



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**GENLEŞEN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ATIK KÂĞIT FABRİKASI
ARITMA SUYU ÇAMURU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Muhammed TANYILDIZI

**Mart-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**GENLEŞEN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ATIK KÂĞIT FABRİKASI
ARITMA SUYU ÇAMURU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Muhammed TANYILDIZI

**Danışman
Doç. Dr. İslam GÖKALP
Prof. Dr. Volkan Emre UZ**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet SALTAN Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Can BALCI

**Mart-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed TANYILDIZI tarafından hazırlanan “GENLEŞEN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ATIK KÂĞIT FABRİKASI ARITMA SUYU ÇAMURU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 11/03/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mehmet SALTAN

.....

Danışman

Doç. Dr. İslam GÖKALP

.....

2. Danışman

Prof. Dr. Volkan Emre UZ

.....

Üye

Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

.....

Üye

Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Can BALCI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza
Muhammed TANYILDIZI
Tarih:11.03.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GENLEŞEN KARAYOLU TABAN ZEMİNLERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ATIK KÂĞIT FABRİKASI ARITMA SUYU ÇAMURU İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Muhammed TANYILDIZI

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İslam GÖKALP
2. Danışman: Prof. Dr. Volkan Emre UZ

2025, 152 Sayfa

Bu tez çalışmasında, farklı şişme-büzülme özelliklerine sahip üç farklı karayolu taban zemininin geoteknik ve mühendislik özellikleri atık kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (KFASÇ) kullanarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak taban zeminlere kuru ağırlığınca %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında KFASÇ eklenmiş ve plastisite, şişme-büzülme, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS), Kaliforniya taşıma oranı (CBR), direkt kesme kutusu, düşen koni, konsolidasyon ve esneklik modülü (M_r) deneyleri olmak üzere kapsamlı laboratuvar analizleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlerin içyapısında KFASÇ kullanımı sonucunda meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDX) ve X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçları kullanılarak UCS ve M_r değerlerini tahmin etmek amacıyla farklı yapay sinir ağları (YSA) modelleri geliştirilmiştir. Son olarak Plaxis 2D programı ile taban zeminlerinin modellemesi yapılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde KFASÇ içeriğinin zeminlerin plastisitesi ve şişme-büzülme potansiyelini önemli derecede azalttığı görülmüştür. Kompaksiyon parametrelerinin zemin türünden etkilendiği sonucuna varılmıştır. Zeminlerin yük taşıma kapasitesinin kür süresi ve KFASÇ içeriğiyle artabileceği görülmüştür. Konsolidasyon parametrelerinin zemin türünden ve KFASÇ içeriğinden etkilendiği belirlenmiştir. M_r deneyi sonuçları incelendiğinde belirli bir oranda KFASÇ ile taban zeminlerin rijitliğinin arttığı görülmüştür. SEM ve XRD analizleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminlerinin içyapısının, zemin ile KFASÇ daneleri arasında meydana gelen katyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlar sonucu floküle olmuş tanecikler ile birlikte çimentomsu jellerden oluştuğu görülmüş ve yeni mineralojik bileşimlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. UCS ve M_r parametrelerini tahmin etmek amacıyla geliştirilen YSA modelleri çoklu regresyon modellerine kıyasla daha yüksek belirleme katsayıları (R^2) ve daha düşük hata oranları ile daha iyi performans göstermiştir. Plaxis 2D ile gerçekleştirilen analizler sonucunda taban zeminlerin KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonların ve gerinimlerin azaldığı, daha rijit yol platformu elde edildiği ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, elde edilen veriler KFASÇ'nin bu tez çalışmasında kullanılan taban zeminlerinin geoteknik ve mühendislik özelliklerini iyileştirmede kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Genleşen Taban Zeminleri, Atık Kâğıt Fabrikası Arıtma Suyu Çamuru, İyileştirme, Esneklik Modülü, Plaxis 2D

ABSTRACT

DOCTORAL THESIS

IMPROVEMENT OF ENGINEERING PROPERTIES OF EXPANSIVE HIGHWAY SUBGRADES WITH WASTE PAPER MILL TREATMENT WATER SLUDGE

Muhammed TANYILDIZI

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. İslam GÖKALP

Second Advisor: Prof. Dr. Volkan Emre UZ

2025, 152 Pages

In this thesis, the geotechnical and engineering properties of three different highway subgrade soils with different swelling-shrinkage potentials were tried to be improved by using waste paper mill treatment water sludge (WPS). For this purpose, firstly, WPS was added to the subgrade soils at the rates of 3%, 6%, 9%, 12% and 15% by dry weight and comprehensive laboratory analyses including plasticity, swelling-shrinkage, compaction, unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio (CBR), direct shear box, falling cone, consolidation and resilient modulus (M_r) were performed on soil specimens. Scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray diffraction (XRD) analyses were carried out to examine the changes in the microstructure of the soils with the use of WPS. Different artificial neural network (ANN) models were developed to predict UCS and M_r values using the experimental results obtained within the scope of the study. Finally, the modeling of the subgrade soils was done with the Plaxis 2D program and finite element analysis was performed. When the test results are examined, it is seen that the WPS content significantly reduces the plasticity and swelling shrinkage potential of the soils. The compaction parameters are found to be affected by the soil type. It is deduced that the load-bearing capacity of the soils can increase with the curing period and WPS content. It is determined that the consolidation parameters are influenced by the soil type and WPS content. When the M_r test results are examined, it can be concluded that the stiffness of the subgrade soils increases with a certain amount of WPS. The results obtained by SEM and XRD analyses showed that the microstructures of subgrades with WPS revealed cementitious gels formation with flocculated particles as a result of the cation exchange and pozzolanic reactions that occurred between the soil and WPS grains, and new mineralogical compositions were determined to emerge. ANN models developed to estimate the UCS and M_r parameters showed better performance with higher coefficients of determination (R^2) and lower error rates compared to multiple regression models. The results of the Plaxis 2D analyses showed that the stabilization of the subgrade soils with WPS reduced the deformations and strains caused by the traffic loads and provided a more rigid road platform. As a consequence, the data obtained showed that WPS can be used to improve the geotechnical and engineering properties of the subgrade soils used in this thesis.

Keywords: Expansive Subgrade Soils, Waste Paper Mill Treatment Water Sludge, Improvement, Resilient Modulus, Plaxis 2D

ÖN SÖZ

Akademik hayatım boyunca hiçbir zaman desteklerini benden esirgemeyen, yol gösteren, değerli zamanlarını bana ayıran ve bilgi birikimini paylaşmaktan geri durmayan çok kıymetli saygıdeğer danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. İslam GÖKALP ve Prof. Dr. Volkan Emre UZ'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora eğitimim sürecinde değerli bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarımın değer kazanmasında önemli katkıları olan sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet SALTAN, Doç. Dr. Nuray ALPASLAN, Doç. Dr. Abdülhakim ZEYBEK ve Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Can BALCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi M. Akif YERLİKAYA'ya, Arş. Gör. İdris GÖKALP'e, Muş Alparslan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi ile İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi personellerine teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim, zorlu ve yorucu doktora çalışmalarım boyunca beni sabırla motive eden anne ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Muhammed TANYILDIZI
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Kâğıt Üretimi ve Kâğıt Fabrikası Arıtma Suyu Çamuru	8
2.2. Önceki Çalışmalar	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Genleşen taban zeminleri	18
3.1.2. Kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (KFASÇ)	23
3.2. Yöntem	27
3.2.1. İndeks özelliklerinin değerlendirilmesi	27
3.2.1.1. Dane boyu dağılımı ve hidrometre analizi	27
3.2.1.2. Özgül ağırlık	27
3.2.1.2. Atterberg limitleri deneyi	28
3.2.1.3. Serbest şişme indeksi	29
3.2.1.3. Tek eksenli şişme	30
3.2.1.4. Şişme potansiyeli	31
3.2.1.5. Lineer (doğrusal) ve hacimsel büzülme deneyi	32
3.2.2. Geoteknik ve taşıma gücü parametrelerinin değerlendirilmesi	33
3.2.2.1. Kompaksiyon deneyi	33
3.2.2.2. Serbest basınç dayanımı (UCS)	34
3.2.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi	35
3.2.2.4. Direkt kesme kutusu deneyi	37
3.2.2.5. Drenajsız kayma mukavemeti (S_u)	37
3.2.2.6. Konsolidasyon deneyi	39
3.2.2.7. Esneklik Modülü deneyi	40
3.2.2.8. Yapay sinir ağı (YSA)	47
3.2.2.9. Plaxis 2D ile taban zemini modelleme	48
3.2.2.10. İy yapı analizleri	49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1. Özgül Ağırlık Deneyi Bulguları	51

4.2. Atterberg Limitleri Deneyi Bulguları	52
4.3. Şişme Deneyleri Bulguları	55
4.3.1. Serbest şişme indeksi deneyi	55
4.3.2. Tek eksenli şişme deneyi	56
4.3.3. Şişme potansiyeli tespiti deneyi	57
4.4. Lineer (Doğrusal) ve Hacimsel Büzülme Deneyi Bulguları	58
4.5. Kompaksiyon Deneyi Bulguları	60
4.6. UCS Deneyi Bulguları	64
4.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Bulguları	73
4.8. Direkt Kesme Kutusu Deneyi Bulguları	78
4.9. Drenajsız Kayma Mukavemeti (S_u) Deneyi Bulguları	80
4.10. Konsolidasyon Deneyi Bulguları	81
4.11. Esneklik Modülü Deneyi Bulguları	94
4.11.1. Esneklik Modülü tahmin modelleri bulguları	103
4.12. Yapay Sinir Ağları Bulguları	111
4.12.1. YSA ile UCS değerlerinin tahmini	111
4.12.2. YSA ile M_r değerlerinin tahmini	118
4.13. Plaxis 2D ile Taban Zemini Modelleme Bulguları	125
4.14. İÇyapı Analizi Bulguları	132
4.14.1. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve EDX analizi bulguları	132
4.14.2. X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi bulguları	135
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	138
5.1. Sonuçlar	138
5.2. Öneriler	141
KAYNAKLAR	142

ÇİZELGELER

Çizelge 1.1. Zeminlerin şişme potansiyellerinin LL, PI ve BL değerleri ile değerlendirilmesi	3
Çizelge 1.2. Plastisite indeksi değerlerine göre zeminlerin büzülme potansiyeli	3
Çizelge 1.3. Dünya genelinde genişleyen zemin kaynaklı tahmini hasar maliyetleri	4
Çizelge 2.1. Çeşitli ülkelerde yıllık kâğıt ve kâğıt ürünleri üretimi (mt)	10
Çizelge 2.2. Bazı kâğıt fabrikalarının yıllık kâğıt üretimi ve ortaya çıkan atık çamur miktarları	11
Çizelge 2.3. Genleşen taban zemini iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların özeti	17
Çizelge 3.1. Taban zeminlerinin mühendislik özellikleri	20
Çizelge 3.2. Taban zeminlerinin kimyasal özellikleri	23
Çizelge 3.3. KFASÇ'nin kimyasal özelliği	26
Çizelge 3.4. Esneklik modülü deneyi taban zemini yükleme serileri	43
Çizelge 4.1. Özgül ağırlık deneyi sonuçları	52
Çizelge 4.2. Atterberg limitleri deney sonuçları	54
Çizelge 4.3. Şişme parametrelerinin değerlendirildiği deney sonuçları	58
Çizelge 4.4. Lineer ve hacimsel büzülme deneyi sonuçları	60
Çizelge 4.5. Kompaksiyon deneyi sonuçları	63
Çizelge 4.6. UCS deneyi sonuçları	69
Çizelge 4.7. Enerji yutma kapasitesi değerleri	72
Çizelge 4.8. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi sonuçları	74
Çizelge 4.9. CBR değerine göre kaplama dizayn alternatifleri	76
Çizelge 4.10. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin KFASÇ ile değişimi	79
Çizelge 4.11. Zemin karışımlarının ilk boşluk oranı değerleri	82
Çizelge 4.12. Boşluk oranı değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi	84
Çizelge 4.13. Sıkışma indeksi değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi	86
Çizelge 4.14. Hacimsel sıkışma katsayısı (m^2/kN) değerlerinin uygulanan gerilmelerle değişimi	88
Çizelge 4.15. Sıkışma katsayısı (m^2/kN) değerlerinin uygulanan gerilmelerle değişimi	90
Çizelge 4.16. Şişme indisi değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi	92
Çizelge 4.17. Konsolidasyon oturmalarının (mm) uygulanan gerilmeler ile değişimi	94
Çizelge 4.18. Karayolları ve NCHRP'ye göre tasarım M_r değerleri	102
Çizelge 4.19. Zeminlere ait UZAN modeli katsayıları ve istatistiksel analizi	110
Çizelge 4.20. Zeminlere ait AASHTO modeli katsayıları ve istatistiksel analizi	110
Çizelge 4.21. UCS tahmin etmede geliştirilen MR modellerinin mimarisi	112
Çizelge 4.22. UCS tahmin etmede geliştirilen MR ve YSA modellerinin istatistiksel analizi	117
Çizelge 4.23. UCS hassasiyet analizi sonuçları	117
Çizelge 4.24. M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen MR modellerinin mimarisi	119
Çizelge 4.25. M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen MR ve YSA modelleri istatistiksel analizi	124
Çizelge 4.26. M_r hassasiyet analizi sonuçları	124
Çizelge 4.27. Plaxis 2D analizlerinde kullanılan tabaka verileri	126
Çizelge 4.28. Plaxis 2D analiz sonuçları	130
Çizelge 4.29. Plaxis 2D taban zemini noktasal deplasman sonuçları	130

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tipik (a) ıslak ve (b) kuru formdaki genişleyen zeminler	2
Şekil 1.2. Genleşen-büzülen zeminlerin mekanizması	2
Şekil 1.3. Genleşen zemin kaynaklı tipik üstyapı hasarları (a) Blok çatlaklar, (b) Kaplamanın yükselmesi, (c) Şev kayması (d) Farklı seviyede oturmalar	4
Şekil 2.1. Kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisinde kullanılan arıtma teknolojileri	10
Şekil 2.2. Kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru	11
Şekil 2.3. Balıkesir Varaka Kâğıt Fabrikası uydu görüntüsü (Google Earth)	12
Şekil 3.1. Genleşen taban zeminlerin arazi incelemesi; Zemin-A (a) ve Zemin- B (b)	18
Şekil 3.2. Genleşen taban zeminlerin görünümü	19
Şekil 3.3. Genleşen taban zeminlerinin dane boyu dağılımı	19
Şekil 3.4. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin SEM görüntüleri	21
Şekil 3.5. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin XRD analizleri	22
Şekil 3.6. Bıçaklı değirmen öğütücü	24
Şekil 3.7. Atık kâğıt çamurunun fabrikada ortaya çıkışı (a, b, c), ıslak form (d), kuru form (e), kurutulup öğütülmüş form (f)	24
Şekil 3.8. KFASÇ'nin tane boyu dağılımı	25
Şekil 3.9. KFASÇ'nin TEM görüntüsü	25
Şekil 3.10. KFASÇ'nin XRD analizi	26
Şekil 3.11. Özgül ağırlık deneyi; (a) Zemin, (b) KFASÇ	28
Şekil 3.12. Atterberg limitleri; (a) Likit limit; (b) Plastik limit	28
Şekil 3.13. Serbest şişme indeksi deneyi	29
Şekil 3.14. Tek eksenli şişme deneyi	30
Şekil 3.15. Şişme potansiyeli tespiti deneyi	31
Şekil 3.16. Büzülme deneyi; Büzülme kalıbı (a), Yaş numune (b), Etüvde kurutulmuş numune (c)	32
Şekil 3.17. Kompaksiyon deneyi	34
Şekil 3.18. UCS deneyi cihazı	35
Şekil 3.19. CBR deneyinde kullanılan araç-gereçler	36
Şekil 3.20. CBR deneyi cihazı	36
Şekil 3.21. Direkt kesme kutusu deneyi	37
Şekil 3.22. Düşen koni penetrometre cihazı	38
Şekil 3.23. Konsolidasyon deneyi cihazı	39
Şekil 3.24. Tekrarlı yük altında malzemede meydana gelen plastik ve elastik deformasyonlar	41
Şekil 3.25. Esneklik modülü deneyindeki Haversine yükleme formu	43
Şekil 3.26. Tekrarlı yüke maruz kalan numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	43
Şekil 3.27. Dinamik üç eksenli deney cihazının genel görünümü	44
Şekil 3.28. Tipik bir X-ışını difraktometresi	50
Şekil 4.1. Özgül ağırlık değerlerinde KFASÇ içeriğiyle meydana gelen değişimler	51
Şekil 4.2. Likit limit ve plastik limit değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi	53
Şekil 4.3. Plastisite indeksi değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi	53
Şekil 4.4. Zeminlerin Casagrande plastisite kartındaki konumları	55
Şekil 4.5. Zeminlerin serbest şişme indeksi değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi	56
Şekil 4.6. Zeminlerin tek eksenli şişme değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi	56
Şekil 4.7. Zeminlerin şişme potansiyellerinin KFASÇ içeriği ile değişimi	57
Şekil 4.8. Zeminlerin lineer (a) ve hacimsel (b) büzülme değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi	59

Şekil 4.9. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin- C (c)'nin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkisi	61
Şekil 4.10. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin V_{mak} ve w_{opt} değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi	62
Şekil 4.11. Küre tabi tutulmuş Zemin-A-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))	65
Şekil 4.12. Küre tabi tutulmuş Zemin-B-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))	66
Şekil 4.13. Küre tabi tutulmuş Zemin-C-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))	67
Şekil 4.14. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFASÇ içeriği ve kür süreleri ile UCS değerlerinde meydana gelen değişimler	68
Şekil 4.15. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFASÇ içeriği ve kür süreleri ile enerji yutma kapasitelerinde meydana gelen değişimler	71
Şekil 4.16. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin yük-batma eğrileri	73
Şekil 4.17. Zemin-KFASÇ numunelerinin CBR deneyi sonuçlarına göre zemin sınıflandırması	75
Şekil 4.18. Taban zeminin CBR değerine bağlı olarak kaplama ve alttemel kalınlığı tasarımı	76
Şekil 4.19. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin kohezyon ve içsel sürtünme açılarının KFASÇ içeriği ile değişimi	78
Şekil 4.20. Zeminlerin farklı su muhtevalarındaki S_u değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi	80
Şekil 4.21. Zeminlerin ilk boşluk oranının KFASÇ içeriği ile değişimi	81
Şekil 4.22. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin boşluk oranının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	83
Şekil 4.23. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin sıkışma indekslerinin KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	85
Şekil 4.24. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin hacimsel sıkışma katsayılarının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	87
Şekil 4.25. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin sıkışma katsayılarının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	89
Şekil 4.26. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin şişme indisi değerlerinin KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	91
Şekil 4.27. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi	93
Şekil 4.28. Zemin-A'nın farklı KFASÇ içeriği ve deviatör gerilme ile M_r değerlerinde meydana gelen değişim	95
Şekil 4.29. Zemin-A'nın farklı KFASÇ içeriği ve çevre basıncı ile M_r değerlerinde meydana gelen değişim	96
Şekil 4.30. Zemin-B'nin farklı KFASÇ içeriğinde ve deviatör gerilme altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler	97
Şekil 4.31. Zemin-B'nin farklı KFASÇ içeriği ve çevre basıncı ile M_r değerlerde meydana gelen değişimler	98
Şekil 4.32. Zemin-C'nin farklı KFASÇ içeriğinde ve deviatör gerilme altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler	99
Şekil 4.33. Zemin-C'nin farklı KFASÇ içeriği ve çevre basıncı ile M_r değerlerinde meydana gelen değişimler	100
Şekil 4.34. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFASÇ içeriği ve yükleme serileri ile M_r değerlerinin değişimi	101

Şekil 4.35. Zemin-A ve Zemin-A/KFASÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	104
Şekil 4.36. Zemin-B ve Zemin-B/KFASÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	105
Şekil 4.37. Zemin-C ve Zemin-C/KFASÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	106
Şekil 4.38. Zemin-A AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	107
Şekil 4.39. Zemin-B AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	108
Şekil 4.40. Zemin-C AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	109
Şekil 4.41. UCS değerlerini tahmin etmede geliştirilen YSA modellerin mimarisi	113
Şekil 4.42. MR modelleri UCS tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	114
Şekil 4.43. YSA modelleri UCS tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	115
Şekil 4.44. YSA modelleri UCS tahmin MATLAB performans çıktıları	116
Şekil 4.45. M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen YSA modellerin mimarisi	120
Şekil 4.46. MR modelleri M_r tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	121
Şekil 4.47. YSA modelleri M_r tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki	122
Şekil 4.48. YSA modelleri M_r tahmin MATLAB performans çıktıları	123
Şekil 4.49. Plaxis 2D tabaka modelleri	125
Şekil 4.50. Deplasman analizinde seçilen noktalar	126
Şekil 4.51. Zeminlerin yük altındaki deformasyonları	127
Şekil 4.52. Zeminlerin yük altındaki toplam yer değiştirmeleri	128
Şekil 4.53. Zeminlere etki eden kesme gerinimleri	129
Şekil 4.54. Yol platformu taban zemini içerisinde seçilen noktalarda meydana gelen yer değiştirmeler	131
Şekil 4.55. Zemin-A 10 μ m (a), 2 μ m (b), EDX (c) ve Zemin-A+%6 KFASÇ 10 μ m (d), 2 μ m (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri	132
Şekil 4.56. Zemin-B 10 μ m (a), 2 μ m (b), EDX (c) ve Zemin-B+%9 KFASÇ 10 μ m (d), 2 μ m (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri	133
Şekil 4.57. Zemin-C 10 μ m (a), 2 μ m (b), EDX (c) ve Zemin-C+%12 KFASÇ 10 μ m (d), 2 μ m (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri	134
Şekil 4.58. Zemin-A ve %6 KFASÇ içeren Zemin-A karışımının XRD analizi	135
Şekil 4.59. Zemin-B ve %9 KFASÇ içeren Zemin-B karışımının XRD analizi	136
Şekil 4.60. Zemin-C ve %12 KFASÇ içeren Zemin-C karışımının XRD analizi	136

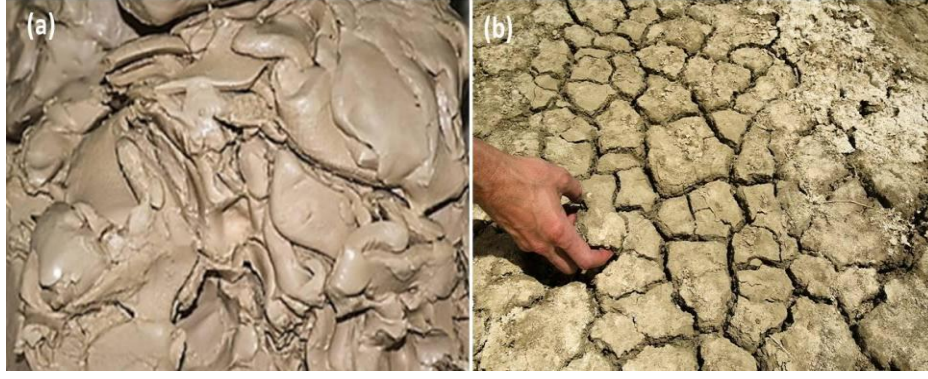
SİMGELER VE KISALTMALAR

a_v	:Sıkışma katsayısı
c	:Kohezyon
C_c	:Sıkışma indisi
C_r	:Tekrar yükleme indisi
C_s	:Şişme indisi
cm	:Santimetre
cm^3	:Santimetre küp
d	:Penetrasyon derinliği
e	:Boşluk oranı
e_0	:İlk boşluk oranı
G_s	:Özgül ağırlık
g	:Gram
H	:Numunede 96 saat sonunda görülen şişme
H_i	:Numunenin ilk yüksekliği
J	:Joule
k	:Konik katsayısı
k_1, k_2, k_3	:Regresyon sabitleri
kPa	:Kilopaskal
kg	:Kilogram
L_0	:Numunenin ilk uzunluğu
L_f	:Etüvde kurutulmuş numunenin uzunluğu
L_s	:Lineer büzülme
M_r	:Esneklik modülü
ml	:Mililitre
mm	:Milimetre
mt	:Milyon ton
m^3	:Metre küp
mm^3	:Milimetre küp
m_v	:Hacimsel sıkışma katsayısı
N	:Newton
S_u	:Drenajsız kayma mukavemeti
γ_{mak}	:Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w_{opt}	:Optimum su muhtevası
v	:Poison oranı
V_d	:Saf su içeren dereceli silindirden okunan numunenin hacmi
V_f	:Etüvde kurutulmuş numunenin hacmi
V_k	:Kerosen içeren dereceli silindirden okunan numunenin hacmi
V_s	:Hacimsel büzülme
V_0	:Numunenin ilk hacmi
ΔH	:Numunede meydana gelen yükseklik değişimini
W	:Konik ağırlığı
σ_{atm}	:Atmosfer basıncı
σ_0	:Referans gerilme
σ_c	:Çevre basıncı
σ_d	:Deviatör gerilme
ε_r	:Eksenel esnek birim şekil değiştirme
θ	:Toplam gerilme
ϕ°	:İçsel sürtünme açısı

°C	:Santigrat derece
μ	:Mikron
V_{mak}	:Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w_{opt}	:Optimum su muhtevası
AASHTO	:American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	:American Society for Testing and Materials
BS	:British Standards
CBR	:Kaliforniya taşıma oranı
CH	:Yüksek plastisiteli kil
CL	:Düşük plastisiteli kil
EAC	:Enerji yutma kapasitesi
EDX	:Enerji dağılım X-ışını spektrometresi
SŞİ	:Serbest şişme indeksi
IS	:Indian Standard
KFASÇ	:Kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru
LL	:Likit limit
MAE	:Ortalama mutlak hata
MAPE	:Ortalama mutlak yüzde hata
MSE	:Ortalama kare hatası
ML	:Düşük plastisiteli silt
PI	:Plastisite indeksi
PL	:Plastik limit
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
SL	Büzülme Limiti
TEŞ	:Tek eksenli şişme
UCS	:Serbest basınç dayanımı
RMSE	:Kök ortalama kare hatası
YSA	:Yapay sinir ağı
XRD	:X-ışını difraksiyonu
XRF	:X-ışını floresans spektrometresi

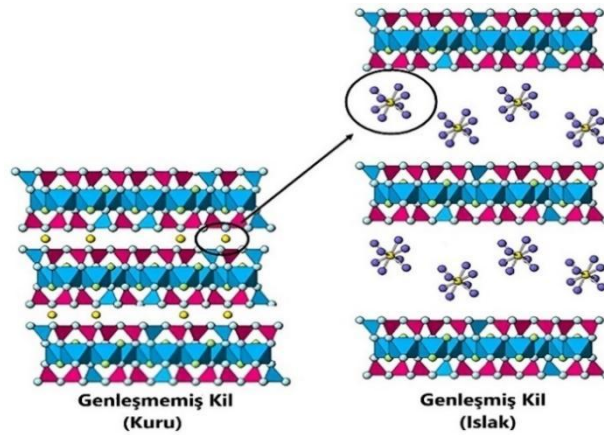
1. GİRİŞ

Karayollarının yapım maliyetleri ve belirlenen standartlar dahilinde trafiğe hizmet sürekliliklerini sağlamak için yapılan bakım ve onarım harcamaları oldukça yüksektir (Rahgozar vd., 2018). Karayolu üstyapısının tasarımı ve performansı, üzerine inşa edildiği taban zemininin dayanım ve durabilitesinden doğrudan etkilenmektedir (Caliendo, 2012; Pereira ve Pais, 2017). Bazı zeminler doğal haliyle taban zemini olarak kullanıma elverişli iken bazıları ise gerekli kriterleri sağlayamayabilir, bu durumda zeminin ya elverişli olan bir zemin ile değiştirilmesi ya da uygun bir yöntem ile iyileştirilmesi gerekmektedir. İyileştirilme işlemi, zeminlerin mekanik veya kimyasal yöntemler ile üstyapıdan aktarılan trafik yüklerine ve/veya çevresel etkilere karşı gerekli dayanım ve durabilite performansını göstermede yetersiz kalan geoteknik ve mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için gerçekleştirilen çalışmaları kapsamaktadır (Ikeagwuani vd., 2019; Steinberg, 2012). Yol inşası esnasında tipik ve yaygın olarak karşılaşılabilecek en problemlili zemin türlerinden biri genişleyen zeminlerdir (Steinberg, 2012). Genleşen zeminler su içeriğinde meydana gelen değişimler sonucu gösterdikleri çok yüksek hacim değişiklikleri ile bilinirler. Bu hacim değişiklikleri su ile temas ettiklerinde şişme ve kuruduklarında ise büzülme yoluyla ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu hacim değişiklikleri sebebiyle genişleyen zeminler üzerine inşa edilen hafif yapılarda ve özellikle yol kaplamalarında onarımları çok zor bazen de yol güvenliği ni tehlikeye atabilecek yüksek maliyetli hasarlar oluşturan zeminlerdir (Mokhtari ve Dehghani, 2012; Abbey vd., 2020). Zemin ve su etkileşimi sonucu ortaya çıkan hacimsel değişimler mevsimsel ve insan kaynaklı faktörlerden, içme suyu ve kanalizasyon gibi yeraltı hizmetler kaynaklı sızan sulardan veya kusurlu bir yağmur suyu drenaj sisteminden kaynaklanabilir (Elarabi, 2010). Zeminin şişmesi sonucu ortaya çıkan gerilmeler, üstyapının aşırı kabarmasına ve yükselmesine; zeminin büzülmesi ise oldukça tehlikeli olabilecek oturmalara neden olabilmektedir (BGS, 2023). Yüksek şişme-büzülme potansiyeline sahip ıslak (Hossain vd., 2019) ve kuru (CGS, 2022) formdaki genişleyen zeminlere tipik örnekler Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Tipik (a) ıslak ve (b) kuru formdaki genleşen zeminler

Zeminlerin mineralojik birleşimi ve mineral taneciklerinin yüzey alanları (iç ve dış) bünyelerinde görülen hacim değişimlerin şiddetini etkilemektedir ve yüksek miktarda montmorillonit, genleşebilir illit ve bentonit gibi kil minerallerine sahip zeminler genleşen zemin olarak nitelendirilmektedir (Abiodun ve Nakbantoğlu, 2015; Al-Rawas ve Goosen, 2006). Genleşen zeminler, mikroskop altında incelendiğinde katmanlı tabakalar gibi görünen smektit kil malzemeleri içermektedir. Bu dağınık katmanlı yapı, killi zeminin mühendislik özelliklerini ve hidrolik iletkenliğini etkilemektedir (Besq vd., 2003). Kil su ile temas ettiğinde, negatif yüklü olan yüzeyi pozitif yüklü su moleküllerini çekerek suyun katmanlar arasına girmesine izin verir. Katmanlar arasındaki su, plakaları birbirinden daha da uzaklaştırarak tüm kil yapısının genleşmesine neden olur. Zemin, kuruma sonucu, kil mineralleri arasında hapsolmuş suyun salınması işlemi ise büzülme olayı ile sonuçlanmaktadır (Krenz vd., 2006). Şişen-büzülen zeminlerin mekanizması Şekil 1.2’de görülmektedir (Krenz vd., 2006).



