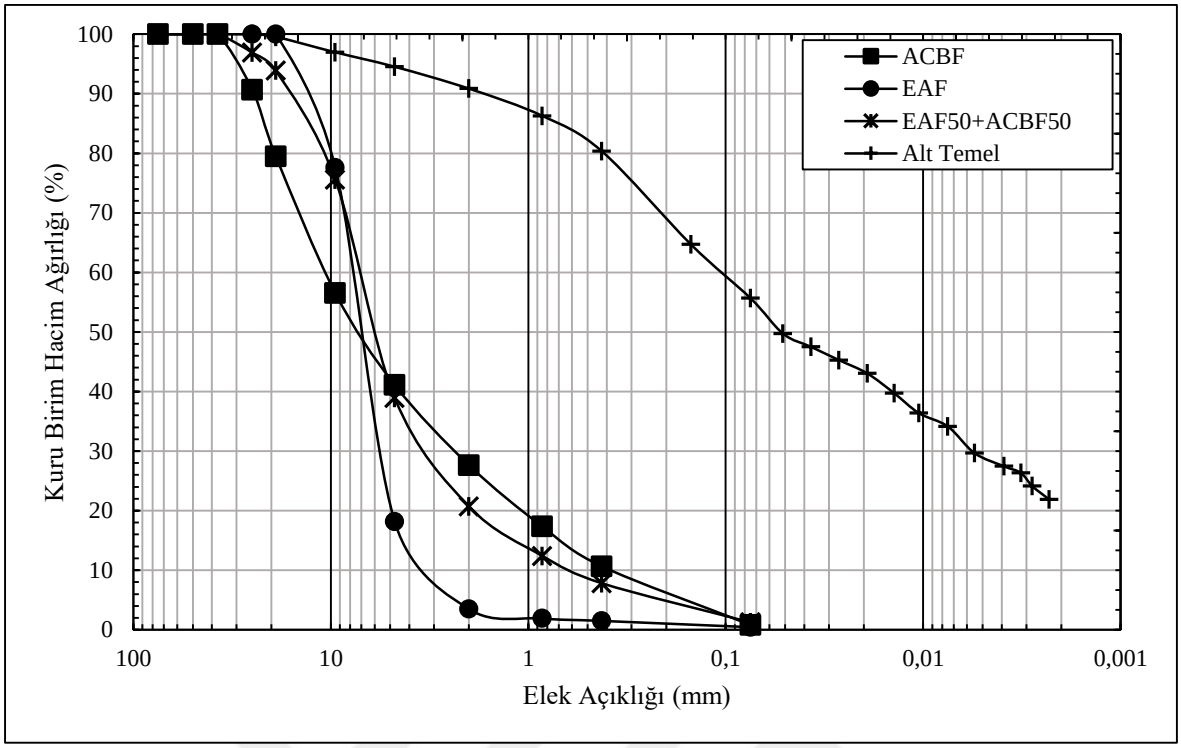
Yukarıda bahsedilen testlerin (elek ve hidrometre) sonuçları, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) (ASTM D2487) ve Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma Idareleri Birliği (AASHTO) zemin sınıflandırma sistemine (AASHTO M 145) göre zemin sınıflandırmasını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 6.5'te, çakıl, kum ve ince taneli malzeme yüzdeleri ile zemin sınıflandırmasını göstermektedir.

Bu sınıflandırma, C_u üniformluk katsayısı ve C_c eğrilik katsayısına dayalıdır.

$$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$c_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} x D_{60}}$$

olarak tanımlanır. Burada D_{60}, D_{30} ve D_{10}, sırasıyla %60, %30 ve %10 geçen parçacık boyutlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 6.5. Çelik cürufların ve alt temel malzemesinin elek analizleri

6.2.2. Atterberg limitleri

İnce taneli zeminlerin plastisitesi, likit limit (LL) ve plastik limit (PL) gibi parametrelerin bir fonksiyonu olarak kabul edilir ve bu parametreler, inşaat/geoteknik mühendisliği, tarım uygulamaları, seramik sanayi ve tuğla üretim süreci gibi birçok alanda büyük öneme sahiptir.

Bu kıvam limitlerinin belirlenmesine yönelik orijinal testler, Atterberg'in [115-116] araştırmalarından kaynaklanmakta olup, sonrasında Terzaghi [117-118] ve Casagrande [119-120] tarafından inşaat mühendisliği uygulamaları için standartlaştırılmıştır. Likit limit, teorik olarak, ince taneli bir zeminin likit olarak akmayı durdurduğu su içeriği (w) olarak tanımlanır. Atterberg'in orijinal olarak önerdiği el ile yuvarlama plastik limiti, zeminin davranışında gözlemlenebilir gerçek bir geçişi belirler. Bu test, su içeriği plastik limitin iki tarafında kalan zeminin cam bir plaka üzerinde yuvarlanmasıyla elde edilir. Casagrande likit limiti ise, doygun hale getirilmiş ince taneli bir zemin numunesinin yerleştirildiği pirinç bir kabın, içine standart bir oluk açılarak, 10 mm mesafeden bir kauçuk taban üzerine tekrarlı olarak düşürülmesi ile belirlenir. Bu işlemde, plastik akışın oluktaki belirli bir uzunluğu kapatması için 25 darbenin gerekli olduğu su içeriği, likit limit olarak tanımlanır. Bu bilgiler ışığında hem cüruf malzemelerine hem de alt temel malzemelerine testler uygulanmıştır. Alt

temel malzemesi için likit limit, plastik limit ve plasitisite indisi değerleri sırasıyla %33.3, %13.5 ve %19.8 iken, cüruf parçacıklarının plastik olmayan yapısı nedeniyle casagrande testi sonucunda bir değer elde edilememiştir (Şekil 6.6) [121].



Şekil 6.6. Casagrande aparati kullanılarak çelik cüruf malzemesinin likit limit testi

6.2.3. Özgül ağırlık

Özgül ağırlık (G_S), boşluk oranı, doygunluk derecesi ve zemin yoğunlukları gibi diğer önemli miktarların hesaplanmasında kritik bir öneme sahip bir özelliktir. Ayrıca, sedimantasyon analizi, kompaksiyon ve konsolidasyon analizleri gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında da gerekli bir parametredir. Bu nedenle, özgül ağırlığın laboratuvar ortamında titizlikle belirlenmesi gerekmektedir.

Büyük taneli zeminlerin özgül ağırlığının belirlenmesi genellikle zorluk teşkil etmezken, ince taneli zeminler, özellikle kil türleri için, birçok pratik zorluk nedeniyle benzer bir kolaylıkla ölçülememektedir.

Geleneksel olarak, zemin katılarının özgül ağırlığı, piknometre veya yoğunluk şişesi yöntemi ile laboratuvar ortamında belirlenmektedir (ASTM D 854-06, 2007; IS: 2720, 1980; BS: 1377, 1990). Bu test, orta zorluk derecesine sahip olup, en büyük hata kaynağı, zemin örneğinde hapsolmuş hava kabarcıklarının varlığından kaynaklanmaktadır [122-123].

<u>İnce tanelerin özgül ağırlığı</u>

4.75 mm'den daha küçük çelik cürufu parçacıklarının özgül ağırlığı, ASTM D854-06 standartlarına uygun olarak su piknometresi yöntemi ile belirlenmiştir. Piknometrenin

kalibrasyonu amacıyla, belirli bir hacme kadar hava almış su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi, farklı sıcaklıklarda kaydedilmiştir. Fırında kurutulmuş malzemelerin başlangıç kütlesi kaydedildikten sonra, bu örnek daha önce kalibre edilen boş piknometreye yerleştirilmiştir.

Piknometrenin hacminin yaklaşık 2/3'ü kadar havasız su ekledikten sonra, hava alma süreci başlatılmıştır. Bu süreç, su piknometresi yönteminde hapsolmuş havanın yanlış hacim ölçümlerine neden olabileceğinden kritik bir adımdır. Hava alma işlemi, hem ısıtma hem de hava vakumlama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7, deneye ait görüntüyü sunmaktadır.



Şekil 6.7. İnce taneli malzemeler için piknometre uygulaması

İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyinden elde edilen verilerin hesaplanması için gereken formüller ve açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

M_P = Piknometre ağırlığı (gr)

M_{P+S} = Piknometre ve içindeki suyun ağırlığı (gr)

M_{P+A} = Piknometre ve içindeki ince agrega ağırlığı (gr)

M_{P+A+S} = Piknometre, içindeki su ve ince agrega ağırlığı (gr)

M_{KURU} = İnce agreganın kuru ağırlığı (gr)

Kuru Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_K = \frac{M_{KURU}}{(M_{P+A} - M_{P)} - (M_{P+A+S} - M_{P+S)}}$$

DKY Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_{DKY} = \frac{M_{KURU} - M_P}{(M_{P+A} - M_{P)} - (M_{P+A+S} - M_{P+S)}}$$

Görünen Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_g = \frac{M_{KURU}}{(M_{KURU}) - (M_{P+A+S} - M_{P+S)}}$$

Su Emme Oranı (%)

$$S = \frac{(M_{P+A} - M_P) - M_{KURU}}{M_{KURU}} * 100$$

Kaba tanelerin özgül ağırlığı ve emilimi

Kaba tanelerin özgül ağırlığını belirlemek için ASTM C127'de tanımlanan prosedürler izlenmiştir. Fırında kurutulmuş örnekler başlangıçta 24 saat süreyle suya daldırılmıştır. Şekil 6.8, malzemelere ait kaba tanelerin (4.75 mm'den büyük boyutlardaki) ıslatma süreci sırasında çekilmiş bir görseli sunmaktadır.



Şekil 6.8. İri taneli malzemeler için özgül ağırlık testi

Islatma süresi tamamlandığında, örneklerin yüzeyleri bir bezle kurutulmuş ve yüzey kurutulmuş doygun örneklerin kütlesi ölçülmüştür. Ardından, örnekler tel örgü bir kabın içine yerleştirilmiş ve suya daldırılmıştır; bu aşamada çelik cürufu örneklerinin yüzdürme kütlesi ölçülmüştür. Örnekler fırında kurutulduktan sonra son kütle ölçümü alınmıştır.

Bu ölçümler ve saf suyun yoğunluğu kullanılarak, her malzeme örneği için fırında kuru özgül ağırlık, doygun yüzey kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve kaba agregaların su emilimi şu şekilde belirlenmiştir:

M_{DKY} = Agreganın DKY ağırlığı (gr)

M_{SUDA} = Agreganın suiçindeki ağırlığı (gr)

M_{KURU} = İri agreganın kuru ağırlığı (gr)

Kuru Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_K = \frac{M_{KURU}}{(M_{DKY} - M_{SUDA})}$$

DKY Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_{DKY} = \frac{M_{DKY}}{(M_{DKY} - M_{SUDA})}$$

Görünen Özgül Ağırlık (gr/cm^3)

$$\delta_g = \frac{M_{KURU}}{(M_{KURU} - M_{SUDA})}$$

Su Emme Oranı (%)

$$S = \frac{M_{DKY} - M_{KURU}}{M_{KURU}} * 100$$

Bu veriler doğrultusunda Çizelge 6.5 cüruf malzemelerline ait özgül ağırlık değerlerini sunmaktadır. Alt temel malzemesinin özgül ağırlık değeri 2.65'tir. Elektrik ark ocağı cürufu (EAF) için tipik Gs değerleri 3.47 ile 3.96 arasında değişirken, hava soğutmalı yüksek fırın cürufu (ACBF) için bu değerler 2.21 ile 2.90 arasında değişmektedir.

Çizelge 6.5. EAF ve ACBF çelik cüruflarının özgül ağırlıkları

Malzeme Tanımlayıcı	İri agrega				İnce agrega			
	$G_{s,OD}$	$G_{s,SSD}$	$G_{S,a}$	WA (%)	$G_{s,OD}$	$G_{s,SSD}$	$G_{S,a}$	WA (%)
ACBF	2,21	2,35	2,57	6,43	2,18	2,43	2,90	11,35
EAF	3,47	3,57	3,83	2,71	2,80	3,10	3,96	10,36
$G_{s,OD}$=etüv kurusu özgül ağırlık								
$G_{s,SSD}$=doygun yüzey kuru özgül ağırlık								
$G_{S,a}$=görünen özgül ağırlık								
WA (%)=su emme oranı								

6.2.4. Kompaksiyon

Proctor sıkıştırma testi ile optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum kuru yoğunluk (MDD) belirlenmektedir. Kompaksiyon işlemi, yolların, otoyolların, barajların ve çöplüklerin inşasında OMC ve MDD'yi belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Proctor'un 1933'teki çalışmasından bu yana, laboratuvar ortamında sıkıştırma testleri, yoğunlaştırma mekanizmasını incelemek için birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır. Lee ve Suedkamp (1972) farklı topraklar için sıkıştırma eğrilerinin şekilleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Lambe (1958) ise sıkıştırma eğrilerini fizikokimyasal etkileşimler açısından açıklamıştır. Günümüzde mühendislik projelerinde, Standart Proctor testi veya Modifiye Proctor testi ile belirlenen maksimum kuru yoğunluğun %90 ile %95'i arasında bir sıkıştırılmış alan kuru yoğunluğu, çoğu teknik şartnamede gerekmektedir.

Standart proctor test

Bu testte ASTM D-698 standardına göre, standart bir kalıbın çapı 101.6 mm, etkin yüksekliği ise 116.63 mm olarak önerilmektedir. Kalıbın çıkarılabilir bir taban plakası ve üst kısmında 2 inçlik bir yaka bulunur. Zemin numunesi, kalıp içinde 24.4 N kuvvetinde bir sıkıştırıcı kullanılarak, her katmana 304.8 mm yükseklikten 25 kez düşürülmek suretiyle üç eşit tabaka halinde sıkıştırılır. Sıkıştırma eğrisi, kuru yoğunluk ve nem içeriği arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu eğriden tek bir tepe noktasına sahip olan optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum kuru yoğunluk (MDD) değerleri elde edilebilir.

Modifiye proctor test

Standart Proctor sıkıştırması ile elde edilen yoğunluktan daha yüksek bir alt temel yoğunluğu gerektiren durumlarda, Modifiye Proctor sıkıştırma testi kullanılmaktadır. ASTM D-1557 ve AASHTO T-180, bu yöntemin tüm detaylarını açıklamakta olup, ağır silindirler kullanıldığında saha koşullarını daha iyi taklit edebileceği düşünülmektedir. Modifiye proctor testinin esasları, standart proctor testi ile aynıdır. Ancak, Modifiye Proctor testinde 24.5 N kuvvetindeki tokmakla üç tabaka yerine, 44.5 N kuvvetindeki tokmakla beş tabaka sıkıştırılır. Bu nedenle, Modifiye Proctor testindeki sıkıştırma enerjisi, standart proctor testine göre yaklaşık beş kat daha fazladır. Malzemeye uygulanan bu artan enerji sonucunda, yoğunluk %5 ila %10 oranında artarken, optimum nem içeriği (OMC) daha düşük seviyede elde edilir [124].

Modified Proctor" deneyi, "Standard Proctor" testine kıyasla genellikle daha yüksek bir zemin yoğunluğu verir ve bu fark yaklaşık %5 civarındadır. Bu, Modified Proctor yönteminde uygulanan daha yüksek sıkıştırma enerjisinden kaynaklanır. Modified Proctor

testinde kullanılan daha yüksek enerji, aynı su içeriğinde daha yoğun bir zemin yapısı elde edilmesine yol açar ve bu durum, özellikle daha yüksek yük taşıma kapasitesine ihtiyaç duyulan inşaat projeleri için önemlidir.

Olası zemin sıkıştırma derecesi, öncelikle parçacıkların boyut ve şekil dağılımına bağlıdır: Eğer hem büyük hem de küçük taneleri içeren bir yapı varsa, iri tanelerin arasındaki boşluklarda yer alan küçük taneler, mümkün olan yoğunluğun artmasına katkı sağlar. Sıkıştırma işlemi sırasında uygulanan mekanik iş miktarı arttıkça, elde edilen zemin yoğunluğu da yükselmektedir. Belirli bir zemin sıkıştırması için harcanan iş aynı kalmak koşuluyla, elde edilen yoğunluk sıkıştırma sırasında malzemenin nem içeriğine bağlıdır. Bu faktörlerin birleşik etkisi, sıkıştırma derecesinin değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Proctor'un önerisi doğrultusunda, her malzeme için laboratuvar koşullarında, tüm malzemeler için aynı sıkıştırma işinde, sahada hedeflenen sıkıştırma yoğunluğunu belirlemek amacıyla çalışmalar yapılmakta, ardından sahada elde edilen yoğunluk göstergesi ölçülmekte ve laboratuvar koşullarında elde edilen değerle karşılaştırılmaktadır.

Proctor, değerlendirme için zeminin yoğunluğunu $p = \frac{M}{V}$ (zeminin birim hacmindeki kütle) kullanmayı önermekle kalmamış, aynı zamanda zemin parçacık yoğunluğu ρ_d'yi kullanmayı önermiştir; bu, zemin birim hacmindeki katı parçacıkların kütlesidir. Bu, temel bir öneme sahiptir. Aslında, sıkıştırmanın amacı, malzeme içindeki iri taneleri birbirine yaklaştırarak, dış yüke karşı iyi bir şekilde dayanabilen bir sistem oluşturmaktır.

Verilen bir malzeme hacmindeki iri taneciklerin kütlesi ne kadar büyükse, taneciklerin yerleşimi o kadar yakın olur ve sıkıştırma daha iyi sağlanır. Malzeme kütlesi M, parçacık kütlesi M_s ve su kütlesi M_w'den oluşmakta olup, hava kabarcıklarının boşluk kütlesi M~~a~~ ihmal edilebilir: $M = M_S + M_W$. Bu denklemin her iki tarafını malzemenin toplam hacmi V'ye böldüğümüzde, $p = p_d x(1 + w)$ ifadesini elde ederiz; burada $w = \frac{M_w}{M_s}$, su kütlesinin parçacık kütlesine oranını temsil eden nem oranıdır. Bu nedenle, belirli bir hacimdeki zemin örneği alındığında ve tartıldığında, yoğunluğu $p = \frac{M}{V}$ ile bulabiliriz. Ardından, sabit bir ağırlığa ulaşana kadar kurutulduğunda, nemi bulunur ve malzemenin parçacık yoğunluğu şu formülden hesaplanır [125]:

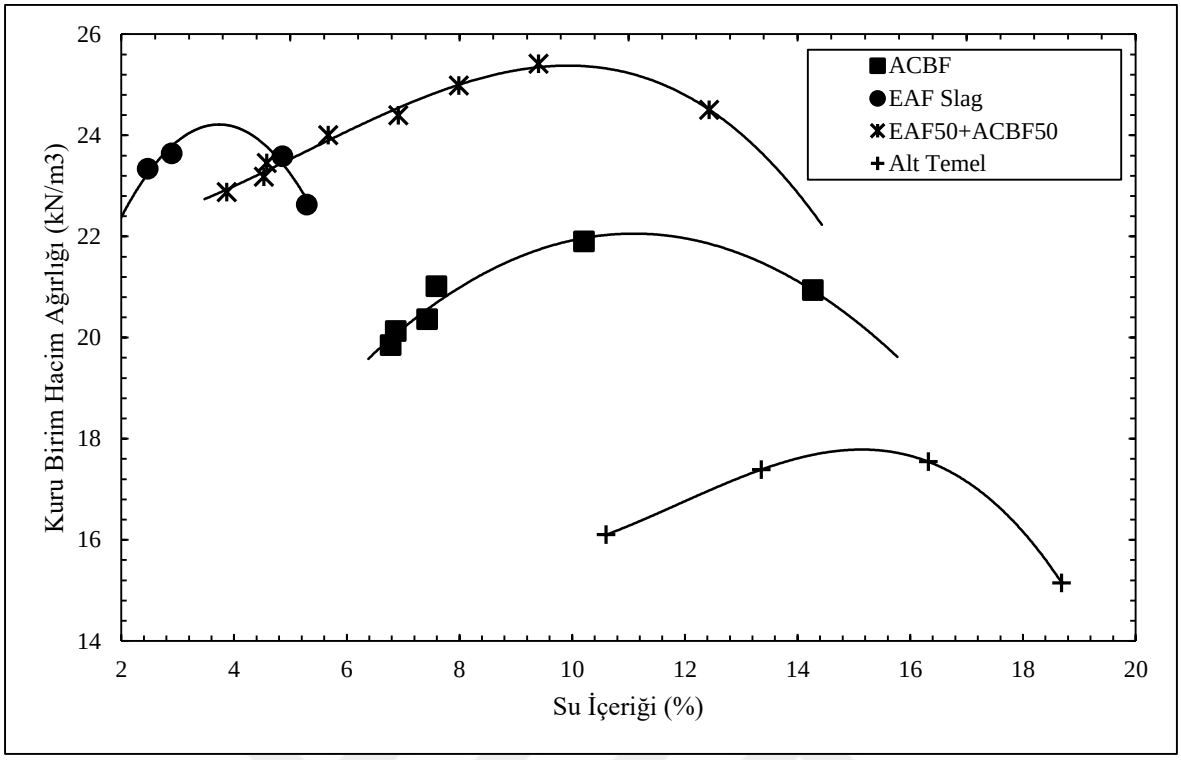
$$p_d = \frac{p}{(1+W)}$$

Esneklik modülü testlerini gerçekleştirmek için, araştırmanın önemli bir parçasını oluşturan bu testlerde, malzemelerin maksimum kuru birim ağırlığı (MDU) ve optimum nem içeriği (OMD) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu değerler ASTM D1557-12 standardına uygun olarak modifiye sıkıştırma testi gerçekleştirilerek elde edilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Kompaksiyon testlerine ait deneysel görüntüler

Şekil 6.10, modifiye sıkıştırma testinin sonuçlarının bir özetini sunmaktadır. EAF cürufu için maksimum kuru birim ağırlığı (MDU) 24.3 kN/m³, optimum nem içeriği (OMC) ise %3.7 olarak belirlenmiştir. ACBF cürufu için MDU değeri 22 kN/m³, OMC değeri ise %10.9 olarak tespit edilmiştir. Alt temel için MDU ve OMC değerleri sırasıyla 17.8 kN/m³ ve %15.3 olarak belirlenmiştir. EAF ve ACBF karışımından oluşan malzemenin (EAF50+ACBF50) MDU değeri 25.2 kN/m³, OMC değeri ise %10.2'dir.



Şekil 6.10. Malzemelerin kompaksiyon karakteristik özellikleri eğrisi

Çizelge 6.6, farklı zemin malzemelerinin mühendislik özelliklerini kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu tabloda, malzemelerin silt-kil, kum ve çakıl oranları, USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) ve AASHTO (Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği) sınıflamaları yer almaktadır. Silt-kil, kum ve çakıl oranları, zeminin granülometrik bileşimini göstererek, zemin türünün fiziksel davranışını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. USCS ve AASHTO sınıflamaları, zeminlerin mühendislik uygulamaları için uygunluğunu değerlendirmede kullanılan temel sınıflandırma sistemleridir; USCS sınıflaması, zeminleri tane boyutuna ve plastikliğine göre sınıflandırırken, AASHTO sınıflaması özellikle yol yapımı gibi altyapı projeleri için zeminlerin taşıma kapasitesi ve dayanıklılığı hakkında bilgi verir. Ayrıca, üniformluk katsayısı ve eğrilik katsayısı gibi parametreler, zeminlerin tane boyut dağılımının homojenliğini ve yapısal dengesini değerlendirmek için kullanılır. Bu katsayılar, zeminin sıvı geçirmezlik ve stabilite özelliklerine dair önemli ipuçları sağlar.

Tabloda ayrıca, malzemelerin pH değerleri ve elektriksel iletkenlik özellikleri de belirtilmiştir. pH değeri, zeminin kimyasal özelliklerini ve asidik ya da bazik yapısını anlamada önemli bir parametredir, özellikle zemin stabilizasyonu ve zemin ile temas eden

yapı elemanlarının korozyona karşı dayanıklılığı açısından değerlendirilir. Elektriksel iletkenlik, zeminin iyonik bileşimi hakkında bilgi verir ve zemin-su ilişkisini anlamada kullanılır.

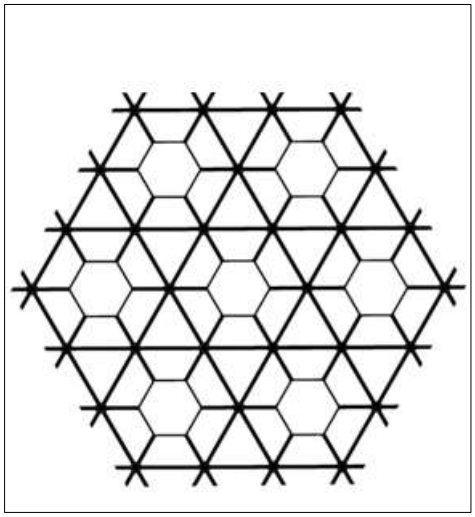
Son olarak, kompaksiyon parametreleri zeminlerin maksimum kuru yoğunlukları ve optimum nem içerikleri gibi Proctor test sonuçlarına dayanmaktadır. Bu parametreler, zeminin sıkıştırılabilirlik performansını belirlemeye yardımcı olur ve özellikle altyapı projelerinde kullanılan malzemelerin yeterli taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlamak açısından kritiktir.

Çizelge 6.6. Malzemelere mühendislik özellikler

Mühendislik özellikleri		ACBF	EAF	EAF50+ACBF50
Silt-Kil	(%)	72	96,50	79,20
Kum	(%)	26	3,20	19,70
Çakıl	(%)	<2	<1	<1.50
USCS sınıflandırması	-	GW	GP	GW
AASHTO sınıflandırması	-	A-2-4	A-2-5	A-2-6
Üniformluk katsayısı	C_u	28,60	2,51	11,90
Eğrilik katsayısı	C_c	1,47	1,24	2,46
Modifiye kompaksiyon, MDD	(kN/m^3)	22,05	23,75	25,50
Modifiye kompaksiyon, OMC	(%)	11	4	10,40
Sodyum sülfat testi, 4.75-9.5	(%)	4,54	1,67	-
Sodyum sülfat testi, 9.5-12.5	(%)	10,72	1,80	-
pH	-	9,79	11,38	-
Elektriksel iletkenlik	(S/m)	270	878,50	-
USCS: Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi				
AASHTO: Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği				
MDD: Maksimum Kuru Yoğunluk				
OMC: Optimum Nem İçeriği				

6.2.5. Geogrid malzemesinin mühendislik özellikleri

Tez çalışması kapsamında kullanılan cüruf numuneleri ile geogrid güçlendirme mekanizması arasındaki ilişkinin net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla, özellikleri Çizelge 6.7'de verilen ve altıgen, üçgen ve trapez deliklere sahip üç yönlü (triaxial) geogrid, ticari faaliyetlerini sürdüren bir firmadan temin edilmiştir. Temin edilen bu geogridin görüntüsü Şekil 6.11'de, özellikleri ise Çizelge 6.7'de sunulmuştur.



Şekil 6.11. Tez çalışmasında kullanılan geogride ait şematik görüntü

Çizelge 6.7. Geogrid malzemesinin genel özellikleri

Tanımlayıcı Özellikleri	Değer
Ana polimer türü	Polipropilen
Yapısı	Ekstrüzyon & Bütünleşik şekillendirme
Açıklık şekli	Altıgen, trapez, üçgen
Rib şekli	Dikdörtgen
Süreli paralel rip aralığı, mm (in)	80 (3,2)
Rib en-boy oranı	> 1.0
Düğüm kalınlığı, mm (in)	4,5 (0,18)

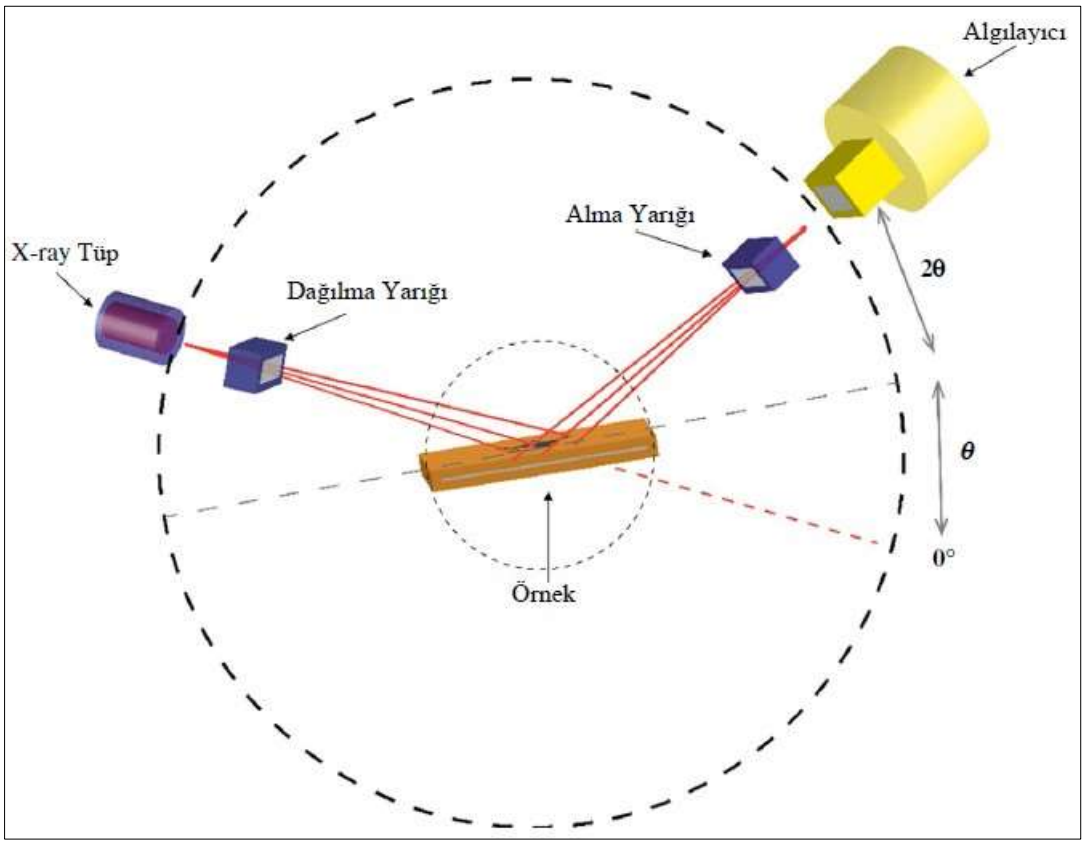
6.3. Mineralojik ve Morfolojik Karakterizasyonu

6.3.1. X-Işını difraksiyonu

X-ışını kırınımı (XRD), karmaşık mineral topluluklarındaki mineralleri tanımlamak, nicelendirmek ve karakterize etmek için mineralojide önemli bir araçtır. Kil mineralleri, katkı maddeleri ve bunların dönüşüm ürünlerinden oluşan antik seramiklere uygulanması, nesnelerin mineral bileşimi hakkında bilgi sağlar. Bu sayede, pişirme sıcaklıkları, fırın atmosferleri ve sırlama veya sıvama işlemleri gibi üretim süreçlerinin ayrıntıları görünür hale gelebilir.

X-ışını kırınımı, kristal yapıları ve atomik aralıkların incelenmesinde yaygın bir teknik haline gelmiştir. X-ışını kırınımı, monokromatik X-ışınlarının ve kristal bir örneğin yapıcı

girişimine dayanır. Bu X-ışınları, bir katot ışını tüpü tarafından üretilir, monokromatik radyasyon elde etmek için filtrelenir, yoğunlaştırılır ve örneğe yönlendirilir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. X-ışını difraktometre aletinin şematik gösterimi [126].

Gelen ışınların örnekle etkileşimi, Bragg yasasını sağladığında yapıcı girişim (ve kırınıma uğramış bir ışın) üretir.

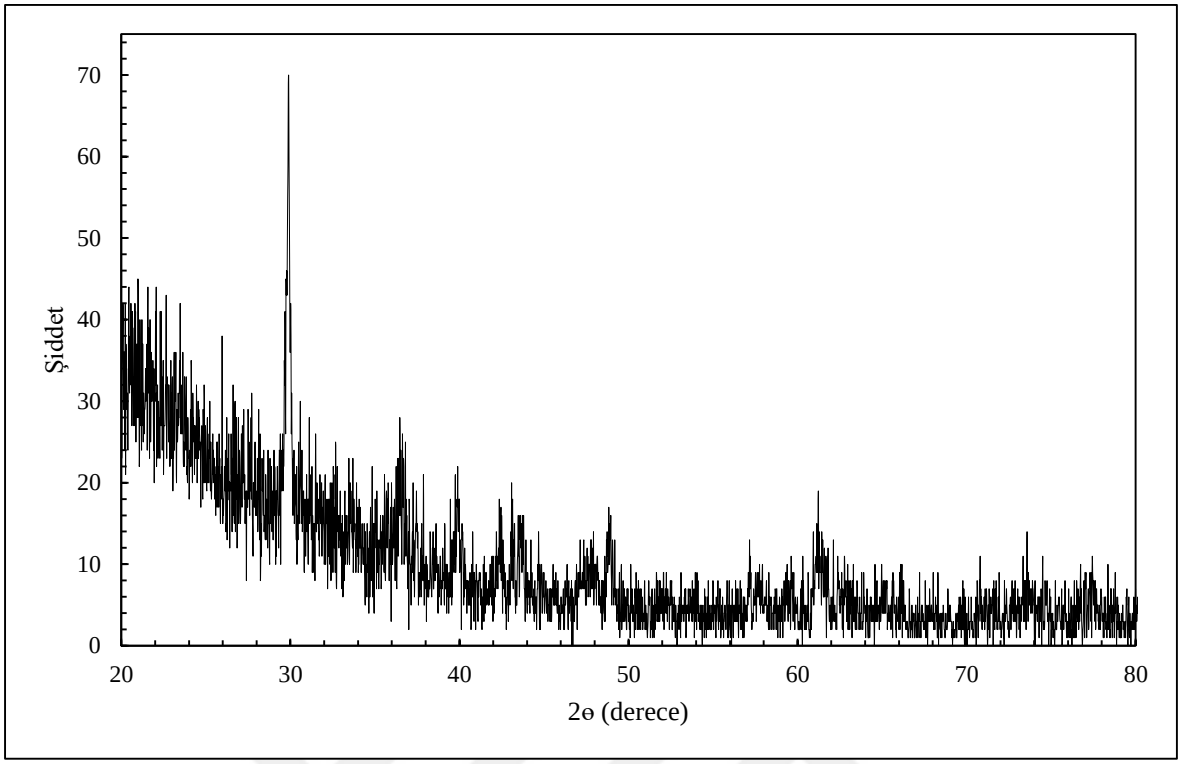
$$n\lambda = 2dsin\theta$$

Burada n bir tam sayı, λ X-ışınlarının dalga boyu, d kırınım oluşturan düzlemler arası mesafe ve θ kırınım açısıdır. Bu yasa, elektromanyetik radyasyonun dalga boyunu kırınım açısına ve kristal bir örnekteki kafes aralığına bağlar. Kırınıma uğrayan X-ışınları daha sonra tespit edilir, işlenir ve sayılır. Toz haline getirilmiş malzemenin rastgele yönelimi sayesinde, örnek bir dizi 2θ açısı boyunca tarandığında tüm olası kırınım yönleri elde edilebilir. Kırınım zirvelerinin d aralıklarına dönüştürülmesi bileşiğin tanımlanmasını sağlar; çünkü her bileşiğin kendine özgü bir d aralıkları seti vardır. Genellikle bu, d aralıklarının standart referans desenleriyle karşılaştırılmasıyla yapılır.

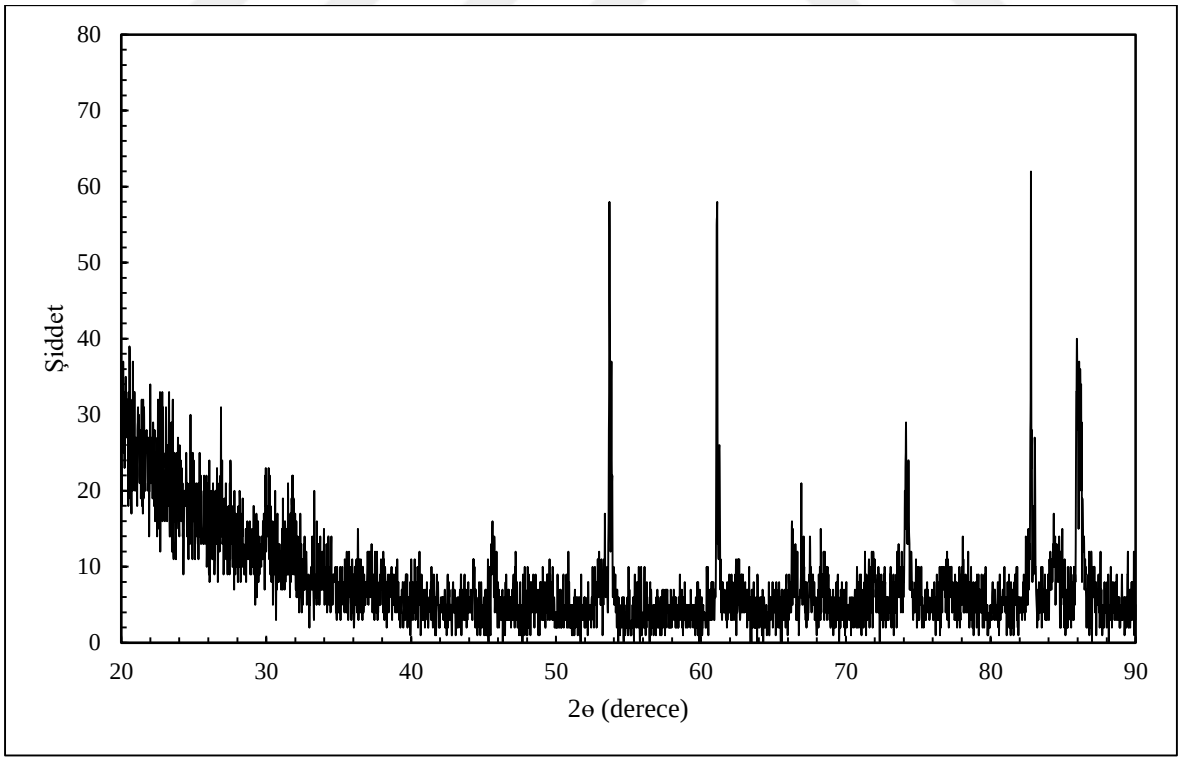
X-ışını kırınım cihazları üç temel elemandan oluşur: bir X-ışını tüpü, bir örnek tutucu ve bir X-ışını dedektörü. X-ışınları, bir katot ışını tüpünde bir filamentin ısıtılarak elektron üretmesi, elektronların bir hedefe yönlendirilmesi için bir voltaj uygulanması ve hedef malzemenin elektronlarla bombardımana tutulması yoluyla üretilir. Elektronlar, hedef malzemenin iç kabuk elektronlarını yerinden çıkaracak yeterli enerjiye sahip olduğunda karakteristik X-ışını spektrumu ortaya çıkar. Bu spektrumda en yaygın bileşenler K_α ve K_β'dır. K_α, $K_{\alpha1}$ ve $K_{\alpha2}$'yi içerir. $K_{\alpha1}$, $K_{\alpha2}$'den biraz daha kısa bir dalga boyuna ve iki kat yoğunluğa sahiptir. Spesifik dalga boyları, kullanılan hedef malzemeye (Cu, Fe, Mo, Cr) özgüdür. Kırınım için gerekli olan monokromatik X-ışınlarını elde etmek amacıyla folyo veya kristal monokromatörlerle filtreleme yapılır. $K_{\alpha1}$ ve $K_{\alpha2}$ dalga boyları yeterince yakın olduğundan, ikisinin ağırlıklı ortalaması kullanılır. Tek kristal kırınımı için en yaygın hedef malzeme bakırdır ve CuK_α radyasyonu λ=1.5418 A˚dir. Bu X-ışınları yoğunlaştırılır ve örneğe yönlendirilir. Örnek ve dedektör döndürülürken yansıyan X-ışınlarının yoğunluğu kaydedilir [127].

Çelik cüruflarının mineralojik ve kimyasal özellikleri, üretim sürecindeki işlemlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, malzemelere X-ışını kırınımı testleri uygulanmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) test sonuçları Şekil 6.13 ve 6.14'de gösterilmektedir. Toz haline getirilmiş cürufların mineralojik bileşimini elde etmek için 10° ile 60° arasında, 2θ ölçüm aralığında ve saniyede 0.02° adım boyutuyla ölçüm yapılmıştır (75 μm'den geçen malzemeler kullanılmıştır).

EAF cüruf örneğinin XRD desenleri, örnekte bulunan birçok mineral nedeniyle birbirine örtüşen çok sayıda zirve ile oldukça karmaşık bir yapı sergilemiştir (Şekil 6) (Yıldırım ve ark., 2011). EAF malzemesi üzerinde yapılan testlerde çeşitli ana kristal fazlar tespit edilmiştir: larnit (Ca_2SiO_4), srebrodolskit ($Ca_2Fe_2O_5$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), maghemit (γ-Fe_2O_3), wüstit (FeO), demir kromit ($FeCr_2O_4$), magnezyokromit ($MgCr_2O_4$) ve kuvars (SiO_2).



Şekil 6.13. EAF cürufunun X-ışını kırınım grafiği



Şekil 6.14. ACBF cürufunun X-ışını kırınım grafiği

6.3.2. Mikroskobik inceleme

SEM’in (Taramalı Elektron Mikroskobu) geliştirilme fikri, geçen yüzyılın 1933 yılına dayanmaktadır; ilk elektron mikroskobu, 1933'te Ruska ve Knoll adlı iki fizik bilim insanının çalışmaları temel alınarak inşa edilmiştir. Cihaz, yalnızca ince örneklerden geçen elektronları kullanan transmisyon elektron mikroskobu (TEM) olarak adlandırılmıştır ve bilinen optik mikroskopların ötesinde bir büyütme sunmaktadır. Sonrasında, 1938 yılında Von Ardenne, TEM’e tarama bobinleri ekleyerek 23 kV voltaj, 8000x büyütme ve 50-100 nm çözünürlükle çalışan taramalı transmisyon elektron mikroskobunu (STEM) geliştirmiştir. Ardenne’nin laboratuvar cihazı, o günden itibaren her SEM sisteminin geliştirilmesinde standart hale gelen birçok özelliği içermektedir. Ancak, Ardenne'nin SEM ilkelerine dayanan ticari bir cihaz, laboratuvarında yaşanan patlama nedeniyle geliştirilememiştir. 1942’de Zworykin, Hillier ve Snyder, kalın örneklerin incelenmesi için yeni bir SEM tanımı sundular ve topografik kontrast için ikincil elektron yayılımının rolünü belirlediler. Oatley, 1952 yılında öğrencisi McMullan ile işbirliği yaparak, elektron tabancasında 40 kV voltaj kullanarak elektrostatik mercekli bir SEM geliştirdi. McMullan’ın çalışmasını Smith takip etti ve araştırmalarında McMullan'ın çalışmalarına ek ilkeler getirdi. Smith, mikrografların sinyal işleme ile iyileştirilebileceğini fark etti ve doğrusal olmayan sinyal amplifikasyonunu tanıttı. Ayrıca tarama sistemini geliştirmek için çift yönlü tarama yaptı. Bu iki öğrencinin çalışmaları, cihaz geliştirme alanında diğer araştırmaların temelini oluşturdu.

1953 yılında O. Wells, mikrograflarda üçüncü boyutu incelemek için yeni bir stereoskopik çift görüntü yöntemi geliştirdi. Bir diğer iki araştırmacı öğrenci (Everhart ve Thornley), ikincil elektronları ışığa dönüştüren bir sintilatör dedektörünün (ikincil dedektör) çalışmasını geliştirerek daha verimli bir fotomultiplere iletilmesini sağladı. Bu geliştirme, toplanan sinyallerin artırılmasına ve sinyal-gürültü oranının iyileştirilmesine yol açtı.

1963’te Pease, üç manyetik mercekli SEM V sistemini geliştirdi. Bu cihaz, Cambridge Scientific Instruments Mark 1 adı altında 1965 yılından itibaren piyasada bulunan ilk ticari cihaz olarak “Stereoscan” ismiyle satışa sunuldu. Sonrasında, daha fazla elektron emisyonu sağlayan gelişmiş elektron kaynaklarının kullanımı ve çözünürlüğün artırılması gibi birçok yenilik kaydedildi. Enerji Dağılımlı Spektrometre’nin (EDS) icadı büyük bir fayda sağladı.

Bu sistem, katı hal dedektörü ile X-ışınlarını ölçmek amacıyla 1968'den itibaren SEM ile başarıyla kullanıldı.

SEM'in en son evrimi, görüntülerin dijital olarak oluşturulması ve bilgisayar ekranında görüntülenmesi sürecidir. Günümüzde mevcut ticari SEM cihazlarının çoğu EDS sistemi ve alınan verileri analiz etmek için modern yazılımlarla donatılmıştır. EDS, bir bilgisayar programı yardımıyla numunedeki çeşitli elementlerin bileşimini değerlendirme avantajı sağlar. Bu yazılım, X-ışını yoğunluğunu kimyasal bileşimlere dönüştürme sürecini saniyeler içinde gerçekleştirir ve kantitatif analiz performansını artırır [128-129].

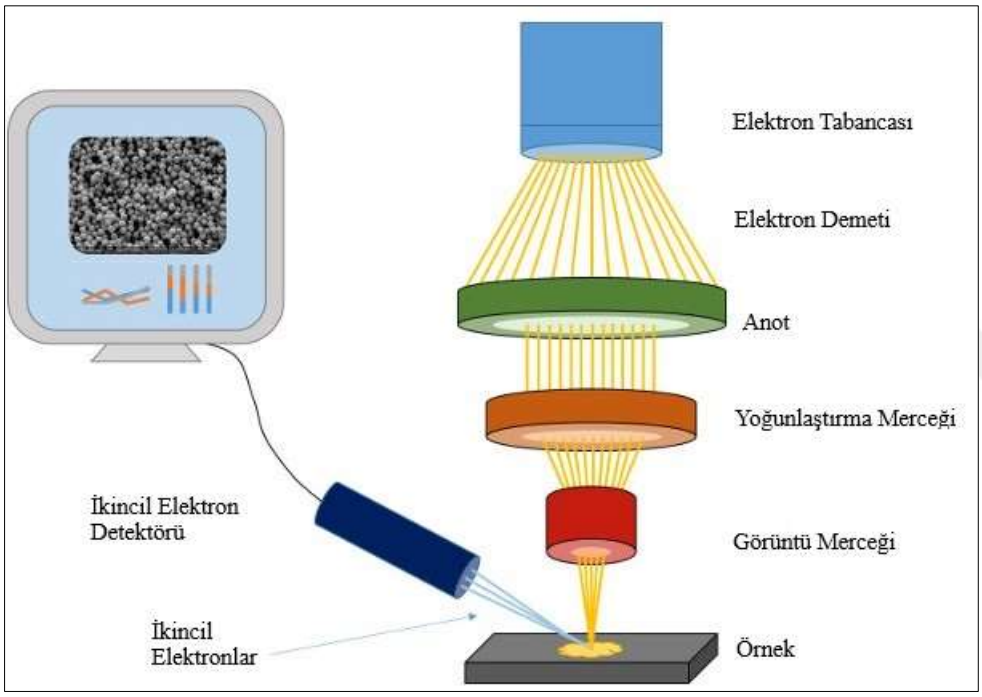
Sem analiz süreci

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), mikrodüzeydeki ve nanodüzeydeki görünmeyen dünyaları görme imkânı sunan bir araçtır. Işık mikroskobuyla erişilemeyen ayrıntılar ve karmaşıklıklar, SEM ile açığa çıkarılabilir. Bu süreç, Goldstein ve arkadaşları tarafından ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır ve daha fazla netlik için Şekil 6.15 incelenebilir:

- Analiz, yüksek enerjili elektronlardan (100-30.000 elektron volt arasında) oluşan bir ışın uygulanarak gerçekleştirilir. Genellikle bir termal kaynak elektron yayılımı için kullanılır.
- Tabancadan üretilen spot boyutu, net bir görüntü elde etmek için çok büyüktür; bu nedenle SEM, spotu sıkıştırmak ve odaklanmış elektronları örneğe yönlendirmek için merceklerle donatılmıştır. Çoğu SEM'in spot boyutu 10 nm'den küçüktür ve son mercekten toplanan elektronlar örnekle etkileşime girerek 1 μm derinliğe nüfuz eder ve görüntü oluşturmak için kullanılan sinyalleri üretir.
- Örnek görüntüsü, tarama bobinlerinin hareketine bağlı olarak, elektron demetini örneğin yüzeyinde dikdörtgen bir raster oluşturacak şekilde belirli noktalara yönlendirerek nokta nokta oluşturulur. Bu süreç, istenen büyütme seviyesine bağlıdır. Yüksek büyütmeli bir görüntü talep edildiğinde, tarama bobinleri demeti daha küçük bir alana yönlendirir. Modern SEM'lerde, çalışma mesafesi (son mercekten örnek yüzeyine kadar olan mesafe), büyütme üzerinde etkili olup otomatik ayarlama ile bu durum çözülmüştür.
- Elektron dedektörü, taranan örnekten yayılan elektronları (sinyalleri) algılar. Dedektörlerin yokluğunda, elektron demeti ile örnek yüzeyi arasındaki etkileşimden

üretilen her bir sinyal tek başına bir görüntü oluşturabilir ancak bu anlaşılması zor olur. SEM görüntü üretiminde ikincil elektronlar (SE) ve geri saçılan elektronlar (BSE) kullanılır. Kolektör ekranına pozitif bir voltaj verildiğinde hem SE hem de BSE toplanır. Ancak kolektör ekranında negatif voltaj uygulandığında yalnızca BSE toplanır. Şekil 9'da hem ikincil hem de geri saçılan elektronlar için kullanılabilen sintilatör dedektör gösterilmiştir [10].

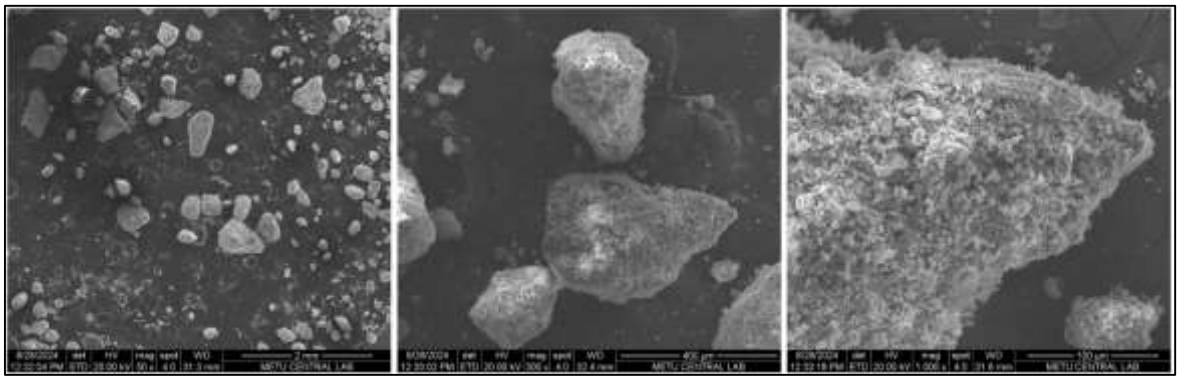
- Sinyaller görüntüleme ekranında gösterilir ve operatör, net bir görüntü elde edilene kadar parlaklık ve yoğunluğu kontrol eder. Örnekte küçük ayrıntıların görünmesi gerekiyorsa, 10.000x'in üzerinde bir büyütme uygulanmalıdır [130-131].