Şekil 1.2. Genleşen-büzülen zeminlerin mekanizması

Zeminleri şişme ve büzülme potansiyellerine göre derecelendirmek için genellikle likit limit (LL), plastisite indeksi (PI), büzülme limiti (SL) ve kil yüzdesi gibi zemin indeks özellikleri kullanılmıştır. Genellikle kil, şeyl veya marndan oluşan zeminler, sahip oldukları LL ve PI değerlerinin sırasıyla %50 ve %30'u aşması durumunda genleşen zemin olarak kabul edilmektedir (Elarabi, 2010). Buna göre, zeminlerin şişme potansiyelleri Çizelge 1.1'de verilen LL (Holtz ve Gibbs, 1956) değerlerinin ve Çizelge 1.2'de verilen PI (BRE, 1993) değerlerinin artmasıyla artarken, SL değerlerinin azalmasıyla düşmektedir. Zeminlerin büzülme potansiyelleri ise PI ve zemin yapısındaki kil yüzdesi ile ters orantılıdır.

Çizelge 1.1. Zeminlerin şişme potansiyellerinin LL, PI ve SL değerleri ile değerlendirilmesi

Şişme Potansiyeli	Likit Limit (LL) (%)	Plastisite İndeksi (PI) (%)	Büzülme Limiti (SL) %
Düşük	20-35	<18	>15
Orta	35-50	15-28	10-15
Yüksek	50-70	25-41	7-12
Çok Yüksek	>70	>35	<11

Çizelge 1.2. Plastisite indeksi değerlerine göre zeminlerin büzülme potansiyeli

Büzülme Potansiyeli	Plastisite İndeksi (PI) (%)	Kil Yüzdesi (<0.002 mm) (%)
Çok Yüksek	> 35	> 95
Yüksek	22-48	60-95
Orta	12-32	30-60
Düşük	< 18	< 18

Genleşen zeminler üzerine inşa edilen yol kaplamalarında, zemin yapısında meydana gelen aşırı hacim değişimlerinden ötürü Şekil 1.3'te tipik örnekleri paylaşılan blok çatlaklar (Mintek Resources, 2023), kaplamanın yükselmesi (Alabachew, 2005), şev kayması (Abbey vd., 2020) ve farklı seviyelerde oturmalar (Vaniček ve Herza, 2021) gibi önemli yapısal bozulmalar görülmektedir (Bizualem vd., 2015).



Şekil 1.3. Genleşen zemin kaynaklı tipik üstyapı hasarları (a) Blok çatlaklar, (b) Kaplamanın yükselmesi, (c) Şev kayması (d) Farklı seviyede oturmalar

Çizelge 1.3'te dünya genelinde genleşen zeminler kaynaklı yol, bina, drenaj sistemleri vb. mühendislik yapılarında ortaya çıkan bozulmaların neden olduğu tahmini hasar maliyetleri derlenmiştir (Amakye vd., 2021). Ülkemizde de yaygın olarak görülen genleşen zeminlerin neden olduğu bu direkt maliyetlere ek olarak bir de bu tür hasarların giderilmesi süresince ortaya çıkabilecek zamansal ve çevresel kayıpların neden olduğu dolaylı maliyetler de yansıtıldığında sorunun ne denli büyük bir ekonomik boyutunun olduğu daha da net anlaşılabacaktır.

Çizelge 1. 3. Dünya genelinde genleşen zemin kaynaklı tahmini hasar maliyetleri

Ülke	Maliyet (\$)	Kaynak
Çin	> 1 milyar	Abbey vd. (2020)
Hindistan	> 73 milyon	Gobena ve Suppiah (2019)
Sudan	> 1 milyar	Zumrawi ve diğ. (2017)
Avustralya	150 milyon	Adem (2015)
ABD	> 15 milyar	Jones ve Jefferson (2012)
Fransa	> 3.3 milyar	Toll ve diğ. (2012)
İngiltere	> 3.7 milyar	Jones ve Jefferson (2012)
Suudi Arabistan	> 300 milyon	Adem (2015)

Hemen hemen tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi karayolları için de genişleyen taban zeminlerin iyileştirilmesi kaçınılmazdır. İyileştirme işlemi maliyetli olsa da yapılacak rehabilitasyon çalışması ile karayolu yapım ve bakım/onarım harcamaları yani yaşam döngüsü maliyetleri düşürülebilmektedir (Gougazeh ve Al-Shabatat, 2013). Genel olarak genişleyen zeminlerin mühendislik özellikleri, mekanik ve kimyasal teknikler ile iyileştirilebilir (Jiang vd., 2013). Mekanik iyileştirme yöntemine sıkıştırma, ön ıslatma ve elektrokinetik işlemler örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan; kimyasal iyileştirme işlemi çimento, kireç, uçucu kül ve tuz gibi malzemelerin zemine eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir (Rivera vd., 2020). Zeminin özellikleri mekanik yöntemlerle iyileştirilirken zeminin kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişme meydana gelmez. Ancak, kimyasal yöntemlerin kullanımı sonrası zeminin kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler ile zemin yapısı daha rijit ve stabil hale gelmektedir (Abduljawad, 1993). Genişleyen karayolu taban zeminlerinin mühendislik özelliklerini iyileştirmede dünya genelinde en çok kullanılan yöntemler kimyasal yöntemleridir (Barman ve Li, 2006). Kireç ve çimento gibi kalsiyum bazlı stabilizörler en yaygın kullanılan ve geleneksel katkılar olarak nitelendirilen kimyasal katkılardır (Mahedi vd., 2020). Fakat bu kimyasal katkıların yüksek maliyeti, üretim aşamalarında yüksek oranda sera gazı salımı ortaya çıkması ve büyük miktarda doğal kaynakların kullanılması araştırmacıları ve karar verici otoriterleri sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif katkı bulma konusunda arayışlara yöneltmiştir. Bu durum, farklı sektörlerde üretim aşamasında veya üretilen malzemelerin kullanımı sonrasında ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesi ile daha sürdürülebilir bir karayolu inşası için önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır.

Giderek artan dünya nüfusu ve şehirleşmeye paralel olarak tüketim faaliyetleri ve dolayısıyla tüketim talebini karşılamak için yapılan endüstriyel üretim faaliyetleri de benzer oranlarda artmaktadır. Artan bu endüstriyel üretim faaliyetleri sonucunda dünya genelinde önemi azımsanmayacak derecede ortaya çıkan atık malzeme ve endüstriyel yan ürün miktarları da artmaktadır. Bu nedenle atık yönetimi toplumlarda önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Bu atıkların uygun olmayan bir şekilde çevreye atılması veya yeterli altyapının olmadığı depolama alanlarında uzun süre bekletilmesi hem çevre hem de insan sağlığı için önemli bir tehdit unsuru haline gelmektedir. Ayrıca, düzenli depolama sahalarının kısıtlı olması ve sürekli artan depolama maliyetleri nedeniyle endüstriyel yan ürünlerin ve atık malzemelerin, kaynak malzeme ihtiyacının çok fazla olduğu inşaat sektörü gibi sektörlerde geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, bu atıkların bertarafı için cazip bir teklif ve hatta bir gereklilik haline gelmiştir. Üretimde

kullanılan yöntemler nedeniyle önemli miktarda atık ortaya çıkan endüstrilerden birisi de kâğıt üretim sektörüdür. Tesiste üretilen ürüne, kullanılan hammadde ve üretim tekniklerine bağlı olarak toplam üretimin %1 ila %5'i oranında atık çamur ortaya çıkmaktadır. Bu malzeme için henüz pratik ve ekonomik bir kullanım alanı oluşturulamadığından ortaya çıkan çamurun tamamına yakını depolama tesislerinde bekletilmektedir.

Bu tez çalışmasında, genleşen karayolu taban zeminlerinin iyileştirilmesinde, mevcut bilimsel çalışmalar arasında sınırlı alan yer kaplayan ve kâğıt üretim tesislerinde atık olarak bertarafı oldukça zor olan kâğıt fabrikası arıtma suyu çamurunun (KFASÇ) kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma ile dünyada ve ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan ve karayolu üstyapısında önemli hasarlara neden olabilmeleri nedeniyle şişme hassasiyetleri giderilmeden ve zayıf taşıma gücü iyileştirilmeden karayolu taban zemini olarak kullanımı mümkün olmayan genleşen taban zeminlerin geoteknik ve mühendislik özelliklerini iyileştirilmesi sayesinde önemli bir mühendislik probleminin çözümü değerlendirilecektir. Böylece, genleşen taban zeminlerin iyileştirilmesinde yalnızca alternatif bir malzeme önerisi getirilmiş olmayacak aynı zamanda neredeyse hiçbir ekonomik değeri olmayan ve depo sahalarında bekletilmeleri nedeniyle çevresel birçok soruna neden olabilecek bir atık malzeme kullanımı ile sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirilmiş olacaktır. Önerilen yeni yöntem ile genleşen zeminlerin yalnızca genleşme hassasiyetlerini azaltmak değil aynı zamanda zeminlerin mekanik ve mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışması ile ulaşılmak istenen hedefler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Genleşen zeminlerin şişme-büzülme hassasiyetlerinin kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru ilavesiyle değişimini gözlemlemek.
2. Genellikle düşük taşıma gücüne sahip genleşen zeminlerin kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru ilavesi ile taşıma güçlerinin nasıl değiştiğini ortaya koymak.
3. Zeminlerin şişme-büzülme potansiyellerinin değerlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemler arasında ilgileşimler ortaya koymak.
4. Kâğıt fabrikalarında kullanılan suyun arıtılması neticesinde ortaya çıkan çamurun depolanması için gerekli olan alan ihtiyacını dolayısıyla da düzenli atık depolama sahalarına olan talebi azaltmak. Atık çamurun bertarafı nedeniyle ortaya çıkan olumsuz çevresel etkileri azaltmak ve sıfır atık anlayışını desteklemek.

5. Atık çamura, yaygın görülen bir mühendislik probleminin çözümünde alternatif bir iyileştirme malzemesi hüviyeti kazandırarak bu malzeme için ekonomik bir değer oluşturarak döngüsel ekonomiye katkı vermek. Kâğıt/karton üreticilerinin atık çamuru bertaraf etmek için harcadıkları bütçelerden tasarruf etmelerini hatta kullanımının yaygınlaşması halinde ekonomik girdi oluşturmalarını sağlayarak tasarruf edilen kaynağın üretim ve/veya istihdama yöneltmelerinde katkı vermek.

6. Ülkemiz genelinde yol inşasında sıklıkla karşılaşılan genleşen zeminlerin ıslahında kullanılan geleneksel yöntemlere göre daha pratik, ekonomik ve çevreci yani sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirmek. Bu tür zeminlerin ıslahında pazarda yaygın olarak kullanılan çimento ve kireç gibi malzemelerin üretimleri nedeniyle ortaya çıkan sera gazı salımlarının azaltılmasına katkı sağlamak ve bu geleneksel malzemelerin üretiminde kullanılan doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmak.

7. Önerilen yaklaşımın karayolu mühendisliği alanında başarılı olması durumunda genleşen zeminler nedeniyle zarar görebilecek diğer mühendislik yapılarının zemin ıslahında tüm inşaat sektöründe farkındalık oluşturmak. Elde edilen sonuçların uluslararası çalışmalarda paylaşılmasıyla tüm dünyada doğal kaynakların korunmasına ve bu âtil malzemenin neden olduğu çevresel kayıpların azaltılmasına katkı vererek bu alanda öncülük etmek.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ilk olarak kâğıt üretimi, aşamaları ve çeşitleri hakkında bilgi verilerek dünya genelinde kâğıt üretim miktarları hakkında bilgiler paylaşılmıştır. Daha sonra kâğıt fabrikası arıtma suyu çamurunun ortaya çıkış aşamaları ile beraber miktarı hakkında istatistiksel veriler sunulmuştur. Son olarak atık malzemeler kullanarak karayolları genişleyen taban zeminlerinin geoteknik ve mühendislik özelliklerini iyileştirme amacıyla gerçekleştirilen önceki çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir.

2.1. Kâğıt Üretimi ve Kâğıt Fabrikası Arıtma Suyu Çamuru

Kâğıt üretimi; odun veya yıllık bitkiler (buğday sapı, kendir, kenevir, kamış, bambu, pamuk, vb) gibi hammaddelerden veya atık kâğıt gibi geri dönüştürülen maddelere uygulanan değişik mekanik ve kimyasal işlemlerle elde edilen hamurların (elyaf karışımı) bir dizi işlemten geçirilmesi ile meydana gelir. Kâğıt, elde edilen hamurların dövme, kesme, saçaklandırma ve temizleme gibi bir dizi işlemlere tabii tutulup dolgu ve şartlandırma maddeleri ilave edildikten sonra elek üzerinde safiha oluşturulması, kurutulması ve bunun uygun ebatta kesilme işlemi aşamalarının tamamlanmasıyla üretilir. Kâğıt üretimindeki aşamalar geçmişten günümüze büyük bir değişime uğramamakla birlikte günümüzde bu işlemlerin daha sürdürülebilir (daha ekonomik ve çevre dostu) yaklaşımla nasıl yapılabileceği araştırılmaktadır (Kâğıt Sektör Raporu, 2020).

Kâğıt üretiminde kullanılan selüloz, mekanik, kimyasal veya bu iki yöntemin birleştirildiği uygulamalarla ham liflerden elde edilebileceği gibi hurda kâğıtların hamurlaştırılması yöntemiyle de elde edilebilmektedir (Dumlu, 2014; EC, 2001). Dünya’da kâğıda olan ihtiyacın artması, buna karşın kâğıt yapımında kullanılan selülozun hammaddesi olan odun, saman, pamuk gibi doğal kaynakların azalması, kâğıt üreticilerinin atık kâğıt kaynağına yönelmesini mecbur hale getirmiştir (Li vd., 2023; Danielewicz and Surma-Ślusarska, 2019). Sektörde, selüloz ara ürün, kâğıt-karton ise nihai ürün olarak tanımlanmaktadır. Kâğıt ve kartonun işlevsel kullanımına bakıldığında ise elde edilen ürünler çeşitlilik göstermekle birlikte bu ürünler uluslararası çalışmalarda (Yakut, 2012; Waterhouse, 2001) genel olarak kültürel kâğıtlar ve endüstriyel kâğıtlar olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılmaktadır.

Kültürel kâğıtlar üzerine yazı yazılabilir ve baskı yapılabilir nitelikteki yazı kâğıtları ve gazete kâğıtlarıdır. Genellikle kâğıt kalitesi, üretimde kullanılan mekaniksel odun hamuru ile kimyasal selüloz oranları ile kontrol edilmektedir. Endüstriyel kâğıtlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Dumlu, 2014; Soyer, 2004).

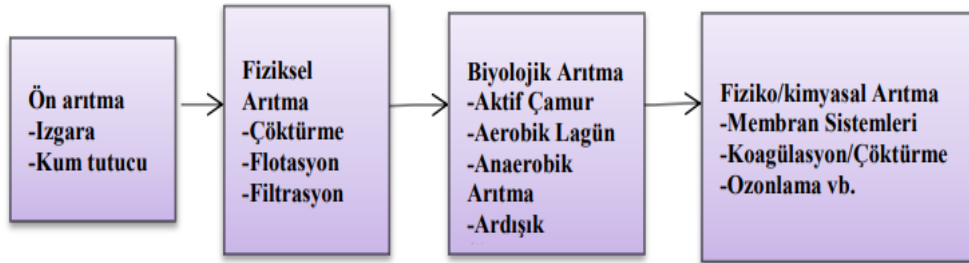
- Selüloz, atık kâğıt ve odun hamurundan elde edilen ambalaj malzemesi olarak kullanılan sargılık kâğıtlar;
- Selüloz ve atık kâğıttan elde edilen az miktarda odun hamuru da içeren düşük gramajlı temizlik kâğıtları;
- Beyazlatılmamış ya da beyazlatılmış kraft selülozdan üretilen dayanıklı kraft torba kâğıdı;
- Bir veya daha fazla oluklu tabakanın alt ve/veya üst yüzeylerinin düz tabaka (kraft liner) ile kaplanmasıyla meydana gelen oluklu mukavva kâğıtları;
- Yüksek gramajlı, kalın, tek veya çok katlı olabilen, kullanım amacına bağlı olarak çok çeşitli isimlerde ve özelliklerde üretimi yapılan kartonlar ve
- Genellikle kendir, keten, jüt ve paçavra selülozdan üretilen yüksek mukavemetli ve düşük gramajlı sigara ve ince özel kâğıtlar.

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü istatistiklerine göre 2016 yılında dünyada kâğıt-karton üretiminin yaklaşık 413 milyon ton (mt) olduğu bilinmektedir. Bu üretimin yaklaşık %57'sinin (235 mt) ambalaj ve etiket kâğıtları, %25'inin (100 mt) yazı ve baskı kâğıtları, %8'inin (32 mt) temizlik kâğıdı, %6'sının (24 mt) gazete kâğıdı ve %4'ünün (16 mt) ise diğer kâğıt ve karton ürünlerin imalatından oluştuğu belirtilmektedir. Sektörde talebin her yıl %1.1 oranında büyüyerek 2030 yılında 482 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Matthis, 2015). E-ticaret ve hazır gıda endüstrisinin büyümesine bağlı olarak ambalaj ve etiket kâğıdı ile temizlik kâğıdının payının artacağı ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak artan dijitalleşmenin etkisiyle basım ve yayın için üretilecek kâğıt miktarının azalacağı tahmin edilmektedir. 2010 ve 2017 yılları arasında çeşitli ülkelerde yıllık kâğıt ve kâğıt ürünleri üretim miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir (UNECE/FAO, 2022).

Çizelge 2.1. Çeşitli ülkelerde yıllık kâğıt ve kâğıt ürünleri üretimi (mt)

Ülke	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Çin	97	103	107	105	109	111	113	111
ABD	76	75	74	74	73	72	72	72
Japonya	27	27	26	26	26	26	26	27
Almanya	23	23	23	22	23	23	23	23
Hindistan	10	10	10	12	14	15	14	15
Türkiye	2.3	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9

Kâğıt endüstrisi büyük miktarlarda su kullanılan bir endüstri koludur ve su tüketimi açısından metal sektörü ve kimya sektöründen sonra dünyada üçüncü sırada yer almaktadır. Su, selüloz fabrikasında pişirme, yıkama ve beyazlatma, kâğıt fabrikasında ise liflerin taşınmasında, soğutma suyu, kazan besleme suyu, yıkama suyu ve ilave edilen maddelerin çözündürülmesinde kullanılmaktadır. Üretimde kullanılacak suyun niteliği ve miktarı, üretilen mamule ve üretimde kullanılan yöntemlere göre değişiklik göstermekle birlikte üretilen ton başına 10-100 m³ aralığındadır. Bu sulardan bazıları (soğutma suyu vs.) geri devredildiğinden işlem suyu olarak kullanılırken diğer imalat atıklarından ayrılmaktadır. Kâğıt endüstrisinde en fazla atıksu üreten kademeler, hamur yıkama ve kâğıt üretimidir. Kâğıt hamuru atık suları pişirme, yıkama, ağartma ve elyaflarına ayırma işlemlerinden oluşmaktadır. Kâğıt makinası atık suları ise eleklerden, duşlardan ve kâğıt makinası karıştırma tanklarından geçen sulardan oluşmaktadır. Tipik bir kâğıt hamuru ve kâğıt üretimi yapan işletmede farklı süreçlerde ve farklı kirleticilere maruz kalan atık suların arıtım teknolojilerine ait genel akım şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir (İnce vd., 2011).



Şekil 2.1. Kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisinde kullanılan arıtma teknolojileri

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler ile arıtılan atık su yönetmelikler çerçevesinde uygun koşullara getirildikten sonra alıcı ortamlara deşarj edilirken,

tehlikesiz atık olarak nitelendirilen ve 03 03 11 atık kodu ile etiketlenen atık çamur depolama sahalarına sevk edilmektedir. Çizelge 2.2’de ülkemizde üretim yapan bazı kâğıt fabrikalarının yıllık üretim miktarları ve üretim sonucu ortaya çıkan atık çamur miktarları gösterilmektedir (Dumlu, 2014).

Çizelge 2.2. Bazı kâğıt fabrikalarının yıllık kâğıt üretimi ve ortaya çıkan atık çamur miktarları

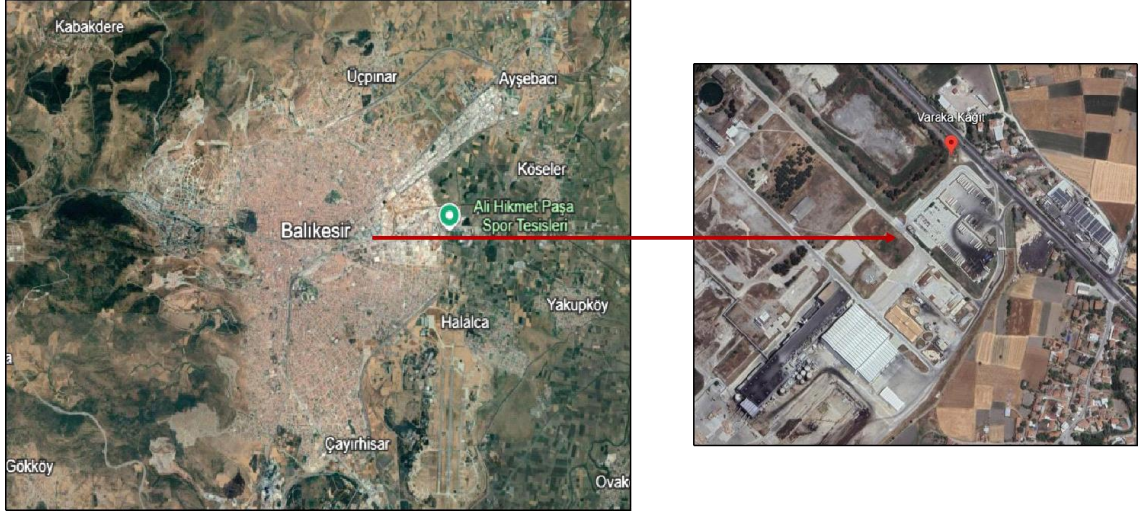
Kâğıt Fabrikası	Yer	Üretim (ton/yıl)	Atık Çamur (ton/yıl)
Ak Gıda San. ve Tic. A.Ş.	Sakarya, Pamukova	70.000	192
Kahramanmaraş Kâğıt Sanayi ve Tic. A.Ş.	Kahramanmaraş	150.000	393
Çopikas Kâğıt ve Oluklu Mukavva San. Tic. A.Ş.	Çorum	78.000	63
Modern Karton ve San. Tic. A.Ş.	Tekirdağ, Çorlu	1.000.000	8.760
Modern Oluklu Mukavva Ambalaj San. Tic. A.Ş.	Tekirdağ, Çorlu	100.000	15
Kıpaş Kâğıt San. İşletmeleri	Kahramanmaraş	425.000	14.400
Hayat Kâğıt ve Enerji San. Tic. A.Ş.	Çorum	45.000	330
Oyka Kâğıt Ambalaj San. Tic. A.Ş.	Zonguldak, Çaycuma	100.000	500
Mopak Kâğıt-Karton San.Tic. A.Ş.	Muğla	622.000	2.250
Viking Kâğıt ve Selüloz A.Ş.	İzmir, Aliğa	45.800	6.500
Olmuksa-International Paper Ambalaj San. Tic. A.Ş.	Edirne	65.000	1.800

Çizelge 2.2’den de anlaşılacağı üzere her yıl ülkemizin farklı bölgelerinde faaliyet gösteren bu fabrikalarda çok büyük miktarlarda atık ortaya çıkmakta ve herhangi bir şekilde ekonomik bir değere dönüşmeden depolama sahalarına gönderilmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (Şekil 2.2) Balıkesir ilinde faaliyet gösteren [Varaka Kâğıt Fabrikasından](#) (Şekil 2.3) temin edilmiştir.



Şekil 2.2. Kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru



Şekil 2.3. Balıkesir Varaka Kâğıt Fabrikası uydu görüntüsü (Google Earth)

Varaka Kâğıt Fabrikasında %100 atık kâğıt hamurundan üretim yapılmaktadır. Fabrikada ürün olarak Fluting (oluklu mukavva sanayisinde ondüle, orta ve iç yüzey kâğıdı olarak kullanılır), Liner (yüksek patlama ve ezilme mukavemeti gerektiren oluklu ambalaj kutularında kullanılır), Bag Paper (kahverengi renkli, yüksek fiziksel ve mekaniksel direnç özelliklerine sahiptir ve kâğıt poşet ve torba sektöründe kullanılır) kâğıt grupları üretilmektedir. Arıtma tesisi ile üretim sonucu oluşan atık sular fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma ünitelerinden oluşan 9400 m³/gün kapasiteye sahip arıtma tesisinde arıtılarak deşarj limitlerinin altında doğaya kazandırılmaktadır.

2.2. Önceki Çalışmalar

Karayolu genişleyen taban zeminlerini iyileştirmede çeşitli endüstriyel yan ürünlerin ve atıkların kullanımı son yıllarda giderek artmış ve sürdürülebilirlik açısından önemli hale gelmiştir. Bu bölümde atık malzemelerin genişleyen zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

Çabalar vd. (2017) genişleyen karayolu taban zemini iyileştirmesinde seramik karo atıklarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda zemine kuru ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında katılan seramik karo atıklarının zeminin plastisite indeksi değerini azalttığı ve CBR değerini ise sürekli olarak arttırdığını gözlemlemişlerdir. Genleşen zeminin taşıma gücünün atık seramik karo ile artmasını V_{mak} ile beraber zemin ile atık arasındaki sürtünmenin dolayısıyla kenetlenmenin artmasına

bağlamışlardır. Çalışma bulguları ile seramik karo atıklarının genleşen zemin iyileştirmesinde alternatif katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bir diğer çalışmada ise Onyelowe vd. (2020) artan atık seramik içeriği ile genleşen zemin ile atık arasında gerçekleşen puzzolanik reaksiyonlar sonucu çimentolaşmanın dolayısıyla sıkılığın artması sonucu genleşen taban zeminlerin Esneklik Modülü değerlerinin arttığını belirtmişlerdir.

Mohammadia vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada killi genleşen bir taban zeminini öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda taban zemini %10, %20, %30 ve %40 oranında cüruf ile ikame edilmiş ve bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre genleşen zeminin şişme potansiyelinin artan ikame oranı ile sürekli düştüğü, %20 ikame oranına kadar CBR ve kesme dayanımının arttığı belirtilmiştir. Şişme potansiyelinin azalması ve taşıma gücünün artması zemin ile atık arasında gerçekleşen puzzolanik reaksiyonlar sonucu çimentolaşma ile zemin-atık karışımlarının dayanımının artmasına bağlamışlardır.

Edeh vd. (2014) genleşen karayolu taban zeminin iyileştirilmesinde talaş tozu külünün etkisini incelemişlerdir. Farklı oranlarda (%0-%100, %10 artışlarla) talaş tozu külü ile ikame edilen genleşen zeminin UCS ve CBR değerinin %30'a kadar katkı ikamesi ile arttığı daha sonra artan katkı içeriği ile azaldığını belirtmişlerdir. Dayanım parametrelerinde kısmi artışın zemin ile atık arasındaki puzzolanik reaksiyonlar sonucu sıkılığın ve kenetlenmenin artması sonucu daha kompozit bir yapının oluşmasına bağlamışlardır. %30 oranında talaş tozu kullanımı ile iyileştirilen genleşen zeminin karayolu taban zemini olarak kullanılabilineceğini belirtmişlerdir.

Bawa vd. (2017) yaptıkları çalışmada killi genleşen zeminin mühendislik özellikleri üzerine atık kâğıt çamuru katkısının etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda zemine kuru ağırlığınca %2, %5, %7, %10, %15, %20 ve %25 oranlarda atık çamur ilave edilmiş ve zeminin w_{opt} değerinin atık ile beraber arttığını V_{mak} değerinin ise düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, farklı kür sürelerinde (0, 3, 5, 7 ve 28 gün) zeminin UCS dayanımı incelenmiş ve her kür süresinde %5 atık kâğıt çamur içeriği ile maksimum değere ulaşıldığı belirtilmiştir. Teja vd. (2016) artan atık kâğıt çamuru ile genleşen killi bir zeminin plastisite indeksi ve serbest şişme indeksi değerlerinin sürekli olarak azaldığını belirtmişlerdir. Singh ve Bisen (2021) yapmış oldukları çalışmada killi genleşen bir zeminin CBR parametresi üzerine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında atık kâğıt çamuru ilavesinin etkisini araştırmış ve artan atık içeriği ile CBR değerinin arttığını ortaya koymuşlardır.

Kaur (2019) yapmış olduğu çalışmada atık dökümhane kumunu genişlen taban zemini iyileştirmede katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiş ve bu kapsamda zeminin kuru ağırlığınca %10, %20, %30 ve %40 oranında atık ilave ederek bir dizi deneyler gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde artan atık içeriği ile zeminin plastisite indeksi değeri ve şişme potansiyelinde azalma elde ederken CBR değerinde ise sürekli artış elde edilmiştir. CBR değerindeki iyileşmenin, atık dökümhane kumu ilavesiyle karışım parçacıklarının daha iyi sıkışması ve kompakt bir yapı oluşmasına bağlanmıştır. Atık dökümhane kumu ile iyileştirilen zeminin düşük trafik hacimli yollarda taban zemini olarak kullanılabilceği ifade edilmiştir.

Pereira vd. (2022) atık cam parçacıklarının genişlen killi karayolu taban zeminlerini iyileştirmede katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bu kapsamda %5, %10, %15 ve %20 oranında zemine kuru ağırlığınca katılan atık cam parçacıklarının taban zeminin şişme-büzölme potansiyellerini atık malzemenin daha düşük su hassasiyetine sahip olmasından ötürü azalttığını belirtmişlerdir. Taşıma gücü parametrelerinden CBR ve Esneklik Modülü değerlerinin atık cam içeriği ile bir noktaya kadar arttığını daha sonra kısmen azaldığını ifade etmişlerdir. Taşıma gücü parametrelerinde ortaya çıkan bu iyileşmenin zemin daneleri ile cam parçacıkları arasındaki sürtünmenin ve kompaktlığının artmasına bağlamışlardır. Bir diğer çalışmada ise Blayı vd. (2020) genişlen zeminin kesme dayanımı üzerine zemine kuru ağırlığınca %2.5, %5, %10, %15 ve %25 oranlarında katılan atık cam tozunun etkisini direkt kesme kutusu deneyi ile incelemişlerdir. Artan atık içeriği ile beraber V_{mak} 'ın artması sonucu zeminin içsel sürtünme açısı sürekli artarken atık cam tozunun kohezyonsuz yapısından ötürü zemin karışımının kohezyon değerinin sürekli azaldığını belirtmişlerdir.

Çabalar vd. (2020a) yaptıkları çalışmada galvaniz ile kaplanmış çelik CNC atıklarının killi genişlen taban zemini mühendislik özellikleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda genişlen zemin kuru ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında çelik CNC atıklarıyla karıştırılmış ve zemin-atık karışımlarının şişme potansiyeli, UCS ve CBR değerlerinde olan değişim gözlemlenmiştir. Artan atık içeriği ile zeminin şişme potansiyelinin düştüğü, CBR dayanımının ise %20 atık içeriğine kadar arttığı daha sonra kısmen düşüş elde edildiğini belirtmişlerdir. UCS değeri ise %15 atık kullanımına kadar artmış daha sonra yeterli kohezyon sağlamadığı için %20 ve %25 atık içeren numunelerle deney gerçekleştirilememiştir.

Çadır ve Vekli (2022) yapmış oldukları çalışmalarında çeşitli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) atık mermer ve pomza tozunu karşılıklı olarak genişlen zeminlerin UCS

üzerinde olan etkisini farklı kür sürelerinde (0, 7 ve 28 gün) incelemişlerdir. Her iki atığın zeminin serbest basınç dayanımını her bir kür süresinde olumlu etkilediğini fakat mermer tozunun pomza tozuna nispeten daha etkili olduğunu deney sonuçları ile ortaya koymuşlardır. Bir diğer çalışmada ise Akinwumi ve Both (2015) artan atık mermer tozu içeriği ile genleşen zemin arasında gerçekleşen katyon değişimi sonucu zeminin plastisitesinin azaldığını belirtmişlerdir.

Noaman vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada uçucu kül katkısının genleşen killi zeminin kesme dayanımı parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda zemine ağırlığınca %0'dan %50'ye %5 artışlarla uçucu kül ilave edip optimum su muhtevalarında sıkıştırdıktan sonra deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre %30 uçucu kül katkısı ile en yüksek kohezyon değeri elde edildiği bunun ise bu oranda uçucu kül kullanımı ile daha kompozit bir yapı elde edilmesine bağlamışlardır. Ayrıca, %25 uçucu kül ilavesine kadar zeminin içsel sürtünme açısının arttığı daha sonra artan katkı içeriği ile azaldığını belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Munirwan vd. (2022) killi genleşen zeminin çeşitli oranlarda (%5, 10%, 15% ve %20) kahve kabuğu ile iyileştirilmesi sonucu kohezyon ve içsel sürtünme açısının düzenli olarak arttığını belirtmişlerdir. Kayma dayanımında elde edilen bu iyileşmeyi zemin ve kahve kabuğu külü arasında gerçekleşen pozolanik reaksiyonlar ile atığın boşlukları doldurup zeminin yoğunluğunun artmasına neden olmasına bağlamışlardır.

Kumar vd. (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada %10 kireç ile iyileştirilmiş genleşen killi bir zeminin taşıma gücü parametreleri üzerine %4, %8, %12 ve %16 oranında atık parçalanmış lastik parçacıklarının ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda elde ettikleri verilere göre zemin UCS ve CBR değerlerinin %12 atık ilavesine kadar arttığı daha sonra artan atık içeriği ile azaldığını belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Akbarimehr vd. (2020) %10 oranına kadar atık lastik parçacıkları kullanımının genleşen killi zeminin taşıma gücü parametrelerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Atahu vd. (2019) kahve kabuğu külünün genleşen taban zemini konsolidasyon parametreleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda zemin kuru ağırlığınca %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kahve kabuğu külü ile karıştırılmış ve 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa basınç altında konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarından elde edilen bulgulara göre artan kahve kabuğu külü içeriği ile zeminin sıkışma (C_c) ve tekrar yükleme indisi (C_r) azaldığı dolayısıyla zeminin

sıkışabilirliğinin ve hacim değişikliğinin azaldığını belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Taha vd. (2021) genleşen zemine kuru ağırlığınca %4, %8, %12 ve %16 oranında katılan pirinç kabuğu külünün konsolidasyon parametreleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Pirinç kabuğu külü ile zeminin boşluk oranının ve konsolidasyon katsayısının azaldığını; bunu ise atık içeriği ile birlikte zeminin yoğunluğunun ve daneler arası sürtünme ve kenetlenmenin artmasına bağlamışlardır. İnşaat ve yıkıntı atıklarının genleşen killi bir zeminin konsolidasyon parametreleri üzerine etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada ise Islam vd. (2022) inşaat ve yıkıntı atıklarının genleşen zeminin konsolidasyon oturmasını, süresini ve C_c değerini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Kadhim vd. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada kanalizasyon ve atık su arıtma çamuru külünün genleşen killi zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla genleşen zemine ağırlığınca %10, %15 ve %20 oranında atık ilave etmiş ve meydana gelen değişimleri tespit etmek amacıyla Atterberg limitleri ile UCS ve CBR deneylerini yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre artan atık içeriği ile PI değerinin azaldığı, kürlenme süresi ile UCS ve CBR dayanımının arttığı belirtilmiştir. Kür süresi ile artan dayanımı zemin ile atık arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar sonucu çimentolaşma ile dayanımın artmasına bağlanmıştır. Bir diğer çalışmada ise Akbulut (2020) yaptığı çalışmada genleşen killi zeminin drenajsız kayma mukavemetine olan etkisini incelemek amacıyla zemine kuru ağırlığınca %5, %10, %15, %20 ve %30 oranında kanalizasyon ve atık su arıtma çamuru eklemiştir. Düşen koni deney yöntemiyle elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerleri incelendiğinde artan atık içeriği ile mukavemet değerlerinin arttığını belirtmiştir.

Çizelge 2.3'te genleşen taban zemini mühendislik özelliklerini iyileştirmede atık malzeme kullanarak gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları özetlenmiştir. Çizelge 2.3'te verilen çalışmaların sonuçları incelendiğinde endüstriyel, tarımsal ve evsel atıkların genleşen taban zemini mühendislik özelliklerini iyileştirmede sürdürülebilir bir yaklaşım çerçevesinde kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur.

Çizelge 2.3. Genleşen taban zemini iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların özeti

Kaynak	Katkı	Oran (%)	LL (%)	PI (%)	Şişme (%)	γ_{mak} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	UCS, (kPa)	CBR (%)
Abdelkader vd. (2021)	Atık Mermer Tozu	0	42.12	17.12	6.17	1.84	13.10	417.0	6.39
		5	38.40	15.10	4.99	1.88	12.74	454.7	7.55
		10	35.25	13.43	3.82	1.91	12.38	492.4	8.70
		15	32.68	12.13	2.64	1.95	12.02	530.1	9.86
		20	30.68	11.18	1.46	1.99	11.66	567.9	11.0
		25	29.26	10.60	0.29	2.02	11.30	605.6	12.1
Çabalar vd. (2020b)	Alüminyum CNC Atıkları	0	49.00	26.00	1.15	1.72	19.50	373.0	6.30
		5	-	-	1.06	1.75	18.70	389.0	7.40
		10	-	-	0.99	1.77	17.90	405.0	7.90
		15	-	-	0.87	1.81	17.00	470.0	8.80
		20	-	-	0.81	1.81	16.30	-	5.50
Daryati ve Ramadhan (2020)	Pirinç Kabuğu Külü	0	46.25	11.1	-	1.38	31.44	-	5.30
		3	40.02	5.64	-	1.30	32.21	-	8.50
		6	39.18	6.13	-	1.38	32.42	-	12.2
		9	42.99	7.62	-	1.40	33.25	-	12.5
Ashiq vd. (2022)	Atık Cam Tozu	0	47.0	25.0	23.50	1.69	16.00	110.0	2.50
		5	45.5	24.0	21.60	1.64	19.00	91.25	4.80
		10	44.0	23.1	20.80	1.62	20.50	134.3	6.00
		15	42.1	22.3	19.05	1.58	20.10	173.9	7.00
		20	40.1	20.0	17.10	1.54	21.00	231.6	9.60
Haldankar vd. (2016)	Yumurta Kabuğu Tozu	0	69.9	46.6	-	1.57	19.65	117.0	2.20
		1	67.6	46.2	-	1.63	18.83	164.0	3.03
		2	61.9	43.9	-	1.70	17.36	252.0	3.85
		3	58.3	42.8	-	1.78	16.28	369.0	5.23
		4	59.4	44.8	-	1.85	14.97	276.0	4.40
		5	69.9	46.6	-	1.67	17.23	123.0	2.20
	Şeker Kamışı Külü	0	36.0	14.8	-	1.48	18.55	-	10.0

Salahudeen ve Ochebo (2015)		2	37.5	15.1	-	1.48	19.0 0	-	12.0
		4	36.0	15.0	-	1.49	18.9 0	-	13.0
		6	35.8	14.9	-	1.49	18.5 0	-	16.0
		8	35.6	14.9	-	1.49	18.5 0	-	18.0
Ayodele vd. (2016)	Atık Su Arıtma Çamuru Külü	0	49.3	12.0	-	1.72	19.0 0	-	12.0
		2	46.0	9.80	-	1.76	16.4 0	-	12.5
		4	48.5	16.1	-	1.79	16.2 0	-	14.0
		8	49.5	12.1	-	1.67	16.8 0	-	17.0
		16	46.5	6.40	-	1.62	17.0 0	-	25.0
Jain ve Dohare (2018)	Atık Kâğıt Fabrikası Çamuru Külü	0	-	38.6	63.4	1.51	25.2 0	65.8	3.45
		2	-	37.2	79.9	1.54	25.3 8	54.6	2.17
		4	-	33.3	64.4	1.54	25.7 9	70.5	5.75
		6	-	29.3	52.5	1.54	26.4 8	76.8	8.42
		8	-	23.4	71.8	1.52	26.9 3	65.8	4.81
Nnochiri and Adetayo (2019)	Mısır Koçanı Külü	0	53.0	35.0	-	13.45	14.9 5	495	9.50
		2	48.0	28.0	-	13.40	15.8 0	510	11.10
		4	46.0	21.0	-	13.35	16.7 0	525	18.05
		6	45.0	22.0	-	13.20	18.1 0	542	24.64
		8	44.0	23.0	-	13.20	19.1 0	560	28.20
		10	43.0	24.0	-	13.01	20.2 0	550	26.10

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, KFASÇ'nin farklı türde genleşen karayolu taban zemini iyileştirilmesi kapsamında kullanılan materyaller ve gerçekleştirilen kapsamlı deney ve analizlere ait takip edilen uygulama esasları standartlar çerçevesinde özetlenmiştir.

3.1. Materyal

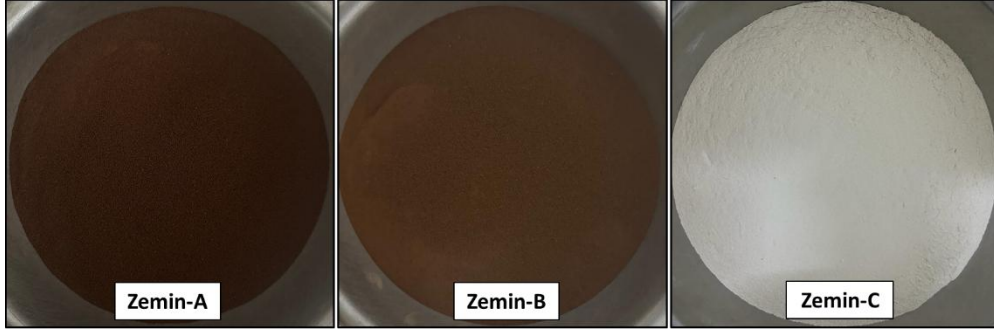
Tezin bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler tanıtılmış ve malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mikroyapı özelliklerinin tespiti amaçlı gerçekleştirilen analizlerin sonuçları paylaşılmıştır.

3.1.1. Genleşen taban zeminleri

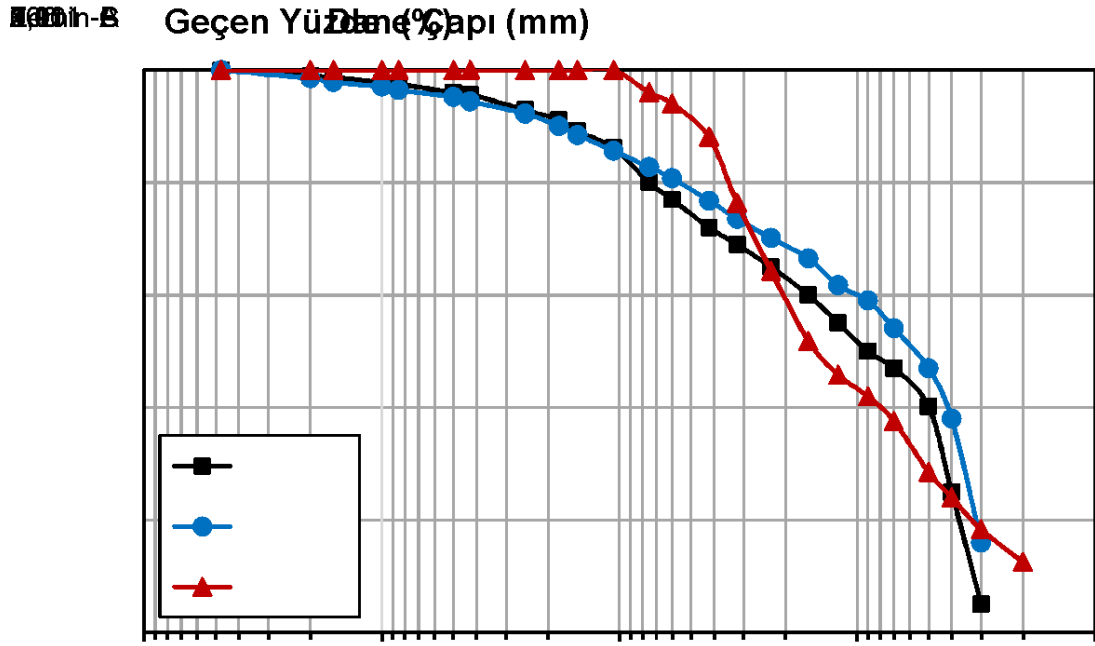
Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel analizlerde üç farklı genleşen karayolu taban zemini kullanılmıştır. Zemin örneklerinden ikisi Şekil 3.1'de gösterilen Muş-Kulp karayolu üzerinde farklı lokasyonlarda bulunan iki farklı yarma şevinden alınmıştır. Zemin numuneleri üst kısımlarda bulunan organik zemin sıyrılıp yüzeyden 1-1.5 m derinliğe inildikten sonra alınmıştır (Zemin-A ve Zemin-B). Diğer bir taban zemini ise kaolin kili olup Eskişehir ilinde ticari faaliyet gösteren bir firmadan temin edilmiştir (Zemin-C). Genleşen karayolu taban zeminlerinin görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir. Zeminlerin dane boyutu analizi ASTM D422'ye göre gerçekleştirilmiş ve analiz sonucu Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.1. Genleşen taban zeminlerin arazi incelemesi; Zemin-A (a) ve Zemin- B (b)



Şekil 3.2. Genleşen taban zeminlerin görünümü



Şekil 3.3. Genleşen taban zeminlerinin dane boyu dağılımı

Şekil 3.2’de verilen taban zeminlerinin dane boyutu dağılımı incelendiğinde Zemin-A’nın Zemin-B’ye nispeten daha koyu kahverengi renkte olduğu, Zemin-C’nin ise beyazımsı renge sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.3’te verilen zeminlerin dane boyu dağılımı incelendiğinde zeminlerin dane boyutunun 4.75 mm altında olduğu görülmektedir. İnce malzeme oranının Zemin-C’de en fazla olduğu Zemin-A ve Zemin-B’nin ise zemin dane boyutlarının birbirine yakın olmakla beraber Zemin-B’nin nispeten daha çok ince malzeme içerdiği söylenebilir.

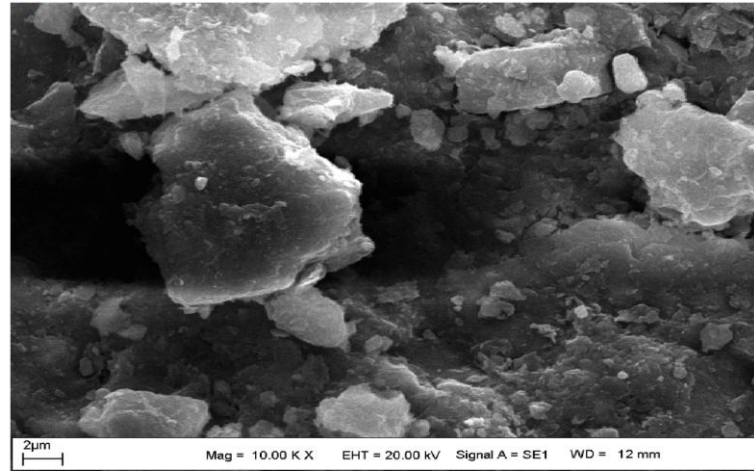
Zeminlerin özellikleri belirlenirken ASTM, AASHTO, BS ve IS standartlarında belirtilen metot ve yöntemler izlenilmiştir. Taban zeminlerinin geoteknik ve mühendislik

özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Zeminlerin içyapı analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiş olup görüntüleri Şekil 3.4’te verilmiştir. Taban zeminlerinin mineralojik bileşimleri X-ışını kırınım (XRD) yöntemi ile belirlenmiş ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

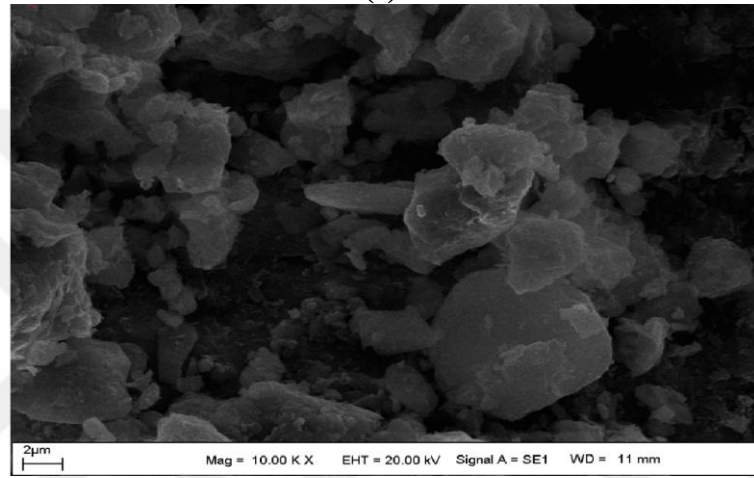
Çizelge 3.1. Taban zeminlerinin mühendislik özellikleri

Zemin Özellikleri	Zemin-A	Zemin-B	Zemin-C
Kum (0.075-4.75mm), %	19.99	17.24	4.00
Silt+Kil (<0.075mm), %	80.01	82.76	96.00
Özgül Ağırlık, %	2.59	2.72	2.54
Likit Limit, %	50.55	42.75	41.13
Plastik Limit, %	25.10	23.23	21.73
Platisite İndeksi, %	25.45	19.52	19.40
Lineer Büzülme, %	13.22	11.07	7.43
Zemin Sınıfı	CH	CL	CL
	A-7-6 (16)	A-7-6 (13)	A-7-6 (12)
Serbest Şişme İndeksi, %	43.00	28.71	11.63
Tek Eksenli Şişme, %	6.49	5.51	3.75
Şişme Potansiyeli, %	3.91	2.63	2.10
V_{mak} , kN/m ³	16.41	17.75	15.61
w_{opt} , %	20.79	15.70	19.37
c, Kohezyon (kPa)	40.67	23.33	14.00
İçsel Sürtünme Açısı, (ϕ°)	21.03	43.10	38.63
UCS, kPa	158.76	379.87	127.48
CBR, %	3.02	9.90	17.54
ph	7.33	7.10	8.10
Elektriksel İletkenlik, mS/cm	560	713	1044
Katyon Değişim Kapasitesi, cmol _c /kg	1.24	1.05	0.15

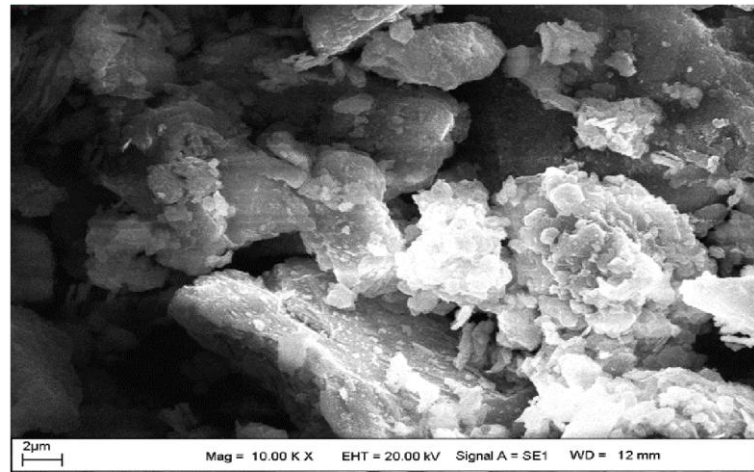
Çizelge 3.1 incelendiğinde Zemin-A, ASTM D2487 standardına göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılırken, Zemin-B ve Zemin-C ise düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C AASHTO M-145 sınıflandırılma sistemine göre sırasıyla A-7-6(16); A-7-6(13) ve A-7-6(12) olarak sınıflandırılmıştır.



(a)



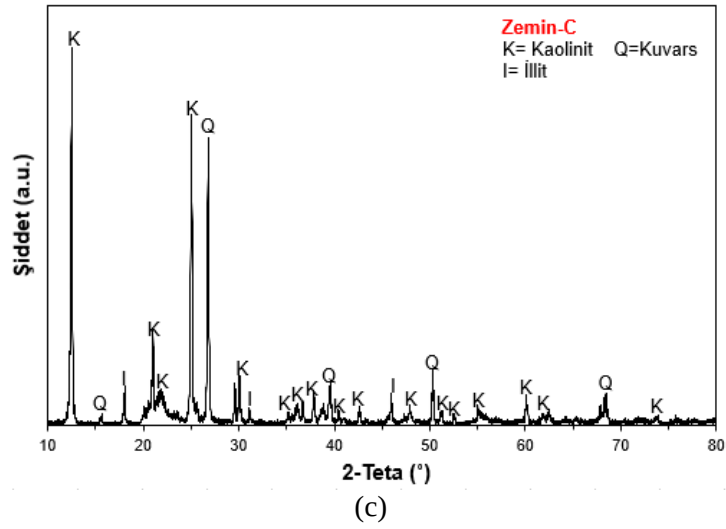
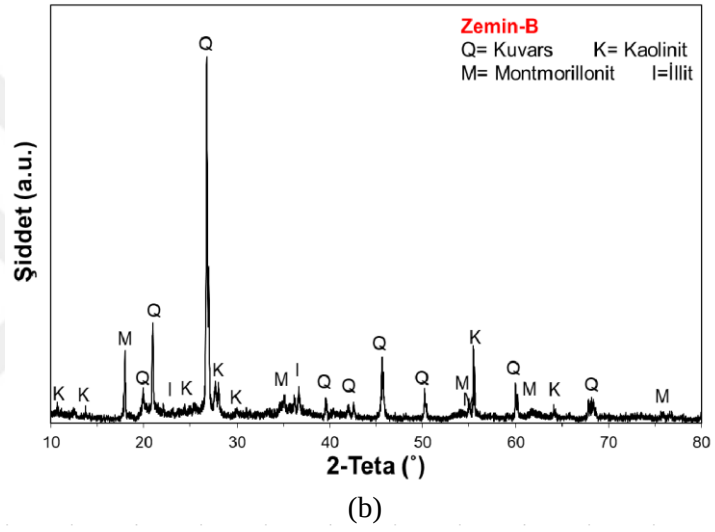
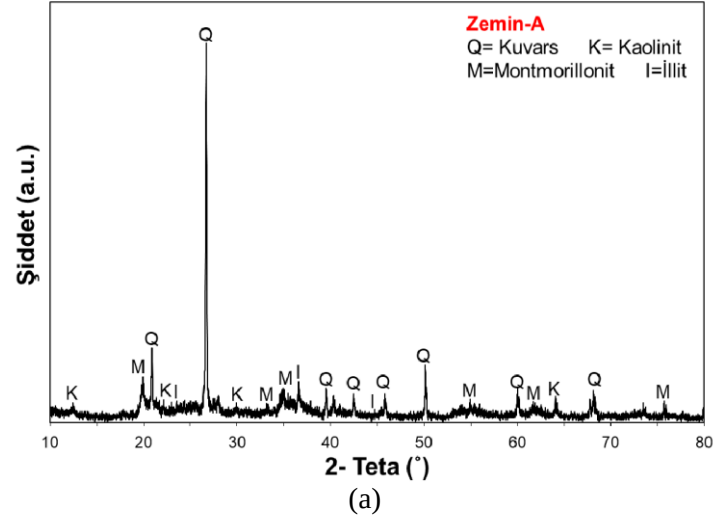
(b)



(c)

Şekil 3.4. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin SEM görüntüleri

Şekil 3.4'te verilen taban zeminlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde yassı kil parçacıklarının içyapıda düzensiz dağıldığı ve mikroyapının dağınık, düzensiz ve geniş boşluklar içerdiği görülmektedir.