Şekil 6.15. SEM'in prensibini gösteren şematik diagram [148]

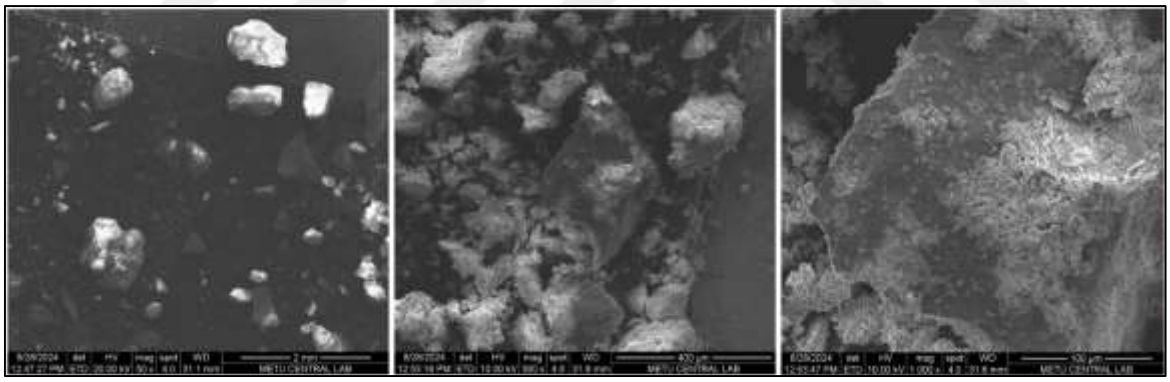
Bu bilgiler kapsamında tez çalışmasında SEM analizi, QUANTA 400F Alan Emisyon Mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri üç farklı büyütme değerinde (50x, 300x ve 1000x) yapılmıştır; Şekil 6.16 ve 6.17, SEM analizlerinin görsellerini sunmaktadır.

Şekil 6.16'da, EAF (Elektrik Ark Fırını) cürufunun yüzey dokusunun pürüzlü olduğu görülmektedir. Bunun ana sebebinin farklı mineral fazlarının dağılımı olduğu ortaya konmuştur. Cürufun pürüzlü yüzeyi, diğer materyallerle etkileşimde daha yüksek bir yapışma kapasitesi oluşturması nedeniyle faydalı bir özellik olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6.16. EAF cürufunun taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM): parçacık şekli ve yüzey dokusu

Şekil 6.17'de, ACBF parçacıklarının düzensiz bir yapıya sahip olduğu ve yüzeyde daha yoğun ama hafif düzensiz bir doku gözlemlendiği görülmektedir. Ayrıca, EAF cürufunun aksine, ACBF cürufunun gözenekli bir yapısı olduğu tespit edilmiştir. ACBF'nin keskin zirvelerle temsil edilen bir kristal yapıya sahip olduğu da gözlemlenmiştir. ACBF'nin gözenekli doğası, daha büyük parçacıklardaki bazı makro-gözenekleri gösteren mikroskop görüntülerinde de belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.17. ACBF cürufunun taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM): parçacık şekli ve yüzey dokusu

6.3.3. pH ve elektriksel iletkenlik

Bir su kütlesi gibi bir ortamı, pH ve elektriksel iletkenliğini (EC) ölçerek karakterize etmek genellikle yararlıdır. pH, suyun veya toprağın hidrojen iyon konsantrasyonuna dayalı asitliğinin bir ölçüsüdür ve matematiksel olarak hidrojen iyon konsantrasyonunun negatif logaritması veya

$$pH = -\log[H^+]$$

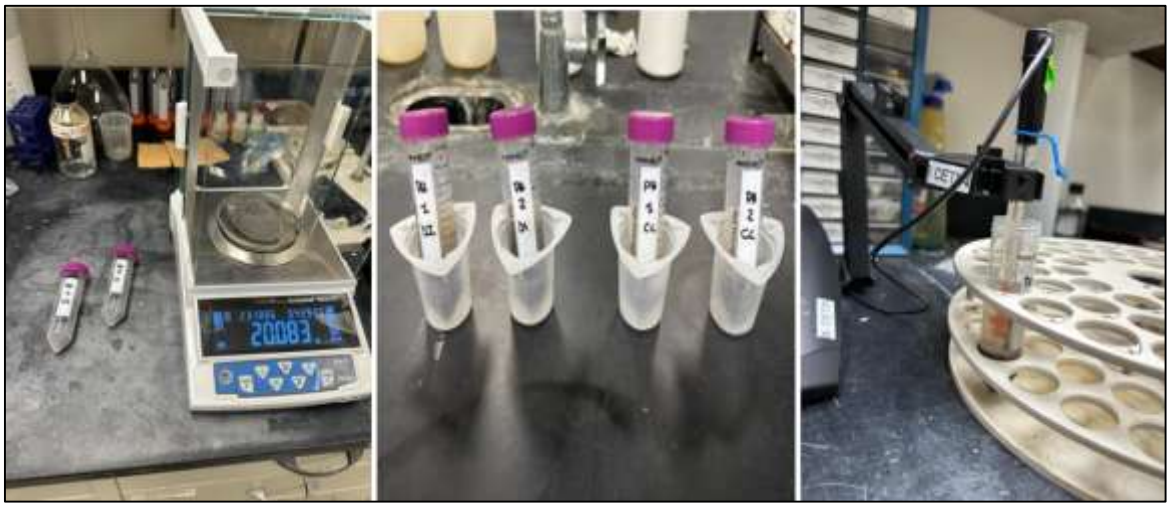
olarak tanımlanır; burada H + etrafındaki parantezler "konsantrasyonu" sembolize eder.

Elektriksel iletkenlik bir ölçüm cihazı ve prob kullanılarak da ölçülebilir. Prob, 1 cm aralıklı iki metal elektrottan oluşur (bu nedenle ölçüm birimi *santimetre başına* mikroSeimens veya miliSeimens'tir). Elektrotlara sabit bir voltaj uygulanır ve bu da sulu numuneden geçen bir elektrik akımıyla sonuçlanır. Sudan geçen akım, sudaki çözünmüş iyonların konsantrasyonuyla orantılı olduğundan, elektriksel iletkenlik ölçülebilir. Çözünmüş tuz/iyon konsantrasyonu ne kadar yüksekse, numune o kadar iletkendir ve dolayısıyla iletkenlik okuması o kadar yüksek olur.

Bir numunenin pH'ını ölçmek için bir metre ve prob veya turnusol kağıdı kullanılabilir. Bu yöntemlerden daha doğru ancak pahalı olanı metre ve probdur. pH metreler, özel çözeltiler veya bilinen bir pH değerine sahip tamponlar kullanılarak kalibre edilir. Kalibrasyon protokolleri üreticinin talimatlarında bulunabilir ancak basitleştirilmiş bir protokol de bulunabilir.

Turnusol veya pH kağıdı kullanmak pH'ı ölçmenin daha basit ve daha az masraflı yoludur. Bu yöntem, bir örnek çözeltisinin pH'ına göre renk değiştiren özel kağıt şeritleri kullanır. Şeritler, basit asit-baz karşılaştırmasından dar bir pH değeri çözünürlüğüne kadar çeşitli çözünürlüklerde gelir. Bu kağıt şeritleri, bir örnekteki 0,2-0,3 pH farkını ölçebilir. Turnusol kağıdı, örnek çözeltisinin asidik veya bazik olmasına göre renk değiştirir ve sırasıyla kırmızı veya maviye döner. pH şeritleri, bir örneğin pH'ını renk değiştirerek de gösterir; bu renkler paket üzerinde belirtilir ve farklı pH aralıkları ve üreticiler için değişir.

Araştırmada çözümün elektriksel iletkenliği ve pH'ı, sırasıyla dijital bir iletkenlik ölçer ve pH metre ile ölçülmüştür. Veriler zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Ölçüme ait görüntüler Şekil 6.18'de verilirken ölçüm sonuçları Çizelge 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.18. pH ve elektriksel iletkenlik testlerine ait deneysel görüntüler

Çizelge 6.8. Cüruf malzemelerinin pH ve elektriksel ölçüm sonuçları

	Elektrik Ark Fırın Cürufu	Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu
pH	9,79	11,38
Elektrik İletkenlik (s/m)	270	878,5

6.4. Malzemelerin Standart Mekanik Karakterizasyonu

Bu bölüm, malzemelerin tekrarlanan yükler altındaki davranışına ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmayı içermektedir. Tekrarlanan yükleme özellikleri, esneklik modülü ve kalıcı deformasyon özellikleri üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, bu özelliklerin belirlenmesini etkileyen faktörler sunulmaktadır. Laboratuvar ortamında bu özelliklerin belirlenmesi aşaması da sunulmaktadır. Ayrıca yaygın olarak kullanılan modeller de açıklanmıştır.

6.4.1. Esneklik modülü kavramı

Çoğu yol performans kriteri yüzey koşullarına odaklansa da, yüzey hasarlarının önemli bir kısmının genellikle yol temel katmanları olarak bilinen alt tabakalardan kaynaklandığı unutulmamalıdır. Bu nedenle, bu katmanların mekanik davranışını, yani gerilme-gerinim özelliklerini anlamak, yol performansını en üst düzeye çıkarmaya büyük katkı sağlar.

Christopher ve arkadaşları tarafından 2006 yılında yapılan bir çalışmada, esnek, rijit ve kompozit kaplamalarda hasara katkıda bulunan geoteknik faktörler özetlenmiştir (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9. Yol bozulmalarını etkileyen geoteknik faktörler [132]

Yol Bozulması		Yetersiz Temel Sertliği/Gücü	Yetersiz Alt Temel Sertliği/Gücü	Nem/Drenaj Sorunları	Donma/Çözülme	Şişme	Kontaminasyon	Erozyon
Esnek Kaplama	Yorgunluk Çatlakları	x	x	x	x	x	x	
	Yolda Çökme	x	x	x	x	x	x	
	Dalgalanma	x						
	Tümsekler				x	x		
	Çöküntüler	x		x	x		x	
	Çukur			x	x			
	Pürüzlülük	x	x	x	x	x	x	x
Sert Kaplama	Yorgunluk Çatlakları	x	x	x	x	x	x	x
	Deliklenmeler	x	x	x	x	x	x	x
	Pompalama			x				x
	Faylanma	x		x	x		x	x
	Pürüzlülük	x		x	x		x	x
Kompozit Kaplama	Yansıma Çatlakları	x		x				x
	Pürüzlülük	x		x	x	x	x	x

Çizelge 6.9'da görülebileceği gibi, geoteknik faktörler arasında, nem/drenaj problemleri ve don/çözülme durumlarının doğrudan bu faktörleri etkilemesiyle birlikte, yol temel katmanlarının rijitlik ve mukavemetinin birçok yol hasarını baskın bir şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Trafik yüklemesinin doğası gereği, yol sistemleri, yol temel katmanlarında mukavemet kaybına yol açabilecek herhangi bir gerilme seviyesinin oluşmaması için tasarlanır. Bu nedenle, bağlı olmayan katmanların yapısal kapasitesi için kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi geleneksel mukavemet parametrelerine ihtiyaç duyulmaz. Bu noktada, M_R olarak adlandırılan esneklik modülü, yol analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bağlı olmayan malzemelerin rijitliği, yoldaki en önemli mekanik özellik olarak hayati bir rol oynar. Bu özellik, yol sistemi içinde gerilme ve şekil değişimlerinin nasıl dağıldığını belirler; çünkü farklı katmanların göreceli rijitliği, bu dağılımı şekillendirir. Bağlı olmayan

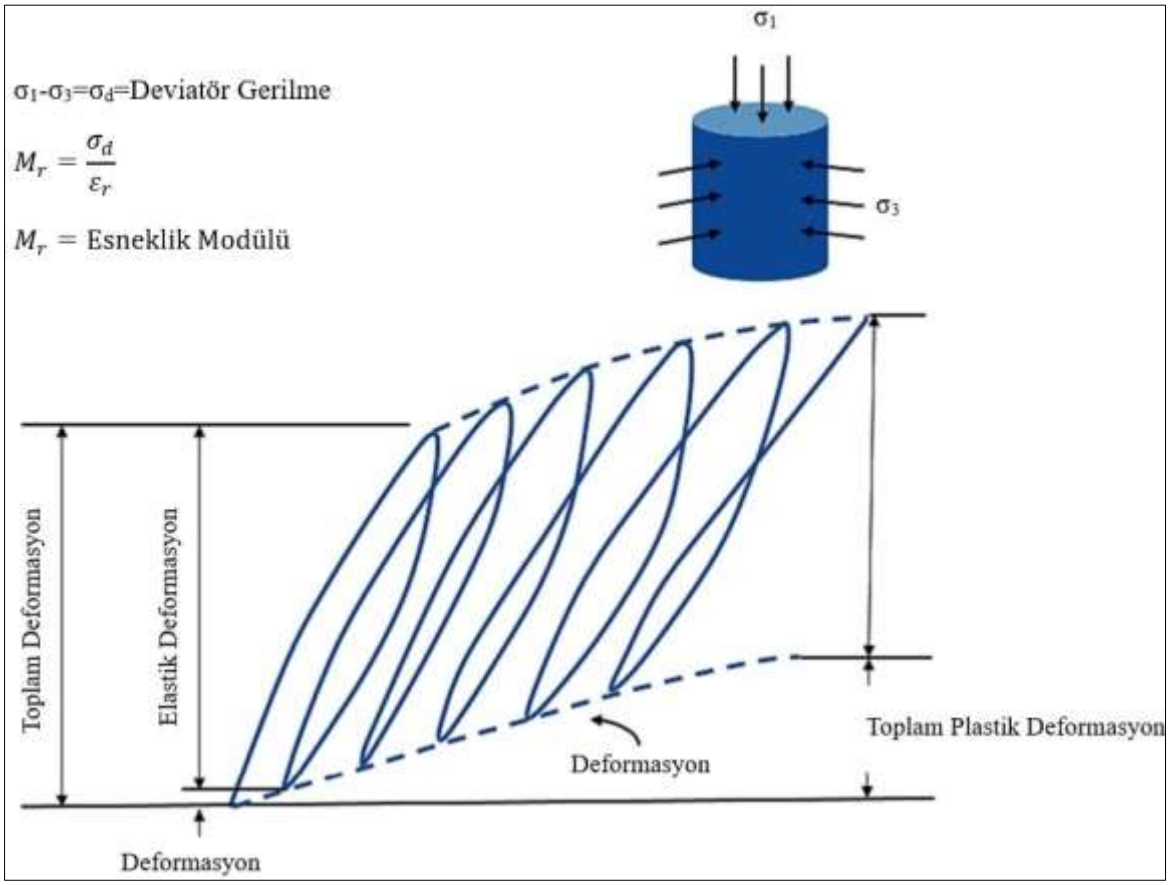
katmanların rijitliğinin, asfalt tabakasının altındaki çekme gerinimi ve alt temel tabakasının üst kısmındaki basınçlı dikey gerinim üzerinde doğrudan bir etkisi olduğu geniş ölçüde kabul edilmektedir [132].

Yeni kaldırımların başarılı ve ekonomik tasarımı ve mevcut kaldırımların kalan ömrünün tahmini, kaldırım malzemelerinin uygun şekilde karakterizasyonuna bağlıdır. Geleneksel esnek bir kaldırım, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sıcak karışım asfalt yüzey tabakası, granül malzemelerden oluşan taban tabakası ve alt zeminden oluşur. Yol mühendislerinin temel endişelerinden biri olan granül malzemelerin davranışını karakterize etmeye yönelik çok sayıda araştırma çabası harcanmıştır. Granül bir taban tabakasının temel yapısal işlevi, trafik yükü tarafından kaldırım yüzeyine uygulanan gerilimlerin dağılımına katkıda bulunmaktır. Bu gerilimler, alttaki tabanı, alt tabanı ve alt zemini aşırı zorlamayacak seviyelere düşürülmelidir. Bağlı olmayan granüler malzemeye aşırı gerilim uygulanması, hareketli tekerlek yükleri altında kabul edilemez seviyelerde esnek kaldırım sapmaları üretebilir veya aşırı miktarda kalıcı deformasyon birikmesine neden olarak nihayetinde kaldırım performansını etkileyebilir. Bu nedenle, yerinde gerilim koşullarının ve trafik yüklerinin yeterince simüle edildiği laboratuvar testleri ile taban malzemelerinin bu davranışının daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Tekrarlanan yükleme üç eksenli testi, esneklik modülü testi olarak da bilinir, malzemenin sertlik özelliklerinin yanı sıra tekrarlanan yükleme sırasında kalıcı deformasyon birikimine dayanma yeteneğinin değerlendirildiği bir yöntemdir.

M_R'nin laboratuvar ortamında karakterizasyonu, bağlı olmayan katmanların rijitlik özelliklerini belirlemek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. M_R, bir malzemeye uygulanan döngüsel gerilme ($\Delta\sigma$) ile çoklu tekrar yüklemesi sonrasında elde edilen geri kazanılabilir (elastik) şekil değişimi arasındaki oranı tanımlayan bir parametredir ve trafik yüklemesini temsil eder [132].

Esneklik modülü testlerinde kullanılan yükleme dalga formu, servis koşullarında kaplamalarda oluşan gerçek yükleri simüle etmelidir. Bir araç kaplama üzerindeki belirli bir noktaya yaklaşırken, yük sıfırdan maksimum bir değere ulaşır. Pseudo-enerji simülasyonlarına göre, maksimum yük seviyesine lastik kenarı referans noktasının tam üzerine geldiğinde ulaşılır [133-134]. Bu nedenle, testin uygulanmasında haversine yük darbesi önerilmektedir, çünkü bu yükleme, tekerlek yükü altındaki gerilme durumunu daha iyi simüle etmektedir. Malzemenin yinelenen yükleme altındaki gerçek esnek tepkisi, belirli

bir yük uygulama sayısından sonra belirlenebilir; çünkü erken aşamalarda dikkate değer kalıcı deformasyon meydana gelir. Yük uygulama sayısı arttıkça, yük tekrarı nedeniyle oluşan plastik şekil değişimi azalır [135]. Bu nedenle, belirli bir dizi için esneklik modülü, 100 ölçümden son 5'i kullanılarak belirlenir. Esneklik modülü, uygulanan deviator gerilmenin elastik dikey şekil değiştirmeye oranı olarak tanımlanır. Şekil 6.19, tekrar eden yükler altındaki elastik ve plastik tepkileri göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, kalıcı deformasyon hızı, tekrar sayısının artmasıyla sıfıra yaklaşmaktadır [136].



Şekil 6.19. Tekrarlı yükleme koşulları altında zemin tabanı dayanım modülünün (M_R) tanımı [137].

6.4.2. Deneysel yöntem ve bulgular

Bu bölüm, granüler malzemelerin tekrarlı yükleme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test prosedürlerinin kısa bir açıklamasını içermektedir. AASHTO protokolü, Avrupa Protokolü, ICAR protokolü ve yakın zamanda yayımlanan Uyarlanmış Protokol özetlenmiştir. Bu bölüm, test prosedürlerine ve ana özelliklerine dair genel bir giriş

sağlamaktadır. Açıklamalar temel malzemeler için izlenen test prosedürlerini içermektedir [138].

AASHTO T307 protokolü

AASHTO T307 protokolü, esneklik modülün belirlenmesi için uygulanan test prosedürünü açıklamaktadır. Sabit büyüklükte bir eksenel tekrarlı döngüsel gerilme, yük süresi (0.1 s) ve döngü süresi (1.0 s) ile silindirik bir test numunesine uygulanır. Test sırasında numune, bir üç eksenli basınç hücresi aracılığıyla sağlanan dinamik döngüsel gerilme ve statik kapalı basınç altına alınır. Numunenin eksenel deformasyon tepkisi ölçülür ve esneklik modülü hesaplanır.

Teste, 15 psi (103.4 kPa) maksimum eksenel gerilme ve 13.5 psi (93.1 kPa) döngüsel eksenel gerilmeye denk gelen, yarım sinüs dalgası biçiminde bir yükle en az 500 tekrar uygulanarak başlanır. Hücre basıncı 15 psi (103.4 kPa) olarak ayarlanır. Koşullandırma sürecinin sonunda numunenin yüksekliği hâlâ azalmaya devam ediyorsa, testten önce döngüsel stres 1000 tekrara kadar uygulanabilir. Bu işlemi, değişken hücre basınç ve deviatör stres ile yapılan yükleme dizisi takip eder. Hücre basıncı sabit tutulurken deviator stres artırılır. Ardından, hücre basıncı artırılarak deviator stres değiştirilir. Esneklik modül değerleri belirli deviator stres ve hücresel basınç değerleri raporlanır. Uygulanan stres dizisi ve detaylı prosedür, AASHTO T-307 Protokolü'nde bulunabilir.

Avrupa protokolü

Malzemenin kalıcı deformasyona duyarlılığını ölçmek ve esneklik özelliklerini değerlendirmek için tekrarlı yük üç eksenli test kullanılır. Taslak Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) standardı (29), aynı tekrarlı yük üç eksenli cihazını kullanan iki prosedürü tanımlamaktadır.

Protokol, değişken hücresel basınca sahip Yöntem A ve sabit hücresel basınca sahip Yöntem B olarak bilinen iki prosedürü tanımlar. Genel olarak, test numuneleri gerekli yoğunluk ve nem içeriği koşullarına göre hazırlanır.

Test numunelerine, ortalama normal gerilme (p) = 43.5 psi (300 kPa) ve deviatorik gerilme (q) = 87 psi (600 kPa) (veya σ_1 = 101.5 psi (700 kPa) ve σ_3 = 14.5 psi (100 kPa)) uygulanarak 20.000 döngüden oluşan bir ön koşullandırma testi uygulanır.

Ön koşullandırma testinin ardından, malzeme numunelerine CEN prosedürüne göre sıralı olarak q/p = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 gerilme oranı yükleme yolları ile uygulanan bir dizi yükleme ile aşamalı olarak 100 döngüden oluşan bir dayanıklı modül testi yapılır.

CEN test yöntemi B (sabit hücre basınç), Yöntem A'ya göre daha düşük stres seviyelerini takip etmekte ancak aynı numuneye uygulanmaktadır. Bu stres seviyeleri, bir yol yapısının alt seviyelerine yerleştirilen malzemelere uygun olarak Yöntem A'dan daha düşük büyüklüktedir.

Farklı malzemelerin esneklik modüllerini doğrudan karşılaştırmak amacıyla, elastik 3D Hooke Yasası modülünün raporlandığı bir "karakteristik" gerilme seviyesi seçilmiştir. Bu gerilme seviyesi, uygulanan yüklemede p = 36.3 psi (250 kPa) ve q = 72.5 psi (500 kPa) (veya σ_1 = 84.5 psi (583 kPa) ve σ_3 = 12 psi (83 kPa)) olarak belirlenmiştir. Detaylı prosedür, CEN standardında (29) bulunabilir [138].

ICAR test protokolü

ICAR test protokolü, granüler malzemelerin anizotropisini dikkate almaktadır. Üç eksenli testlerde kullanılan gerilmeler, esnek bir yol taban tabakasında trafik yüklerinden kaynaklanan gerilme koşullarını temsil etmek amacıyla seçilmiştir. Test protokolü, on statik gerilme durumu içeren programlanmış bir yükleme dizisini içerir. Her statik gerilme durumunda, üç eksenli gerilme rejimi elde etmek amacıyla küçük dinamik gerilme değişiklikleri uygulanır; böylece net gerilme değişiklikleri üç eksenli basınç, üç eksenli kayma ve üç eksenli uzamayı temsil eder. Her bir gerilme rejimi için dayanıklı eksenel ve radyal birimler belirlenir ve sistem tanımlama şeması içerisinde kullanılarak, ilgili gerilme durumundaki beş anizotropik elastik özellik geriye dönük hesaplanır. Yükleme dizisi aşağıdaki adımlarda özetlenmiştir:

1- Monte edilmiş bir numune, statik bir gerilme durumuna (eksenel gerilme σy ve çevreleyici gerilme σx) yüklenir. Çevreleyici gerilme sabit tutulurken, eksenel

gerilmeye üç eksenli basınç olarak gösterilen küçük bir dinamik gerilme artışı Δσy uygulanır. Bu artış yüklemesi, stabil bir dayanıklı birim elde edilene kadar 25 tekrarlık bir süreçte gerçekleştirilir. Yükleme döngüsü, 1,5 saniye yükleme ve ardından 1,5 saniye dinlenme süresinden oluşur. RaTT (hızlı üç eksenli test) hücresi hava ile çevrelenme sağladığından, yükleme döngüsü değişken çevreleme uygulamasını kolaylaştıracak şekilde seçilmiştir.

2- Birinci adımdakiyle aynı statik gerilme durumunda (σx, σy), eksenel gerilme yine Δσy dinamik gerilme artışı ile 25 tekrarlı olarak değiştirilir. Bu sırada, ilk gerilme sabiti değişiminin (ΔI1) her yükleme döngüsünde sıfır olması sağlanacak şekilde, radyal gerilme Δσx kadar azaltılır. Bu işlem, üç eksenli kayma olarak gösterilir.
3- Aynı statik gerilme durumunda (σx, σy), eksenel gerilme küçük bir miktar Δσy azaltılırken radyal gerilme Δσx artırılır. Böylece, net gerilme değişimi uzama modunda olur, ancak ana gerilmeler tersine dönmez. Dinamik gerilmeler, stabil dayanıklı birimler elde edilene kadar önceki gibi 25 tekrarda uygulanır. Bu işlem, üç eksenli uzama olarak gösterilir.
4- Bu adımlar, on farklı gerilme durumu için tekrarlanır. Her gerilme durumunda ölçülen eksenel ve radyal birimler, sistem tanımlama şemasına girdi olarak kullanılır. Bilgisayar programı, SID yöntemi (25) temelinde beş anizotropik elastik özelliği sistematik olarak geriye dönük hesaplar.

Kalıcı deformasyon testi

Malzemelerin kalıcı deformasyon davranışı farklı gerilme seviyesinde incelenmiştir. Her bir gerilme seviyesinde, numunelere statik kapalı gerilmeler uygulanmış ve deviator gerilmeler eksenel olarak 10.000 kez döngülenmiştir. Ölçülen birimler, dayanıklı ve plastik birimler olarak ayrılmıştır. Plastik birimler, malzemenin kalıcı deformasyon davranışını karakterize etmek için kullanılmıştır. Deviator gerilme, 0.1 saniyelik bir yarım sinüs darbe yükü ve 0.9 saniyelik bir dinlenme periyoduyla saniyede 1 döngü frekansında uygulanır. Bu yük döngüsü, kapalı basınç döngülenmediği için kalıcı deformasyon testi için kullanılmıştır.

Yukarıdaki test prosedürlerinden elde edilen parametreler, uygun regresyon modellerinde kullanılarak regresyon parametreleri ile yol performans tahmin araçları ve yazılımlarında kullanılacak dayanıklı ve kalıcı deformasyon parametrelerinin belirlenmesini sağlar.