Şekil 3.5. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin XRD analizleri

Şekil 3.5'te verilen taban zeminlerinin XRD desenleri incelendiğinde Zemin-A'nın kuvars, kaolinit, montmorillonit ve illit gibi kil minerallerini içerdiği

görülmektedir. Zemin-B'nin XRD desenleri içerdiğinde Zemin-A ile benzer mineralojik bileşimlere sahip olduğu görülmekle beraber kaolinit mineralinin peak yoğunluğu artmıştır. Zemin-C'de ise beklenildiği şekilde kaolinit minerallerinin peaklerinin yoğunluğu dikkat çekmekle beraber kuvars ve illit minerallerinin varlığı da tespit edilmiştir.

Zeminlerin kimyasal analizi X-ışını floresans spektrometresi (XRF) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Taban zeminlerinin kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellik (%)	Zemin-A	Zemin-B	Zemin-C
Silisyum dioksit (SiO ₂)	42.20	44.82	63.41
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	22.36	23.90	25.21
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	24.99	21.17	0.67
Kalsiyum oksit (CaO)	1.36	1.06	1.95
Magnezyum oksit (MgO)	2.32	2.01	0.81
Sülfür (SO ₃)	0.05	0.04	2.23
Sodyum oksit (Na ₂ O)	0.12	0.11	3.17
Potasyum Oksit (K ₂ O)	2.87	3.45	1.49

Zeminlerin kimyasal analizi sonuçları incelendiğinde killi zeminlerde genellikle beklenildiği üzere SiO₂ bileşiğinin baskın olduğu bunu sırasıyla Al₂O₃ ve Fe₂O₃'nin takip ettiği görülmektedir.

3.1.2. Kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (KFASÇ)

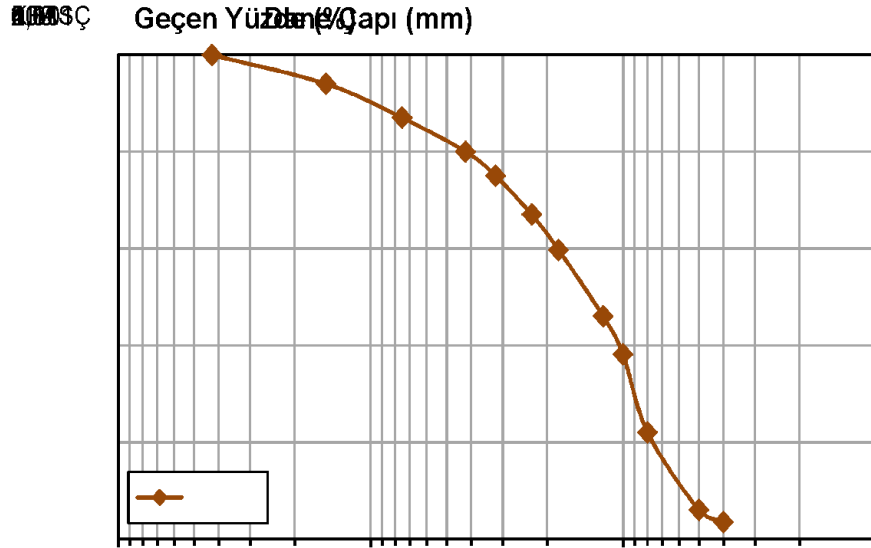
Bu tez çalışmasında farklı taban zeminlerinin geoteknik ve mühendislik özelliklerini iyileştirmede katkı olarak kullanılan kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (KFASÇ) Balıkesir ilinde faaliyet gösteren Varaka Kâğıt Fabrikasından temin edilmiştir. Fabrikadan ıslak olarak elde edilen atık çamur, laboratuvarında etüv yardımıyla değişmez ağırlığa ulaşıncaaya denk kurutulup; Şekil 3.6'da gösterilen bıçaklı değirmen öğütücünde 425 µ altı boyuta öğütülmüştür. Islak form, kuru form ve kurutulup öğütülmüş formdaki KFASÇ Şekil 3.7'de gösterilmiştir. KFASÇ'nin özgül ağırlığı 1.57 olarak bulunmuştur. KFASÇ tane boyu dağılımı Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da sırasıyla KFASÇ'nin SEM görüntüleri ve XRD analizi verilmiştir. Çizelge 3.3'te KFASÇ'nin XRF yöntemi ile belirlenen kimyasal özelliği sunulmuştur.



Şekil 3.6. Bıçaklı değirmen öğütücü



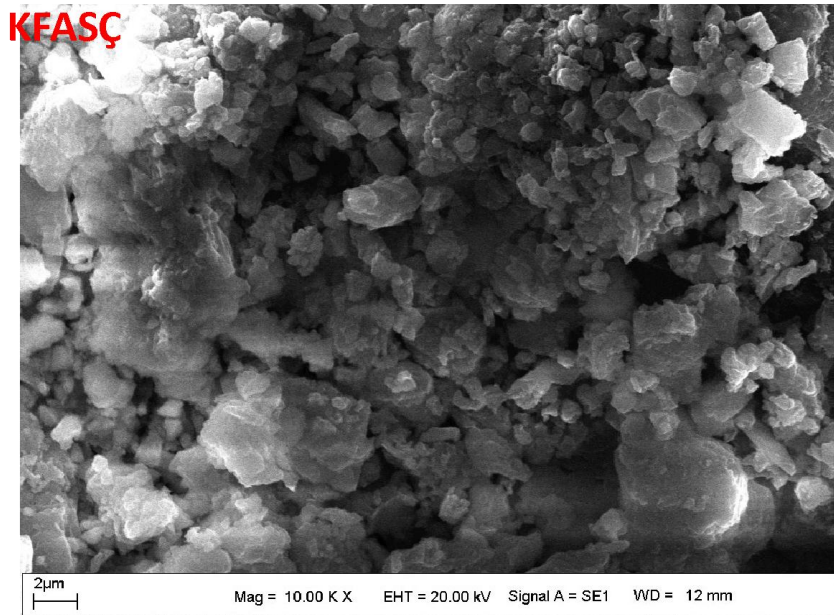
Şekil 3.7. Atık kâğıt çamurunun fabrikada ortaya çıkışı (a, b, c), ıslak form (d), kuru form (e), kurutulup öğütülmüş form (f)



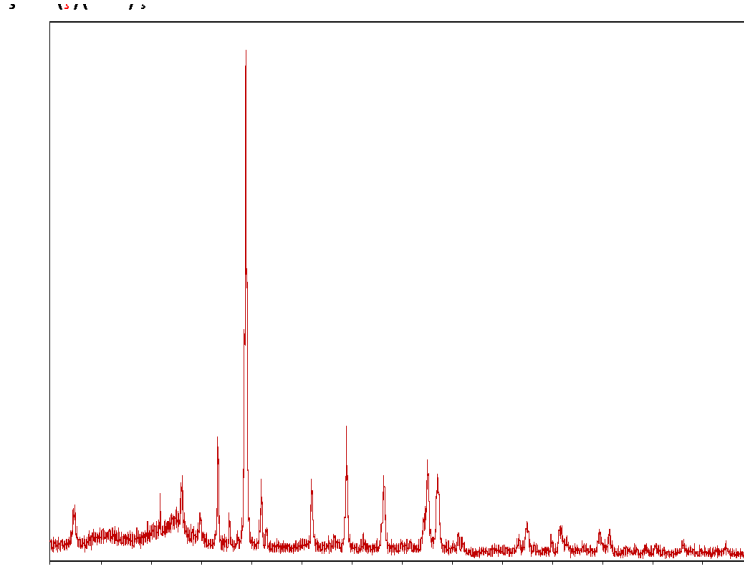
Şekil 3.8. KFASÇ'nin dane boyu dağılımı

Şekil 3.8'de verilen KFASÇ'nin dane boyu dağılımı incelendiğinde 0.425 mm elek altı malzeme içerdiği görülmektedir. KFASÇ'nin 75 µ elek altı malzeme içeriğinin ise yaklaşık %87 olduğu tespit edilmiştir.

Malzemeyi tanımda destekleyici diğer bir analiz olan ve KFASÇ'ye uygulanan SEM analizi görüntüsü Şekil 3.9'da, XRD analizi sonucu Şekil 3.10'da ve XRF analizi sonucu ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.9. KFASÇ'nin SEM görüntüsü



Şekil 3.10. KFASÇ'nin XRD analizi

Çizelge 3.3. KFASÇ'nin kimyasal özelliği

Kimyasal Özellik	Yüzde (%)
Silisyum dioksit (SiO ₂)	5.48
Kalsiyum oksit (CaO)	58.43
Sodyum oksit (Na ₂ O)	14.07
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	1.48
Magnezyum oksit (MgO)	3.41
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	11.98
Sülfür (SO ₃)	2.69
Potasyum oksit (K ₂ O)	0.001

Şekil 3.9'da KFASÇ'nin SEM görüntüsü incelendiğinde taneciklerin kümelenmiş halde olduğu ve mikroyapının yer yer büyük boşluklar içerdiği görülmektedir. Şekil 3.10'da KFASÇ'nin XRD deseni incelendiğinde kimyasal özelliğe paralel bir şekilde kalsit minerallerinin varlığı görülmektedir. Ayrıca XRD deseninde kaolinit, dolomit, gehlenit ve serbest kireç minerallerinin varlığı tespit edilmiştir. Çizelge 3.3'te verilen KFASÇ'nin kimyasal özelliği incelendiğinde CaO bileşiğinin oransal olarak baskın olduğu görülmektedir. CaO bileşiğini sırasıyla Na₂O ve Al₂O₃'nin takip ettiği tespit edilmiştir. KFASÇ'nin miktarca CaO'nun baskın olması taban zeminleri ile puzolanik rekasyon sonucu çimentomsu bileşiklerin oluşması açısından önemlidir (Jwaida, 2024).

3.2. Yöntem

Tezin bu bölümünde gerçekleştirilen deneylerin ve analizlerin yöntemleri ile deneysel çalışmalara ait takip edilen uygulama esasları standartlar çerçevesinde özetlenmiştir.

3.2.1. İndeks özelliklerinin değerlendirilmesi

Zeminlerin index özellikleri belirlenirken tane boyu dağılımı ve hidrometre analizi, özgül ağırlık deneyleri, Atterberg limitleri deneyleri, şişme potansiyelinin değerlendirildiği deneyler ve büzülme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

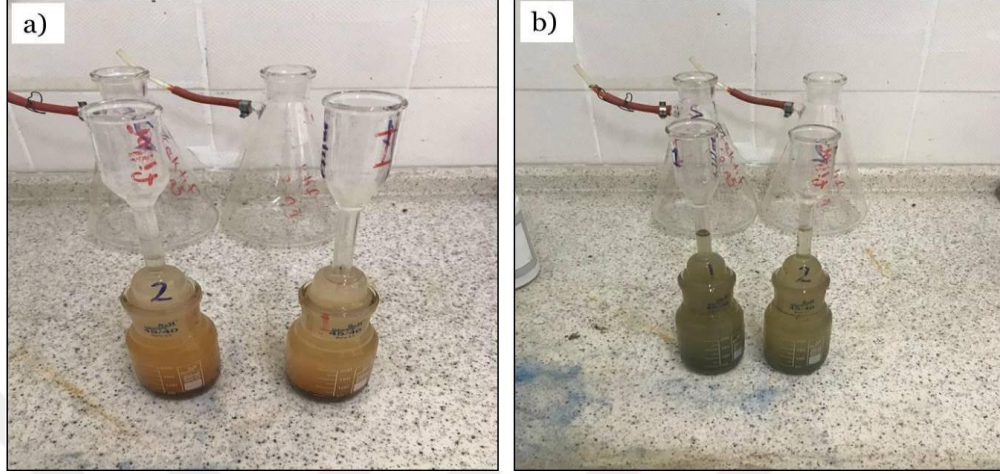
3.2.1.1. Dane boyu dağılımı ve hidrometre analizi

Zeminlerin dane boyu dağılımının belirli standartlar izlenerek saptanması zeminlerin sınıflandırılmasında önemlidir. Ayrıca, dane boyu dağılımı analizi ile bir zemindeki danelerin yani çakıl, kum, silt ve kil miktarlarının belirlenerek zeminin diğer mühendislik özellikleri hakkında da önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, zeminlerin ve KFASÇ'nin dane boyu dağılımı ve analizi ASTM D422 ve ASTM D1140 standardı izlenerek gerçekleştirilmiştir. Zeminlerin ve KFASÇ'nin 4.75-0.075 mm aralığındaki dane dağılımının saptanması için elek analizinden yararlanılırken, 0.075 mm (#200) altı tane boyu dağılımının belirlenmesi için ise hidrometre analizi gerçekleştirilmiştir. Hidrometre analizi (akışkan tartısı, pipet, kaldırma kuvveti analizi) eleme ile test edilemeyen zeminler için dane dağılım eğrisini belirleme olarak bilinir. Hidrometre analizi, Stokes yasasında açıklanan bir süreç olan fiziksel biriktirme sürecini kullanarak toprak parçacıklarını boyutlarına göre hesaplar (Stokes, 1981). Hidrometre analizi parçacık boyutu 75 µm'den küçük zeminlerin boyutlarının dağılımını belirlemek için gerçekleştirilir. Taban zeminlerinin elek ve hidrometre analizlerinin sonucu Şekil 3.3'te görselleştirilmiştir.

3.2.1.2. Özgül ağırlık

Bir katı maddenin özgül ağırlığı, belirli bir hacimdeki maddenin ağırlığının aynı hacimdeki suya oranıdır. Zeminin özgül ağırlığının belirlenmesi, zeminin boşluklarının hesaplanması ve hidrometre analizinde dane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi için

gereklidir. Çoğu kil mineralinin zgl ağırlığı 2 ila 3.3 arasındadır (Mukherjee, 2013). Çalışma kapsamında kullanılan zeminlerin ve KFAS'nin zgl ağırlıkları ASTM D854 standardına göre belirlenmiştir (şekil 3.11)



şekil 3.11. Özgül ağırlık deneyi; (a) Zemin, (b) KFAS

3.2.1.2. Atterberg limitleri deneyi

Atterberg limitleri ya da diğer adıyla kıvam limitleri zemin taneleri ve su arasındaki temasları ve değişen su oranına göre zeminin durumunu tanımlar. Likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri her zemin ve zemin-KFAS karışımları için Casagrande ve yuvarlama metodu ile ASTM D4318 metodu izlenerek belirlenmiştir. Casagrande ve yuvarlama metodu deney fotoğrafları şekil 3.12'de verilmiştir.



şekil 3.12. Atterberg limitleri; (a) Likit limit; (b) Plastik limit

3.2.1.3. Serbest şişme indeksi

Serbest şişme indeksi deneyi genleşen killi zeminlerin şişme potansiyellerini tespit etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden biridir. Bu deney, 425µm elekten geçen fırında kurutulmuş numuneden 10 g alınarak 100 ml'lik iki dereceli silindirin her birine eşit miktarda yerleştirilerek gerçekleştirilir. Dereceli silindirin birine 100 ml seviyesine saf su diğerine ise kerosen ilave edilip cam çubuk yardımıyla iyice karıştırılır. 24 saat sonunda meydana gelen hacim değişikliği farkından Denklem 3.1'e göre serbest şişme indeksi hesaplanır.

$$S\dot{S}i = \left(\frac{V_d - V_k}{V_d} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

Burada,

$S\dot{S}i$ = Serbest şişme indeksini (%)

V_d = Saf su içeren dereceli silindirden okunan numunenin hacmini

V_k = Kerosen içeren dereceli silindirden okunan numunenin hacmi

Bu tez kapsamında, IS 2720-40 standardı izlenerek her bir zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının serbest şişme indeksi belirlenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Serbest şişme indeksi deneyi

3.2.1.3. Tek eksenli şişme

Tek eksenli şişme (TEŞ) zeminlerin şişme potansiyelerini tespit etmede yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden biridir. Bu tez çalışmasında tek eksenli şişme deneyi 50 mm çapında 20 mm yükseliğindeki çelik ring kalıplara optimum su muhtevalarında yerleştirilen numuneler üzerinde ASTM D4546 standardı izlenerek gerçekleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen numunenin alt ve üst kısmına filtre kâğıdı ve poroz taşlar yerleştirilerek deney hücresine yerleştirilmiş ve hücre su ile doldurulmuştur. Komparatör yardımıyla 1 kPa yük altında zemin yüksekliğinde meydana gelen değişimler 24 saat boyunca kaydedilmiştir. Denklem 3.2'ye göre her zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının tek eksenli şişme (%) değerleri hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan TEŞ deneyi düzeneği Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

$$TEŞ = \left(\frac{\Delta H}{H_i} \right) \times 100\% \quad (3.2)$$

Burada,

TEŞ=Tek eksenli şişme (%)

ΔH = Numunede meydana gelen yükseklik değişimini (mm),

H_i = Numunenin ilk yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.



Şekil 3.14. Tek eksenli şişme deneyi

3.2.1.4. Şişme potansiyeli

Bu tez çalışmasında her zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının şişme potansiyelleri ASTM D1883 standardı izlenerek belirlenmiştir. Optimum su muhtevalarında maksimum kuru birim hacim ağırlıklarına sıkıştırılan karışımlar 4,54 kg sürşarj yükleri altında 96 saat boyunca su havuzuna bırakılmıştır. Numunede meydana gelen kabarmalar izlenerek 96 saat sonunda meydana gelen şişme yardımıyla Denklem 3.3 kullanılarak her zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının şişme potansiyelleri (%) hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan ŞP deney düzeneği Şekil 3.15'te verilmiştir.

$$\text{ŞP} = \left(\frac{H}{H_i} \right) \times 100\% \quad (3.3)$$

Burada,

ŞP=Şişme Potansiyeli (%)

H= Numunede 96 saat sonunda görülen şişmeyi (mm),

H_i= Numunenin ilk yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.



Şekil 3.15. Şişme potansiyeli tespiti deneyi

3.2.1.5. Lineer (doğrusal) ve hacimsel büzülme deneyi

Büzülme deneyi, genişleyen zeminlerin su muhtevası kaybı sonucu maruz kaldığı büzülme miktarını elde etmek için yaygın olarak kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Bu deney yönteminde yeterli miktarda 425 µ elek altı malzeme likit limit civarında (± 2) saf su homojen bir durum elde edilene kadar karıştırılıp büzülme kabına içindeki hava kabarcıkları çıkacak şekilde hafifçe sarsılarak yerleştirilir. Numunenin kurutulması aşamasında, kalıp önce hava akımına maruz kalmayan bir yere konur ve numunenin kalıp çeperinden çekilmesi gözlenene kadar açıkta kurutulur; sonra büzülme büyük ölçüde tamamlanıncaya kadar (60 ± 5) °C sıcaklıklı bir etüvde ve son olarak da tam kurumayı sağlamak amacıyla (105 ± 5) °C sıcaklıklı bir etüvde bekletilir. Kalıp ve içindeki numune soğutulur ve zemin çubuğun ortalama uzunluğu ile hacimsel büzülme oranının hesaplanması için de çapı ölçülür. Denklem 3.4 ve 3.5'e göre zeminlerin lineer (doğrusal) ve hacimsel büzülme oranı hesaplanır. Bu tez çalışmasında BS-1377 deney standardı izlenerek her zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının lineer ve hacimsel büzülme değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.16).

$$L_s = \left(1 - \left(\frac{L_f}{L_0} \right) \right) \times 100\% \quad (3.4)$$

Burada,

L_s = Lineer büzülme değerini (%),

L_0 =Numunenin ilk uzunluğu (mm),

L_f = Etüvde kurutulmuş numunenin uzunluğunu (mm) belirtmektedir.

$$V_s = \left(1 - \left(\frac{V_0}{V_f} \right) \right) \times 100\% \quad (3.5)$$

Burada,

V_s = Hacimsel büzülme değerini (%),

V_0 =Numunenin ilk hacmini (mm^3),

V_f = Etüvde kurutulmuş numunenin hacmini (mm^3) belirtmektedir.



Şekil 3.16. Büzülme deneyi; Büzülme kalıbı (a), Yaş numune (b), Etüvde kurutulmuş numune (c)

3.2.2. Geoteknik ve taşıma gücü parametrelerinin değerlendirilmesi

Zeminlerin KFASÇ ile geoteknik ve taşıma gücü parametrelerinde meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS), Kaliforniya taşıma oranı (CBR), direkt kesme kutusu, drenajsız kayma mukavemeti (S_u), konsolidasyon, Esneklik Modülü (M_r) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçları kullanarak yapay sınır ağları ile UCS ve M_r tahmin modelleri gerçekleştirilmiştir. Bir sonlu elemanlar analiz programı olan Plaxis 2D ile taban zeminlerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Son olarak KFASÇ ile taban zeminlerinin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sonucu mikroyapıda meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDX) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemleri ile incelenmiştir.

3.2.2.1. Kompaksiyon deneyi

Kompaksiyon (sıkıştırma), zemin parçacıklarının yeniden düzenlendiği ve birbirine yaklaştırılarak sıkıştırıldığı, toprak yapısı içindeki boşlukların azaltıldığı ve kuru yoğunluğunun artırıldığı bilimsel bir süreçtir (Kodikara vd., 2018). Standart veya modifiye proktor yöntemiyle gerçekleştirilebilen kompaksiyon deneyleri ile zeminin en sıkı, yoğun durumunu veren maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{mak}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri bulunur. Bu tez çalışmasında kompaksiyon deneyleri ASTM D1557 standartları izlenerek modifiye proktor yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneyleri vasıtasıyla zemin-atık karışımlarının γ_{mak} ve w_{opt} değerleri tespit

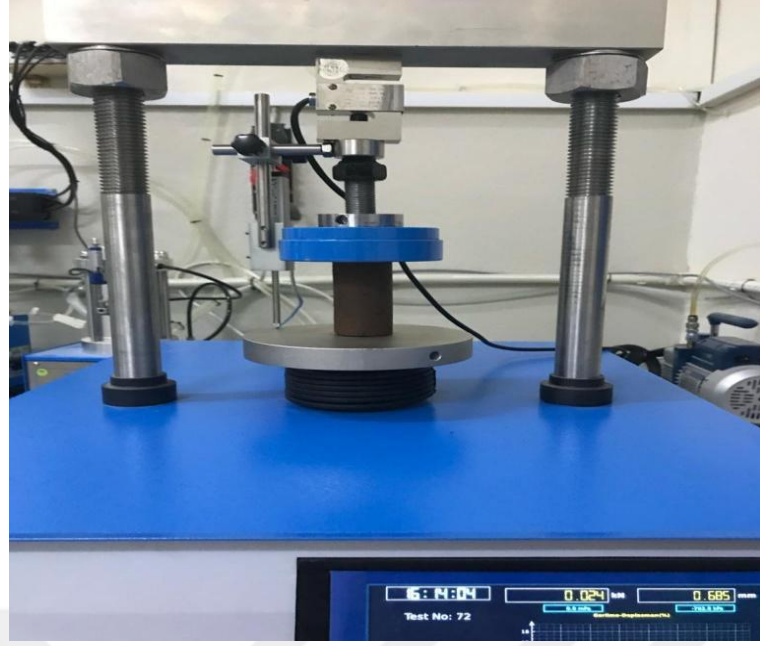
edildikten sonra bu veriler kullanarak taşıma gücü deneyleri için numuneler hazırlanabilecektir. Kompaksiyon deneyi aşaması Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Kompaksiyon deneyi

3.2.2.2. Serbest basınç dayanımı (UCS)

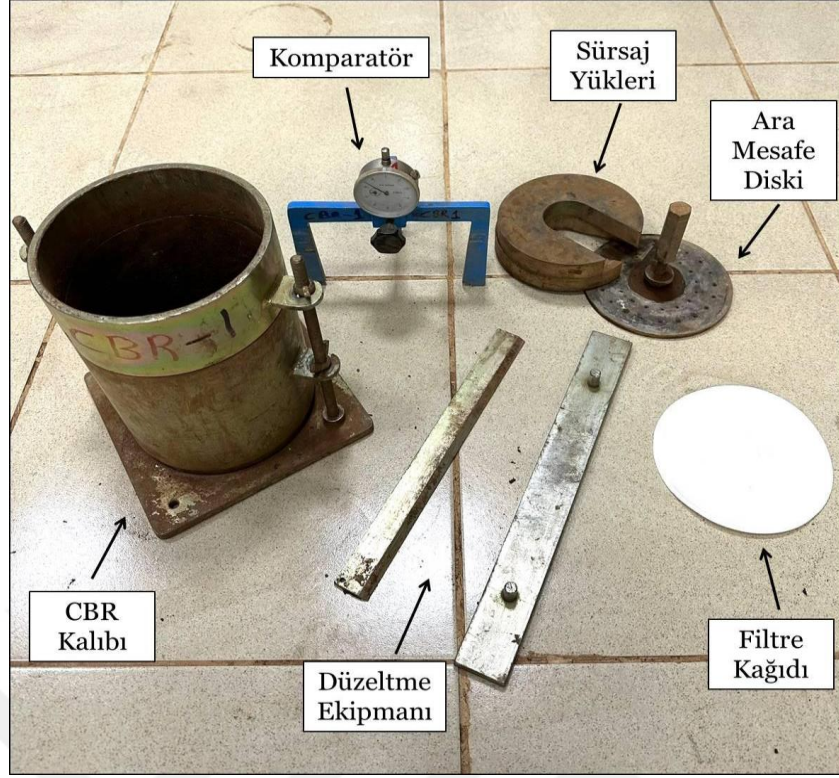
UCS, zemin ve kaya numunelerinin taşıma gücü ve kayma dayanımlarını belirlemek için sıklıkla kullanılan bir laboratuvar test metodudur (Amakye vd., 2021). Bu tez kapsamında, optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan 38 mm çaplı 76 mm uzunluğundaki zemin ve zemin-atık karışımlarının ASTM D2166 standartlarına göre gerilme-deformasyon davranışını belirlemek amacıyla yükleme hızı 1 mm/dakika olacak şekilde UCS deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kür sürelerinin (7, 28 ve 90 gün) taşıma gücüne olan etkisini gözlemlemek amacıyla numuneler hazırlanmış ve numuneler deney gününe kadar nem kaybını önlemek amacıyla naylon poşetlere sarılıp havayla teması kesilerek deney gününe kadar sıcaklığı ve nemi düzenli olarak kontrol edilen kür odasında (20 ± 5 °C) bekletilerek kürlenmiştir. UCS deney aşaması Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. UCS deneyi cihazı

3.2.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

Kaliforniya taşıma oranı (CBR), yol yapımında kullanılan taban zemini, alttemel ve temel malzemelerinin kayma mukavemetinin göreceli bir ölçüsüdür (Arulrajah vd., 2010). CBR, belirli bir zemini deforme eden yükün, kırma taşta aynı deformasyonu ortaya çıkaracak olan yüke oranıdır. Bu tez kapsamında, su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının ASTM D1883 standartlarına göre gerilme-penetrasyon davranışını gözlemlemek amacıyla CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca CBR deney düzeneğinden ve koşullandırma aşamasından zemin ve zemin-KFASÇ karışımların şişme potansiyelleri saptanmıştır. CBR deneyi gerçekleştirilirken kullanılan araç-gereçler Şekil 3.19’da gösterilmiştir. CBR deneyi test aşaması Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



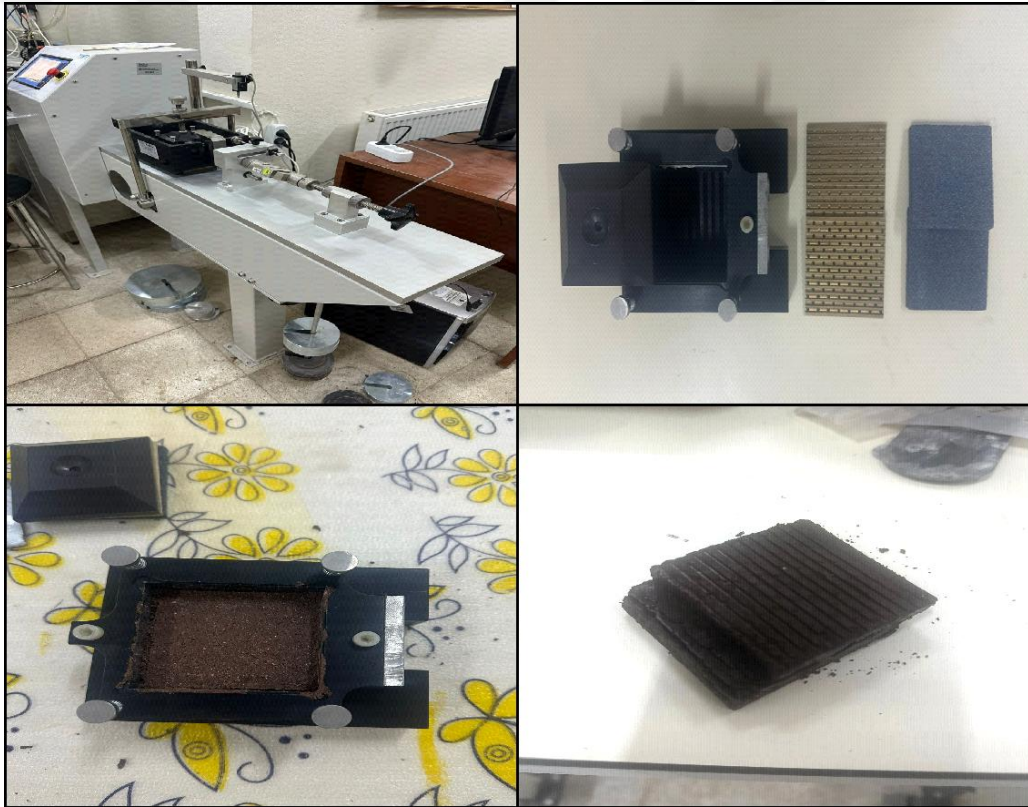
Şekil 3.19. CBR deneyinde kullanılan araç-gereçler



Şekil 3.20. CBR deneyi cihazı

3.2.2.4. Direkt kesme kutusu deneyi

Zeminlerin kayma parametrelerini (kohezyon, içsel sürtünme açısı) laboratuvar ortamında değerlendirmede yararlanılan araç-gereçlerin başında direkt kesme kutusu deneyi gelir. Bu tez kapsamında, 6×6×2 cm boyutlarındaki kesme kutusu kalıplarında optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının yükleme hızı 1 mm/dakika olacak şekilde ASTM D6528 standartlarına göre drenajsız ve konsolidasyonsuz şartlar altında kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımın kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenirken numunelere 109 kPa, 218 kPa ve 327 kPa olmak üzere 3 farklı normal gerilme uygulanmıştır. Kesme kutusu deney düzeneği ve cihazı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Direkt kesme kutusu deneyi

3.2.2.5. Drenajsız kayma mukavemeti (S_u)

Bu çalışmada zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının drenajsız kayma mukavemeti (S_u) düşen koni test yöntemi BS 17892-6 standardı izelenerek belirlenmiştir. Düşen koni test yöntemi izlenerek zeminlerin S_u değerleri belirlenirken konik faktörü ve

penetrasyon derinliğinden faydalanılır. Drenajsız kayma mukavemeti deneylerinde Şekil 3.22’de gösterilen 30° ve 80 g konik şaft ağırlığına sahip penetrometre kullanılmıştır. Deney ile S_u değerleri 55 mm çap ve 40 mm yüksekliğe sahip kaplara içinde hava boşluğu kalmayacak şekilde yerleştirilen zemin karışımlarına 5 sn boyunca serbest düşüye bırakılan koni ucunun batma miktarından yararlanarak Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

$$S_u = \frac{(k \times W)}{d^2} \quad (3.6)$$

Burada,

S_u = Drenajsız kayma mukavemetini (kPa),

W = Konik Ağırlığını (N),

k = Konik katsayısı (30° konik için 0.85 (Wood, 1985),

d = Penetrasyon derinliğini (mm) belirtmektedir.