Aşağıdaki bölüm, bu tekrarlı yükleme özelliklerinin tahminine yönelik modeller üzerine kapsamlı bir literatür sunmaktadır [138].

Modeller

Granüler malzemelerin uzun vadeli davranışını doğru tahmin edebilmek için bir yapısal ilişki kurulması gerekmektedir. Literatürde bulunan modellerin büyük bir çoğunluğu, laboratuvar üç eksenli test verilerini kullanarak basit eğri uydurma prosedürlerine dayanmaktadır. Literatürde bulunan bazı modelleme teknikleri aşağıda sunulmuştur.

Esneklik modülü modelleri

Seed ve arkadaşları, dayanıklı modül için aşağıdaki ilişkiyi önermiştir [139]:

$$M_r = k_1 \sigma_3^{k_2}$$

Burada

σ_3 = çevreleyici basınçtır.

Hicks, K-θ modeli olarak bilinen aşağıdaki basit hiperbolik ilişkiyi önermiştir [140]:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2}$$

Burada

θ = gerilmelerin toplamı veya hacimsel gerilmedir.

k_1, k_2 = regresyon katsayılarıdır.

Bu model, sabit bir Poisson oranı varsayımına dayanmakta, ancak araştırmalar, Poisson oranının uygulanan gerilmelerle birlikte değiştiğini kanıtlamıştır. Diğer bir dezavantaj ise, dayanıklı modül üzerindeki gerilmenin etkisinin yalnızca ana gerilmelerin toplamı ile hesaba katılmasıdır.

Uzan, K-θ modeline deviator gerilmeyi dahil etmiş ve ilişkiyi aşağıdaki gibi ifade etmiştir [141]:

$$M_r = k_1 P_a (\frac{\theta}{P_a})^{k_2} (\frac{q}{P_a})^{k_3}$$

Burada

θ = hacimsel gerilme,

P_a = atmosfer basıncı,

q = deviator gerilme,

k_1, k_2, k_3 = regresyon katsayılarıdır.

Üç boyutlu durumda, Uzan modelindeki deviator gerilme, aşağıdaki gibi oktahedral gerilme ile değiştirilmiştir:

$$M_r = k_1 P_a (\frac{\theta}{P_a})^{k_2} (\frac{\tau_{oct}}{P_a})^{k_3}$$

Burada

θ = hacimsel gerilme,

P_a = atmosfer basıncı,

τ_{oct} = oktahedral kayma gerilmesi,

k_1, k_2, k_3 = regresyon katsayılarıdır.

Bu model, τ_{oct} sıfıra yaklaşırken modülün absürt bir şekilde hesaplanmasının önüne geçmek için "+1" terimi eklenerek daha da değiştirilmiştir (τoct sıfıra yaklaşırken modül değeri sıfıra yaklaşır):

$$M_r = k_1 P_a (\frac{\theta}{P_a})^{k_2} (\frac{q}{P_a} + 1)^{k_3}$$

Kolisoja, hem K-θ hem de Uzan modellerinde malzeme yoğunluğunun etkisini dahil etmiştir. Aşağıdaki değiştirilmiş formülasyonları ifade etmektedir [142]:

$$M_r = A(n_{max} - n)P_a(\frac{\theta}{P_a})^{0.5}$$

Burada

n = agrega porozitesi,
A = sabit terimdir.

1993 AASHTO Kılavuzunda, bağlı olmayan temel ve alt temel katmanları için k_1 ve k_2 değerlerinin tahmin edilmesine yönelik rehberlik sağlanmıştır. Tipik k_1 ve k_2 aralıkları Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. AASHTO (1993) standardına göre, k_1 ve k_2 katsayılarının tipik aralıkları

Malzeme	k_1 (psi)	k_2
Granüler temel	3000-8000	0.5-0.7
Granüler alt temel	2500-7000	0.4-0.6

Kalıcı deformasyon modelleri

Barksdale (21), 105 yük uygulaması ile tekrarlı yük üç eksenli testler kullanarak farklı temel tabaka malzemelerinin davranışını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Verilen bir gerilme koşulunda, kalıcı eksenel birim birikiminin yük döngülerinin sayısının algoritması ile orantılı olduğu gösterilmiş ve sonuçlar aşağıdaki log-normal ifadesiyle ifade edilebilmiştir [143]:

$$\varepsilon_p = aN^b$$

Burada

a, b = regresyon parametreleridir.

Bu log-log modelinin uygulanabilirliği daha sonra Wolff ve Visser (33) tarafından sorgulanmıştır; bu araştırmacılar, birkaç milyon yük uygulaması ile tam ölçekli Ağı Heavy Vehicle Simulator (HVS) testleri gerçekleştirmiştir. Onlar, aşağıdaki gibi farklı bir modeli önermişlerdir:

$$\varepsilon_P = (CN + A)(1 - e^{-bN})$$

Burada

a, b, c = regresyon parametreleridir.

Kenis, kalıcı birimin dayanıklı birime orantılı olduğunu düşündüğü VESYS modelini geliştirmiştir [144]:

$$\varepsilon_p(N)/\varepsilon_r = \mu N^{-\alpha}$$

$$log\varepsilon_p = \log(\varepsilon_r \mu/1 - \alpha) + (1 - \alpha)\log N$$

Burada

$$s = 1 - \alpha$$

Kullanılan bir diğer model, Ohio Eyalet Üniversitesi'nde geliştirilmiş ve Khedr (2) tarafından tanımlanan Ohio Eyalet Modeli olarak bilinmektedir:

$$\varepsilon_p/N = AN^{-b}$$

Tseng ve Lytton, bir sigmoid eğri uydurma kullanarak üç parametreli bir model geliştirmiştir ve bu model aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [145]:

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0 \exp(-p/N)^\beta$$

Burada

ε_a = kalıcı eksenel birim,

ε_o, β, ρ = üç malzeme parametresidir.

Lekarp ve Dawson, birikmiş kalıcı eksenel birim ile maksimum kayma-normal gerilme oranı (qmax/pmax) ve bu maksimum değere ulaşmak için uygulanan p-q uzayındaki gerilme yolunun uzunluğu arasında bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir. Verilen bir döngü sayısındaki kalıcı birimin gerilme yolunun uzunluğuna oranı ile maksimum kayma-normal gerilme oranı karşılaştırıldığında tutarlı bir model gözlemlenmiştir. İlişki, aşağıdaki formda ifade edilmiştir [146]:

$$\frac{\varepsilon_{1,p}(N_{ref})}{L/p_0} = a(\frac{q}{p})^b_{max}$$

Burada

ε_1, p(N_{ref}) = N_{ref} sayıda döngü sonrasında birikmiş kalıcı eksenel birim,

N_{ref} = 100'den büyük herhangi bir yük döngüsü sayısı,

L = gerilme yolunun uzunluğu,

P_o = denklemin boyutsuzluğunu sağlamak için tanıtılan referans gerilmesi (örneğin, 1 kPa),

$(q/p)_{max}$ = maksimum kayma-normal gerilme oranı,

a, b = regresyon parametreleridir.

Bu denklem, 100'den büyük herhangi bir yük döngüsü sayısı için geçerlidir. NCHRP projesi 1-37 "Yeni ve Yenilenen Yol Yapıları Tasarımı için 2002 Kılavuzunun Geliştirilmesi" kalıcı deformasyonun belirlenmesi için aşağıdaki modeli önermiştir.

$$\delta_a = \beta_{s1}\varepsilon_v h(\varepsilon_0/\varepsilon_r)(e^{-(p/N)\beta})$$

Burada

δ_a = bağlı olmayan agrega tabanındaki kalıcı birim,

β_{s1} = saha kalibrasyon faktörü,

ε_v = yazılımdan elde edilen ortalama dikey dayanıklı birim,

h = katman kalınlığı,

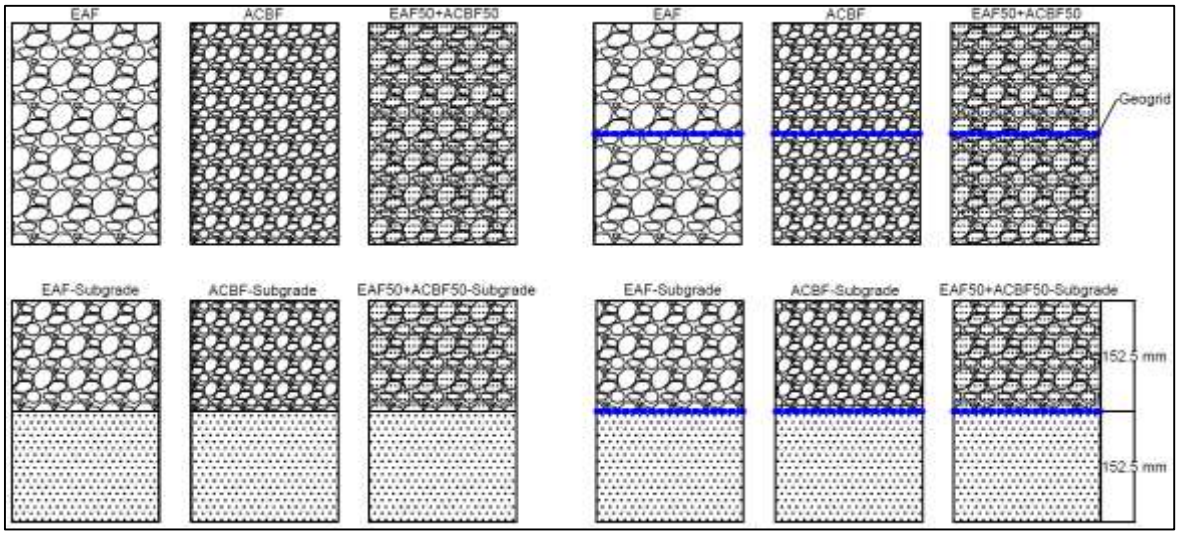
ε_0, ρ, β = regresyon sabitleri,

ε_r = laboratuvar testinde uygulanan dayanıklı birim,

$\varepsilon_0/\varepsilon_r$ = bir malzeme özelliğini temsil etmek üzere birleştirilmiş oran.

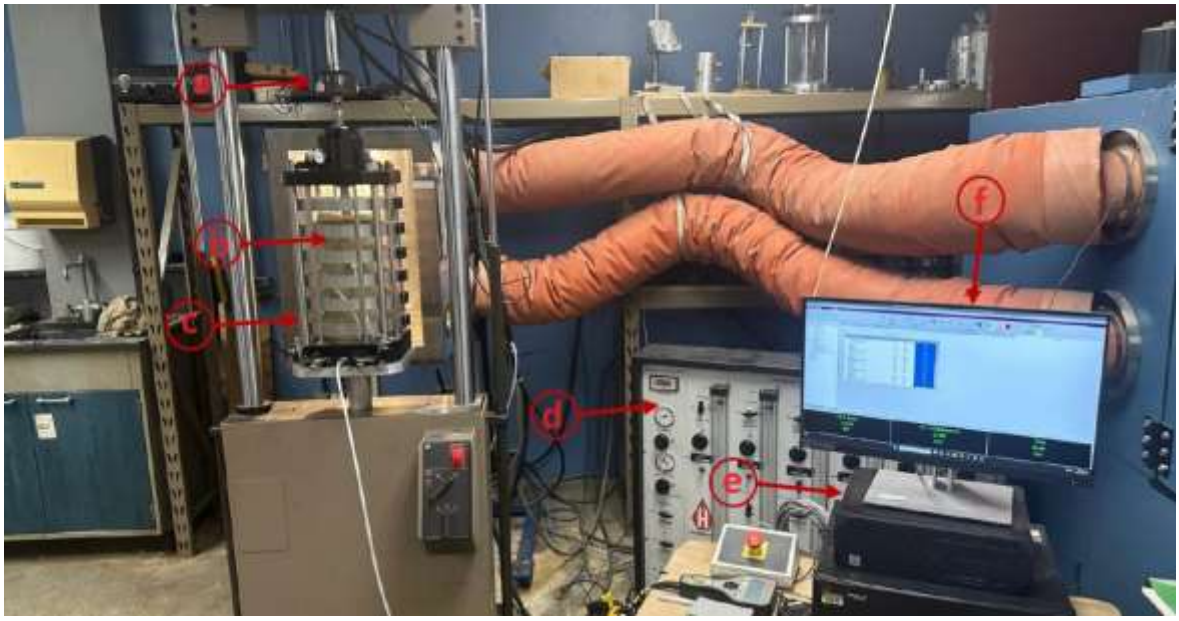
Test prosedürlerinin yanı sıra model seçimi de test sonuçlarında farklılıklara yol açmaktadır. Uygun test prosedürleri ve modellerinin en iyi uyumu, dayanıklı modül ve kalıcı deformasyon değerlerinin saha ölçümleriyle yakın değerlerde belirlenmesini sağlayacaktır. Ancak, test prosedürlerinden, operatörlerden ve diğer benzeri faktörlerden kaynaklanan değişkenliğin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, ölçümlerin gereken doğruluk seviyesini belirtmek zorunludur; bu durum, test prosedürlerinde bir hassasiyet ve yanlılık beyanı olarak dahil edilmektedir. Aşağıdaki bölüm, hassasiyet ve yanlılık üzerine kısa bir tartışma sunmaktadır [138].

Silindirik numuneler, AASHTO T307 standardına (AASHTO T 307-99 2017) göre hazırlanmıştır. Her test örneği, standartta belirtilen şekilde 6 katmana sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden önce, her katmanın gradyan değerleri eşit olacak şekilde hazırlanmıştır. Amaç, örnek hazırlama sırasında meydana gelebilecek heterojenliği en aza indirmek için her katman içinde gradyanın homojenliğini korumaktır. İlk katman test kalıbına yerleştirilmiş ve yaklaşık 2 inç kalınlıkta istenen kalınlığa ulaşana kadar titreşimli sıkıştırma ile sıkıştırılmıştır. İlk katmanın sıkıştırılmasından sonra, numunenin yüzeyi bütünlüğünü sağlamak için düzleştirilmiş ve ardından ikinci katman yerleştirilip buna göre sıkıştırılmıştır. Bu işlem, toplam yükseklik 12 inç olana kadar her katman için tekrarlanmıştır. Geogrid ile yapılan testlerde, geogrid numunenin orta yüksekliğine yerleştirilmiştir. Test planının bir fotoğrafı ve şematik çizimi Şekil 6.20'de verilmiştir. Malzemelerin performansını değerlendirmek için on iki farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyonları oluştururken amaç, yalnızca cüruf malzemelerinden oluşan yapının ve alt tabaka malzemesiyle birlikte oluşturulan yapının performansını değerlendirmektir. Testler, yüksekliği 305 mm ve çapı 152.5 mm olan bir üç eksenli test makinesi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

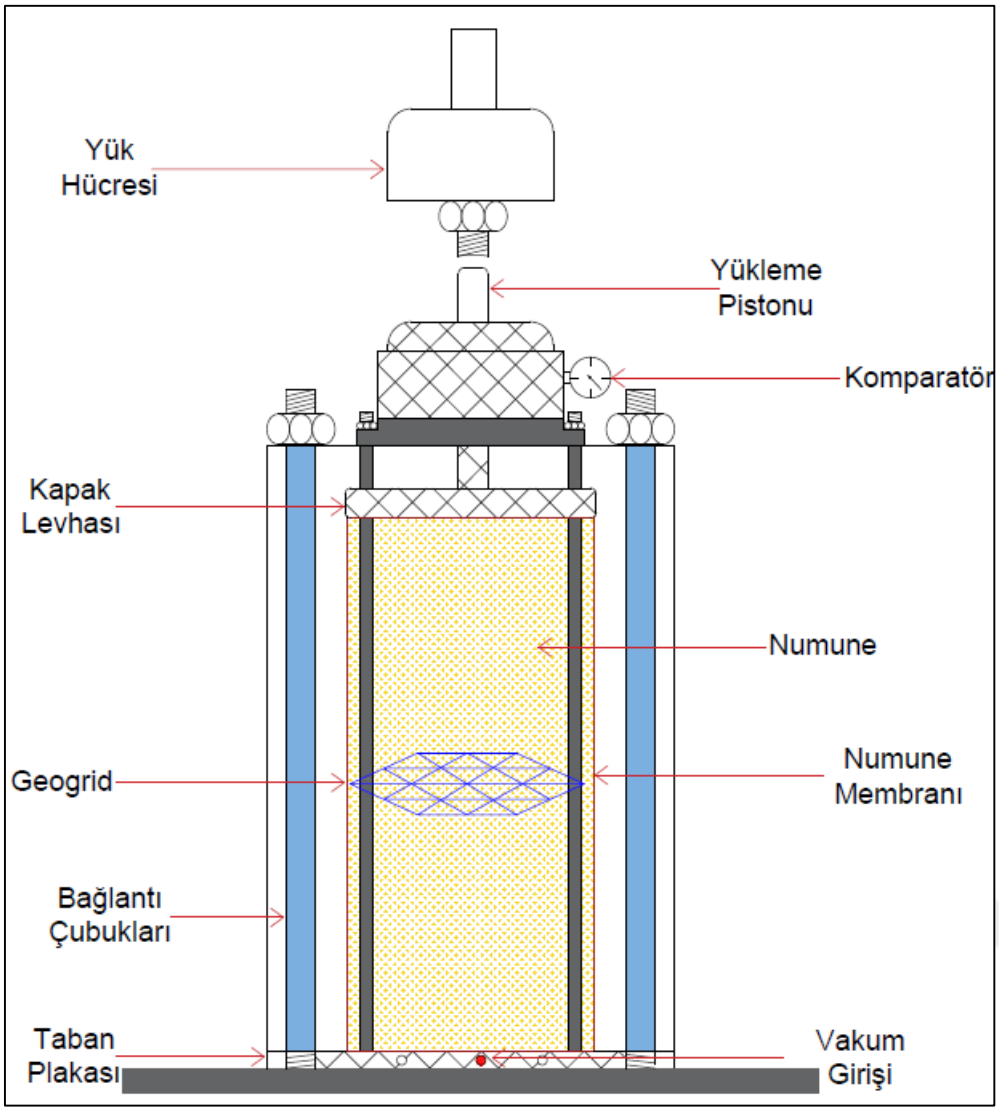


Şekil 6.20. Esneklik modülü test planı

Test aparatı üç eksenli bir hazne, yükleme aygıtı, tepki ölçüm ekipmanı ve veri toplama sisteminden oluşur. Üç eksenli haznede tüm testler için sınırlayıcı sıvı olarak hava kullanılır. Eksenel deformasyon dahili olarak, doğrudan numune üzerinde, lastik bantlı normal ölçüm cihazları, temassız sensörler ve kelepçeler kullanılarak ölçülür. RLT test kurulumu Şekil 6.21'de gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 6.22 bu sistemin şematik diyagramı sunulmaktadır.



Şekil 6.21. Bu çalışmada kullanılan tekrarlı yük üç eksenli deney düzeneği: (a) yük hücresi, (b) zemin numunesi, (c) üç eksenli hücre, (d) basınç sistemi, (e) veri kontrol cihazı, (f) kullanıcı yazılım arayüzü.



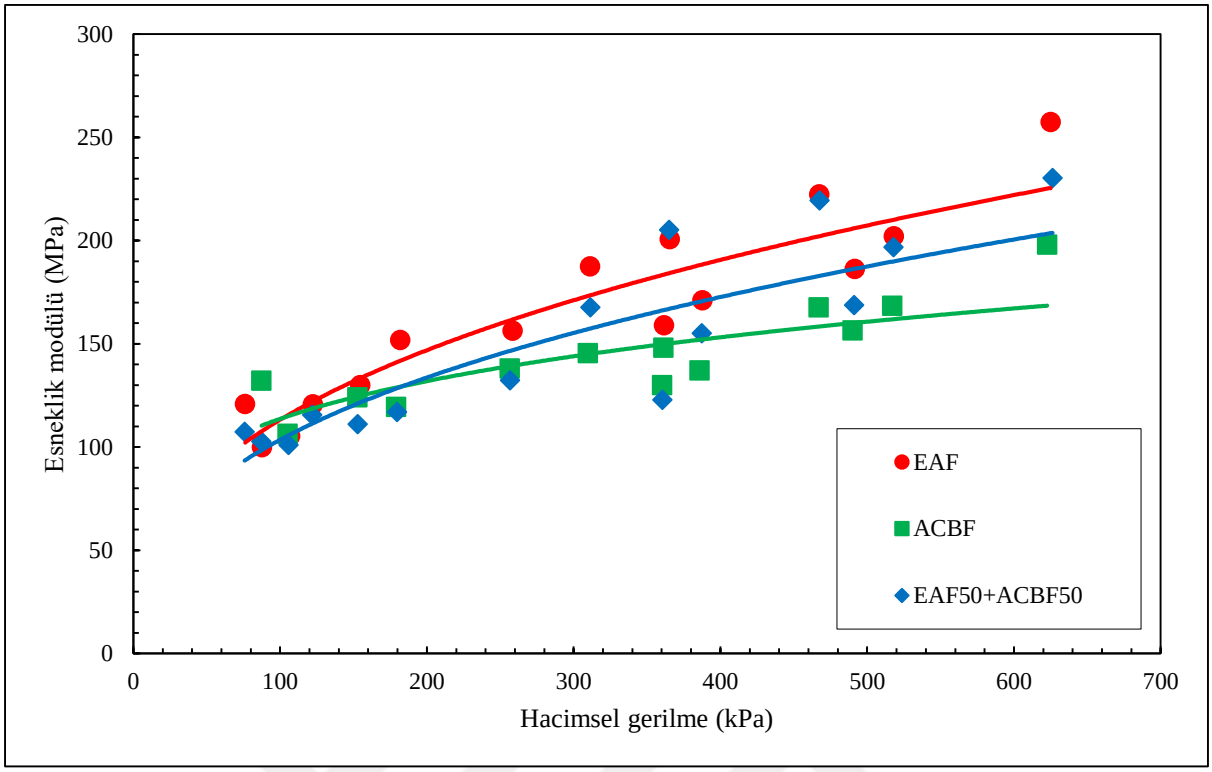
Şekil 6.22. Çalışmada kullanılan tipik üç eksenli hücrenin şematik görünümü

Tekrarlanan yük triaxiyal (RLT) testi, AASHTO T307 standart yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sırasında, eksenel stres 0.1 saniye boyunca uygulanmış ve ardından 0.9 saniyelik bir dinlenme süresi takip edilmiştir. Dayanıklı modül test sırası öncesinde, hazırlanmış numuneler, Çizelge 7.3'te "0" (sıfır) sırası için gösterildiği gibi şartlandırılmıştır. Şartlandırma sonrası, alt zemin ve alt temel/temel malzemeleri için standartta belirtilen test sıraları Çizelge 6.11'de gösterilmektedir. Malzemeler, her bir sınırlama seviyesi için farklı eksenel stres seviyeleri ile birlikte beş farklı sınırlama seviyesinde (20.7, 34.5, 68.9, 103.4 ve 137.9 kPa) test edilmiştir. Her test sırası için toplam stres hesaplanmış ve ardından 15 test sırası için dayanıklı modül hesaplanmıştır.