Şekil 3.22. Düşen koni penetrometre cihazı

3.2.2.6. Konsolidasyon deneyi

İnce taneli zeminlerde dış yüklemeler ile değişen efektif gerilmeler sonucu boşlukları işgal eden suyun dışarı çıkması sonucu meydana gelen hacim değişiklikleri ile beraber zeminin zamana bağlı sıkışması olayına konsolidasyon denir (Chenarboni vd., 2022). Bu tez çalışmasında konsolidasyon deneyi Şekil 3.23'te gösterilen geleneksel konsolidasyon test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyi 50 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip çelik ring kalıplara optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında sıkıştırılan zemin ve zemin-KFASÇ numuneler üzerinde ASTM D2435 standardı izlenerek gerçekleştirilmiştir. Zemin numuneleri konsolidasyon hücresine yerleştirildikten sonra konsolidasyon hücresi su ile doldurulmuş ve konsolidasyon deneyi süresince 25 kPa, 50kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa olmak üzere farklı büyüklükte dikey gerilmeler uygulanmıştır. Oturmalar hassas LVDT'lerle her bir yük 24 saat uygulanacak şekilde kaydedilmiştir. Konsolidasyon deneyi tamamlandıktan sonra yükler 400 kPa, 200 kPa ve 100 kPa olacak şekilde kademeli olarak kaldırılıp zemin numunelerinin şişme özellikleri herbir yük kademesi için 24 saat boyunca gözlemlenmiştir.



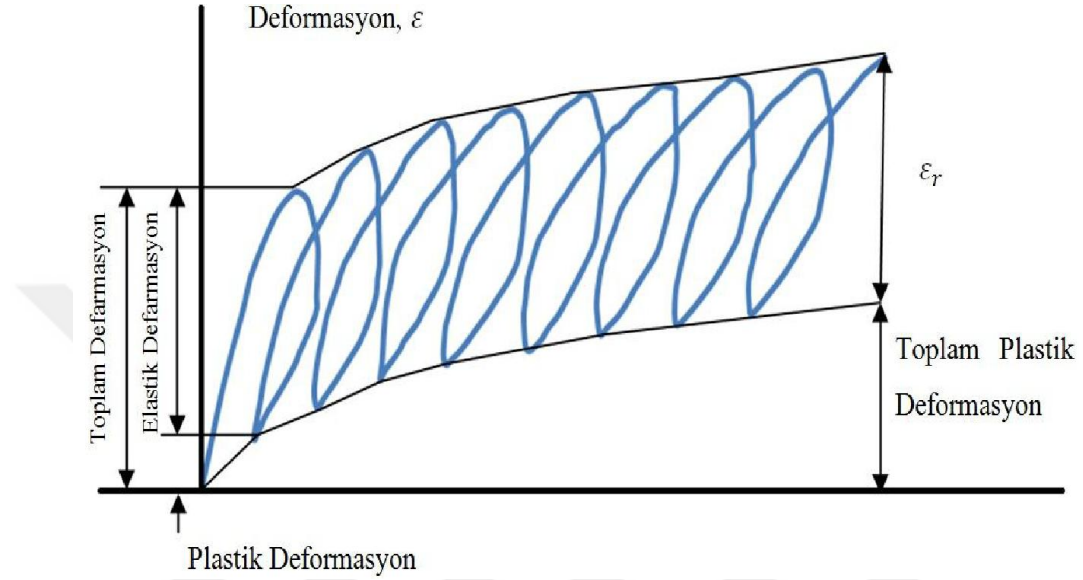
Şekil 3.23. Konsolidasyon deneyi cihazı

3.2.2.7. Esneklik Modülü deneyi

Karayolu mühendisliğinde esnek üstyapı inşasında kullanılan malzemelerin trafik yükü ve çevresel etkilere istenen şekilde direnç gösterebilmeleri için mekanik özelliklerinin en iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Esnek üstyapıların performansı taban zemini, alttemel ve temel malzemelerinin karakterine ve davranışına bağlıdır. Malzeme üzerine etki eden yüklemelerden ötürü oluşan gerilmelerin büyüklüğü, malzeme karakterizasyonu ve sıkıştırılma şartlarının en uygun bir şekilde dikkate alınması daha ekonomik ve daha dayanıklı karayolu tasarımı için büyük önem arz etmektedir (Yılmaz, 2008; Fedekar, 2021). Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi üstyapı dizaynında dünya genelinde en çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemidir (Eboukou vd., 2010). Fakat, gerek üstyapı tabakalarının maruz kaldığı gerilmeleri yeterli şekilde modelleyememe gerekse test koşulları ile numune hazırlama yönteminin gerçek arazi koşullarını laboratuvar ortamında oluşturmama gibi sakıncalarından ötürü CBR deneyinden elde edilen değerlerin malzeme hakkında çok önemli bilgiler vermesine karşın üstyapı tasarımında kullanımının bazı sakıncaları vardır (Ali, 2012; Bozbey vd., 2010; Uz, 2012). Bu sebeplerden ötürü trafik yüklerinden kaynaklanan dinamik yükler ve gerçek arazi koşulları altındaki malzeme davranışını belirleyen yeni dinamik deney metotlarının uygulanması önem kazanmaktadır (Karaşahin ve Tığdemir, 1998).

Esneklik modülü (M_r) deneyi karayolu inşasında kullanılan malzemelerin üç eksenli deney şartlarında tekrarlı trafik yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışını güvenilir bir biçimde yansıtan bir dinamik deney yöntemidir (Sadrossadat vd., 2016; Uz, 2012). M_r deney yöntemi çoğunlukla esnek kaplamalarda kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu malzeme özelliklerine bağlı olarak uygun kaplama tabakası kalınlıklarının seçilmesi amacıyla kullanılmaktadır. M_r deneyi ile esnek kaplamaların taban zemini, alttemel ve temel tabakalarında kullanılacak olan malzemelerin doğrudan mukavemeti yerine, tekrarlı ve farklı yükleme koşulları altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışının göstergesi olan “ M_r ” tayin edilir (Uz, 2012). Araç lastikleri vasıtasıyla üstyapıya iletilmekte olan trafik yüklerinin üstyapıda neden olduğu şekil değiştirmelerinin büyük bir kısmı elastik şekil değiştirme yani kalıcı olmayan deformasyonlardır. Bu sebepten ötürü esnek üstyapı tasarımında, malzemelerin özelliklerinin M_r ile ifade edilmesi doğrultusundaki yaklaşımlar daha çok kabul görmektedir (Baus, 2006). Tekrarlı yük koşullarına maruz kalan malzemelerin tipik elastik ve plastik (kalıcı) şekil değiştirme davranışları Şekil 3.24’te görülmektedir

(Huang, 1993). Plastik (kalıcı) deformasyonların tekrarlanan yük sayısının artmasıyla beraber sıfıra yaklaştığı görülmektedir (Özay ve Güngör, 2008). M_r , uygulanan deviator gerilmenin, düşey elastik (geçici, geri dönüşümlü) deformasyona oranı olarak tanımlanır. Dinamik üç eksenli test koşulları altında test edilen bir malzemenin M_r değeri Denklem 3.7'ye göre hesaplanır.



Şekil 3.24. Tekrarlı yük altında malzemede meydana gelen plastik ve elastik deformasyonlar

$$M_r = \left(\frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \right) \quad (3.7)$$

Burada,

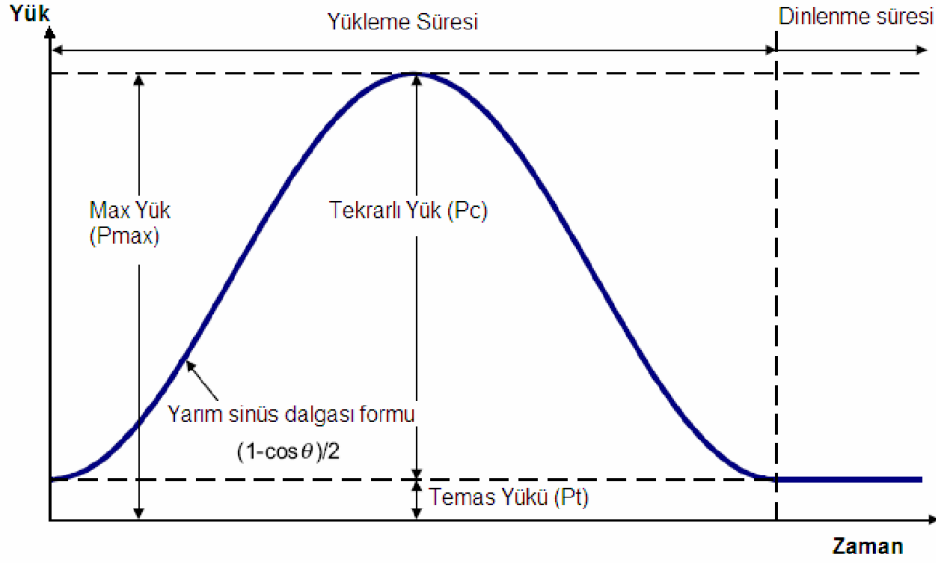
M_r = Esneklik Modülünü (kPa),

σ_d = Deviator Gerilmeyi; Toplam eksenel gerilme-hücre basıncı ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa),

ϵ_r = Eksenel yöndeki esnek birim şekil değiştirmeyi belirtmektedir.

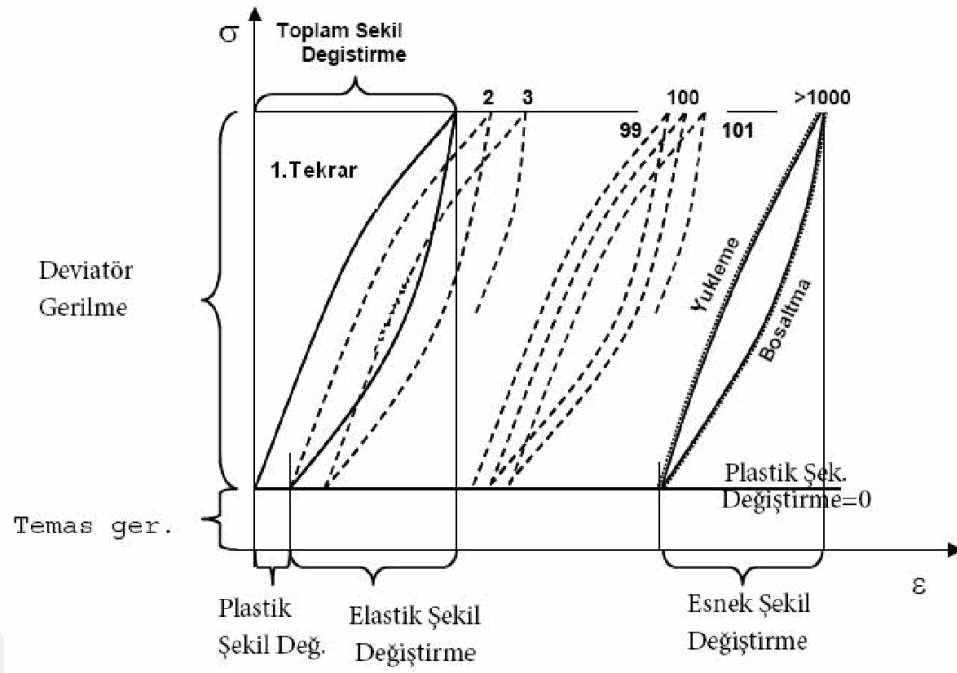
M_r deneyinde kullanılan yükleme formu, trafik yüklerinden ötürü yol tabakalarında meydana gelen gerilmeleri modellemektedir. Bir araç yol platformu üzerinde hareket ettiği zaman belirli bir noktaya yaklaşıırken ortaya çıkan gerilme, sıfırdan maksimum değerine doğru artış gösterir. Maksimum gerilme seviyesine araç tekerinin kenarının belirlenen noktanın tam üzerinde olduğu anda ulaşılır (Sousa vd.,1994; Monismith vd., 2000). Bu nedenle Şekil 3.25'te verilen haversine yük formu (NCHRP,

2004), hareketli tekerlek yükleri altında yol platformunda belirlenen noktada oluşacak gerilme durumlarını en uygun şekilde modelleyen yük formu olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.25. M_r deneyindeki Haversine yükleme formu

Malzemenin tekrarlı yükler altındaki gerçek esneklik davranışı, belirli sayıda tekrarlı yük uygulaması gerçekleştirildikten sonra belirlenebilir. Yükleme durumunun başlarında, numunede dikkate değer miktarda kalıcı deformasyon meydana gelir. Uygulanan yükleme sayısı arttıkça, yük tekrarlarından dolayı oluşan plastik deformasyonlar azalır. Buradaki esnek şekil değiştirme değeri, plastik şekil değiştirmenin minimum düzeye indiği andaki esnek şekil değiştirme değeridir. Bu yüzden deney öncesinde en az 500 yükleme tekrarı ile ön yükleme (şartlandırma yüklemesi) yapılmaktadır. Bu sırada numunenin plastik deformasyonunun büyük bir kısmını tamamlaması sağlanır. Şekil 3.26'da bu durum özetlenmiştir (Ping vd., 2003). Eğer şartlandırma aşaması sonunda toplam kalıcı şekil değiştirme değerinin %5'i aştığı tespit edilirse, numune sıkıştırma sürecinin gözden geçirilip yeterli sıkışma durumunun sağlanıp sağlanamadığının kontrol edilmesi gerekir. Eğer bu gözden geçirme sürecinde yeterli bir açıklama sağlanamaz ise numune yeniden imal edilerek şartlandırma aşaması tekrarlanır. Numune bu kez de bu ön şartı sağlayamaz ise malzeme dayanımının bu gerilme koşulları için yetersiz olduğu söylenebilir (Uz, 2012; Yılmaz, 2008).



Şekil 3.26. Tekrarlı yüke maruz kalan numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Bu çalışmada M_r deneyleri AASHTO T307-99 standardı izlenerek Çizelge 3.4'te taban zeminleri için önerilen yükleme koşulları uygulanarak optimum su muhtevalarında maksimum kuru birim hacim ağırlıklarına sıkıştırılan 70mm × 140mm boyutlarındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4. M_r deneyi taban zemini yükleme serileri

Yükleme Serisi Numarası	Yanal Basınç, kPa	Max. Eksenel Gerilme, kPa	Deviator Gerilme, kPa	Serilerdeki Yükleme Sayısı
Şartlandırma	41.4	27.6	24.8	1000
1	41.4	13.8	12.4	100
2	41.4	27.6	24.8	100
3	41.4	41.4	37.3	100
4	41.4	55.2	49.7	100
5	41.4	68.9	62.0	100
6	27.6	13.8	12.4	100
7	27.6	27.6	24.8	100
8	27.6	41.4	37.3	100
9	27.6	55.2	49.7	100
10	27.6	68.9	62.0	100
11	13.8	13.8	12.4	100
12	13.8	27.6	24.8	100
13	13.8	41.4	37.3	100
14	13.8	55.2	49.7	100
15	13.8	68.9	62.0	100

Numuneler hazırlandıktan sonra naylon poşetlere sarılıp havayla teması kesilerek deney gününe kadar kür odasında bekletilerek 7 gün boyunca kürlenmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen Esneklik Modülü deneylerinde Muş Alparslan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi Zemin Mekanik Laboratuvarında bulunan Wykeham Farrance-Controls Groups (Milan, İtalya) tarafından üretilen Dynatriax EmS adlı dinamik üç eksenli test cihazı kullanılmıştır. Sistemin ana bileşenleri, dinamik servo aktüatör, dinamik kontrolör, iki kolonlu yükleme çerçevesi, otomatik hacim değişim ölçüm ünitesi, üç eksenli deney hücresi, hava/su basınç değişim ara yüzü, hava kompresörü, hava deposu, vakum pompaları ve su dağıtım paneli olarak sıralanabilir. Bununla birlikte sistem farklı kontrol, ölçümleme ve kayıt sistemlerine sahiptir. Elektromekanik servo aktüatöre sahip bu sistem basınçlı hava ve hidrolik güç besleme ünitesine gereksinim duymaksızın arzu edilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda eksenel yük uygulayabilmektedir. Aynı zamanda ± 15 kN dinamik ve ± 10 kN statik yükleme kapasitesine sahip olan bu sistem deney şartlarına göre 10 Hz'den daha fazla çalışma/test frekansına izin verebilmektedir. Dinamik üç eksenli deneyi test cihazının genel görünümü Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Dinamik üç eksenli deney cihazının genel görünümü

3.2.2.7.1. M_r tahmin modelleri

Yol tabakalarının farklı trafik yükleri altında rijitlik davranışını açıklamak amacıyla araştırmacılar tarafından birçok farklı M_r tahmin modelleri geliştirilmiştir.

Geliştirilen bu modellerde M_r değerleri farklı gerilmelerin fonksiyonu olarak eşitliklerde tanımlanmıştır (Özay ve Güngör, 2008). Bu modellerden en çok bilinenleri toplam gerilme modeli, Uzan modeli ve AASHTO modelleri olup bu modeller aşağıda açıklanmıştır.

Toplam gerilme modeli esneklik modeli değerini toplam gerilmeye bağlı tanımlamak için geliştirilen modellerden biridir. k-Q modeli Denklem 3.8’de verilmiştir. k-Q modelinin en önemli eksikliği, bu modelde gerilme seviyesinin sadece toplam gerilme değeri ile ifade edilmesidir. Buda, farklı gerilme koşulları altında oluşan ancak aynı toplam gerilme değerini veren gerilme seviyelerinin malzeme üzerinde aynı etkiye sahip olacağı anlamına gelir (Uz, 2012; Santha, 1994).

$$M_r = k_1 \times \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right) \quad (3.8)$$

Burada,

M_r = Esneklik Modülünü,

θ = Toplam Gerilme Değerini ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

σ_{atm} = Atmosfer Basıncını (101.3 kPa) ifade etmektedir.

Denklem 3.9’da verilen Uzan (1985) tarafından geliştirilen deviatör gerilme büyüklüğünü ve dolayısıyla kesme gerilme seviyesinin etkisinin de dikkate alındığı model malzemelerin lineer olmayan özelliklerini daha iyi tanımlayabilen bir modeldir. Bu model hem granüler malzemeler hem de ince taneli zeminler için kullanılabilir.

$$M_r = k_1 \sigma_{atm} \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \right)^{k_3} \quad (3.9)$$

Burada,

M_r = Esneklik Modülünü,

θ = Toplam Gerilme Değerini ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

σ_d = Deviatör Gerilme,

σ_{atm} = Atmosfer Basıncı (101.3 kPa)’yi ifade etmektedir.

k_1 , k_2 ve k_3 = Regresyon Sabitlerini ifade etmektedir.

AASHTO modeli M_r ile σ_d 'nin logaritmik grafiğinden en küçük karaler yöntemi kullanılarak üssel bir modelin uygulanmasını önermektedir. AASHTO tarafından önerilen model Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$M_r = k_1(\sigma_d)^{k_2} \quad (3.10)$$

Burada,

M_r = Esneklik Modülünü,

σ_d = Deviatör Gerilme Değerini

k_1 ve k_2 =Regresyon Sabitlerini ifade etmektedir.

3.2.2.7.2. M_r ile ilgili çalışmalar

Genleşen taban zemini M_r değerleri üzerine atık malzemelerin etkisinin incelendiği mevcut çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Noolu vd. (2021) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada genleşen killi karayolu taban zeminlerinin M_r değerlerine kalıntı kalsiyum karbür içeriğinin etkisini incelemişlerdir. Düşük plastisiteli taban zemini için %4 oranında kalıntı kalsiyum karbür oranının en uygun değer olduğu belirtilirken bu oranın yüksek plastisiteli taban zemini için %8'e çıktığı ifade edilmiştir. M_r değerlerinde kalıntı kalsiyum içeriği ile 2.7 kata kadar iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca M_r değerlerinin çevre basıncı ile arttığı, deviatör gerilme ile azaldığı tespit edilmiştir.

Mosa (2017) iki farklı gradasyona sahip atık cam tozunun (425μ - 75μ ve $<75\mu$) genleşen taban zemini M_r değerleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. M_r değerlerinin atık cam tozu içeriği ile arttığı ve elde edilen artışın ince öğütülmüş atık cam tozu ile daha belirgin olduğu yazar tarafından bildirilmiştir. İnce öğütülmüş atık cam tozu ile daha yüksek M_r değerleri elde edilmesinin zemin karışımının artan yoğunluğu ve tanecikler arasındaki sürtünmenin artmasına bağlanmıştır. Yaghoubi vd. (2021) genleşen taban zeminin M_r değerinin %30 atık cam tozu eklenmesiyle %113 oranında arttığını bu artışın ise atık cam eklenmesiyle daha yoğun ve az boşluklu bir zemin karışımı elde edilmesine bağlanmıştır. Perera vd. (2022) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada %10 atık cam tozunun eklenmesiyle genleşen killi zeminin M_r değerlerinin 84.83 MPa'dan 102.07 MPa'ya yükseldiğini belirtmişlerdir M_r değerinde atık cam tozu ile elde edilen artışın atık cam tozu ile zemin daneleri arasındaki artan kenetlenmeye ve sürtünmeye bağlamışlardır.

Roustaei vd. (2016) atık lastik parçacıklarının killi genleşen zeminin M_r değerlerine olan etkisini incelemişlerdir. Killi zemine atık lastik parçacıklarının eklenmesiyle zeminin davranışının gerinim-sertleşmeden gerinim-yumuşamaya doğru değiştiğini gözlemlemişlerdir. Çevre basıncının artması killi-atık lastik parçacıklı zeminlerin M_r değerlerinin artmasına yol açmıştır. Genel olarak atık lastik parçacıklarının (0.5-2%) eklenmesiyle zemin daneleri arasındaki kohezyonun azalması sonucu M_r değerlerinin olumsuz etkilendiği belirtilmiştir.

Zimar vd. (2024) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında belediye katı atık küllerinin genleşen karayolu taban zemini M_r değerleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde her bir zemin karışımının M_r değerlerinin çevre basıncı ile arttığı deviatör gerilme ile azaldığı görülmüştür. Saf zeminin ortalama M_r değerinin belediye katı atık külü içeriği ile arttığı belirtilmiştir. Saf zeminin 7 gün kür sonunda M_r değeri 89 MPa'dan %10, %15 ve %20 belediye katı atık külü içeriği ise sırasıyla 135, 175 ve 215 MPa'ya çıktığı ifade edilmiştir.

Mevcut çalışmalar tarandığında genleşen karayolu taban zeminlerinin M_r parametreleri üzerine atık malzeme içeriğinin incelendiği çalışmaların kısıtlı olması dikkat çekmektedir. Ayrıca tez özelinde zeminlerin M_r değerlerine KFASÇ etkisinin incelendiği herhangi bir çalışmaya denk gelinmemiştir. Bu sebepten ötürü bu tez çalışmasında KFASÇ içeriğinin farklı türde genleşen karayolu taban zeminlerinin esneklik parametrelerine olan etkisinin ortaya koyulması mevcut çalışmalara önemli katkı sağlayacaktır.

3.2.2.8. Yapay sinir ağı (YSA)

Teknolojiyle birlikte gün geçtikçe bilgisayar tabanlı programlama hızla gelişmekte olup işletme, tıp ve mühendislik gibi birçok alanda sayısız sorunu çözmede ve bazı hedefleri tahmin etmede kullanımı dikkat çekmektedir (Yang vd., 2021). Bu gelişme ile birlikte, araştırmacıların mühendislik alanındaki problemleri çözme ve yeni araştırmaların nihai sonuçlarını tahmin etmek için çeşitli programlama yöntemlerinden faydalanma isteği yeni modellerin ortaya çıkmasına ilham olmuştur. Bilgisayar tabanlı modellemeler belirli bir emek, zaman, malzeme ve pahalı araç-gereç gerektiren araştırmalarda doğru ve efektif kullanılması ile belirtilen faktörlerden önemli derecede tasarruf sağlanmasına olanak sağlamaktadır (Erzin ve Turkoz, 2016).

Yapay sinir ağı (YSA) insan beyninin ve sinir sisteminin yapısını ve işlevlerini taklit eden en bilinen bilgi işleme sistemlerinden biridir (Dehghanbanadaki vd., 2018). İnsan beyni deneyimleyerek öğrenir. YSA da benzer şekilde insan beyninin özelliklerinden öğrenme yöntemi ile yeni bilgiler türetebilir ve girdi ile çıktı arasındaki karmaşık ilişkileri yüksek bir güven seviyesinde yakalayıp temsil edebilir (Polo-Mendoza vd., 2024). Deneyimden modelleme ve öğrenme yeteneği, YSA'lara çoğu geleneksel yöntemle göre bir avantaj sağlamıştır. Çünkü eldeki sorunu yöneten temel kurallar hakkında varsayımlarda bulunmaya gerek yoktur. Bu, veriler arasındaki ilişkilerin doğası hakkında önceden bilgi gerektiren çoğu geleneksel deneysel ve istatistiksel yöntemle zıttır. Bu nedenle, YSA'lar doğada aşırı değişkenlik gösteren çoğu geoteknik mühendislik malzemesinin karmaşık davranışını modellemek için oldukça uygundur (Shahin vd., 2008). YSA, uzun yıllardır karayolu mühendisliğinde oturma hesaplamaları, konsolidasyon, taban zemini ve temel taşıma gücü parametreleri gibi önemli mühendislik hesaplamalarında etkili bir şekilde çözümler üretmiştir (Chakraborty ve Goswami, 2017; Shahin vd., 2002; Zadhesh vd., 2015).