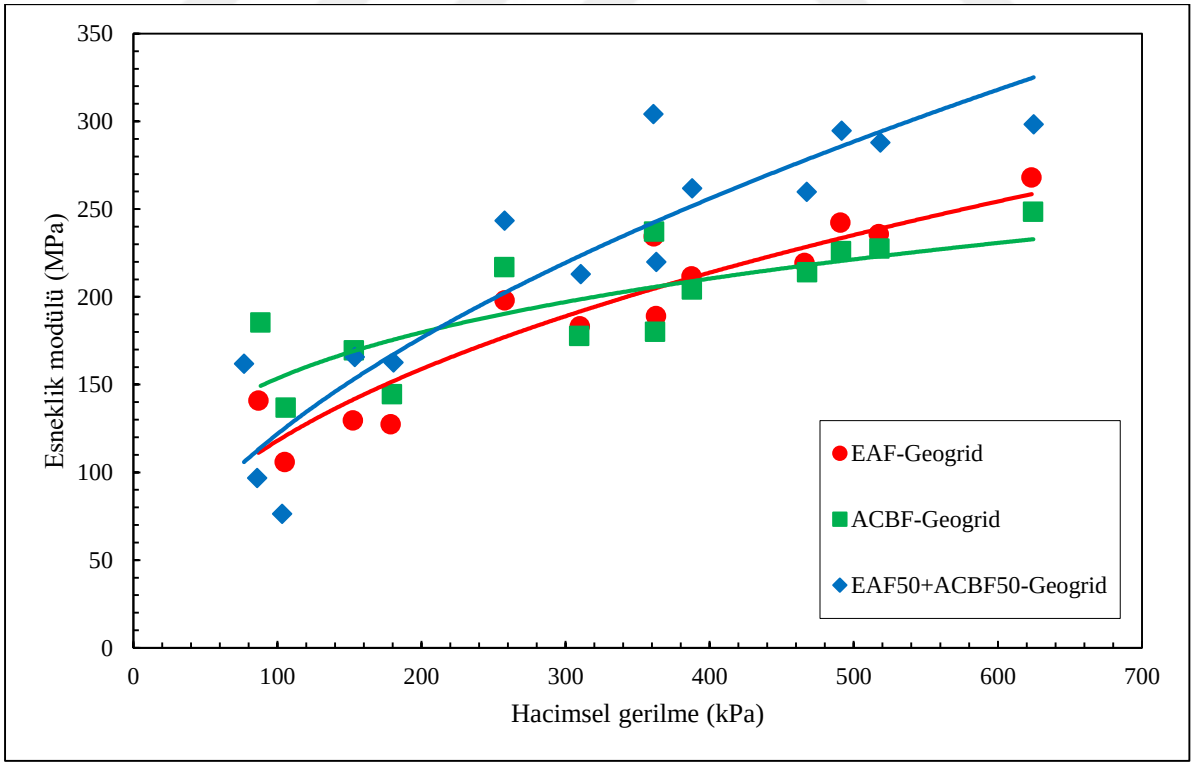
Çizelge 6.11. AASHTO T 307'ye göre temel/alt temel malzemeleri için esneklik modül test protokolü

Yük Çevrim Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Deviatör Gerilme (kPa)	Yük Tekrar Sayısı
Başlangıç	103,4	103,4	1000
1	20,7	20,7	100
2	20,7	41,4	100
3	20,7	62,1	100
4	34,5	34,5	100
5	34,5	68,9	100
6	34,5	103,4	100
7	68,9	68,9	100
8	68,9	137,9	100
9	68,9	206,8	100
10	103,4	68,9	100
11	103,4	103,4	100
12	103,4	206,8	100
13	137,9	103,4	100
14	137,9	137,9	100
15	137,9	275,8	100

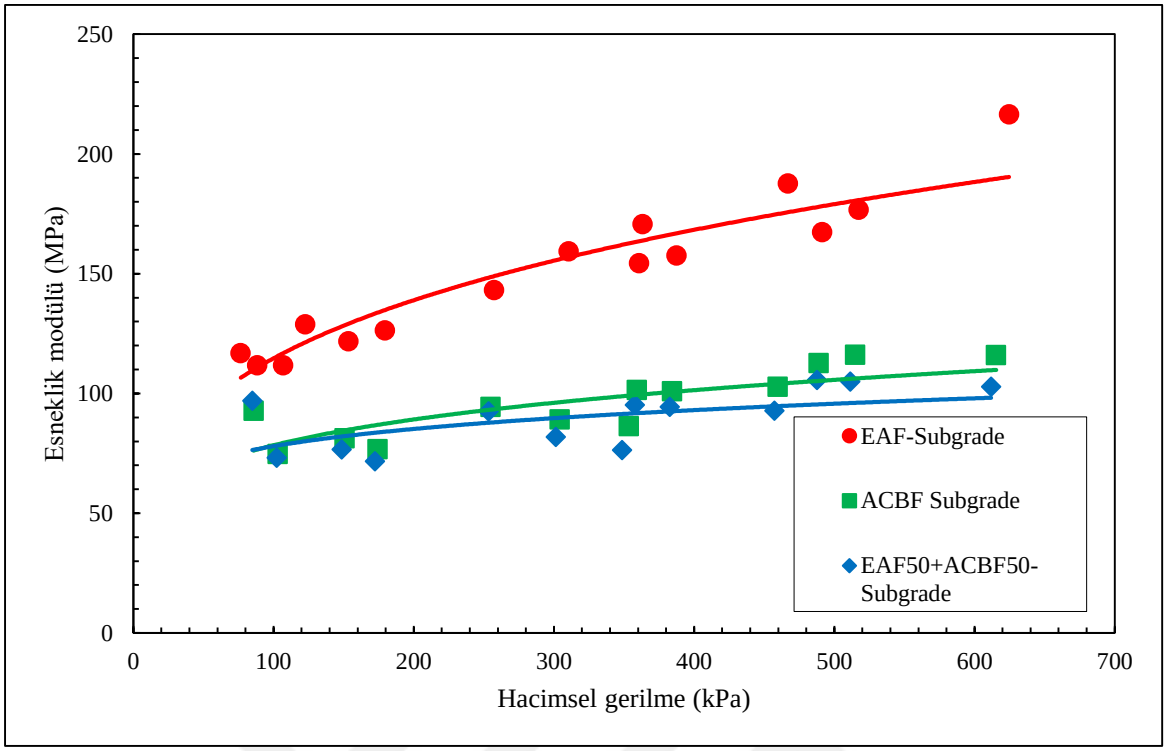
Yük çevrimlerinin, geogrid takviyesiyle ve takviyesiz cüruf malzemesinin esneklik modülü üzerindeki etkileri, test sırasında toplanan verilerden üretilen esneklik modülüyle yükleme çevrimi sayısını karşılaştıran bir grafik kullanılarak değerlendirildi. Testten sonra, malzemelerin M_R'ı, Denklem (1)'e göre her dizinin son beş çevriminin deformasyon ve gerilmelerinin ortalaması için hesaplandı. 10.000 çevrimli yükleme testine tabi tutulan numunelerin esneklik modülü verileri Şekil 6.23-6.26'da gösterilmektedir.



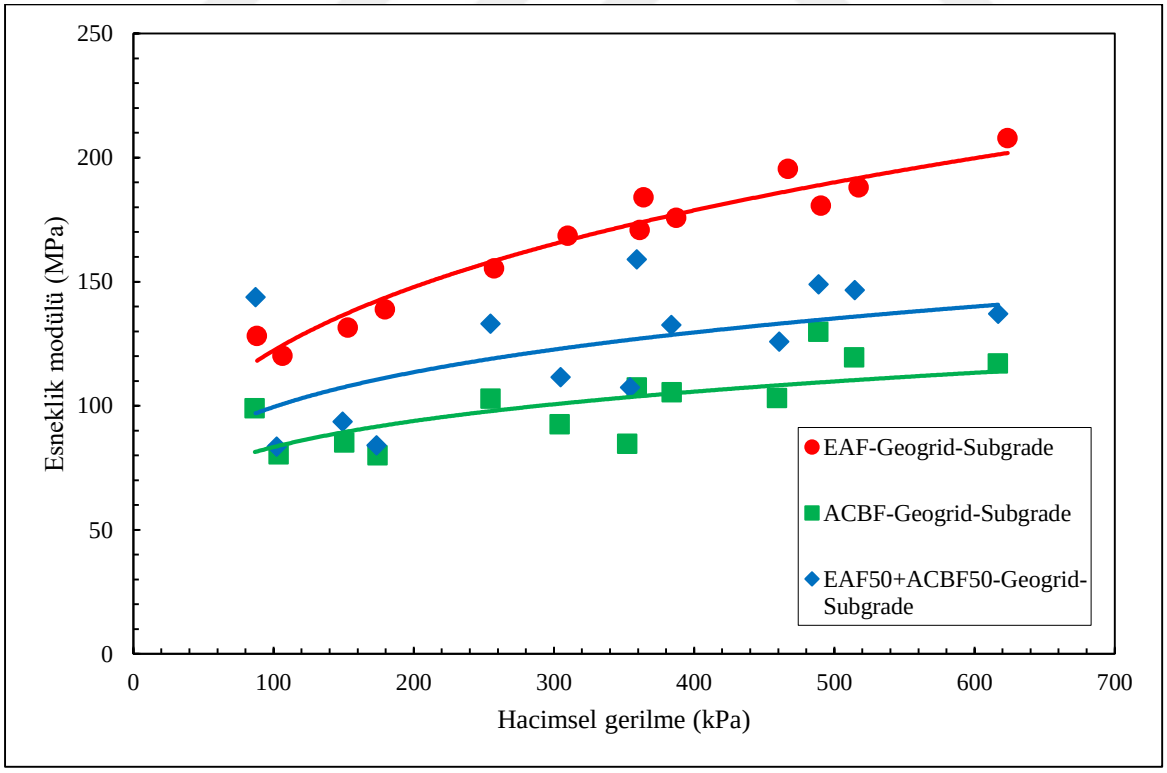
Şekil 6.23. Cüruf için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki



Şekil 6.24. Cüruf-geogrid yapısı için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki



Şekil 6.25. Cüruf-alt temel yapısı için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki



Şekil 6.26. Cüruf-geogrid-alttemel kombinasyonu için esnek modül ile hacimsel gerilme arasındaki ilişki

Şekil 6.23'te geogrid kullanılmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında EAF, ACBF ve EAF50+ACBF50 malzemelerinin M_R değerleri sırasıyla 100-260 MPa, 100-195 MPa ve 98-235 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Geogrid takviyesi sonucunda EAF ve EAF-Geogrid değerleri arasında gözle görülür bir değişim olmamıştır (Şekil 6.23 ve 6.24). Ancak ACBF ve EAF50+ACBF50'ye geogrid ilavesi ile maksimum M_R değerleri sırasıyla 250 MPa ve 300 MPa'ya ulaşmıştır. Geogrid, ACBF'de maksimum M_R değerini %28 oranında artırırken, EAF50+ACBF50 yapısında bu değer %27 olmuştur. Diğer deney sistemleri olan Slag-Subgrade ve Slag-Geogrid-Subgrade yapıları incelendiğinde benzer bir durum burada da görülmektedir. EAF ile yapılan testlerde, geogridli ve geogridsiz esneklik modülü test sonuçlarında önemli bir fark gözlenmemiştir. Ancak, ACBF-Subgrade ve EAF50+ACBF50-Subgrade ile yapılan testler, geogrid takviyesi ile yapılan testlerle (ACBF-Geogrid-Subgrade/EAF50+ACBF50-Geogrid-Subgrade) karşılaştırıldığında, maksimum M_R değerinde sırasıyla %18 ve %50 oranında artış gözlenmiştir.

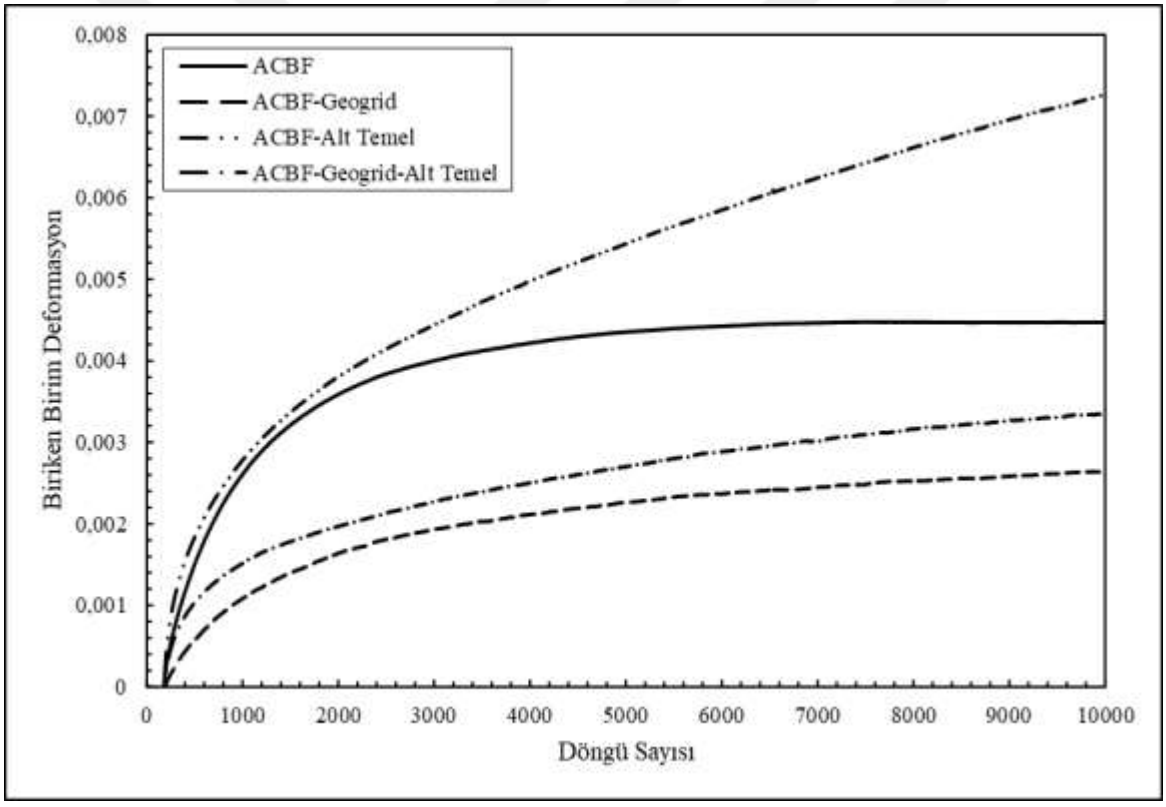
Geogrid malzemesinin iki farklı cüruf tipinde farklı etkiler üretmesinin nedeni, test sonuçları ve test sırasında yapılan gözlemlere dayanarak açıklanabilir. Bu durumun başlıca nedeninin malzemeler arasındaki tane boyutu farkı olduğu düşünülmektedir. D_{90} değeri kümülatif tane boyutlarıyla karşılaştırıldığında, EAF için sırasıyla 14,75 mm ve ACBF için 24,6 mm'dir (bkz. Şekil 6.5). Parçacık boyutları göz önüne alındığında, geogrid malzemesi ile iyi bir şekilde kenetlenmiş ACBF ve EAF50+ACBF50 yapılarının M_R değeri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir.

Kalıcı deformasyon testi

RLT test ekipmanı ile takviyesiz ve geogrid takviyeli malzemelerin kalıcı gerilmesini belirlenmiştir. M_R testinden sonra, ana numuneler (EAF-ACBF) üzerinde kalıcı deformasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Düşey kalıcı gerilme %3'e ulaşmadıysa, aynı numune esneklik modülü testini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Özellikle seçilen gerilmeler, taban/alt taban malzemeleri için literatürü takip ederek seçilmiştir. Malzemelerin kalıcı deformasyon davranışı iki gerilme seviyesinde incelenmiştir. Buna göre ilk gerilme seviyesinde sınırlama basıncı 103,4 kPa iken, ikincisinde 27,5 kPa'dır. İkinci gerilme seviyesinde, numunelere statik sınırlama gerilmeleri uygulanmış ve deviatör gerilmeleri eksenel olarak 10.000 kez çevrilmiştir. Takviyesiz ve geogrid takviyeli EAF ve ACBF için kalıcı gerilme sonuçları sırasıyla Şekil 6.27 ve 6.28'de sunulmaktadır. Şekillerden elde

edilen sonuçlar sabit sınırlayıcı gerilim için artan deviatör gerilimleriyle kalıcı gerilimin arttığını göstermektedir. Ayrıca, geogrid takviyesi kalıcı gerilimleri önemli ölçüde azaltmıştır.

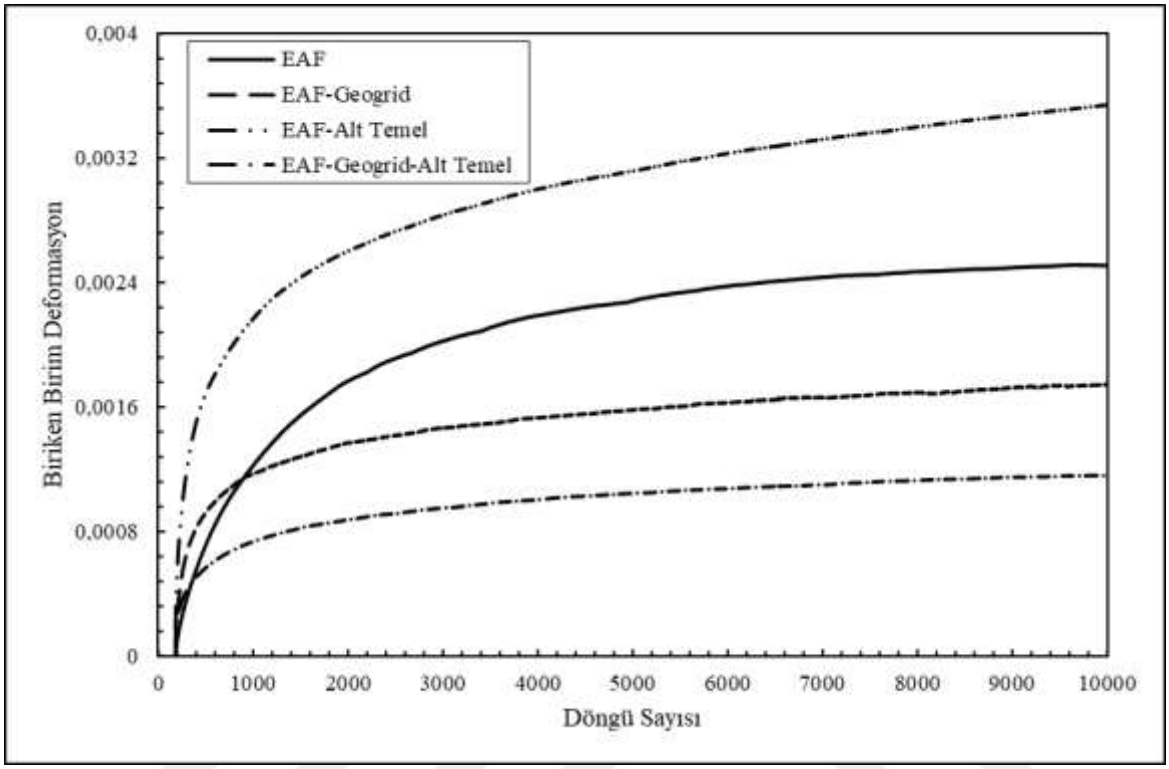
ACBF cürufunda, 4500 çevrimden sonra kalıcı gerinim %0,04 olarak gözlenirken, geogrid takviyeli ACBF için bu değer yaklaşık %0,02 idi. Bu, ACBF cürufunda, takviyenin kalıcı gerinimi takviyesiz kesite kıyasla %50 oranında etkili bir şekilde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, ACBF-Geogrid-Subgrade incelendiğinde, bu yapı için de benzer bir durumun geçerli olduğu görülmüştür. 4500 çevrimden sonra, ACBF-Subgrade yapısında %0,052 olan kalıcı gerinim değeri, geogrid takviyeli ile %0,025'e düşmüştür (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. 27.6 kPa çevresel basınç altında ve 10.000 yükleme döngüsü boyunca ACBF kombinasyonunun laboratuvar ortamında ölçülen kalıcı deformasyonu

Çalışmanın ana materyalini oluşturan EAF cürufunun kalıcı deformasyon grafikleri incelendiğinde, geogrid takviyesinin etkilerinin ACBF cürufuna benzer olduğu görülmektedir (Şekil 6.28). 4500 çevrim sonunda kalıcı deformasyon değerleri sırasıyla EAF için %0,2, EAF-Geogrid için %0,15, EAF-Alt Zemin için %0,28 ve EAF-Geogrid-Alt Zemin

için %0,09'dur. Elde edilen kalıcı deformasyon değerleri incelendiğinde, geogrid takviyesi ile EAF'nin %25, EAF-Alt Zemin yapısının ise yaklaşık %67 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.28. 27.6 kPa çevresel basınç altında ve 10.000 yükleme döngüsü boyunca EAF kombinasyonunun laboratuvar ortamında ölçülen kalıcı deformasyonu

10.000 çevrim sonunda birikmiş kalıcı deformasyonlar incelendiğinde, geogridli ve geogridsiz deneyler arasında önemli bir değişim elde edilmiştir. Geogrid ilaveli ACBF malzemesinde 10.000 çevrim sonunda birikmiş deformasyonun yaklaşık %37,5 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca, ACBF-Alt Zemin kombinasyonuna geogrid ilave edilmesiyle birikmiş deformasyon %57,3 oranında azalmıştır. Bu durum bir diğer malzeme olan EAF cürufunda da benzerdir. EAF malzemesine geogrid ilave edilmesiyle 10.000 çevrim sonunda birikmiş deformasyonun yaklaşık %33,3 oranında, EAF-Alt Zemin kombinasyonuna geogrid ilave edilmesiyle ise %72,2 oranında azaldığı görülmüştür.

6.5. Büyük Ölçekli Laboratuvar Testi

Bu bölümde, geogrid malzemesi ile alt zemin olarak kullanılan cürufun birlikte kullanıldığı takviye uygulamasının etkinliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen büyük ölçekli laboratuvar test serisinin sonuçları tartışılmaktadır.

Büyük ölçekli laboratuvar testleri, çelik cürufunun ve geogridlerin alt temel uygulamalarındaki performansını anlamak ve optimize etmek için önemli bir araçtır. Bu tür testler, malzemelerin çeşitli yük ve çevresel koşullar altındaki davranışlarını inceleyerek, gerçekte karşılaşılabilecek koşullar altında malzemelerin performansını simüle eder. Testler, malzemelerin dayanıklılığını, elastikiyetini, kalıcı deformasyonunu ve modüllerini ölçerek, bunların yol alt yapılarındaki etkinliğini daha iyi anlamamıza yardımcı olur.

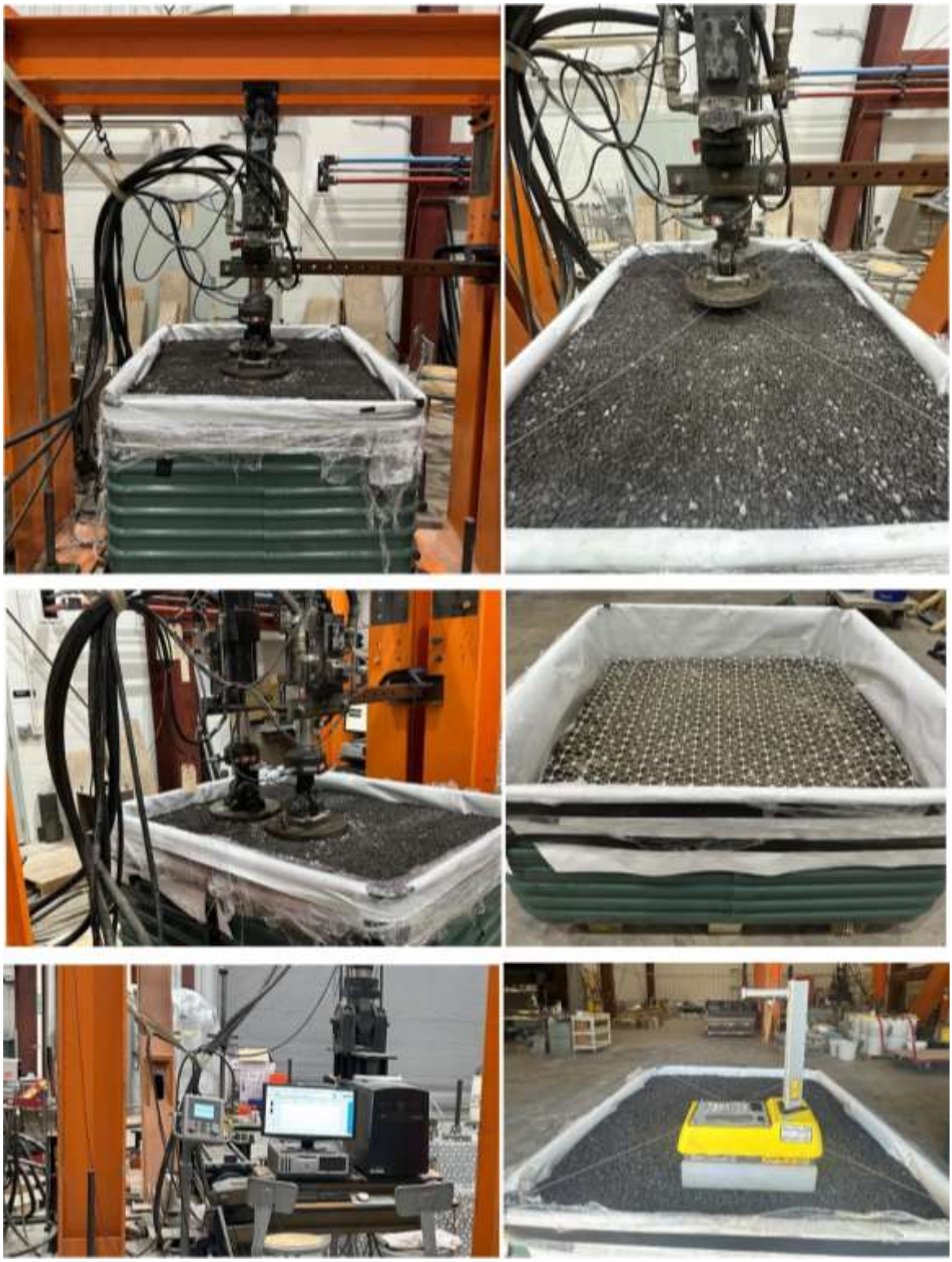
Bu çalışmada, çelik cürufu ve geogridin, büyük ölçekli laboratuvar testleri kullanılarak yol alt temel uygulamalarındaki performansları incelenmiştir. Testlerin sonuçları, bu malzemelerin geleneksel agregalarla karşılaştırıldığında daha üstün performans sergileyebileceğini ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Çalışmanın amacı, bu malzemelerin kullanımının alt yapı mühendisliğinde potansiyel faydalarını değerlendirmek ve uygulama alanlarını genişletmektir.

Ölçüm cihazları ve malzemeler Şekil 6.29'da gösterilmiştir. Model test aparatı, bir çelik test tankı, yükleme sisteminden oluşmaktadır. Ölçüm cihazları ve malzemeler, büyük ölçekli laboratuvar testlerinde malzemelerin ve yapıların performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 6.29'da gösterilen ölçüm cihazları ve malzemeler, testlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla titizlikle seçilmiştir. Bu cihazlar, test sürecindeki verilerin doğru bir şekilde toplanmasını, kaydedilmesini ve analiz edilmesini sağlar.

Testin temel bileşenlerinden biri olan model test aparatı, deneyin gerçekleştirilmesi için gerekli tüm altyapıyı sağlayan ana sistemdir. Bu aparatlar, özellikle deneyin gerçekçi bir şekilde simüle edilmesini mümkün kılar. Çelik test tankı, test edilen malzemelerin yerleştirileceği ve dış etkenlerin (örneğin, yük, sıcaklık, nem) simüle edileceği ana yapı olarak işlev görmektedir. Çelik, dayanıklılığı ve stabilitesi ile bilinen bir malzeme olduğundan, testlerin uzun süreli ve yüksek gerilimli koşullar altında yapılabilmesini sağlar.

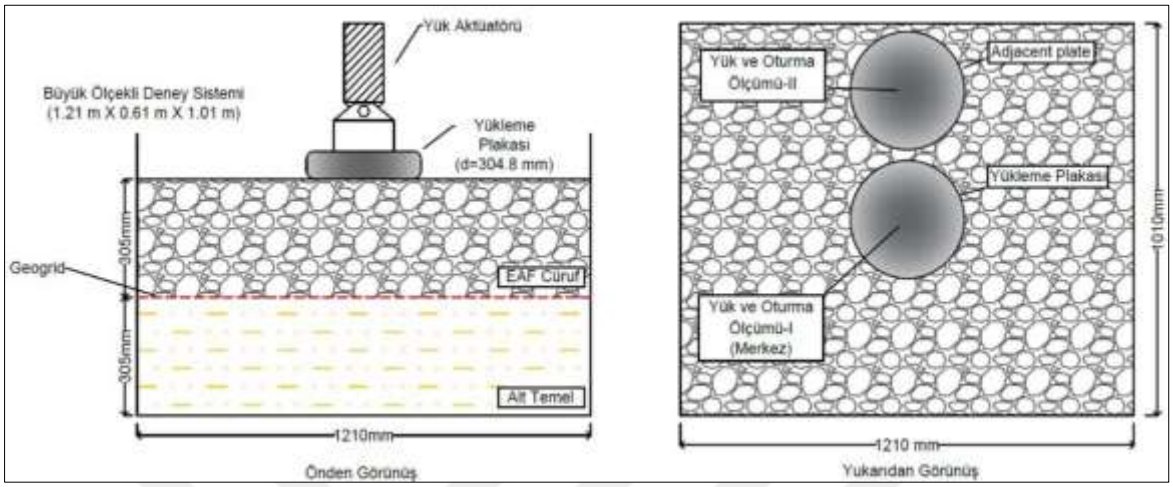
Yükleme sistemi, testlerin en önemli bileşenlerinden birisidir ve malzemenin üzerine uygulanan yükleri simüle ederek zemin iyileştirici malzemelerin gerçek koşullarda nasıl bir performans sergileyeceğini belirler. Yükleme sistemi, genellikle hidrolik presler veya motorlu sistemler kullanılarak malzemenin üzerine kontrollü yüklerinuygulanasıyla gerçekleşir. Bu sayede, malzemenin çeşitli yük ve gerilim koşullarındaki davranışı ölçülür.

Yükleme sisteminin hassasiyet ve doğruluğu, testin sonuçlarının geçerliliği açısından büyük bir öneme sahiptir.



Şekil 6.29. Plaka yük testi için test prosedürleri: (a) çelik kutu, (b) yükleme plakaları, (c) veri kaydedici, (d) test kutusunun üst görünümü, (e) geogrid takviyesi, (f) nükleer ölçüm cihazı testi

Çelik test tankının boyutları, Şekil 6.30'da gösterildiği gibi 1.01 m uzunluğunda, 1.20 m genişliğinde ve 0.61 m yüksekliğindedir.



Şekil 6.30. Büyük ölçekli test sisteminin şematik görünümü

Yükleme düzeneği, numuneye yük uygulamak için kullanılan 100 kN kapasiteli otomatik bir hidrolik sistem ve testler sırasında gerekli reaksiyon yüklerini sağlamak için tasarlanmış sağlam ve esnek olmayan bir çerçeveden oluşmaktadır. Reaksiyon çerçevesi, uygulanan yükler altında minimum sapmalar gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin deformasyonlarını ölçmek için doğrusal değişken diferansiyel dönüştürücüleri kullanılmıştır.

Bitişik plakaya sabit 100 Ibs uygulanmıştır. Yükleme plakasına gelince, maksimum 4.500 Ibs yük ile tekrarlanan bir yük uygulanmıştır. Yükleme süresi 0,4 sn ve gecikme süresi 3,6 sn'dir. Kutu test aparatı ve yük-deformasyon davranışları 100.000 düşey yükleme döngüsü altında değerlendirilmiştir (Şekil 6.31).



Şekil 6.31. Büyük Ölçekli Test Kurulumu, (a) Yan plaka yükü, (b) Temel plaka yükü

Testler sırasında izlenen veriler, çevrim sayısı ile yüzey deformasyonunu ve tabakalara ait düşey basınç dağılımını içeriyordu. Yüzey deformasyonu iki noktada ölçüldü: biri test plakasının merkezi diğeri ise kenar noktasındadır.

Zemindeki geogrid takviyesinin konumu, nispeten kesitler için mevcut çalışmalarda önerilen optimum konuma karşılık gelmektedir. Başlangıçtaki nem içeriği hesaplanarak optimum su içeriğine göre tabakalar hazırlanmıştır. Her katmanın sıkıştırma sürecinde, sıkıştırılacak katmanın yüksekliği eşit olacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra her katmandaki sıkıştırılacak malzeme miktarları hesaplanmıştır. Her katman sıkıştırıldıktan sonra, sıkıştırılmış toprak katmanının yüksekliği ölçülmüş ve yoğunluğu maksimum kuru birim ağırlığının %95'inde kontrol etmek için nükleer ölçüm cihazı kullanıldı.

Büyük ölçekli test hazırlık süreci, öncelikle kullanılan malzemelerin su içeriğinin belirlenmesiyle başlamıştır. Ardından, malzemelerin maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılabilmesi için vibratör kullanılarak uygun yoğunluk elde edilmiştir. Testin

doğruluğunu sağlamak amacıyla, zemin örnekleri belirli bir nem seviyesinde tutulmuş ve test öncesinde gerekli tüm ölçümler yapılmıştır (Şekil 6.32).



Şekil 6.32. Büyük ölçekli testin hazırlık süreci

Nükleer yoğunluk testi

Nükleer yoğunluk testi, yol veya inşaat projelerinde, rüzgar veya güneş enerjisi üretim şantiyelerinde, konut ve ticari inşaat sahalarında, madencilik faaliyetlerinde, tarım ve ormancılık ortamlarında ve hatta arkeoloji amaçları için zemin veya asfaltın yoğunluğunu ve iç yapısını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir.

Nükleer yoğunluk ölçer, zemin ve granüler yapı malzemelerinin ıslak yoğunluğunu, kuru yoğunluğunu ve nem içeriğini ölçmek için düşük seviyeli radyasyon kullanan bir test cihazıdır. Çizelge 6.12, deney öncesi gerçekleştirilen yoğunluk ölçümlerinin sonuçlarını sunmaktadır. Bu ölçümler, dört farklı noktada yapılmış olup, her bir noktadaki yoğunluk değerleri ayrı ayrı kaydedilmiştir. Bu çoklu ölçüm noktaları, malzemenin homojenliğini ve test öncesi şartların tutarlılığını değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Yapılan yoğunluk ölçümleri, deneyin başlangıcındaki zemin özelliklerinin belirlenmesi için temel verileri sağlamaktadır (Şekil 6.33).

Çizelge 6.12. Konvansiyonel nükleer yoğunluk ölçer ile yoğunluk ölçümü.

Deney Sistemi	Birim (kN/m^3)	Nokta-I	Nokta-II	Nokta-III	Nokta-IV	Ortalama
Geogrid Takviyesiz	Kuru Birim Ağırlık	21.14	20.53	21.53	21.39	21.14
	Yaş Birim Ağırlık	21.26	20.62	21.63	21.50	21.25
Geogrid Takviyeli	Kuru Birim Ağırlık	21.63	20.97	21.47	21.15	21.30
	Yaş Birim Ağırlık	21.69	21.05	21.60	21.26	21.40

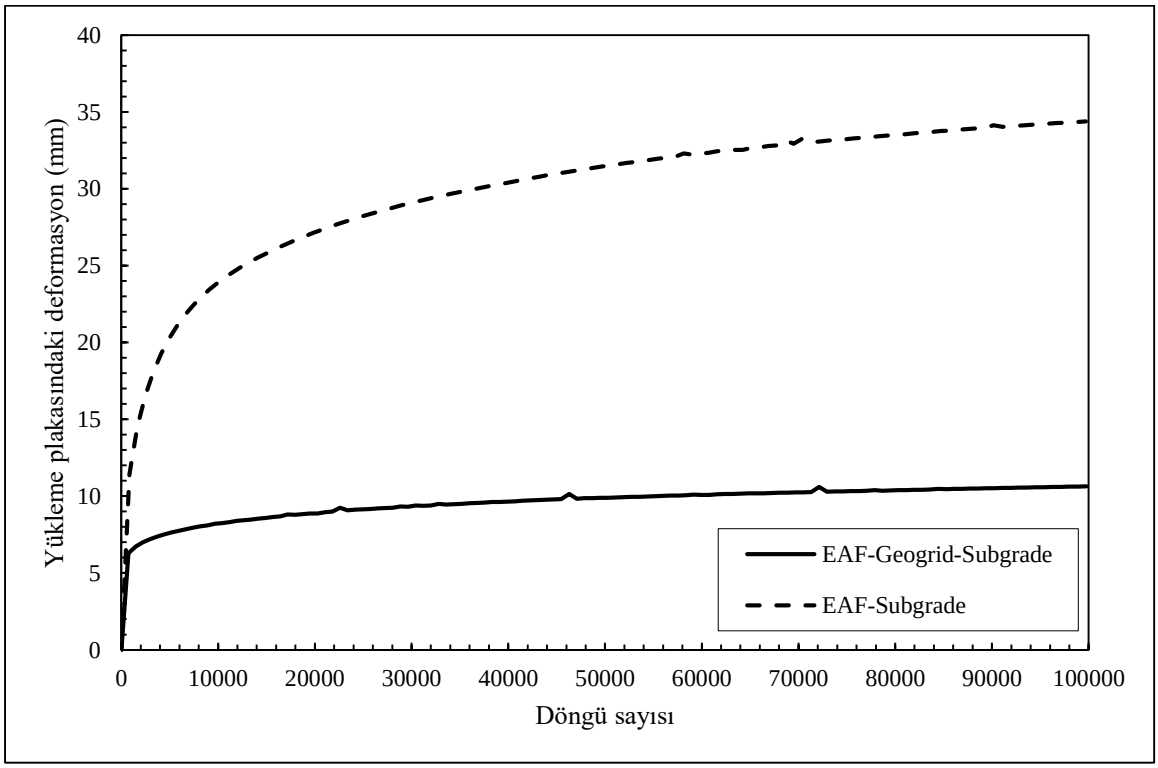


Şekil 6.33. Konvansiyonel nükleer yoğunluk ölçümüne ait bir görsel

Test sonuçlarında, taban-alt zemin arayüzünün ve alt zemin içindeki kalıcı deformasyon davranışını ve geogridin performanslarını değerlendirmek için daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

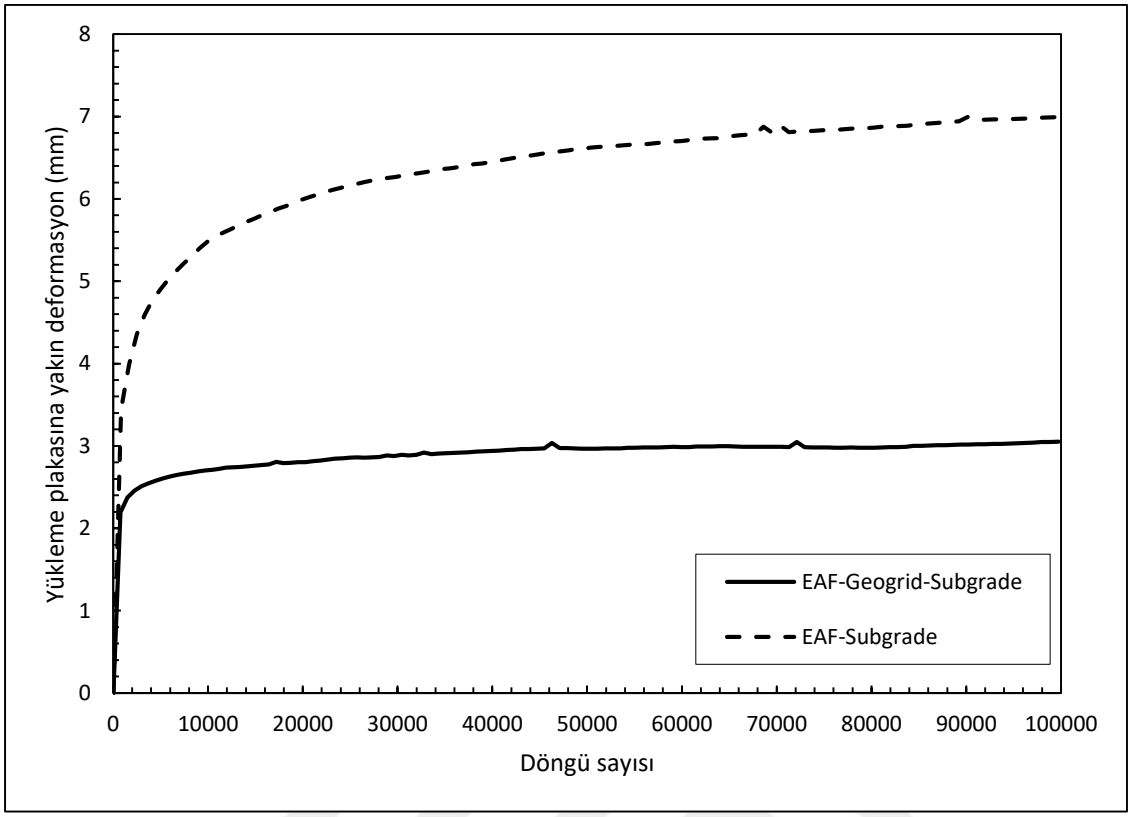
Grafiklerde, farklı sistemlerde (EAF-alt temel ve EAF-Geogrid-alt temel) yükleme döngüsü ile deformasyon arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 6.34'de, çelik cürufu kullanılan ve geogrid takviyesi bulunmayan alt temel tabakası, yükleme döngüsü boyunca önemli bir kalıcı deformasyon sergilemiştir. Deformasyon, ilk 10.000 döngüde hızlı bir artış göstererek yaklaşık 25 mm seviyelerine ulaşmış, daha sonraki döngülerde ise bu artış hızı azalarak asimptotik bir eğilim göstermiştir. Bu durum, cüruf malzemesinin yüksek trafik yükleri

altında viskoplastik bir davranış sergilediğini ve deformasyon direncinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Toplam deformasyonun 30 mm'yi aşması, uzun vadeli kullanımda bu tip yapıların erken yorulma riski taşıyabileceğini göstermektedir. Fakat geogrid ile takviye edilmiş çelik cürufu içeren sistem, deformasyon açısından belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Yükleme döngüsü sayısı 100.000'e ulaşmasına rağmen, deformasyon değerleri yalnızca 10 mm seviyelerinde sabitlenmiştir. Bu durum, geogrid takviyesinin, alt temel malzemesinin yük taşıma kapasitesini artırarak, deformasyonu sınırlandırdığını ve trafik yükleri altında stabil bir davranış sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.34. Yükleme plakasındaki deformasyon ile döngü sayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.35'te, yükleme plakasına yakın bölgede ölçülen deformasyonun daha detaylı bir incelemesini sunmaktadır. Geogrid takviyesi bulunmayan sistemde, yükleme döngüsünün başlangıcında deformasyon hızlı bir şekilde artmış ve 10.000 döngüden sonra 5-6 mm aralığına ulaşmıştır. Bu bölgedeki deformasyon, yük yoğunluğunun en yüksek olduğu alan olduğu için, tabaka stabilitesinin yetersiz olduğunu açıkça göstermektedir. Geogrid ile takviye edilen sistemde, deformasyon yaklaşık 2-3 mm seviyesinde sınırlı kalmıştır. Bu sonuç, geogrid takviyesinin yüzeydeki yüklerin alt temel tabakasında daha geniş bir alana yayılmasını sağladığını ve dolayısıyla yüzey deformasyonunu azalttığını göstermektedir.

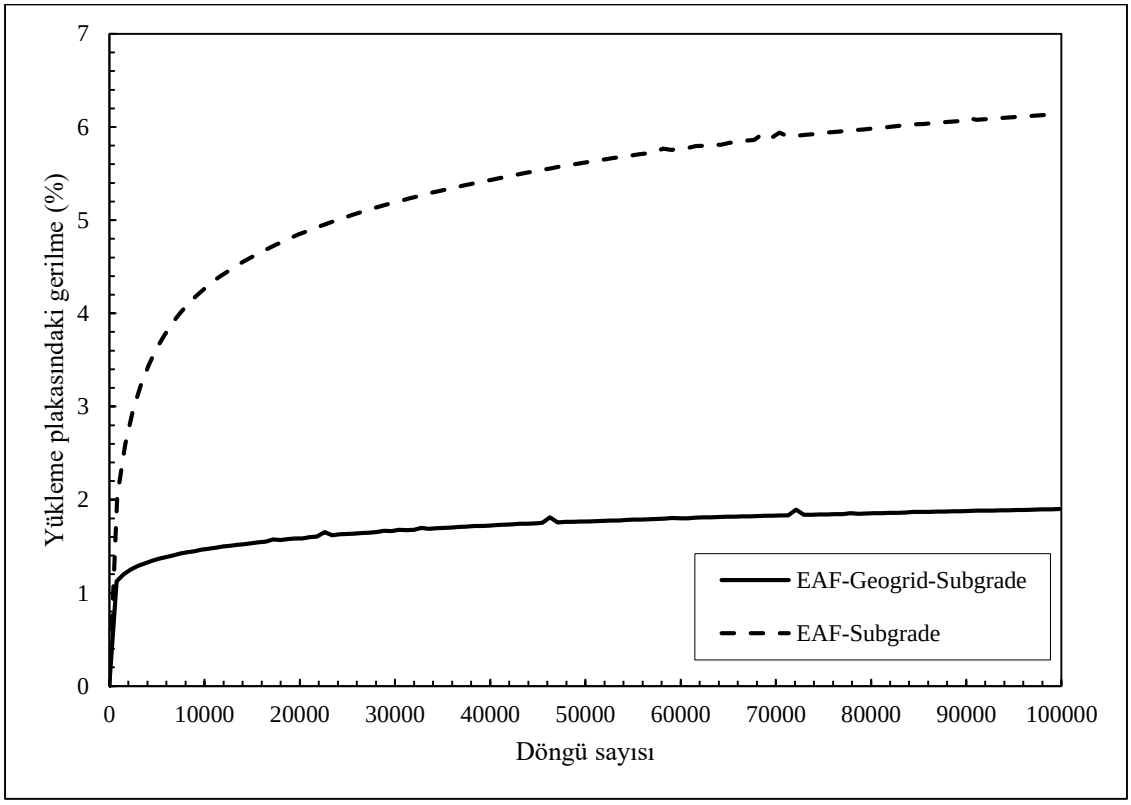


Şekil 6.35. Yükleme plakasına yakın deformasyon ile döngü sayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.36 ve 6.37'de, çelik cürufu (EAF) kullanılan alt temel sistemlerinin, geogrid takviyeli ve takviyesiz durumları için yükleme plakasındaki gerilmenin (% cinsinden) döngü sayısına bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

Şekil 6.36'da grafikteki çizgili eğri, yalnızca çelik cürufu kullanılan alt temel sistemine aittir. Bu sistemde, ilk 10.000 döngüde gerilme hızlı bir şekilde artarak %4 seviyesine ulaşmış ve ardından artış hızı azalarak toplamda %6'ya yaklaşmıştır. Özellikle ilk yükleme döngüleri sırasında, gerilme eğrisindeki ani artış, sistemdeki deformasyon sürecinin başlangıçta yüksek hızda gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, takviyesiz çelik cürufu alt temel sisteminin sınırlı bir elastik kapasiteye sahip olduğunu ve plastik deformasyona yatkın olduğunu ortaya koymaktadır. Geogrid takviyeli sistemde (düz çizgi), gerilme değerleri başlangıçtan itibaren oldukça düşük seviyelerde seyretmiş ve döngü sayısı arttıkça sabit bir platoya ulaşmıştır. Yaklaşık %1,5 seviyesinde sabitlenen gerilme değeri, bu sistemin uzun vadeli yük taşıma kapasitesinde kararlılığını koruduğunu göstermektedir. Bu genel eğilimler, geogrid takviyesinin yalnızca alt temel malzemesindeki deformasyonu

sınırlamakla kalmayıp, aynı zamanda gerilme değerlerini de önemli ölçüde azalttığını ve stabilize ettiğini göstermektedir.

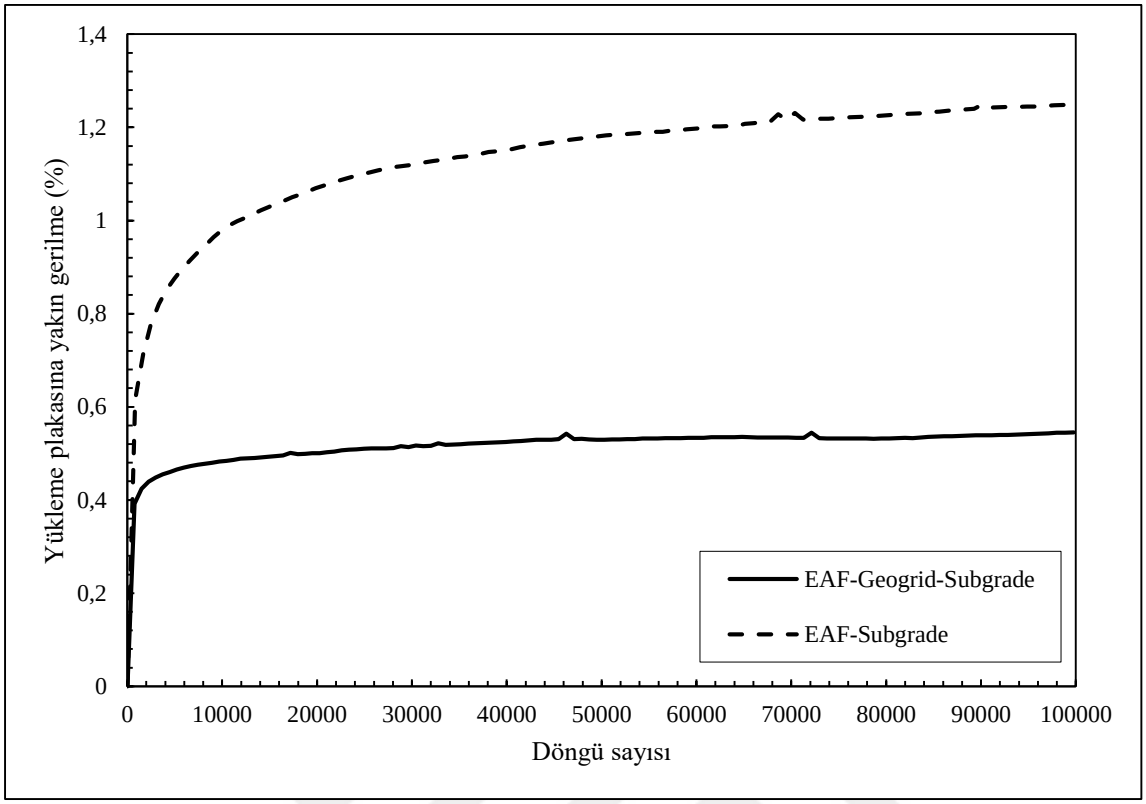


Şekil 6.36. Yükleme plakasındaki gerilme oranı ile döngü sayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.37'deki veriler **i**lk başlarda, döngü sayısı arttıkça, gerilme oranının oldukça düşük kaldığını göstermektedir. Ancak, yaklaşık 10.000 döngü civarına kadar, gerilme oranı belirgin bir şekilde artmaya başlar. Başlangıçtaki düşük gerilme oranı, geogrid'in toprağa sağladığı destek ile zemin malzemesinin daha stabil olduğunu gösterir. Gerilme oranı, döngü sayısının 20.000'ler civarına ulaştığında hızla stabil hale gelir ve gerilme ekseninde 0.4-0.5% civarlarında sabitlenir. Bu, geogrid'in zeminin taşıma kapasitesini artırmaya başlaması ve gerilme oranını sınırlaması ile ilgilidir. Döngü sayısı 50.000-70.000 civarına geldiğinde, gerilme oranı yine çok küçük bir artış göstererek 0.5-0.6% civarlarında stabil kalır. Bu, geogrid'in uzun süreli yüklemelerde zemin malzemesinin daha dayanıklı ve stabil kalmasını sağladığını gösterir. EAF ve alt temeli oluşturan eğride, döngü sayısı arttıkça gerilme oranı başta yavaşça artmaktadır. Ancak, EAF-alt temel eğrisinde gerilme oranı daha yüksek bir değere ulaşır. İlk 10.000 döngüde gerilme oranı, yaklaşık 0.3-0.4% civarlarında kalır. 20.000 döngüden sonra, gerilme oranı daha belirgin bir şekilde artar ve yaklaşık 0.6-0.7% civarlarına ulaşır. Bu, geogrid kullanılmayan alt temel malzemesinin daha fazla

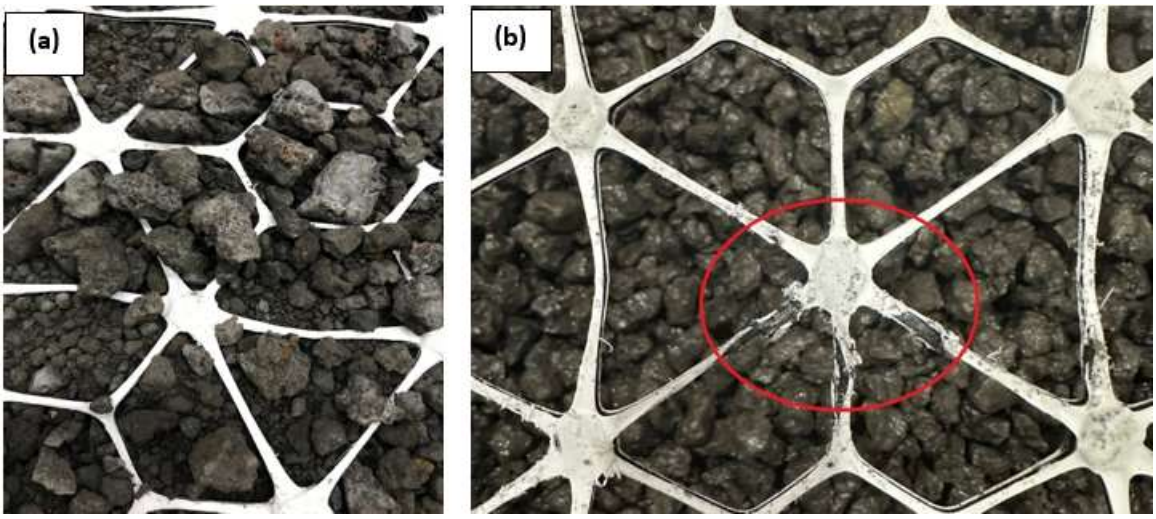
deformasyona uğradığını ve gerilme oranının daha hızlı arttığını gösterir. Döngü sayısı arttıkça, gerilme oranındaki artış yavaşlar, ancak daha yüksek seviyelerde kalmaya devam eder. 70.000 döngü civarında gerilme oranı 0.9-1.0% civarlarına çıkar ve stabilleşme daha geç gerçekleşir.