Bu tez çalışmasında UCS ve M_r deney verileri kullanılarak farklı YSA tahmin modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen YSA modellerinin performansını değerlendirmek amacıyla çoklu regresyon modelleri sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.2.2.9. Plaxis 2D ile taban zemini modelleme

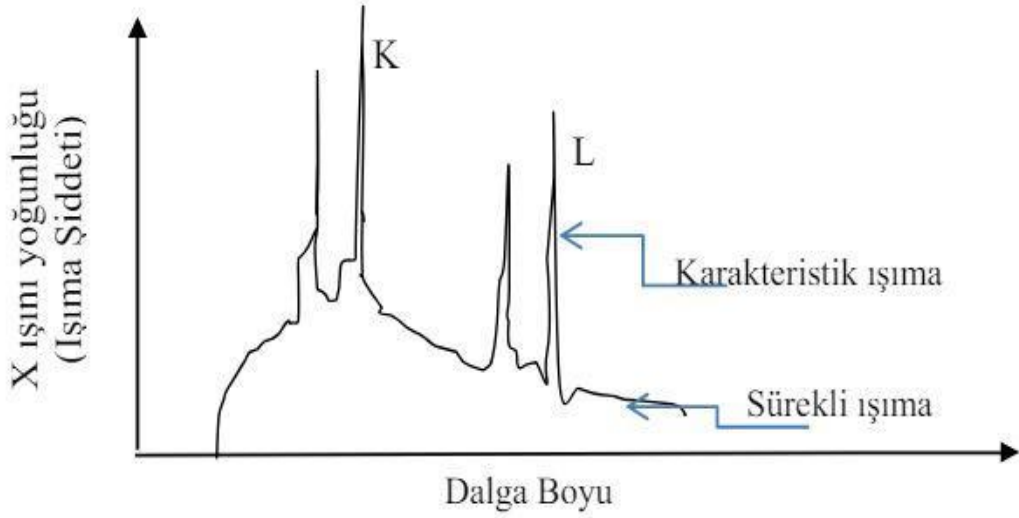
Günümüzde hızla gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı yaklaşımlar giderek artmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel ve mühendislik modellerde çok sık kullanılan analiz yöntemlerinden biridir. Geoteknik mühendisliğinde, arazi çalışmaları ve laboratuvarlarda yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin yardımıyla, çok karmaşık tasarımlarda sayısal yöntemlerin kullanımı önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Sonlu elemanlar yöntemindeki temel yaklaşım, karmaşık ve zor bir problemi basite indirgeyerek çözüme kavuşturmadır. Sonlu elemanlar yönteminin esas çözümler bölgesini çok sayıda basit, küçük ve birbirine bağlı sonlu eleman adı verilen bölgelere ayırmaktır (Çelebi, 2023). Kısacası, oldukça büyük ve karmaşık olan bir modeli daha kolay çözülebilen, birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçalara ayırarak çözümü daha kolay bir hale getirmektir. Düğüm noktalarının birbirine bağlanmasıyla oluşan ızgara şeklindeki yapıya ağ bir diğer deyişle mesh adı verilir. Bu mesh yapısı,

oluşturulan modelin belirli yükleme koşulları altındaki davranışını ortaya koyan malzeme bilgileri ile programlanmıştır. Oluşturulan düğüm noktaları modelin çalışma koşulları altında meydana gelen gerilme seviyelerini ortaya koyar. Modelin hesaplanan gerilme seviyesine bağlı olarak ilgili yük altındaki davranışı öngörülür (Korkut, 2021). Zeminlerin yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilebilir. Geoteknik mühendisliği problemlerinde yaygın olarak kullanılan Plaxis sonlu elemanlar programı ile iki ve üç boyutlu analizler yapılabilir. Genellikle Plaxis 2D modelleme daha hızlı ve basitleştirilmiş bir çözüm sağlar. Bu çalışmada KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminleri ile oluşturulan örnek karayolu kesitinin uygulanan trafik gerilmeleri altındaki davranışları Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile belirlenmiştir. Oluşturulan modellemede taban zeminlerinde meydana gelen yatay yer değiştirmeler, toplam yer değiştirmeler ve kayma gerilmeleri tespit edilmiştir.

3.2.2.10. İçyapı analizleri

Bu tez çalışmasında, zeminlerin KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu içyapısında meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDX) yöntemlerinden faydalanılmıştır.

X-ışını difraksiyon (XRD) yöntemi malzemelerin mikro yapı özelliklerini, kristallografik yapısını ve içerdiği faz yapısı hakkında bilgi edinmeye yarayan, X-ışını kırınım esasına dayanan hasarsız bir yöntemdir (Atum, 2024). X-ışınları, dalga boyu ultraviyolede daha küçük olan kısa dalga boylu elektromanyetik ışımadır. Dalga boyu tipik olarak 0.1-0.001 nm yani 100-1 pm civarındadır. X-ışınları çoğu cismin içine kolayca girebilmektedir. 1895 de Röntgen tarafından keşfedilmiş ve isimlendirilmiştir. X-ışınları, görünmeyen, yüksek giriciliğe sahip, görünür ışıktan daha kısa dalga boylu (yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgalardır (Bilgen, 2012). Tipik bir X-ışın kırınımı Şekil 3.26.'da görülmektedir (Bilgen, 2012). Işınlardan pik yaptıkları noktalardan yola çıkılarak malzemelerin mineralojik yapısı hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında zemin karışımlarının XRD analizi Kocaeli Üniversitesi Malzeme ve Metalürji laboratuvarında bulunan Şekil 3.28'de verilen XRD cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.28. Tipik bir X-ışını difraktometresi

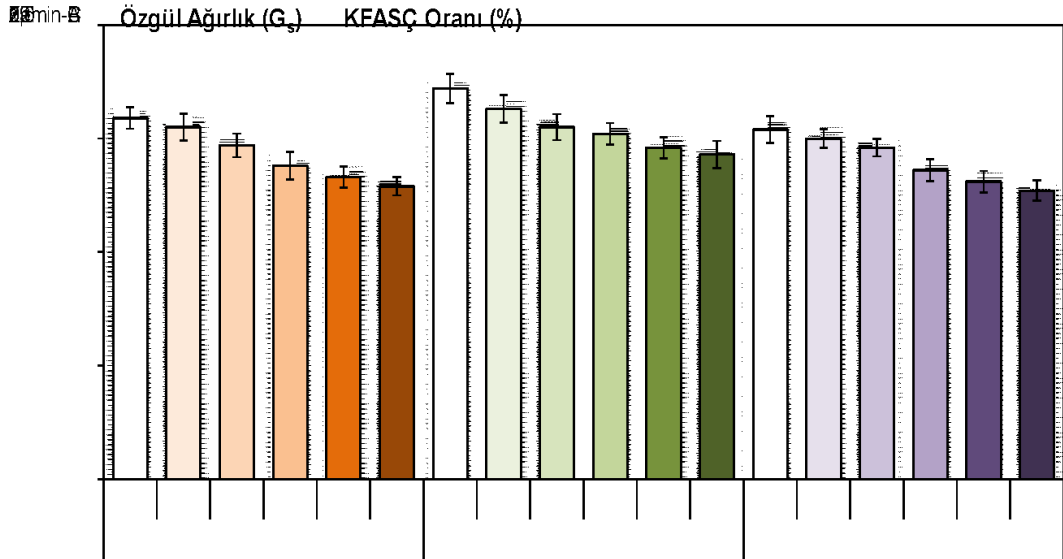
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzemelerden istenen bilgileri elde etmek için odaklanmış yüksek enerjili elektron huzmelerini kullanan güçlü bir büyütme aracıdır. Yüksek çözünürlüklü ve nanogram seviyesinde iki/üç boyutlu görüntüler elde etme yeteneğine sahip olan SEM, çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda çok yönlü bir araç olarak kabul edilmektedir. SEM, malzeme yüzeyinin topoğrafik haritalanması, malzemenin morfolojik ve elementel kompozisyonu gibi bilgilerin elde edilmesinde kullanılabilen bir cihazdır. Ayrıca SEM, malzemenin mikro yapısını, yüzey çatlaklarını tespit ve analiz etmek, kimyasal analizlerde bilgi edinmek, yüzey kirliliğini tespit etmek ve kristal yapılarını tanımlamak için de kullanılabilir. Bu nedenle SEM, yaşam bilimleri, biyoloji, jeoloji, tıbbi ve adli tıp, malzeme ve metalurji gibi alanlarda sıklıkla kullanılan çok yönlü bir cihazdır (Gökalp, 2021; Goldstein vd., 2017; Postek, 1997). Bu tez çalışmasında zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının SEM analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezinde Gerçekleştirilmiştir. EDX analizleri bir malzemedeki elementleri ve kimyasal bileşimi belirlemek için yaygın kullanılan bir teknik. Genellikle SEM analizleri ile birlikte kullanılır. XRD yöntemiyle tespit edilemeyen fazların elementel analizle tespit edilmesinde fayda sağlayan bir yöntemdir (Thambiratham vd., 2020).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde taban zeminlerinin KFASÇ ile iyileştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı deneysel çalışmalardan ve analizlerden elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar elde edilen veriler kullanarak UCS ve M_r değerlerini tahmin etmek amacıyla geliştirilen farklı yapay sinir ağları (YSA) modellerinden elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Bir sonlu elemanlar analizi programı olan Plaxis 2D ile taban zeminlerinin modellemesi gerçekleştirilmiş elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Son olarak zeminlerin KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu mikroyapısında meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım X-ışını spektrometresi (EDX) ve X-ışını difraksiyon (XRD) yöntemiyle incelenmiş elde edilen bulgular paylaşılmıştır.

4.1. Özgül Ağırlık Deneyi Bulguları

Zeminlerin farklı KFASÇ içeriği ile özgül ağırlık değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Özgül ağırlık değerlerinde KFASÇ içeriğiyle meydana gelen değişimler

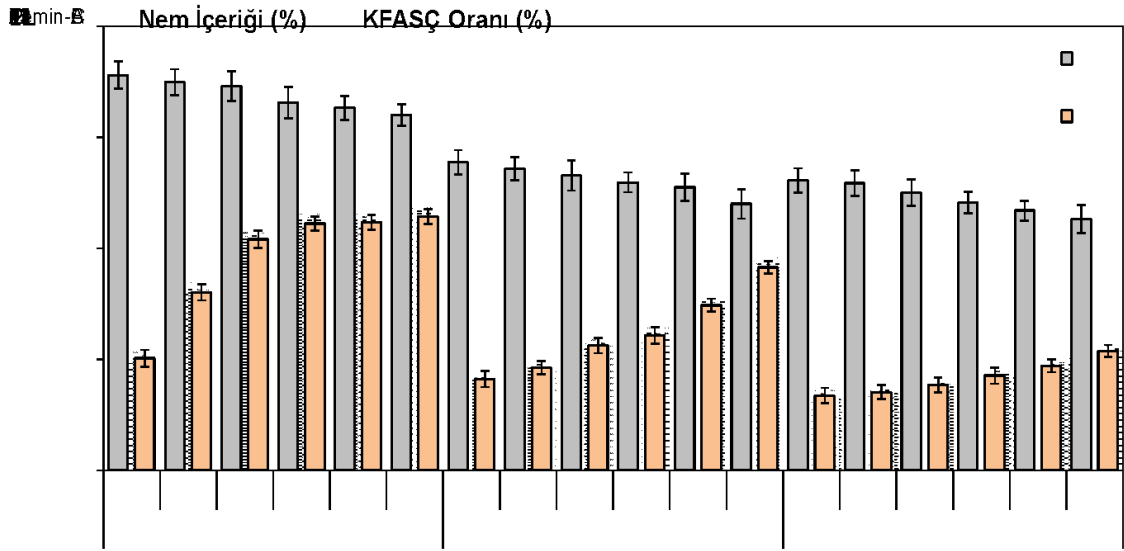
Çizelge 4.1. Özgöl ağırlık deneyi sonuçları

Zemin Türü	KFASÇ İçeriği (%)	Özgöl Ağırlık (Gs)
Zemin-A	0	2.59
	3	2.55
	6	2.47
	9	2.38
	12	2.33
	15	2.29
Zemin-B	0	2.72
	3	2.63
	6	2.55
	9	2.52
	12	2.46
	15	2.43
Zemin-C	0	2.54
	3	2.50
	6	2.46
	9	2.36
	12	2.31
	15	2.27

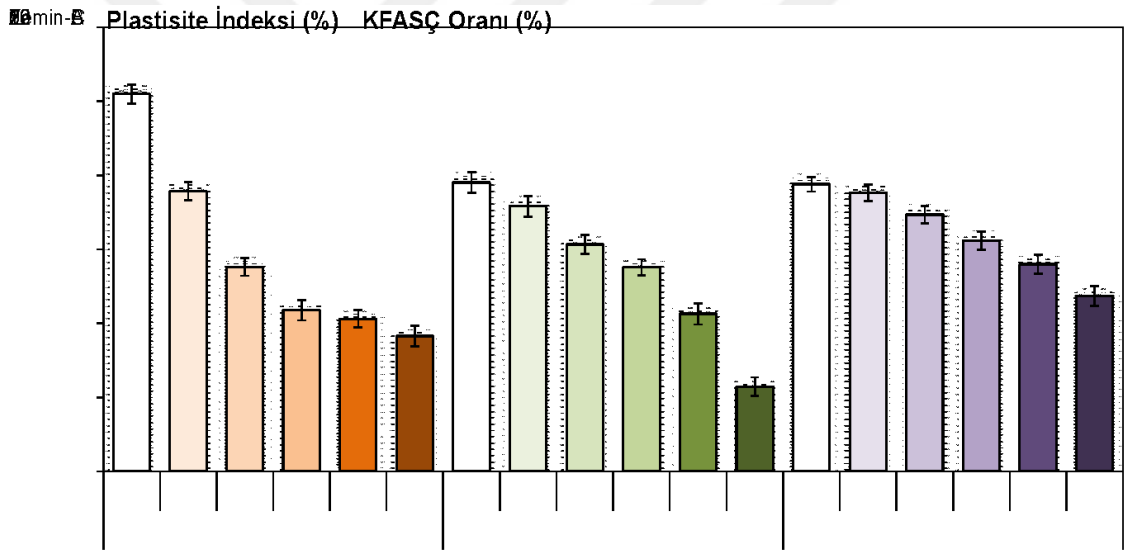
Zemin-A, Zemin-B, Zemin-C ve KFASÇ'nin özgöl ağırlıkları sırasıyla 2.59, 2.72, 2.54 ve 2.27 olarak belirlenmiştir. KFASÇ ilavesiyle zeminlerin özgöl ağırlıkları, KFASÇ'nin daha düşük özgöl ağırlığa sahip olmasından ötürü saf zeminlere nispeten giderek azalmıştır. Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin özgöl ağırlıkları %15 oranında KFASÇ eklenmesiyle sırasıyla 2.29, 2.43 ve 2.27'ye düşmüştür.

4.2. Atterberg Limitleri Deneyi Bulguları

Zemin ve Zemin-KFASÇ karışımlarının Atterberg limitleri deney bulguları Şekil 4.2-4.3 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Likit limit ve plastik limit değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi



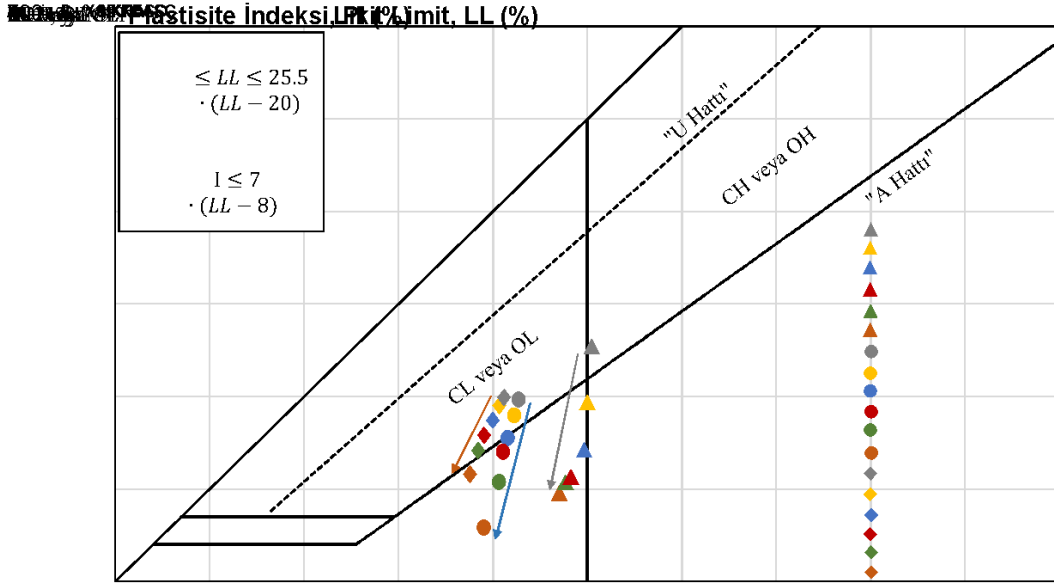
Şekil 4.3. Plastisite indeksi değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi

Çizelge 4.2. Atterberg limitleri deney sonuçları

Zemin Türü	KFASÇ İçeriği (%)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndeksi (%)
Zemin-A	0	50.60	25.10	25.50
	3	49.97	31.04	18.93
	6	49.63	35.82	13.81
	9	48.12	37.24	10.88
	12	47.65	37.35	10.30
	15	47.01	37.87	9.14
Zemin-B	0	42.75	23.23	19.52
	3	42.16	24.25	17.91
	6	41.57	26.24	15.33
	9	40.94	27.16	13.78
	12	40.52	29.88	10.64
	15	39.01	33.29	5.72
Zemin-C	0	41.13	21.73	19.40
	3	40.87	22.05	18.82
	6	40.03	22.68	17.35
	9	39.12	23.54	15.58
	12	38.41	24.42	13.99
	15	37.63	25.77	11.86

Şekil 4.2-4.3 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde KFASÇ içeriği arttıkça tüm zeminlerin istikrarlı bir şekilde LL değerinin azaldığı PL değerinin arttığı görülmüştür. Bunun sonucunda PI değerinin azaldığı görülmektedir. Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin LL değeri %15 KFASÇ eklenmesiyle sırasıyla %50.60'tan %47.01'e; %42.75'ten %39.01'e; %41.13'ten %37.63'e düşmüştür. Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin PI değeri ise %15 KFASÇ eklenmesiyle sırasıyla %25.50'den %9.14'e; %19.52'den %5.72'ye; %19.40'tan %11.86'ya düşmüştür.

LL değerinde elde edilen azalma ile PI değerinde görülen azalma, zemin ile KFASÇ taneleri arasındaki meydana gelen katyon değişiminin neden olduğu flokülasyon ve aglomerasyondan kaynaklanmış, bu da daha iri boyutlu parçacıkların oluşmasına ve dolayısıyla plastisitenin azalmasına dolayısıyla işlenebilirliğin artmasına neden olmuştur. Benzer sonuçlar Teja vd. (2016)'nın yapmış oldukları çalışmada da elde edilmiş artan kâğıt çamuru içeriği ile genleşen killi zeminin LL ve PI değerleri azalmıştır. Ayrıca zeminlerin PI değerlerinde görülen düşüş KFASÇ'nin kohesiv olmayan ve non-plastik yapısına bağlanabilir. Taban zeminlerinin Casagrande plastisite kartındaki konumlarında KFASÇ içeriğiyle meydana gelen değişimleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Zeminlerin Casagrande plastisite kartındaki konumları

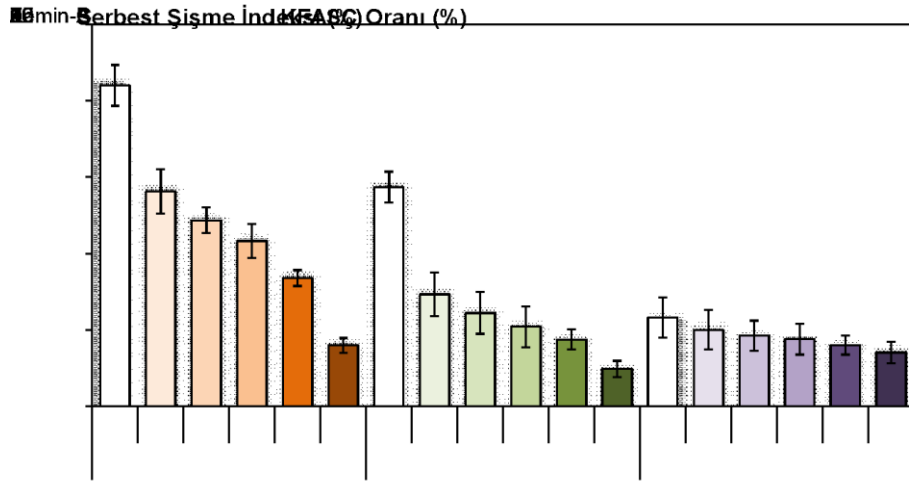
Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere Zemin-A CH, Zemin-B ve Zemin-C ise CL olarak sınıflandırılmaktadır. Artan KFASÇ içeriği ile her bir zeminin plastisite kartındaki pozisyonunun ML bölgesine doğru kaydığı görülmektedir. Bu aynı zamanda KFASÇ'nin bünyesinde bulunan kalsiyuma bağlı meydana gelen flokülasyon ve aglomerasyon sonucu toprak karışımının boyutunun daha iri hale geldiğini kanıtlamaktadır.

4.3. Şişme Deneyleri Bulguları

Bu tez çalışmasında KFASÇ'nin taban zeminlerinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak amacıyla Bölüm 3.2'de değinildiği gibi çeşitli standartlarda belirtilen farklı deney metotları izlenmiştir. Saf zeminlerin ve çeşitli oranlarda KFASÇ içeren zemin-KFASÇ karışımlarının şişme potansiyelleri serbest şişme indeksi deneyi, tek eksenli şişme deneyi ve şişme potansiyeli deneyi gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir.

4.3.1. Serbest şişme indeksi deneyi

Zeminlerin serbest şişme indeksi değerlerinde KFASÇ içeriğiyle meydana gelen değişimler Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

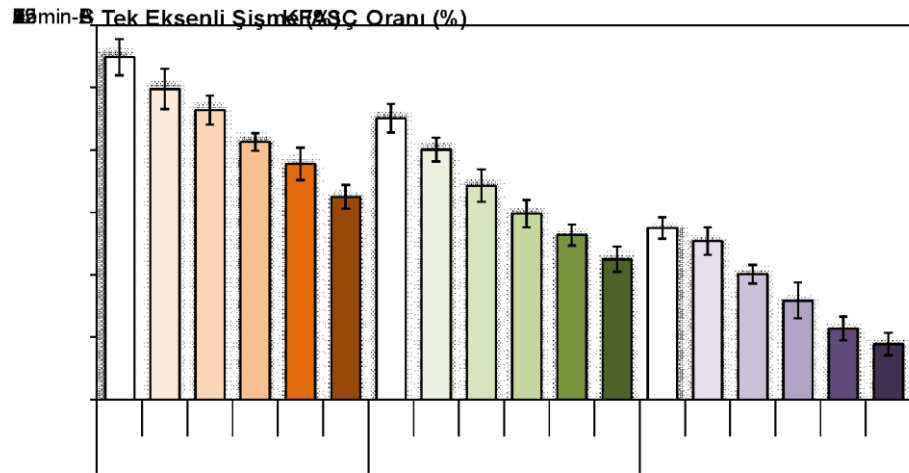


Şekil 4.5. Zeminlerin serbest şişme indeksi değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi

Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin serbest şişme indeksi sırasıyla %42.00, %28.71 ve %11.63 olarak belirlenmiştir. Artan KFASÇ içeriğiyle zeminlerin serbest şişme indeksi değerlerinde bir düşüş trendi gözlemlenmiştir. %15 KFASÇ içeriğiyle Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin serbest şişme indeksi sırasıyla %7.97, %4.86 ve %7.02'ye düşmüştür.

4.3.2. Tek eksenli şişme deneyi

Zeminlerin tek eksenli şişme değerlerinde farklı KFASÇ içeriğiyle meydana gelen değişimler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

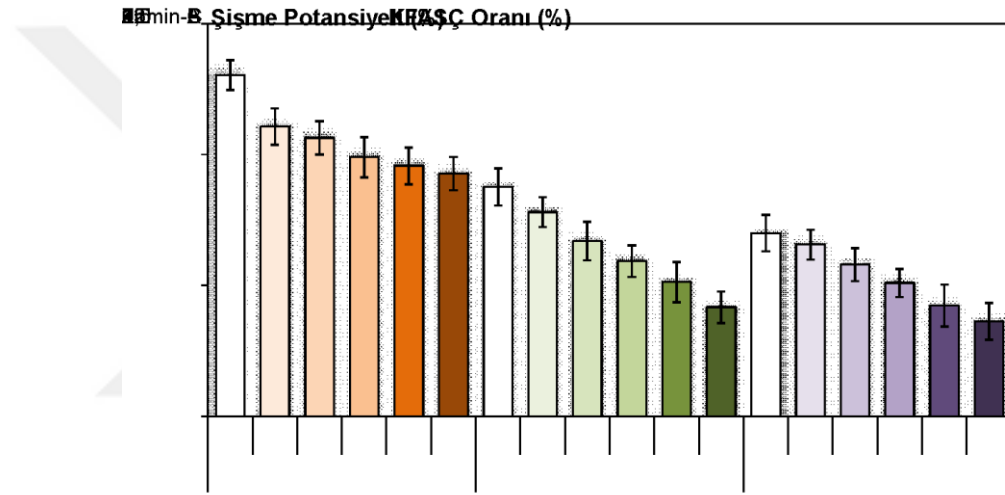


Şekil 4.6. Zeminlerin tek eksenli şişme değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi

Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin tek eksenli şişme değerleri sırasıyla %6.49, %5.51 ve %3.75 olarak belirlenmiştir. Artan KFASÇ içeriğiyle zeminlerin tek eksenli şişme indeksi değerlerinde bir düşüş trendi gözlemlenmiştir. %15 KFASÇ içeriğiyle Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin tek eksenli şişme değerleri sırasıyla %4.25, %3.25 ve %1.89'a düşmüştür.

4.3.3. Şişme potansiyeli tespiti deneyi

Zeminlerin çeşitli oranlarda KFASÇ içeriğiyle şişme potansiyeli değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Zeminlerin şişme potansiyellerinin KFASÇ içeriği ile değişimi

Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin şişme potansiyelleri sırasıyla %3.91, %2.63 ve %2.10 olarak belirlenmiştir. Artan KFASÇ içeriğiyle zeminlerin şişme potansiyeli değerlerinde bir düşüş trendi gözlemlenmiştir. %15 KFASÇ içeriğiyle Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin şişme potansiyeli değerleri sırasıyla %2.78, %1.25 ve %1.09'a düşmüştür. Zeminlerin şişme parametrelerinin değerlendirildiği deneylerin sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

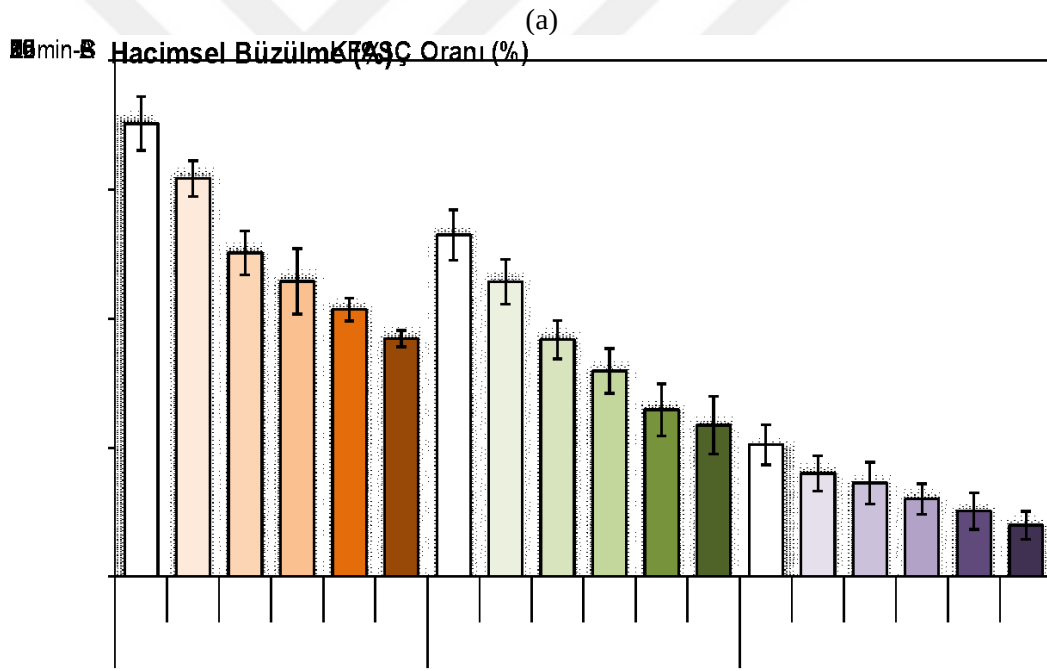
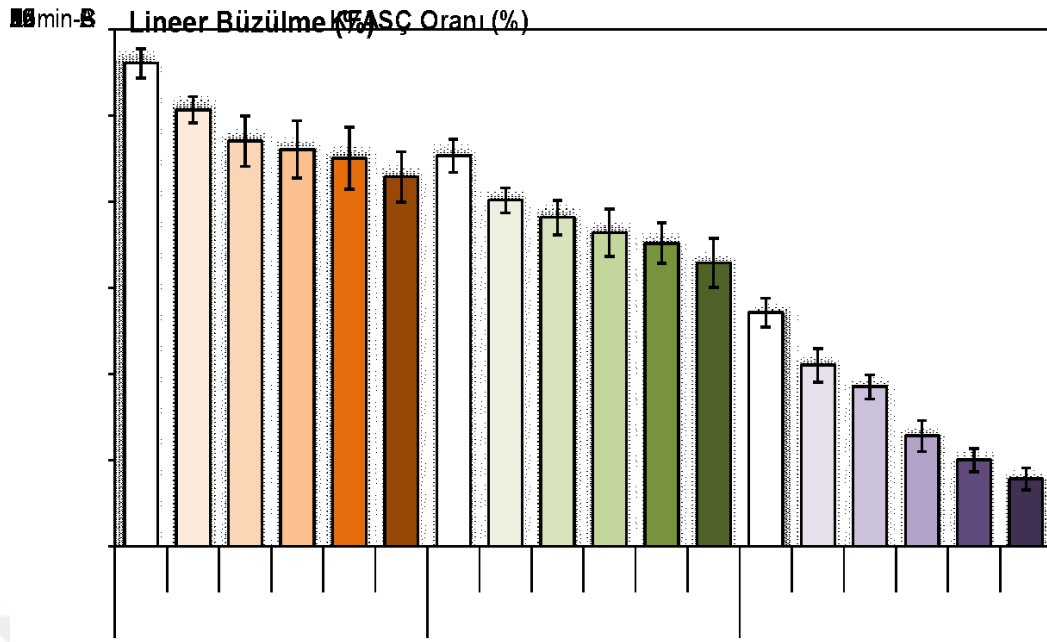
Çizelge 4.3. Şişme parametrelerinin değerlendirildiği deney sonuçları

Zemin Türü	KFASÇ Oranı, %	Serbest Şişme İndeksi, %	Tek Eksenli Şişme, %	Şişme Potansiyeli, %
Zemin-A	0	42.00	6.49	3.91
	3	28.12	5.98	3.32
	6	24.35	5.64	3.19
	9	21.63	5.13	2.97
	12	16.80	4.78	2.87
	15	7.97	4.25	2.78
Zemin-B	0	28.71	5.51	2.63
	3	14.65	5.01	2.34
	6	12.22	4.43	2.01
	9	10.41	3.98	1.78
	12	8.74	3.64	1.54
	15	4.86	3.25	1.25
Zemin-C	0	11.63	3.75	2.10
	3	10.01	3.54	1.97
	6	9.24	3.01	1.74
	9	8.78	2.59	1.53
	12	8.01	2.14	1.27
	15	7.02	1.89	1.09

Çizelge 4.3'te verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, zeminlerin şişme parametrelerinde KFASÇ içeriği elde edilen düşüş, iyileşme ile zeminde meydana gelen kation değişimi ve flokülasyon sonucu zemin karışımında daha iri tanelerin oluşmasına bağlanabilir. Ayrıca, KFASÇ tanelerinin non-plastik ve genleşme hassasiyeti olmayan yapısından ötürü zeminlerin şişme potansiyellerinde azalma görülmüştür. Ek olarak, zemin ve KFASÇ taneleri arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar sonucu çimentolaşma ile beraber zeminlerin şişme potansiyellerinde düşüş elde edilmesinin sebeplerinden biridir. Teja vd. (2016)'nın yapmış oldukları çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş, artan kâğıt çamuru içeriği ile genleşen killi zeminin şişme potansiyelleri sürekli olarak azalmıştır. KFASÇ içeriği ile taban zeminlerin şişme potansiyelinde elde edilen düşüş yol kaplamalarında hacimsel dalgalanmalar sonucu meydana gelebilecek hasarların önüne geçilmesi açısından önem arz etmektedir.

4.4. Lineer (Doğrusal) ve Hacimsel Büzülme Deneyi Bulguları

Zeminlerin farklı KFASÇ içeriğiyle lineer (doğrusal) ve hacimsel büzülme değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.8 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.



(b)

Şekil 4.8. Zeminlerin lineer (a) ve hacimsel (b) büzölme değerlerinin KFASÇ içeriğiyle değişimi

Çizelge 4.4. Lineer ve hacimsel büzülme deneyi sonuçları

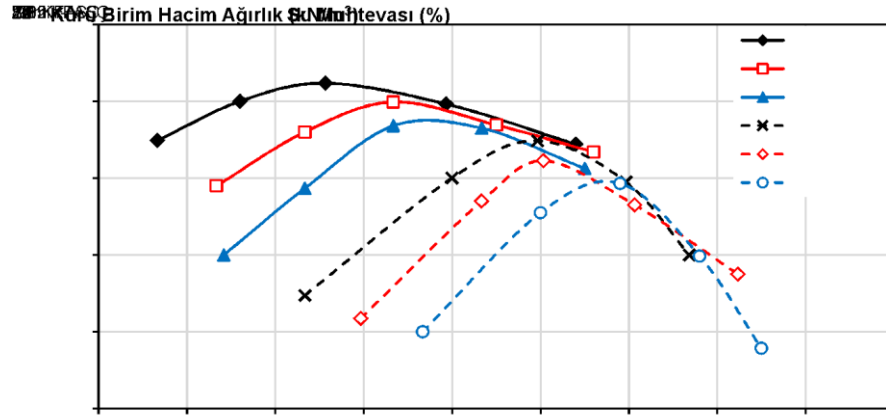
Zemin Türü	KFASÇ Oranı, %	Lineer Büzülme, %	Hacimsel Büzülme, %
Zemin-A	0	13.22	22.56
	3	12.14	20.43
	6	11.41	17.55
	9	11.22	16.44
	12	11.02	15.36
	15	10.58	14.23
Zemin-B	0	11.07	18.24
	3	10.04	16.43
	6	9.64	14.19
	9	9.28	12.98
	12	9.04	11.47
	15	8.58	10.87
Zemin-C	0	7.43	10.12
	3	6.21	9.01
	6	5.71	8.63
	9	4.57	8.01
	12	4.01	7.55
	15	3.57	6.99

Şekil 4.8 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C'nin lineer ve hacimsel büzülme oranları sırasıyla %13.22 ve %22.56; %11.07 ve %18.24; ve %7.43 ve %10.12 olarak belirlenmiştir. Zeminlere %15 oranında KFASÇ eklenmesiyle zeminlerin lineer ve hacimsel büzülme değerleri Zemin-A, Zemin-B ve Zemin-C için sırasıyla %10.58 ve %14.23; %11.07 ve %18.24; ve %7.43 ve %10.12'ye düşmüştür. Zemin ve Zemin-KFASÇ karışımlarının lineer (doğrusal) ve hacimsel büzülme deney sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere artan KFASÇ içeriği zeminde meydana gelen katyon değişimi ve flokülasyon ile beraber zeminin plastisitesinin düşmesi sonucu lineer ve hacimsel büzülme oranında istikrarlı bir düşüş elde edilmiştir. KFASÇ içeriği ile taban zeminlerin büzülme potansiyelinde elde edilen düşüş yol kaplamalarında büzülme ile ortaya çıkabilecek hacimsel dalgalanmalar sonucu meydana gelebilecek hasarların önüne geçilmesi açısından önemlidir.

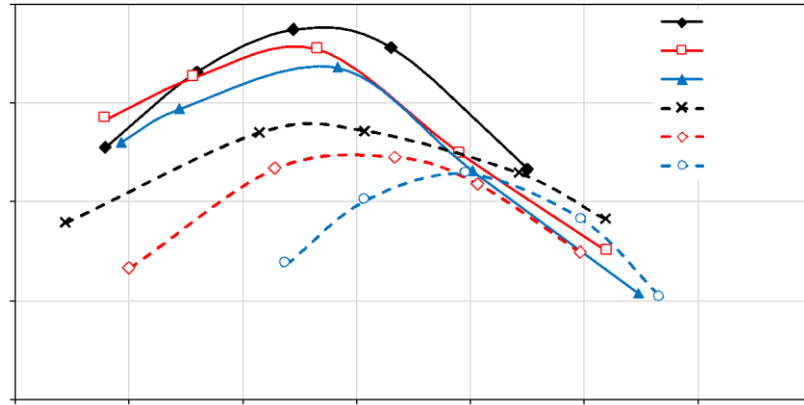
4.5. Kompaksiyon Deneyi Bulguları

Modifiye proktor yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kompaksiyon deneyi ile her bir zemin karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlık (V_{mak}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.9'da zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının farklı su muhtevalarında kuru birim hacim ağırlıklarında meydana gelen değişimler verilmiştir. KFASÇ içeriği ile zeminlerin V_{mak} ve w_{opt} değerlerinde meydana

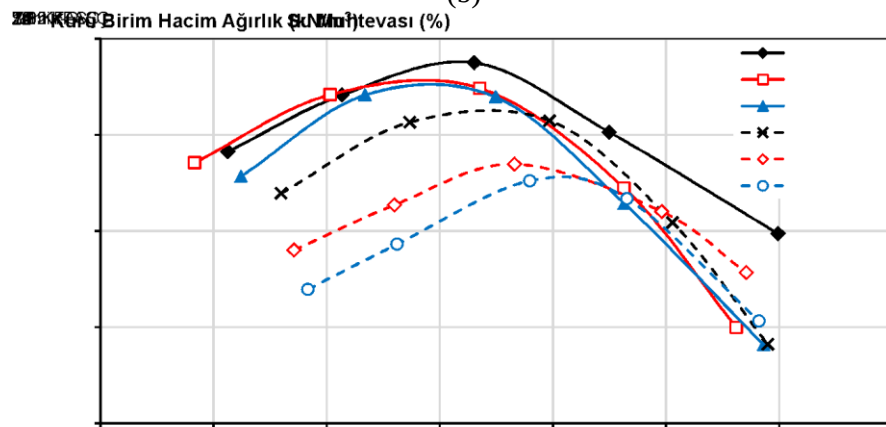
gelen değişim Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Kompaksiyon deneyi sonuçları Çizelge 4.5’te sunulmuştur.



(a)

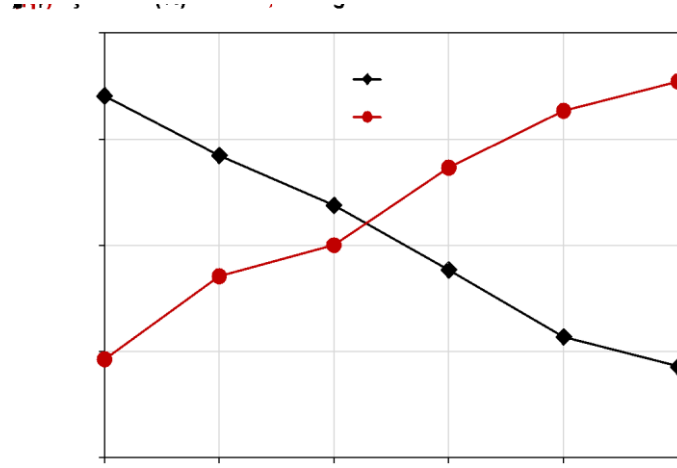


(b)

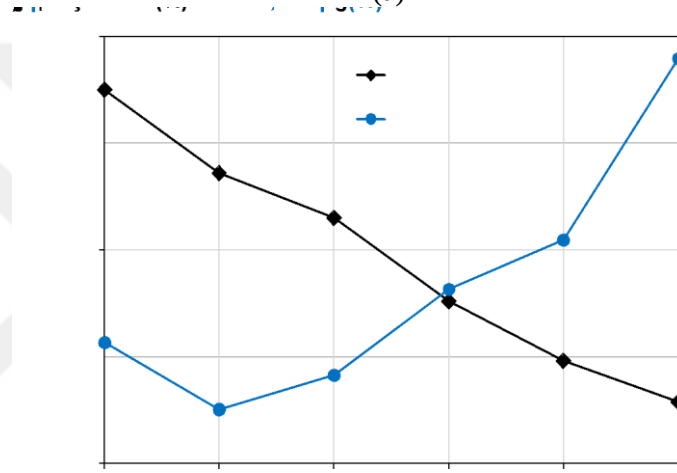


(c)

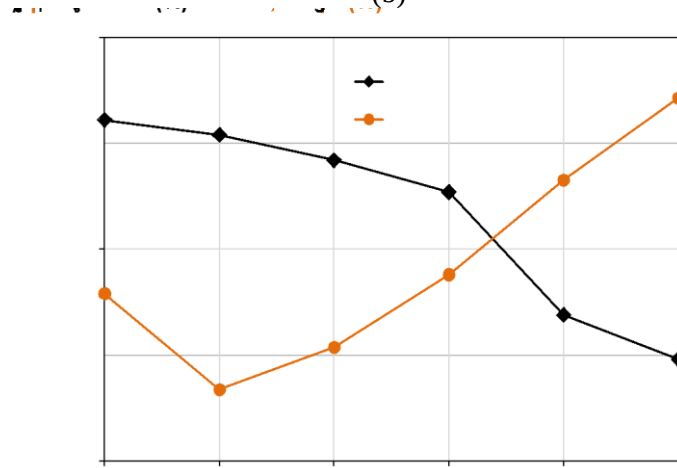
Şekil 4.9. Zemin-A (a), Zemin (b) ve Zemin- C (c)’nin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkisi



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.10. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin $V_{\max}$ ve w_{opt} değerlerinin Kfasç içeriği ile değişimi

Çizelge 4.5. Kompaksiyon deneyi sonuçları

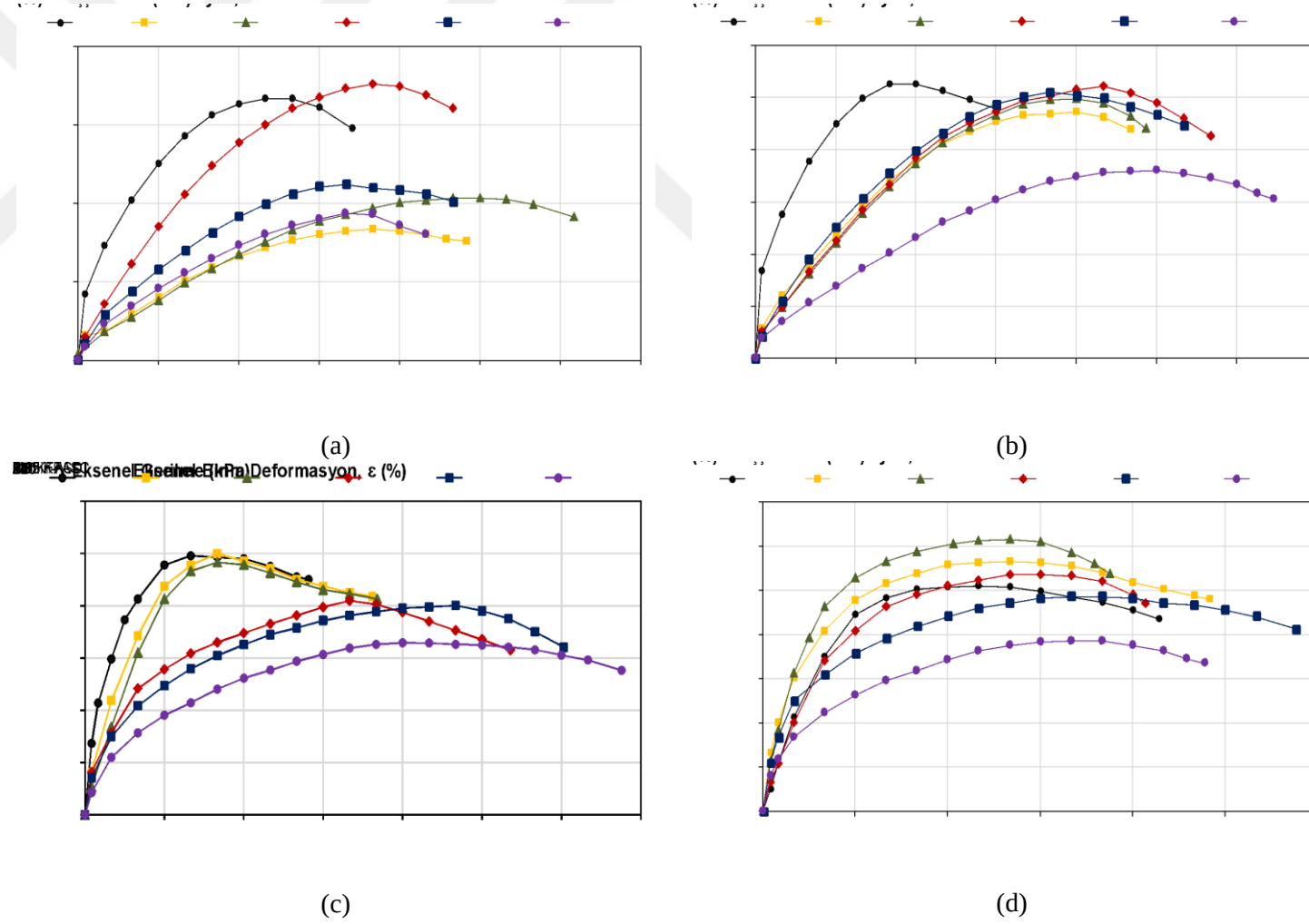
Zemin Türü	KFASÇ Oranı, %	γ_{mak} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
Zemin-A	0	16.41	20.79
	3	15.85	23.13
	6	15.38	24.01
	9	14.77	26.20
	12	14.14	27.81
	15	13.86	28.64
Zemin-B	0	17.75	15.70
	3	17.36	14.76
	6	17.15	15.24
	9	16.76	16.45
	12	16.48	17.14
	15	16.29	19.69
Zemin-C	0	15.61	19.37
	3	15.54	18.01
	6	15.42	18.61
	9	15.27	19.64
	12	14.69	20.98
	15	14.48	22.14

Şekil 4.9-4.10 ve Çizelge 4.5'te verilen bulgular incelendiğinde Zemin-A'nın γ_{mak} değeri KFASÇ içeriği arttıkça azalırken w_{opt} değeri ise istikrarlı bir şekilde artmıştır. Zemin-A'nın γ_{mak} 'si %15 KFASÇ eklenmesiyle 16.41'den 13.86 kN/m³'e düşerken w_{opt} değeri ise %20.79'dan %28.64'e yükselmiştir. Zemin-B ve Zemin-C'nin γ_{mak} değeri her bir KFASÇ içeriği ile sürekli olarak azalmıştır. w_{opt} değerleri ise %3 ve %6 KFASÇ eklenmesiyle saf katkısız zemine göre önce azalmış daha sonra artan KFASÇ içeriğiyle artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C'nin %15 KFASÇ içeriğiyle γ_{mak} 'si sırasıyla 17.75'den 16.29 kN/m³ ve 15.61'den 14.48 kN/m³'e düşmüştür. Zemin-B'nin w_{opt} değerleri %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle sırasıyla %15.70'ten %14.76 ve %15.24'e düşerken %15 KFASÇ eklenmesiyle %19.69'a yükselmiştir. Zemin-C'nin w_{opt} değerleri ise %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle sırasıyla %19.37'den %18.01 ve %18.61'e düşerken %15 KFASÇ eklenmesiyle %22.14'e yükselmiştir. γ_{mak} gözlemlenen düşüş KFASÇ katkısının her bir zemin ile karşılaştırıldığında nispeten daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasına bağlanabilir. Ayrıca, KFASÇ'nin zeminlere göre nispeten daha yüksek su emme eğiliminde olması sebebiyle karışımın w_{opt} değerlerinde genellikle yükseliş gözlemlenmiştir. Ancak %3 ve %6 KFASÇ içeriği ile Zemin-B ve Zemin-C'de bu değerlerde zemin parçacıklarının yeniden düzenlenip daha kompakt ve az boşluklu bir yapı elde edilmesiyle w_{opt} değerleri düşmüştür. Benzer sonuçlar Kumar ve Gupta'nın (2016) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada da elde edilmiş, artan kâğıt çamuru içeriği ile kil zeminin γ_{mak} değeri düşmüş, w_{opt} değeri ise yükselmiştir.

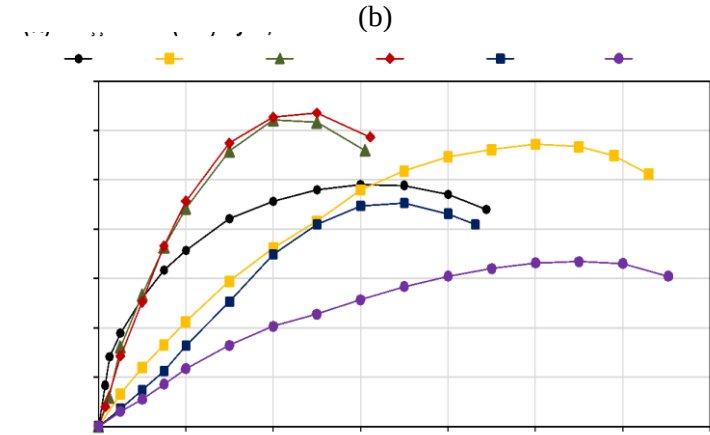
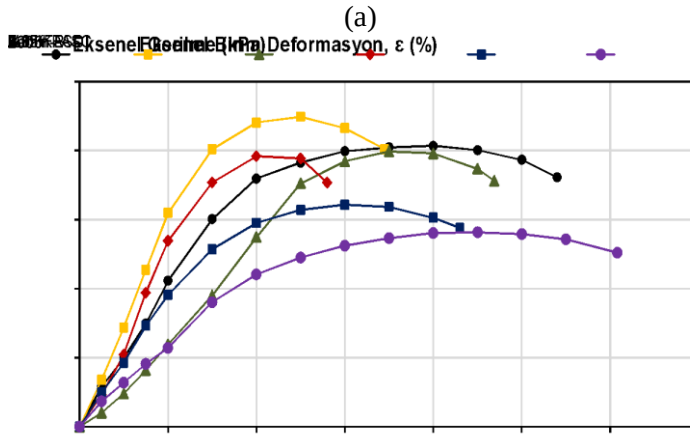
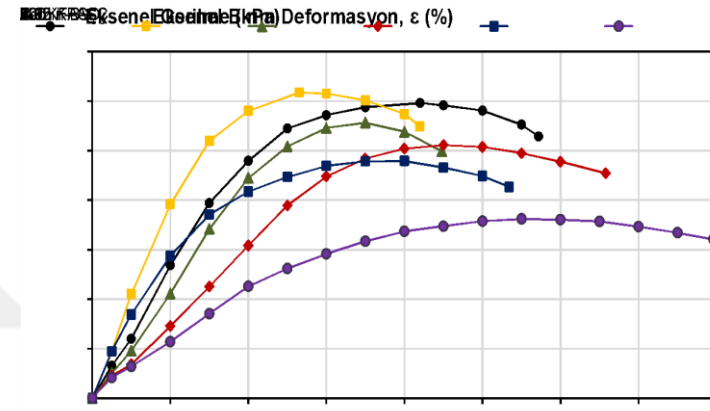
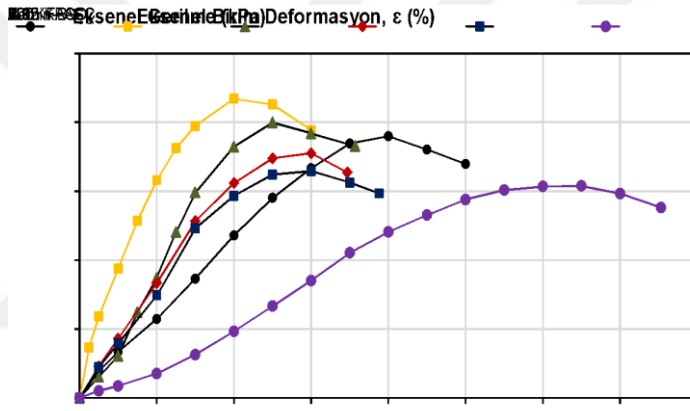
4.6. UCS Deneyi Bulguları

Zemin ve Zemin-KFASÇ karışımlarının farklı kür sürelerindeki (0, 7, 28 ve 90 gün) eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafikleri Şekil 4.11-Şekil 4.13'te verilmiştir.