Grafik, her iki testin de başlangıç aşamasında (düşük döngü sayısı bölgesinde) benzer bir eğilim gösterdiğini, ancak daha sonra belirgin bir fark oluştuğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, EAF-Geogrid-Subgrade eğrisinin daha hızlı bir şekilde stabilleşmesi ve düşük gerilme oranlarına ulaşması, geogrid kullanımının yükleme plakasına yakın gerilme üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. EAF-Subgrade eğrisinde ise, daha yüksek bir gerilme oranı ve daha uzun sürede stabilleşme gözlemlenmektedir. Bu durum, yalnızca alt temel malzemesinin daha fazla deformasyona uğramasına ve daha fazla gerilme üretmesine neden olabilir. EAF-Geogrid-Subgrade eğrisinin, özellikle döngü sayısının 20.000'ler civarına kadar hızla stabil hale gelmesi, geogrid'in alt temel üzerinde taşıma kapasitesini artırarak zemin özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu, geogrid'in toprağın dayanımını artırma işlevini vurgular ve alt temel malzemesinin daha dayanıklı olmasını sağlar. Buna karşın, EAF-Subgrade eğrisinin stabilizasyona daha uzun bir süre ihtiyacı olması, geogrid'in etkisi olmadan yapılan testlerde zemin malzemesinin daha fazla deformasyona uğradığını ve gerilme oranlarının zamanla yavaş bir şekilde arttığını gösterir. Her iki eğrinin de sağa doğru ilerledikçe (daha fazla döngü sayısı) daha yüksek bir gerilme oranına ulaşması, zemin malzemesinin artan yüklere karşı daha fazla tepki verdiğini, fakat bu tepkinin geogrid ile daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Geogrid eklemenin, zeminin dayanımını artırmakla birlikte, yükleme sırasında zeminde meydana gelen deforme süreçlerini sınırlayarak daha düşük bir gerilme seviyesinde sabitlenmesini sağladığı söylenebilir.



Şekil 6.37. Yükleme plakasına yakın gerilme oranı ile döngü sayısı arasındaki ilişki

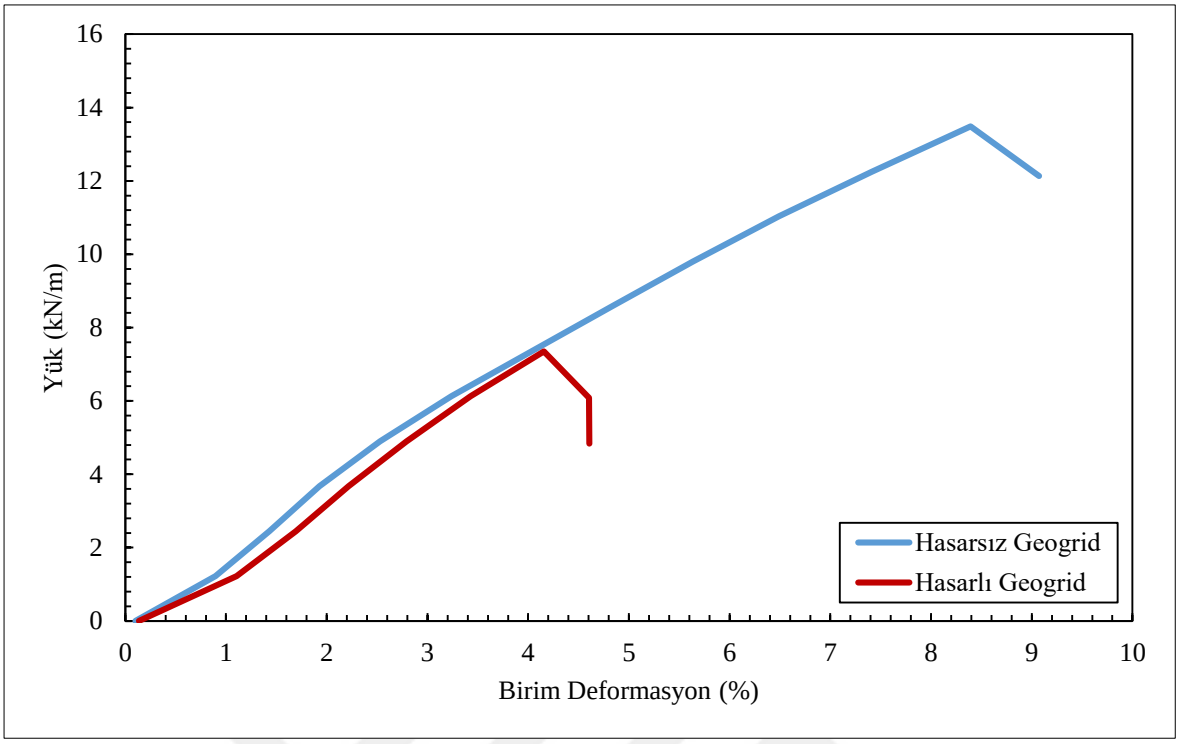
Şekil 6.38, test sisteminin merkezi alanında gerçekleştirilen yükleme testinin öncesi (a) ve sonrası (b) aşamalarında hasar görmüş geogridin görünümünü sunmaktadır. Görselin (a) kısmı, yükleme testi öncesindeki geogrid yapısını göstermekte olup, malzemenin başlangıçtaki sağlamlık ve düzenini yansıtmaktadır. (b) kısmı ise test sonrası meydana gelen hasarları ortaya koymaktadır. Bu hasar, geogridin dayanıklılığını ve performansını değerlendirmeyi amaçlayan yükleme sürecinin sonucudur. Görseldeki değişiklik, geogridin mekanik özelliklerinin ve deformasyon toleransının analiz edilmesine olanak tanımaktadır, bu da malzemenin uzun vadeli dayanıklılığı ve mühendislik uygulamalarındaki güvenilirliğine dair değerli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 6.38. Test sisteminin merkezi alanından yükleme testi öncesi (a) ve sonrası (b) çıkarılmış hasar görmüş geogridin görünümü

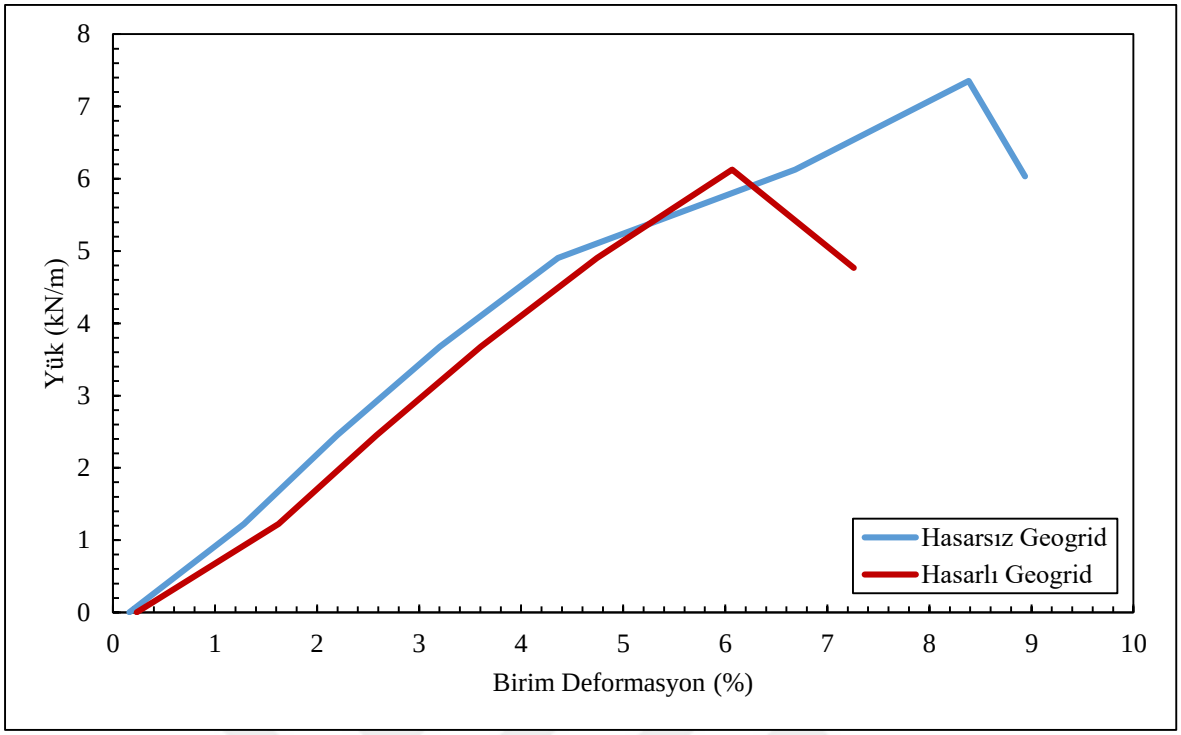
Bu amaçla, ASTM D66-11 standardına uygun olarak iki farklı numune (A ve B) üzerinde çekme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, test öncesindeki malzeme özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Numune A'nın çekme yönüne paralel bir şekilde kırılma gösterdiği, numune B'nin ise bağlantı noktalarında lokalize hasar meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Deneysel prosedür, çeşitli fikstürlerle çekme, basınç ve eğilme testleri yapabilen çift kolonlu masaüstü test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, 5 N (1,1 lbf) ile 50 kN (11.250 lbf) arasında değişen yük kapasitesine sahip olup geniş kapsamlı mekanik değerlendirmelere olanak tanımaktadır. Ayrıca, travers hızı 0,001 mm/dk (0,00004 in/dk) ile 600 mm/dk (24 in/dk) arasında ayarlanabilir, böylece yükleme koşulları üzerinde hassas kontrol sağlanabilir. Çekme dayanımı testi sonuçları, Şekil 6.39 ve 6.40'ta gösterildiği üzere, hasara bağlı olarak performanstaki değişimleri ortaya koymaktadır.

Şekil 6.39’da görüldüğü gibi, hasarlı geogridin çekme dayanımı, hasarsız geogridle kıyaslandığında yaklaşık %40 daha düşüktür. Bu azalma, esas olarak çekme yönüne paralel hizalanmış bağlantıların hasar görmesinden kaynaklanmaktadır. Deneysel gözlemler ve kaydedilen veriler, bu paralel bağlantılardaki hasarın geogridin genel çekme dayanımını önemli ölçüde zayıflattığını doğrulamaktadır.



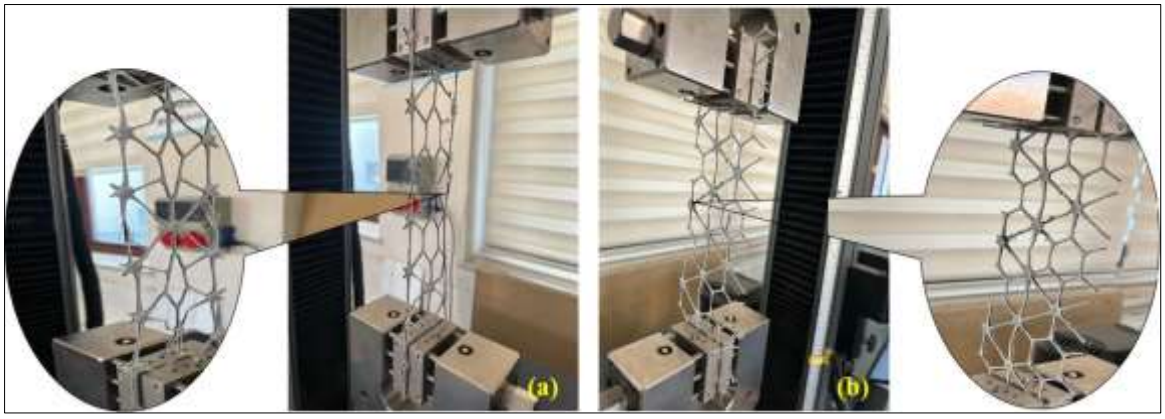
Şekil 6.39. Geogrid malzemesi (A) için çekme dayanımı testi grafiği

Öte yandan, Şekil 6.40, hasarlı geogridin çekme dayanımının hasarsız geogridle kıyaslandığında yaklaşık %14 daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu görece daha küçük azalma, hasarın dikey yük taşıyıcı elemanları daha az etkilemesi nedeniyle daha sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.40. Geogrid malzemesi (B) için çekme dayanımı testi grafiği

Hasarın boyutunun ötesinde, hasarın konumu da geogridin mekanik performansını belirlemede kritik bir rol oynamaktadır (Şekil 6.41). Analiz edilen grafikler, hasarlı geogridler için çekme dayanımında bir azalma olduğunu gösterse de, testler sırasında genel performans üzerinde önemli bir olumsuz etki gözlemlenmemiştir. Bu bulgu, hasar varlığına rağmen geogridin yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve uygulanan yükler altında etkili bir şekilde çalışmaya devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 6.41. Geogridde hasar konumları, (a) çekme yönüne paralel hasar, (b) bağlantı noktalarındaki hasar

6.6. Sayisal Modelleme Çalışmaları

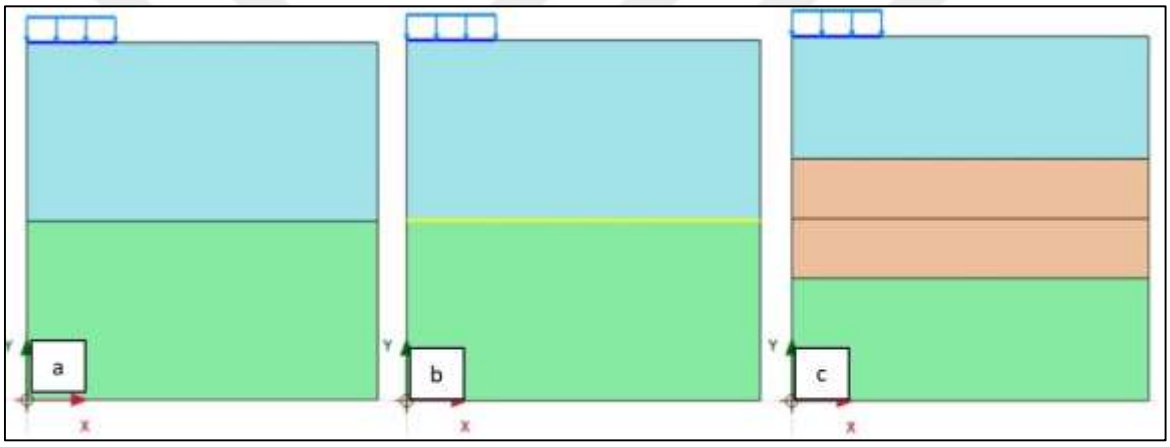
Sayısal modelleme, mühendislikteki karmaşık problemleri çözmek için oldukça güçlü bir araçtır. Zeminlerin davranışı, temel zemin özellikleri kullanılarak yapılan sayısal analizlerle doğru bir şekilde modellenebilir. Bu analizlerde yaygın olarak kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), sürekli ortamları farklı geometrilerle parçalara ayırarak modellenmesini sağlar. Bu yöntem, zeminlerin plastik deformasyonlar ve gerilim yoluna bağlı doğrusal olmayan davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde simüle edebilmek için ideal bir yaklaşımdır [147].

Birçok mühendislik disiplininde olduğu gibi, yol tasarımında da sıklıkla kullanılan basit katmanlı elastik teoriye kıyasla Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) daha karmaşık bir analiz yöntemidir. Ancak, sonlu elemanlar tekniği, malzeme özellikleri arasında farklılıklar ve özellikle kaplama deformasyonları gibi karmaşık etkileşimleri başarılı bir şekilde modelleyebilmesiyle öne çıkar. Bu sebeple, özellikle karmaşık malzeme davranışlarının ve etkileşimlerinin modellemesinde FEM sıklıkla tercih edilmektedir.

Sayısal modellemenin başarısı, oluşturulan FE modelinin geometrisinin doğru ve uygun boyutlarda olmasına bağlıdır. Bu, analizlerin hızlı ve doğru bir şekilde sonuçlanmasını sağlar. Üstyapı tasarımı gibi doğrusal olmayan malzeme davranışlarının doğru şekilde hesaplanması gereken durumlarda, Plaxis, ABAQUS, ANSYS gibi sonlu elemanlar yazılımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, her biri kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar sunarak, analiz yapılacak modelin malzeme özelliklerine, tasarımına ve analiz türüne göre seçilebilir. Ayrıca, doğrusal olmayan malzeme davranışlarının modellenebildiği yazılımlar, esnek üstyapı tasarımında daha etkili sonuçlar verir [34].

Bu amaçla, bu çalışmada Plaxis yazılımı tercih edilmiştir. Plaxis, özellikle zemin-üstyapı etkileşimini ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarını başarıyla modelleyebilmesiyle bilinir. Ayrıca, bu yazılım, zemin deformasyonlarını, yük taşıma kapasitesini ve zemin-tepki analizlerini doğru bir şekilde hesaplamak için güçlü bir araçtır. Plaxis'in sunduğu detaylı çözümleme seçenekleri, bu çalışmada üstyapı tasarımının doğrusal olmayan özelliklerini doğru bir şekilde simüle etmeye olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, daha önce büyük ölçekli bir dinamik analiz deney sistemi kullanılarak elde edilen verilerle, aynı malzeme ve boyutlar üzerinde statik sayısal analiz yapılmıştır. Büyük ölçekli deneyde kullanılan modelin boyutları, yükseklik 610 mm, genişlik 1210 mm ve uzunluk 1010 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar, statik analizde de kullanılacak olup, Plaxis yazılımı kullanılarak modellenmiştir (Şekil 6.42). Analiz, eksenel simetri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları için, Plaxis programında yer alan standart "fixity" seçeneği kullanılmıştır. Bu sayede, modelin kenarlarında yatay deformasyonlar (x) kısıtlanmış, düşey deformasyonlar (y) ise serbest bırakılarak kayar mesnet uygulanmıştır. Modelin alt kısmında ise sabit mesnet koşulları benimsenmiş ve hem x hem de y yönlerindeki deformasyonlar sınırlandırılmıştır.



Şekil 6.42. Eksenel simetriye dayalı olarak sonlu elemanlar analizi için oluşturulan geometri modelleri

Analiz süreci üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, geogrid içermeyen model incelenmiş olup, sadece alt temel malzemesi ve üstte çelik cüruf tabakası yer almaktadır. İkinci aşamada, alt temel malzemesinin üzerine geogrid eklenmiş ve üst tabakada yine çelik cüruf kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise, geogrid rijit bir tabaka olarak modellenmiş ve bu durumun deformasyon üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu üç farklı durumun sonuçları karşılaştırılarak, geogrid kullanımının deformasyon ve zemin stabilitesi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Testlerde kullanılan alt temel malzemesi ve çelik cüruf tabakalarının boyutları eşit olup, her iki malzemenin tabaka kalınlığı 305 mm x 305 mm olarak belirlenmiştir. Bu tabakaların ortasında geogrid malzemesi yer alacaktır. Sayısal analiz, malzeme ve tabaka boyutlarının

doğruluğunu ve zemin-tepki ilişkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olacak ve bu şekilde, geogridli ve geogridsiz durumlar arasındaki performans farkları ortaya konulacaktır.

Bu çalışmanın amacı, geogridli ve geogridsiz zemin davranışlarının karşılaştırılması ve zemin performansına etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesidir. Geogrid kullanımı ile zemin dayanıklılığında, deformasyon oranlarında ve genel performansta ne gibi değişiklikler gözlemlendiği, statik sayısal analiz ile değerlendirilecektir. Kesitlerin analizinde kullanılan malzeme parametreleri, Çizelge 6.13'te sunulmuştur.

Çizelge 6.13. Modellemede kullanılan malzemelere ait mühendislik parametreleri

Malzeme Parametreleri	Alttemel	Çelik Cüruf	Geogrid Tabakası
E_{50}^{ref} (MPa)	80	50	60
E_{oed}^{ref} (MPa)	80	50	60
E_{ur}^{ref} (MPa)	24	50	180
v_{ur}	0,2	0,2	0,2
γ (kN/m^3)	21	21	21
c	5	47	60
ϕ (°)	25	47	47
Kalınlık (m)	0,305	0,305	-

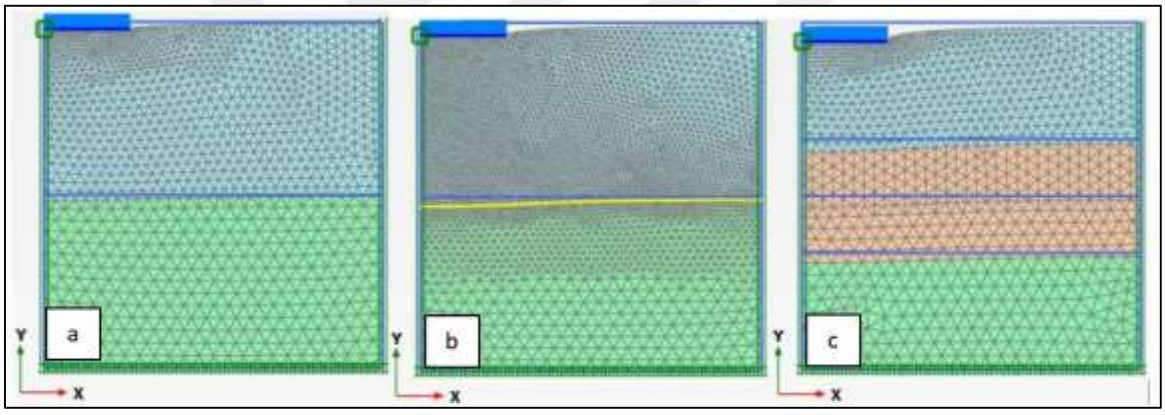
Şekil 6.43'te üç farklı modelin deformasyon sonuçları gösterilmektedir. (a), geogrid içermeyen modelin sonuçlarını sunmakta olup, elde edilen deformasyon değeri 2,612 mm olarak hesaplanmıştır. (b) ise, geogrid malzemesi olarak tasarlanan modelin analiz sonuçlarını göstermektedir ve bu durumda deformasyon 2,268 mm olarak belirlenmiştir. Son olarak, (c) rijit bir tabaka olarak modellenen geogrid içeren modelin sonuçlarını içermekte olup, deformasyon 1,663 mm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geogrid kullanımının deformasyonu azaltmada etkili olduğunu, ancak rijit bir tabaka olarak modellenmesi durumunda bu etkinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Esnek bir geogrid modeli, agrega ile etkileşime girerek yük taşıma kapasitesini arttırmakta ve lokal deformasyonları azaltmaktadır. Ancak, bu etkileşim sınırlı elastisiteye ve esneme kabiliyetine sahiptir. Buna karşın rijit tabaka olarak modellenen geogrid, yükün daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak gerilme yoğunluğunu azaltır. Bu sayede alt tabakalarda oluşan plastik deformasyon sınırlandırılmış olur. Ayrıca, rijit bir ara tabaka; yatay yöndeki

deplasmanları da sınırlandırarak zemin-geogrid etkileşimini daha stabil hale getirir. Bunun sonucunda sistemin genel rijitliği artar ve düşey deformasyon minimum seviyeye iner.

Sayısal modelleme bağlamında rijit bir tabaka, pratikte aşırı yüksek elastisite modülüyle tanımlandığından, neredeyse deplasman göstermeyen bir eleman gibi davranır. Bu, özellikle yükleme bölgesinde gelen yüklerin doğrudan alt zemine iletilmeden önce daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Gerilme yayılımı açısı artar ve alt tabakadaki çevresel ve deviatorik gerilme seviyeleri düşer. Böylece deformasyon daha kontrollü hale gelir.

Bu sonuçlar, geogrid performansının sadece varlığıyla değil, aynı zamanda mekanik özelliklerinin (örneğin rijitlik, çekme modülü) ve geometri-temas koşullarının da deformasyon kontrolünde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.43. Statik analiz sonucu elde edilen deformasyon görüntüsü

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geogrid ile güçlendirilmiş çelik cüruf malzemelerinin dayanıklı modül ve kalıcı deformasyon özellikleri, yol uygulamalarında alternatif inşaat malzemesi olarak potansiyellerini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Dayanıklı modül ve kalıcı deformasyon testleri, AASHTO T 307 test prosedürü takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Geogrid güçlendirmeli ve güçlendirmesiz örnekler aynı koşullar altında hazırlanmıştır. Kalıcı deformasyon testleri, dinamik deviator gerilmesi altında 27,5 kPa seviyesinde, yükleme döngüsü sayısı 10.000'e ulaşana kadar yapılmıştır.

Çalışmadan elde edilen temel bulgular şunlardır:

- Test edilen çelik cüruf alt temel malzemelerinin dayanıklı modülü 100 MPa ile 300 MPa arasında değişmektedir. Geogrid eklenmesi, dayanıklı modülü önemli ölçüde artırarak malzemelerin yük taşıma kapasitesini ve yapısal bütünlüğünü döngüsel yükleme altında geliştirmiştir.
- Geogrid ile güçlendirilmiş örnekler, güçlendirilmemiş örneklere kıyasla daha küçük birikmiş kalıcı deformasyonlar sergilemiştir. Bu, geogridin deformasyonu azaltma ve çelik cüruf tabanlı malzemelerin performansını iyileştirme yeteneğini vurgulamaktadır.
- Dayanıklı modüldeki artış, çelik cüruf tarafından sağlanan sıkıştırma basıncı ile birlikte, bu malzemelerin daha derin yol katmanları için uygunluğunu desteklemektedir. Ayrıca, geogrid güçlendirmesi, gerilme yönlerini iyileştirmiş ve yüzey deformasyonlarını azaltarak alt temele iletilen gerilmenin daha iyi bir şekilde dağılmasını sağlamıştır.
- Alt temel koşullarında, daha düşük toprak taşıma kapasitesi ve daha yüksek deformasyonlar dayanıklı modül değerlerinde bir azalmaya yol açmıştır. Bu durum, alt temel uygulamalarında toprağın elastik özelliklerinin, geogrid ile güçlendirilmiş malzemelerin performansını sınırladığını göstermektedir.
- Geogrid malzemesinde, yükleme fazları sırasında veya sonrasında herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Uygulanan yükler nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar, geogrid malzemesinin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atmamıştır ve bu durum, malzemenin bu çalışmada kullanılabilirliğini doğrulamaktadır.

- Geogrid güçlendirmesi, binlerce yükleme döngüsü boyunca kalıcı gerilme birikimini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu, geogridin özellikle ağır trafik yüklerine maruz kalan alanlarda, yolların ömrünü uzatma potansiyelini göstermektedir.

Bulgular, geogrid güçlendirmesinin ACBF ve EAF çelik cüruf malzemelerinin döngüsel yükleme koşulları altında performansını ve dayanıklılığını iyileştirdiğini ve bu tekniğin yüksek gerilme malzemelerinin kullanıldığı inşaat projelerinde geniş bir uygulama potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Öneriler

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki öneriler gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için sunulmaktadır:

- Geogrid güçlendirilmiş çelik cüruf malzemelerinin performansını optimize etmek amacıyla, farklı geogrid güçlendirme yapılandırmalarının dayanıklı modül ve kalıcı deformasyon özellikleri üzerindeki etkisi daha ayrıntılı olarak incelenmelidir. Farklı açıklık şekilleri ve malzeme bileşimlerinin etkisi, performans iyileştirmeleri için ek bilgiler sağlayabilir.
- Geogrid ile güçlendirilmiş malzemelerde dayanıklı modülün önemli ölçüde arttığı göz önüne alındığında, bu malzemelerin gerçek dünya çevresel ve trafik koşullarındaki uzun vadeli davranışları üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Bu, malzemelerin dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği hakkında kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi sağlayacaktır.
- Geogrid ile güçlendirilmiş malzemeler ve diğer alternatif inşaat malzemelerinin, örneğin geri dönüştürülmüş beton agregatları ve diğer sanayi yan ürünleri ile etkileşimleri üzerine araştırmalar yapılmalıdır. Bu, güçlendirilmiş yol sistemlerinin çeşitliliğini ve maliyet etkinliğini artırabilir.
- Geogridin gerilme dağılımını iyileştirme ve yüzey deformasyonlarını azaltma potansiyeli göz önüne alındığında, özellikle ağır trafik yüklerine maruz kalan bölgelerde yol tasarımlarında kullanımına odaklanılmalıdır. Bu, yük taşıma kapasitesini artırma açısından kritik bir faktör olabilir.
- Alt temel uygulamalarında gözlemlenen sınırlamaları ele almak için, geogrid güçlendirmesinin farklı toprak özelliklerine sahip zeminler üzerindeki etkisi

incelenmelidir. Bu, farklı alt temel koşullarında güçlendirilmiş malzemelerin performansını optimize etmeye yardımcı olabilir.

- Çok katmanlı yol tasarımlarında geogrid güçlendirmesinin kullanılması önerilmektedir. Bu, daha derin katmanların gerektiği durumlarda, özellikle yüksek trafik frekansına sahip bölgelerde, yolun genel yapısal bütünlüğünü ve hizmet ömrünü iyileştirebilir.

Bu öneriler, geogrid ile güçlendirilmiş çelik cüruf malzemelerinin anlaşılmasını ve pratik uygulamalarını geliştirmeyi amaçlamakta olup, daha sürdürülebilir ve dayanıklı yol altyapısı çözümlerine katkı sağlayacaktır

KAYNAKLAR

1. Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials,* 58, 245-257.

2. İnternet: U.S. Geological Survey. Fact sheet; iron ore. In: Summaries, M. C. (Ed.). URL: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information. Son Erişim Tarihi: 06.09.2023

3. İnternet: World Steel Association. Fact sheet; steel industry by-products. URL: https://worldsteel.org/media/publications/by-products/. Son Erişim Tarihi: 12.11.2024

4. Sukmak, P., Sukmak, G., De Silva, P., Horpibulsuk, S., Kassawat, S., Suddeepong, A. (2023). The potential of industrial waste: Electric arc furnace slag (EAF) as recycled road construction materials. *Construction and Building Materials,* 368.

5. Geiseler, J. (1996). Use of steel works slag in Europe. *Waste Management,* 16 (1-3), 59-63.

6. Rohde, L., Nunez, W. P., Ceratti, J. A. P. (2003). Electric arc furnace steel slag base material for low-volume roads. *Transportation Research Record,* 1819, 201-207.

7. Ahmedzade, P., Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165-(1-3), 300-305.

8. Deniz, D., Tutumluer, E., Popovics, J. (2009). Expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) used as base materials. *Research Report,* 09-055.

9. Yıldırım, I. Z., Prezzi, M. (2009). Use of steel slag in subgrade applications. *The Federal Highway Administration,* 32.

10. Maghool, F., Arulrajah, A. Y., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A. (2016). Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregatesas recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy,* 142.

11. Akbarnejad, S., Copuroglu, O., Houben, L. J. M., Molenaar, A. (2012). *Characterization of blast furnace slag to be used as road base material*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auckland. New Zealand.

12. Huang, Y., Bird, R. N., Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*. 52, 58–73.

13. Hosseinzadeh, N., Rezaei, M. J., Hosseini, S. M. (2016). Investigation and performance improvement of hot mix asphalt concrete containing EAF slag. *International Journal of Civil Engineering and Technology,* 8, 260–264.

14. Xu, D. B. (2018). *The material and performance research of steel slag asphalt mixtures*. Southeast University, Bangladeş.

15. Zhou, Q. W. (2011). *Study on the steel slag base and the performance of steel slag-asphalt mixtures in highway*. Chongqing Jiaotong University, Chongqing.

16. Hainin, M. R., Aziz, M. M. A., Ali, Z. (2015). Steel slag as a road construction material. *Journal Technology*, (73), 33–38.

17. Wang, H., Qian, J., Zhang, H., Nan, X., Chen, G., Li, X. (2024). Exploring skid resistance over time: steel slag as a pavement aggregate comparative study and morphological analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142-779.

18. Maghool, F. (2019). Geotechnical properties of ıron and steel making slag aggregates stabilised with binders for pavement base/subbase applications. *Swinburne*, 12-24.

19. Kabeta, W. F., Lemma, H. (2023). Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(4), 4023-4030.

20. Sas, W., Głuchowski, A., Radziemska, M., Dzięcioł, J., Szymański, A. (2015). Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure. *Materials*, 8(8), 4857-4875.

21. Sarkar, S., Hegde, A. (2024). Performance evaluation of steel slag and construction and demolition waste as reinforced earth backfill materials under cyclic loading conditions. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(3), 38.

22. Ika Putra, A. (2014). *Stabilisation of Expansive Subgrade Soils with Slag and Cement For Road Construction.* Doktora Tezi, Curtin University, Avustralya.

23. Maghool, F., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Mohajerani, A. (2019). Geotechnical properties of steel slag aggregates: shear strength and stiffness. *Soils and Foundations*, 59(5), 1591-1601.

24. Gu, X., Yu, B., Dong, Q., Deng, Y. (2018). Application of secondary steel slag in subgrade: performance evaluation and enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 181, 102-108.

25. Vasudevan, M., Santoso, H. (2012). *Use of soil-steel slag-fly ash mixtures in subgrade applications.* Purdue University, United State.

26. Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y. J., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A. (2017). Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 949-958.

27. Soltani-Jigheh, H., Golmohammadi, H., Tajrostami, M. (2022). Effect of steel slag on the mechanical behavior of surficial yellow marl of Tabriz. *Soils and Rocks*, 45(3), 21.

28. Aldeeky, H., Al Hattamleh, O. (2017). Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil. *Advances in Civil Engineering*, 2017(1), 9230279.

29. Rezaei-Hosseinabadi, M. J., Bayat, M., Nadi, B., Rahimi, A. (2022). Sustainable utilisation of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects. *Case Studies in Construction Materials*, (17), 33.

30. Oluwasola, E., Afolayan, A., Popoopa, M., Afolabı, A. (2020). Effect of steel slag on engineering properties of lateritic soil. *American Journal of Engineering Research*, 9, 20-27.

31. Wang, G. W. (1992). *Properties and Utilization of Steel Slag in Engineering Applications*. Doktora Tezi, University of Wollongong, Wollongong.

32. Kumar, P., Shukla, S. (2023). Utilization of steel slag waste as construction material: *A review. Materials Today: Proceedings*, 78, 145-152.

33. Dayıoğlu, Y. A., Hatipoğlu, M., Aydilek, A. (2023). Comparative evaluation of mechanical performance of steel slag and earthen granular aggregates. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 8(1), 12-19.

34. Özsoy, M., Fırat, S. (2023). *Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Altyapısı Katmanlarının Statik ve Tekrarlı Yükler Altında Sayısal Analizleri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

35. Karadağ, H., Fırat, S., Işık, N. S. (2020). Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 799-812.

36. Yıldırım, I. Z., Prezzi, M. (2009). Use of steel slag in subgrade applications. *JTRP Technical Reports.*

37. Suku, L., Prabhu, S. S., Babu, G. S. (2017). Effect of geogrid-reinforcement in granular bases under repeated loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(4), 377-389.

38. Alimohammadi, H. (2021). *A state of the art large-scale laboratory approach to evaluating the effectiveness of geogrid reinforcement in flexible pavements.* Geosynthetics Conference.

39. Jayalath, C., Gallage, C., Wimalasena, K., Lee, J., Ramanujam, J. (2021). Performance of composite geogrid reinforced unpaved pavements under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 304, 124570.

40. Marto, A., Oghabi, M., Eisazadeh, A. (2013). The effect of geogrid reinforcement on bearing capacity properties of soil under static load; a review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 1881-1898.

41. Alimohammadi, H., Zheng, J., Schaefer, V. R., Siekmeier, J., Velasquez, R. (2021). Evaluation of geogrid reinforcement of flexible pavement performance: A review of large-scale laboratory studies. *Transportation Geotechnics*, 27, 100471.

42. Sharbaf, M., Ghafoori, N. (2021). Laboratory evaluation of geogrid-reinforced flexible pavements. *Transportation Engineering*, 4, 100070.

43. Gunasekara Jayalath, C. P. (2021). *Performance of Geogrid-Reinforced Unpaved Pavements Under Cyclic Loading*. Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Avustralya.

44. Gao, J., Liu, L., Zhang, Y., Xie, X. (2022). Deformation mechanism and soil evolution analysis based on different types geogrid reinforced foundation. *Construction and Building Materials*, 331, 127322.

45. Desbrousses, R. L. E., Meguid, M. A., Bhat, S. (2023). Experimental investigation of the effects of subgrade strength and geogrid location on the cyclic response of geogrid-reinforced ballast. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(6), 67.

46. Javdanian, H., Gohari, A. (2024). Seismic behavior analysis of geogrid-reinforced soil slopes. *Iranian Journal Of Science And Technology-Transactions of Civil Engineering*, 48(2), 999-1008.

47. Kumar, J. S., Nusari, M. S., Purushotam, D., Prasad, A. I., Rajyaswori, S. (2021). Effectiveness of geocell wall, geogrid and micropile anchors for mitigation of unstable slopes. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 11.

48. Jasim, A. F., Fattah, M. Y., Al-Saadi, I. F., Abbas, A. S. (2021). Geogrid reinforcement optimal location under different tire contact stress assumptions. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 357-365.

49. Hou, J., Chu, C. X., Li, J. Z., Copeland, T., Chen, J., Nam, B. H. (2024). An analytical model of horizontal-vertical geogrid reinforced foundation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-8.

50. Wu, H., Huang, B., Shu, X., Zhao, S. (2015). Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 462-469.

51. El Tawati, A. (2021). *Full-Scale Field Study of a Geogrid-Reinforced Unpaved Road System.* Doktora Tezi, The University of Western Ontario, Kanada.

52. Jayalath, C. P. G., Wimalasena, K., Gallage, C. (2024). Small-scale cyclic loading test to investigate the rutting performance of geogrid-reinforced unpaved pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17(3), 615-635.

53. Garber, N. J. (2002). Traffic and highway engineering. *Cengage Learning*, 175.

54. Ayat, M. (2014). *Pavement and Alignment Design of a New Rural Road in the Province of Bologna.* Yüksek Lisans Tezi, Università di Bologna, İtalya.

55. Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreaux, R., Berg, R. R. (2006). Geotechnical aspects of pavements, *Federal Highway Administration*, 05-037.

56. Witczak, M. W., Yoder, E. J. (1975). Principles of pavement design. Wiley. 12-18.

57. Witczak, M. W., Yoder, E. J. (1991). Principles of pavement design. Wiley. 29-36

58. İnternet: Reflection Cracking. URL: https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/reflection-cracking/, Son Erişim Tarihi: 07.08.2024

59. İnternet: How do Potholes form?. URL: https://meonuk.com/blogs/news/how-do-potholes-form, Son Erişim Tarihi: 11.11.2023

60. Mukhopadhyay, A. K., Shi, X., Zollinger, D. G. (2018). *Recycling and reuse of materials in transportation projects—Current status and potential opportunities including evaluation of RCA concrete pavements along an Oklahoma interstate highway* (No. FHWA-OK-18-04). Oklahoma Department of Transportation.

61. İnternet: Pumping. URL:https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/pumping/, Son Erişim Tarihi: 16.09.2024

62. İnternet: Faulting. URL:https://appss.nevadadot.com/airportPavement/pavement-inspection/pci-review/distresses-pcc/faulting.html, Son Erişim Tarihi:05.02.2023

63. Kakara, S., Chowdary, V. (2020). Effect of pavement roughness and transverse slope on the magnitude of wheel loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 4405-4418.

64. İnternet: Road Damage. URL:https://en.photo-ac.com/photo/28954106/road-damaged-by-liquefaction-in-kahoku-city--ishikawa-prefecture, Son Erişim Tarihi: 02.02.2023

65. Subramani, S. K. (2009). Validation of new asphalt cement specification test methods using eastern and northeastern ontario contracts and trial sections. *In Masters Abstracts International*, 49, 2.

66. Jones, C., Doulala-Rigby, C. (2014). *The first polymeric geogrid reinforced soil structure*. Proceedings of 10th International Conference of Geosynthetics, Berlin, Germany.

67. Scotland, I. (2016). *Analysis of Horizontal Deformations to Allow The Optimisation of Geogrid Reinforced Structures.* Doktora Tezi, Loughborough University, İngiltere.

68. Giroud, J. P. (1985). Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrid. *Polymer grid reinforcement*, 116-127.

69. Giroud, J., Han, J. (2004). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. ı. development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 775-786.

70. Bordbar, E. (2023). *Investigations on The Effect of Geosynthetics on the Deformation Behavior of Soil Layers and Stress Distribution Under Static Loading*. Doktora Tezi, Clausthal University, Almanya.

71. Shukla, S. K., Yin, J. H. (2006). Fundamentals of geosynthetic engineering. CRC Press.

72. Koerner, R. M. (2005). Designing with geosynthetics. Upper Saddle River, NJ, USA:: Pearson Prentice Hall.

73. Agrawal, B. J. (2011). *Geotextile: It's application to civil engineering–overview*. In National Conference on Recent Trends in Engineering Technology, Kozhikode.

74. Mulabdić, M., Minažek, K., Kaluđer, J. (2018). *Geogrids-what is important*. In 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, Zadar, 215-221.

75. Aran, S. (2006). Base reinforcement with biaxial geogrid: long-term performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (15), 115-123.

76. Reck, N. C. (2009). *Mechanistic empirical design of geogrid reinforced paved flexible pavements.* Proceedings of Jubilee Symposium on Polymer Geogrid Reinforcement, Institute of Civil Engineers, London, England.

77. İnternet: Hanes Geo Components. Terragrid RX 1200 product data sheet. URL:http://hanesgeo.com/Catalog/Product?id=1704>, Son Erişim Tarihi: 15.11.2015

78. İnternet: Tensar International Corporation. Biaxial (BX) geogrid product specification sheet. URL:<http://www.tensarcorp.com/Systems-and-Products/Tensar-geogrids/Tensar-Biaxial-BXgeogrids> , Son Erişim Tarihi:15.11.2015

79. Sweat, E. J. (2016). *Investigation of Structural Capacity of Geogrid-Reinforced Aggregate Base Materials in Flexible Pavements*. Doktora Tezi, Brigham Young University, Amerika.

80. Al-Barqawi, M., Aqel, R., Wayne, M., Titi, H. Elhajjar, R. (2021). Polymer geogrids: a review of material, design and structure relationships. *Materials,* 14(16), 4745.

81. Whelton, W.; Wrigley, N. (1987). *Long-term durability of geosynthetics soil reinforcement.* In Proceedings of the Geosynthetic'87 Conference, New Orleans, LA, USA, 24–25.

82. Carrol, R. (1988). Specifying geogrids; geotechnical fabrics report; ındustrial fabrics association ınternational: Roseville, MN, USA.

83. Raja, J. (2015). *Reducing the Environmental Impact Of Construction Through Use Of Geosynthetics*. Doktora Tezi, Loughborough University, İngiltere.

84. Mutlugeldi, C. (2015). *Elektrik Ark Fırını Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Bitümlü Temel Tabakasında Agrega Olarak Değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

85. Thomas, C., Rosales, J., Polanco, J. A., Agrela, F. (2019). Steel slags. ın new trends in eco-efficient and recycled concrete. *Woodhead Publishing*, 169-190.

86. Shi, C. (2004). Steel slag its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.

87. Morian, D. A., Van Dam, T., Perera, R. (2012). Use of air-cooled blast furnace slag as coarse aggregate in concrete pavements. *Federal Highway Administration*, 12-08.

88. Ducman, V., Mladenovič A. (2011) The potential use of steel slag in refractory concrete. *Materials Characterization*, 62(7), 716–23.

89. Piatak, M., Parsons, M., Seal, R. (2014). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.

90. Ter Teo, P., Seman, A. A., Basu, P., Sharif, N. M. (2016). Characterization of EAF steel slag waste: the potential green resource for ceramic tile production. *Procedia Chemistry*, (19), 842-846.

91. Diotti, A., Cominoli, L., Galvin, A. P., Sorlini, S., Plizzari, G. (2021). Sustainable recycling of electric arc furnace steel slag as aggregate in concrete: effects on the environmental and technical performance. *Sustainability*, 13(2), 521.

92. Manso, J. M., Polanco, J. A., Losañez, M., González, J. J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 528–534.

93. Pellegrino, C., Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 663-671.

94. Sekaran, A., Palaniswamy, M., Balaraju, S. (2015). A study on suitability of EAF oxidizing slag in concrete: an eco-friendly and sustainable replacement for natural coarse aggregate. *The Scientific World Journal*, 1-8.

95. Beh, C. L., Chuah, L., Choong, T. S. Y., Kamarudzaman, M. Z. B., Abdan, K. (2010). Adsorption study of electric arc furnace slag for the removal of manganese from solution. *American Journal of Applied Sciences*, 7(4), 442-446.

96. Song, G., Wu, Y., Chen, X., Hou, W., Wang, Q. (2014). Adsorption performance of heavy metal ions between EAF steel slag and common mineral adsorbents. *Desalination and Water Treatment*, 52, 37-39.

97. Georgakopoulos, E. D. (2016). *Iron and Steel Slag Valorization Through Carbonation and Supplementary Processes*. Doktora Tezi, Cranfield University, İngiltere.

98. Panchmatia, P. (2017). *The Effects of Air-Cooled Blast Furnace Slag (ACBFS) Aggregate on the Chemistry of Pore Solution and The Interfacial Transition Zone*. Doktora Tezi, Purdue University, Amerika.

99. Tozsin, G., Kavasoğlu, B. (2023). Çelik cüruflarının potansiyel kullanım alanlarının değerlendirilmesi. *Kent Akademisi*, 16(2), 1200-1211.

100. Yılmaz, A., Sütaş, Ş., (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 4455-4470.

101. O'Connor, J., Nguyen, T. B. T., Honeyands, T., Monaghan, B., O'Dea, D., Rinklebe, J., ve Bolan, N. (2021). Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126-478.

102. Chandel, S. S., Singh, P. K., Katiyar, P. K. (2023). A review on environmental concerns and technological innovations for the valorization of steel industry slag. *Mining Metall. Exp*, 40, 2059–2086.

103. Ersöz, F., Ersöz, T., Erkmen, İ. N. (2016). Dünyada ve Türkiye'de ham çelik üretimine bakış. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 32(2).

104. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (2022). Türkiye demir ve demir dişi metaller meclisi. *TOBB Yayınları*, 170.

105. İnternet: Total production of crude steel. URL: https://worldsteel.org/data/annual-production-steel data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND/TUR, Son Erişim Tarihi:17.02.2025

106. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. (2015). *Demir çelik cüruf raporu.* Çevre ve Şehircilik Bakanlığı

107. Geopave-Material Technology. (1993, Kasım). *Steel slag aggregates* (Technical Note 9).

108. Turner Fairbank Highway Research Center & Department of Transportation & Federal Highway Administration. (2007). *Steel slag-material description.*

109. Patel, J. P. (2008). *Broader use of steel slag aggregates in concrete*. Master's thesis, Cleveland State University, Amerika.

110. British Standards Institution. (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification tests* (British Standard 1377-2).

111. Knappett, J. A., ve Craig, R. F. (2012). *Soil mechanics*. Spon Press.

112. Tsitouridis, G. (2019). *Terramechanics and Soil–Wheel Interactions For Road Vehicle Applications*. Doktora Tezi, Loughborough University, İngiltere.

113. Barra, M., Ramonich, E.V., ve Munoz, M., A. (2001). Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads. *Proceedings of the Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Application*, 13-15.

114. Rohde, L., Nunez, W. P., ve Ceratti, J., A., P. (2003). Electric arc furnace steel slagbase material for low-volume roads. *Transportation Research Record,* 201-207.

115. Atterberg, A. (1911). Die Plastizität der Tone. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*, 4–37.

116. Atterberg, A. (1911). Lerornas forhållande till vatten, deras plasticitetsgränser och plasticitetsgrader. *Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar och Tidskrift*, 132–158.

117. Terzaghi, K. (1926). Principles of final soil classification. *Public Roads*, 41-53.

118. Terzaghi, K. (1926). Simplified soil tests for subgrades and their physical significance. *Public Roads*, (7), 153–170.

119. Casagrande, A. (1923). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads,* 121-136.

120. Casagrande, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. *Géotechnique,* (8), 84–91.

121. O'Kelly, B., C. (2021). Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations. *Geotechnics*, 1(1), 59-75.

122. Bowles J., E. (1997). Foundation analysis and design. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 29.

123. Prakash, K., Sridharan, A., Thejas, H. K., ve Swaroop, H. M. (2012). A simplified approach of determining the specific gravity of soil solids. *Geotechnical and Geological Engineering*, (30), 1063-1067.

124. Zheng, D., M. (2013). *Mechanical characteristics of soils treated with a liquid stabilizer*. Yüksek Lisans Tezi, University of Alberta, Kanada.

125. Lvovska, T., Lytvynenko, T., ve Kariuk, A. (2018). Soil compaction methods development. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3), 636-641.

126. Falsafi, S. R., Rostamabadi, H., ve Jafari, S. M. (2020). X-ray diffraction (XRD) of nanoencapsulated food ingredients. In Characterization of nanoencapsulated food ingredients. *Academic press*, 271-293.

127. Stanjek, H., ve Häusler, W., J., H., I. (2004). Basics of x-ray diffraction. *Hyperfine Interactions*, 154, 107-119.

128. Hawkes, P., ve Varano, C. (2020). Scanning electron microscope pioneers dennis. *Microscopy Today*, 28(4), 60-61.

129. Breton, P. J. (1999). From microns to nanometers: early landmarks in the science of scanning electron microscope imaging. *Scanning Microsc*, 13(1), 1-6.

130. Mohammed, A., ve Abdullah, A. (2018). *Scanning electron microscopy (SEM): A review.* In Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics. Romania.

131. Michler, G. H. (2008). Scanning electron microscopy (SEM). *Electron Microscopy of Polymers.*

132. Aydin, C., Hatipoglu, M., Cetin, B., ve Ceylan, H. (2023). A cyclic true triaxial with rigid-rigid-flexible boundary for determination of cross-anisotropic nature of geomaterials. *Geotechnical Testing Journal*, 46(1), 1-19.

133. Sousa, J. B., Deacon, J. A., Weissman, S., Harvey, J. T., Monismith, C. L., Leahy, R. B., Paulsen, G., ve Coplantz, J. S. (1994). *Permanent deformation response of asphalt-aggregate mixes* (Report No. SHRP-A-415). Strategic Highway Research Program, National Research Council.

134. Monismith, C. L. (1989). *MR testing-ınterpretation of laboratory results for design purposes, workshop on resilient modulus testing.* Oregon State University, Corvallis.

135. Huang, Y., H. (1993). Pavement analysis and design, englewood cliffs, New Jersey, Prentice Hall.

136. Çöleri, E. (2007). *Relationship between resilient modulus and soil index properties of unbound materials*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

137. He, B., Armaghani, D. J., Tsoukalas, M. Z., Qi, C., Bhatawdekar, R. M., ve Asteris, P. G. (2024). A case study of resilient modulus prediction leveraging an explainable metaheuristic-based XGBoost. *Transportation Geotechnics*, 45, 101-216.

138. Kancherla, A. (2005). *Resilient modulus and permanent deformation testing of unbound granular materials*. Doktora Tezi, Texas A-M University, Amerika.

139. Monismith, C.L., Seed, H. B., Mitry, F. G., ve Chan, C. K. (1967). *Prediction of Pavement Deflections from Laboratory Tests*. Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan.

140. Hicks, R. G. (1970). *Factors ınfluencing the resilient properties of granular materials*. Ph.D. dissertation. University of California, Berkeley, California.

141. Uzan, J. (1985). Granular material characterization. ın transportation research record transportation research board. National Research Council, Washington, 52-59.

142. Kolisoja, P. (1987). *Resilient deformation characteristics of granular materi*als. Ph.D. dissertation. Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

143. Barksdale, R. D. (1972). *Laboratory evaluation of rutting in base course materials.* Proceedings of the 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 161-174.

144. Kenis, W. J. (1977). *Predictive design procedures--A design method for flexible pavements using the VESYS structural subsystem*. In Volume I of proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan.

145. Tseng, K. H., ve Lytton, R. L. (1989). Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials. In Implication of aggregates in the design, construction, and performance of flexible pavements. ASTM International.

146. Lekarp, F., and Dawson, A., R. (1997). *Analysis of permanent deformation behavior of unbound granular materials*. Paper presented at the International Symposium on Thin Pavements, Surface Treatments, Unbound Roads, Fredericton, New Brunswick, Canada.

147. Ornek, M., Demir, A., Laman, M., Yildiz, A. (2012). Numerical analysis of circular footings on natural clay stabilized with a granular fill. *Acta Geotech Slov,* 61–75.

148. İnterner: Wikipedia, URL:https://www.tribonet.org/wiki/scanning-electron-microscope/



Gazili olmak ayrıcalıktır