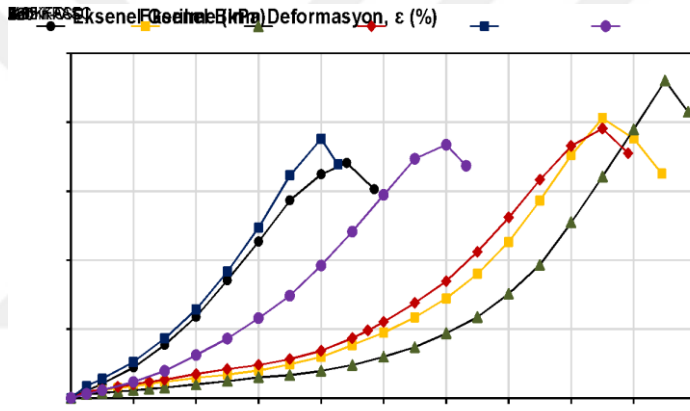




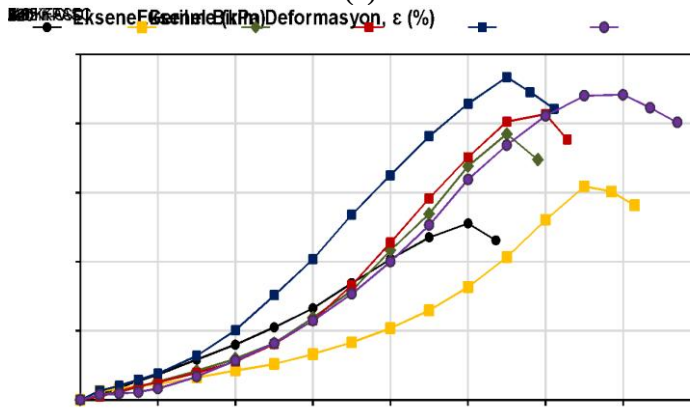
Şekil 4.11. Küre tabi tutulmuş Zemin-A-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))



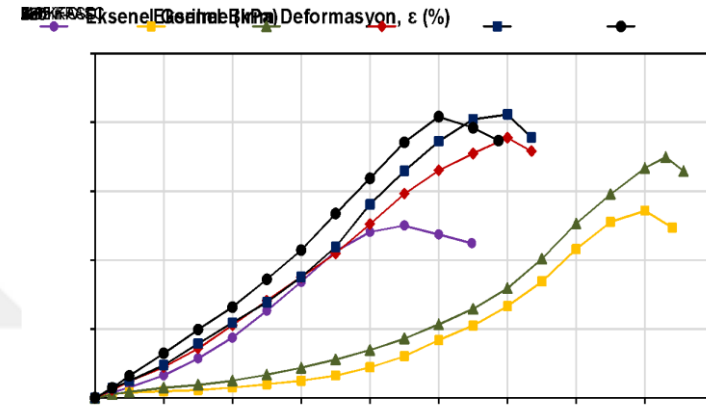
Şekil 4.12. Küre tabi tutulmuş Zemin-B-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))



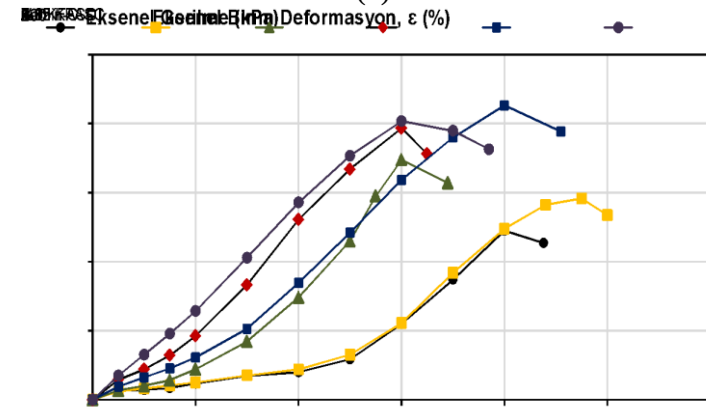
(a)



(c)



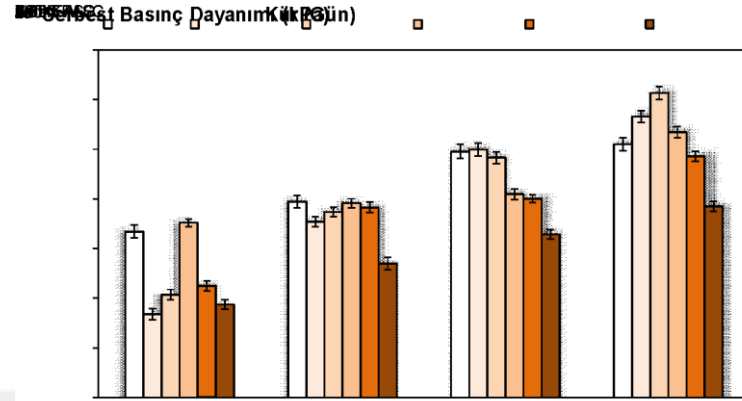
(b)



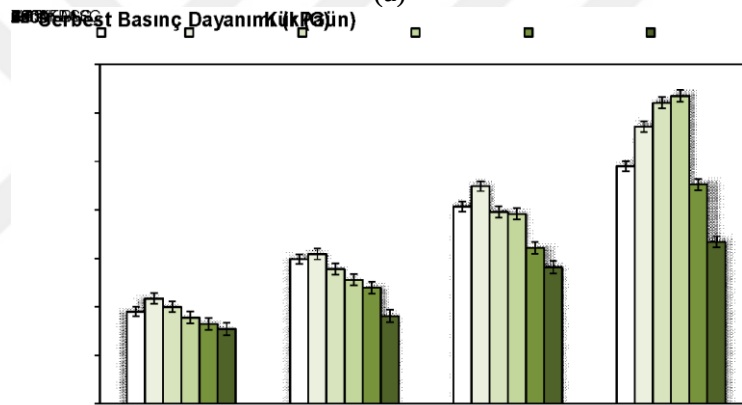
(d)

Şekil 4.13. Küre tabi tutulmuş Zemin-C-KFASÇ numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri (0 gün (a), 7 gün (b), 28 gün (c), 90 gün (d))

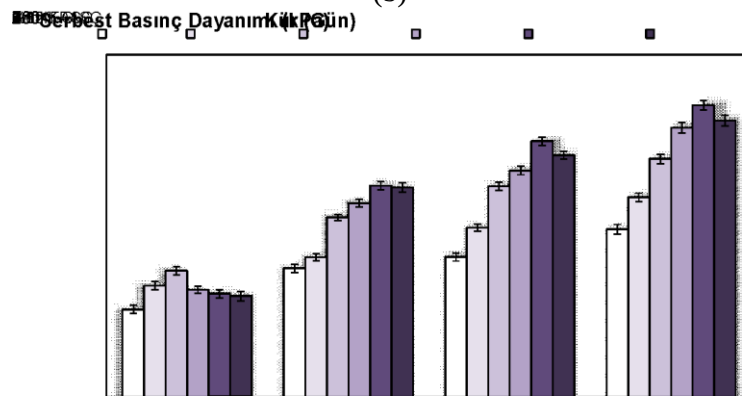
Zeminlerin farklı kür süreleri ve KFASÇ oranları ile UCS değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.14'te ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.14. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFASÇ içeriği ve kür süreleri ile UCS değerlerinde meydana gelen değişimler

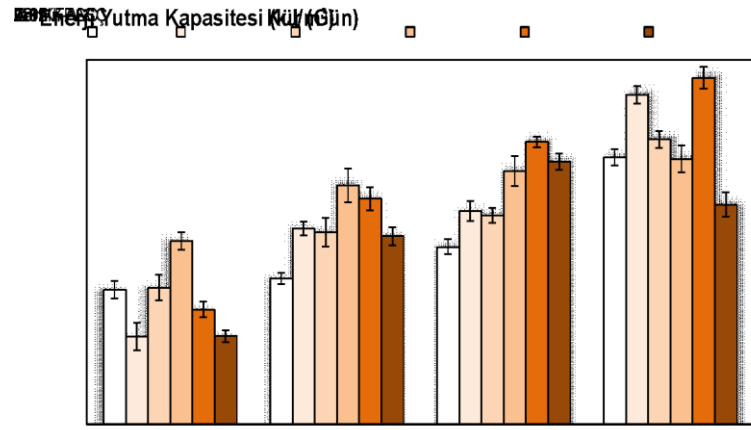
Çizelge 4.6. UCS deneyi sonuçları

Karışımlar	Kür (Gün)			
	0	7	28	90
	UCS (kPa)			
Zemin-A	133.74	157.82	198.12	203.98
Zemin-A + %3 KFASÇ	67.14	141.63	199.85	226.28
Zemin-A + %6 KFASÇ	82.87	149.40	193.23	245.44
Zemin-A + %9 KFASÇ	140.85	156.54	163.78	213.77
Zemin-A + %12 KFASÇ	89.89	153.13	160.12	194.27
Zemin-A + %15 KFASÇ	74.96	107.95	131.58	153.94
Zemin-B	379.87	596.36	813.72	980.50
Zemin-B + %3 KFASÇ	434.30	617.52	898.03	1144.0
Zemin-B + %6 KFASÇ	399.58	556.48	791.78	1241.9
Zemin-B + %9 KFASÇ	355.09	511.27	783.85	1270.7
Zemin-B + %12 KFASÇ	329.39	479.29	643.16	905.10
Zemin-B + %15 KFASÇ	307.82	362.07	563.31	667.91
Zemin-C	127.48	187.68	204.32	244.81
Zemin-C + %3 KFASÇ	162.44	203.75	247.13	291.65
Zemin-C + %6 KFASÇ	184.11	262.12	307.81	347.73
Zemin-C + %9 KFASÇ	156.38	283.23	330.74	393.36
Zemin-C + %12 KFASÇ	150.37	308.64	373.78	426.30
Zemin-C + %15 KFASÇ	146.93	306.08	353.25	403.61

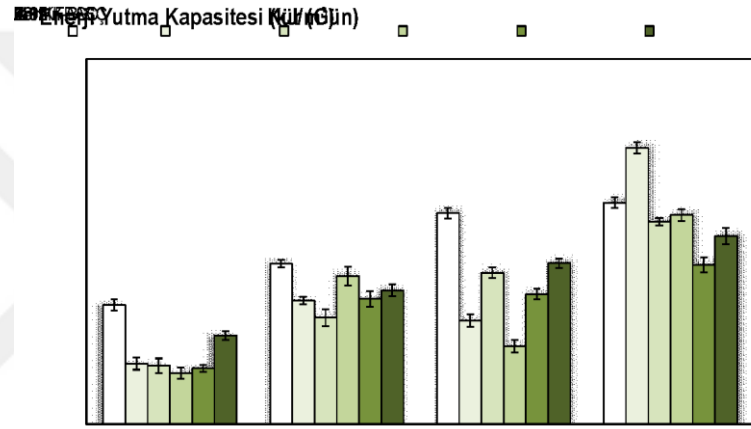
Zemin karışımlarının UCS deneyi sonuçları incelendiğinde zeminlerin UCS dayanımının KFASÇ içeriğinden ve kür sürelerinden etkilendiği görülmektedir. Kürlenmemiş numuneler içerisinde Zemin-A'nın 140.85 kPa ile en yüksek UCS değerine %9 KFASÇ içeriği ile ulaştığı görülmüştür. Zemin-B için kürlenmemiş numuneler arasında en yüksek UCS dayanımı 434.30 kPa ile %3 KFASÇ eklenen karışım ile elde edilirken Zemin-C için ise en yüksek dayanım 184.11 kPa ile %6 KFASÇ eklenen numune ile elde edilmiştir. Kür süresi uzadıkça zemin karışımlarının UCS değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Zemin-A için maksimum UCS değeri 245.44 kPa ile %6 KFASÇ eklenen numune ile 90 gün kür sonunda elde edilmiştir. Zemin-B için en yüksek UCS değeri 90 gün kür sonunda %9 KFASÇ eklenen numune ile 1270.7 kPa olarak elde

edilmiştir. Zemin-C için ise maksimum UCS 90 gün kür sonunda %12 eklenen KFASÇ numunesi ile 426.30 kPa olarak elde edilmiştir. Maksimum UCS değerinin her bir zeminde farklı KFASÇ oranı ile elde edilmesi bu oranda eklenen atık parçacıkları ile killi zemin arasındaki kohezyonun artması ve böylece danelerin birbirine güçlü bir şekilde bağlanması olarak açıklanabilir. Ayrıca, artan kür süresi ile beraber karışımların UCS değerinin artması KFASÇ ile zemin daneleri arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar ile çimentolaşma sonucu zemin karışımlarının taşıma gücünün artmasına bağlanabilmektedir. Benzer sonuçlar Kumar ve Gupta (2016), Bawa vd. (2017) ve Prakash ve Raveendran (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da elde edilmiştir, kâğıt çamuru ile genişlen killi zeminlerin UCS değerinin bir noktaya kadar iyileştirilebildiği görülmüştür. UCS deneyinde belirli bir oranda KFASÇ içeriği ile daha stabil ve taşıma gücü yüksek numunelerin elde edilmesi yol kaplamalarının trafik ve çevresel yüklerin etkisi altında göstereceği mukavemet artacağından deney sonuçları önem arz etmektedir.

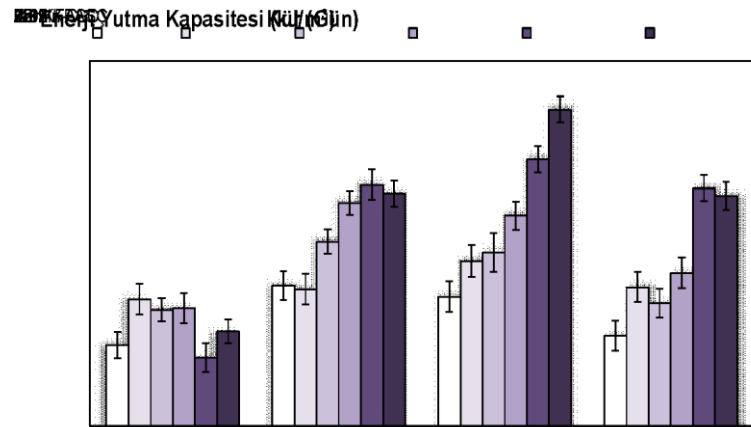
UCS deneyi ile elde edilen gerilme-deformasyon grafiğinden hesaplanan enerji yutma kapasitesinin KFASÇ içeriği ve farklı kür süreleri ile olan değişimi Şekil 4.15'te verilmiştir. Her bir karışımın farklı kür süreleri sonundaki enerji yutma kapasiteleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.15. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFAŞÇ içeriği ve kür süreleri ile enerji yutma kapasitelerinde meydana gelen değişimler

Çizelge 4.7. Enerji yutma kapasitesi değerleri

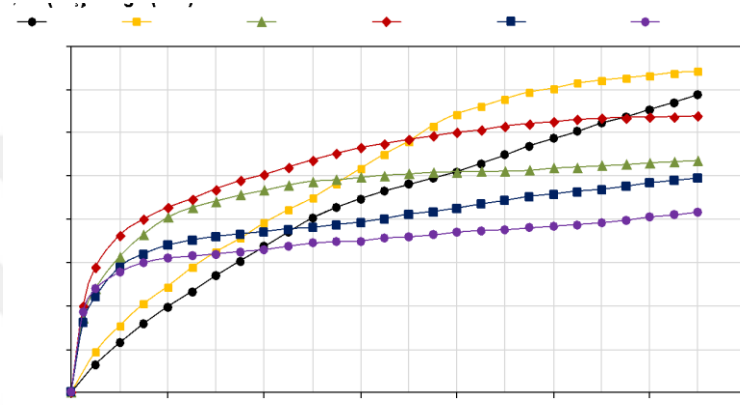
Karışımlar	Kür (Gün)			
	0	7	28	90
	Enerji Yutma Kapasitesi (kJ/m ³)			
Zemin-A	11.06	12.01	14.60	21.99
Zemin-A + %3 KFASÇ	7.20	16.12	17.55	27.14
Zemin-A + %6 KFASÇ	11.25	15.82	17.21	23.46
Zemin-A + %9 KFASÇ	15.08	19.68	20.84	38.45
Zemin-A + %12 KFASÇ	9.45	18.57	23.25	28.53
Zemin-A + %15 KFASÇ	7.26	15.48	21.62	18.09
Zemin-B	19.54	26.37	34.66	36.38
Zemin-B + %3 KFASÇ	9.95	20.29	17.00	52.41
Zemin-B + %6 KFASÇ	9.60	17.50	24.87	33.27
Zemin-B + %9 KFASÇ	8.40	24.32	12.79	34.35
Zemin-B + %12 KFASÇ	9.14	20.56	21.35	26.18
Zemin-B + %15 KFASÇ	14.56	21.97	26.48	30.89
Zemin-C	3.32	5.78	5.32	3.71
Zemin-C + %3 KFASÇ	5.21	5.63	6.79	5.71
Zemin-C + %6 KFASÇ	4.78	7.58	7.14	5.05
Zemin-C + %9 KFASÇ	4.85	9.17	8.65	6.30
Zemin-C + %12 KFASÇ	2.82	9.92	10.97	9.78
Zemin-C + %15 KFASÇ	3.89	9.55	13.02	9.46

Şekil 4.15 ve Çizelge 4.7’de enerji yutma kapasitesi değerleri ile ilgili paylaşılan bulgular incelendiğinde enerji yutma kapasitesinin yani tokluğun kür süresi ile arttığı görülmektedir. Zemin-A numunesi için 38.45 kJ/m³ olarak en yüksek tokluğa 90 gün boyunca kürlenmiş %9 oranında KFASÇ içeren numune ile ulaşılmıştır. Zemin-B numunesi için en yüksek tokluk 90 gün kür sonunda %3 KFASÇ ile 52.41 kJ/m³ olarak elde edilmiştir. Zemin-C numunesi için ise en yüksek tokluğa 28 gün kür sonunda 13.02 kJ/m³ ile %12 KFASÇ eklenmesiyle ulaşılmıştır. Enerji yutma kapasitesinin belirli bir oranda KFASÇ içeriğiyle artması taban zeminlerinin trafik ve çevresel yükler altında yükleme göçme anına kadar daha fazla deformasyon geçirebilme kapasitesinin arttığı ve

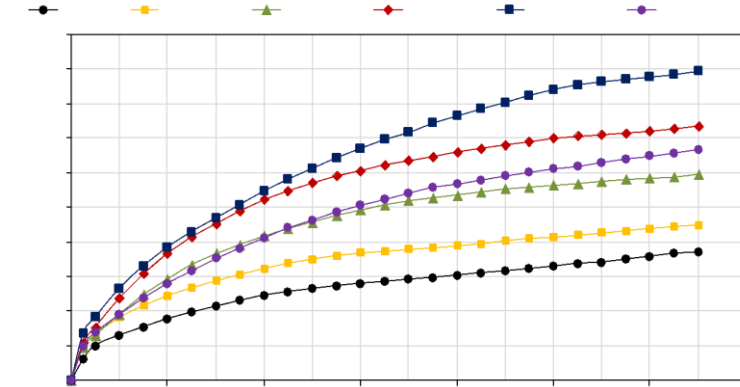
daha sünek bir kompozit malzeme elde edildiği anlamına geldiğinden deney bulguları bu açıdan önemlidir.

4.7. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Bulguları

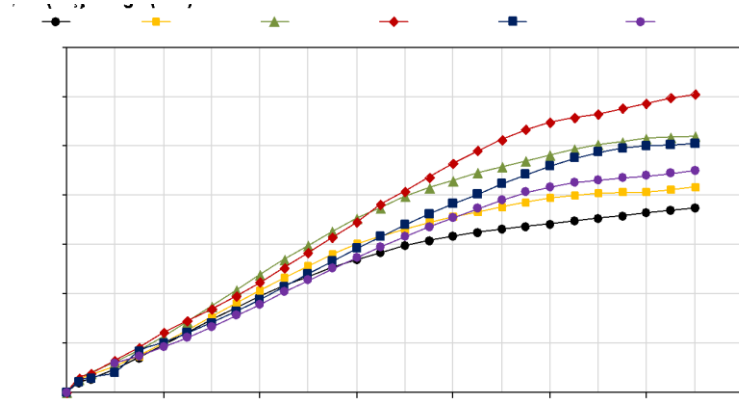
Zemin ve Zemin-KFASÇ karışımlarının CBR deneyi esnasında elde edilen yük-batma grafikleri Şekil 4.16’da verilmiştir. Zeminlerin farklı KFASÇ içeriklerinde CBR değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.17 ve Çizelge 4.18’de paylaşılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.16. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin yük-batma eğrileri

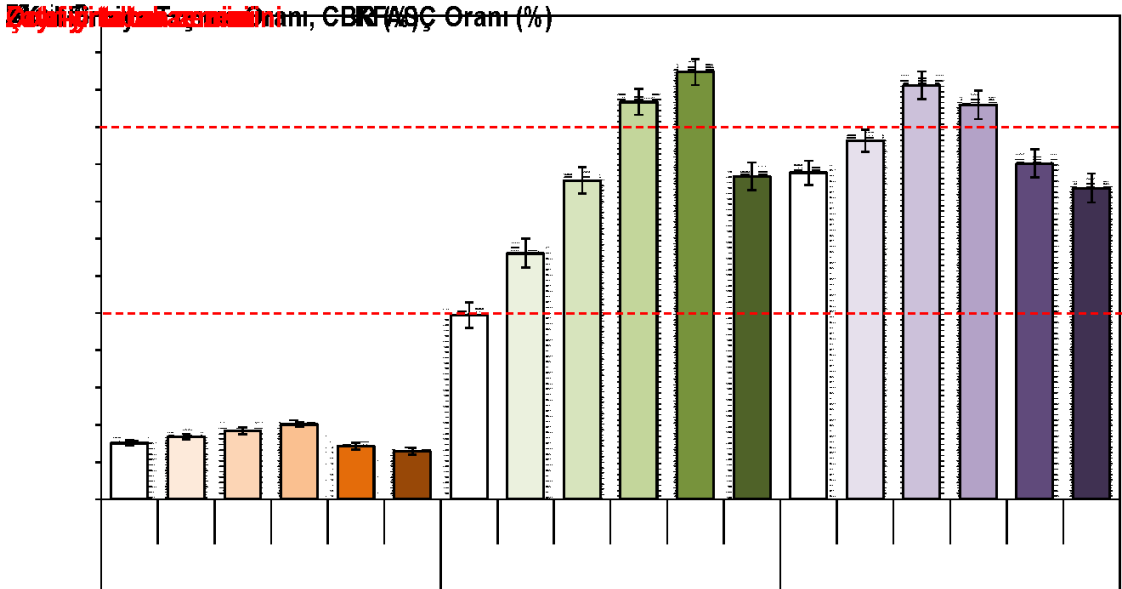
Şekil 4.16'da verilen deney sonuçları incelendiğinde, Zemin-A için %9 KFASÇ içeriği ile CBR değeri maximuma ulaşmış saf zemine göre CBR değeri %33.11 oranında artmıştır. Zemin-B için %12 KFASÇ içeriği ile maksimum CBR değeri elde edilmiş olup saf zemine göre CBR değeri %131.92 oranında bir artış elde edilmiştir. Zemin-C'de ise maksimum CBR değeri %6 KFASÇ içeriğiyle elde edilmiş olup saf zemine göre CBR değerinde %26.85 oranında bir artış elde edilmiştir. Optimum KFASÇ içeriği sonrası zeminlerin CBR değeri düşmüştür. Belirli bir oranda KFASÇ içeriği ile zemin karışımının daha istikrarlı hale geldiği, parçacıklar arasındaki kenetlenmenin ve sürtünmenin arttığı bunun sonucunda dayanım artışının elde edildiği sonucuna varılabilir. Ayrıca, zeminlerin belirli bir KFASÇ ile CBR dayanımında meydana gelen iyileşme, zemin ve KFASÇ taneleri arasındaki puzzolanik reaksiyonlar ile beraber çimentolaşma sonucu ile zemin-KFASÇ karışımlarının daha kompakt ve stabil hale gelmesine bağlanabilir. Benzer sonuçlar Singh ve Bisen (2021)'nin yapmış oldukları çalışmada da görülmüş, genişlen killi taban zeminin CBR dayanımının atık kâğıt fabrikası çamuru ile belirli bir oranda arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.8. Zemin-KFASÇ numunelerinin CBR deneyi sonuçları

Zemin Türü	KFASÇ Oranı, %	CBR (%)
Zemin-A	0	3.02
	3	3.36
	6	3.67
	9	4.02
	12	2.85
	15	2.58
Zemin-B	0	9.90
	3	13.21
	6	17.13

	9	21.35
	12	22.96
	15	17.34
Zemin-C	0	17.54
	3	19.27
	6	22.25
	9	21.19
	12	18.04
	15	16.72

Çoğu yol endüstrisi ve ulaştırma araştırma kurulu, yol tasarımında yaş CBR değerlerinin kullanılmasını önermektedir. Austroads (2012), bir yol taban zemininin yaş CBR değerinin %5'in üzerinde olmasını önermektedir. CBR değerlerine dayalı olarak bu çalışmada ele alınan taban zeminlerinin kalitesinin göreceli değerlendirilmesi Şekil 4.17'de gösterilmektedir.

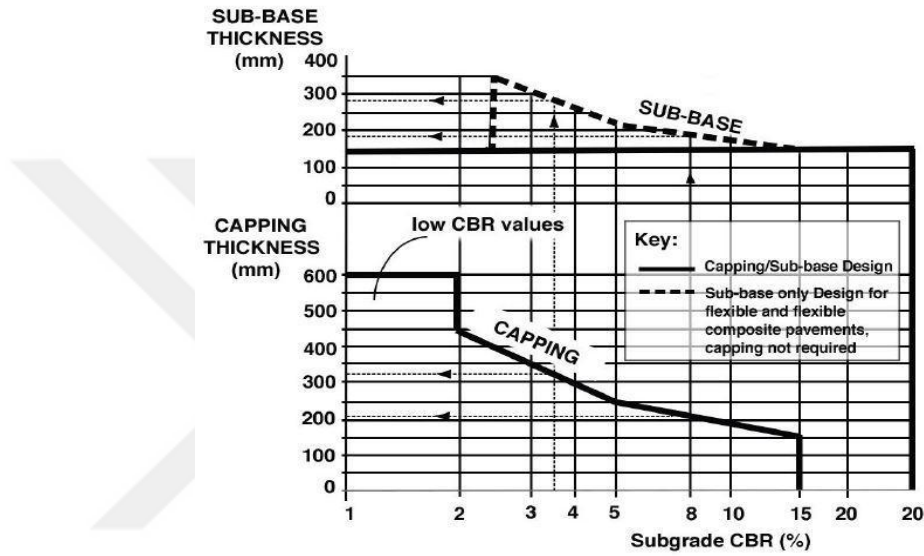


Şekil 4.17. Zemin-KFASÇ numunelerinin CBR deneyi sonuçlarına göre zemin sınıflandırması

Şekil 4.17’de verilen kılavuza göre, çeşitli KFASÇ oranlarına sahip Zemin-A ve saf Zemin-A zayıf-orta taban zemini olarak kabul edilebilir. Ayrıca, saf Zemin-B zayıf-orta alt zemin olarak kategorize edilebilir. %3, %6 ve %15 ile iyileştirilmiş Zemin-B, taban zemininin değerlendirmesini orta-iyi taban zemini sınıfına dönüştürmüştür. Ayrıca, %9 ve %12 KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-B, yol kaplamaları için çok iyi bir taban zemini olarak kabul edilebilir. %3, %12 ve %15 KFASÇ ile iyileştirilmiş saf Zemin-C

ve Zemin-C, orta-iyi taban zemini olarak ele alınabilir. Zemin-C'nin %6 ve %9 KFASÇ ile iyileştirmesi, Zemin-C'nin kategorisini çok iyi bir taban zemine yükseltmiştir.

İngiliz karayolları standartları, taban zemininin CBR değerindeki artışın kaplama katmanlarının kalınlığında azalmaya neden olduğunu belirtmektedir (HD 26/06, 2006). Bu çalışmada çeşitli oranlarda KFASÇ içeren zeminlerin yol platformunda kullanılması ile gerekli olan kaplama ve alttemel kalınlıkları Şekil 4.18 (HD 26/06, 2006) yardımıyla pratik olarak belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.18. Taban zeminin CBR değerine bağlı olarak kaplama ve alttemel kalınlığı tasarımı

Çizelge 4.9. CBR değerine göre kaplama tasarım alternatifleri

Karışım	CBR (%)	Kaplama Dizayn Alternatifleri		
		1		2
		Alttemel (mm)	Koruyucu Tab. (mm)	Alttemel (mm)
Zemin-A	3.02	150	330	298
Zemin-A + %3 KFASÇ	3.36	150	326	294
Zemin-A + %6 KFASÇ	3.67	150	315	270
Zemin-A + %9 KFASÇ	4.02	150	285	250
Zemin-A + %12 KFASÇ	2.85	150	363	320
Zemin-A + %15 KFASÇ	2.58	150	388	350
Zemin-A + %3 Çimento	4.58	150	265	238
Zemin-A + %6 Çimento	5.74	150	235	200
Zemin-A + %9 Çimento	7.12	150	210	185
Zemin-A + %3 Kireç	4.15	150	280	250
Zemin-A + %6 Kireç	5.24	150	245	220
Zemin-A + %9 Kireç	6.68	150	225	200
Zemin-B	9.90	150	185	170
Zemin-B + %3 KFASÇ	13.21	150	175	160
Zemin-B + %6 KFASÇ	17.13	150	-	150
Zemin-B + %9 KFASÇ	21.35	150	-	150
Zemin-B + %12 KFASÇ	22.96	150	-	150
Zemin-B + %15 KFASÇ	17.34	150	-	150
Zemin-B + %3 Çimento	15.11	150	-	150

Zemin-B + %6 Çimento	20.34	150	-	150
Zemin-B + %9 Çimento	24.69	150	-	150
Zemin-B + %3 Kireç	14.91	150	-	150
Zemin-B + %6 Kireç	18.59	150	-	150
Zemin-B + %9 Kireç	23.21	150	-	150
Zemin-C	17.54	150	-	150
Zemin-C + %3 KFASÇ	19.27	150	-	150
Zemin-C + %6 KFASÇ	22.25	150	-	150
Zemin-C + %9 KFASÇ	21.19	150	-	150
Zemin-C + %12 KFASÇ	18.04	150	-	150
Zemin-C + %15 KFASÇ	16.72	150	-	150
Zemin-C + %3 Çimento	21.59	150	-	150
Zemin-C + %6 Çimento	25.69	150	-	150
Zemin-C + %9 Çimento	26.74	150	-	150
Zemin-C + %3 Kireç	20.25	150	-	150
Zemin-C + %6 Kireç	23.99	150	-	150
Zemin-C + %9 Kireç	25.58	150	-	150

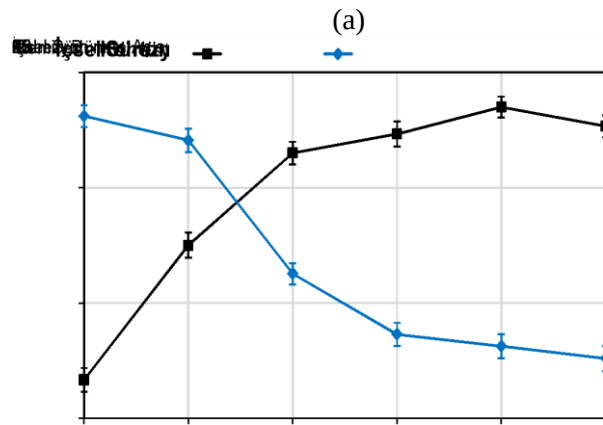
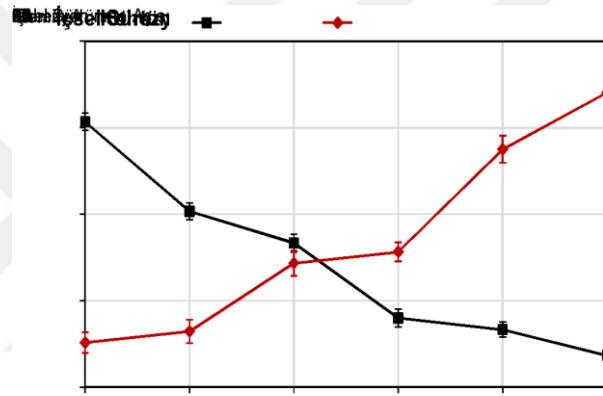
Şekil 4.18 ve Çizelge 4.9 incelendiğinde alttemel kalınlığına ilişkin kaplama yapılarının tasarımı için iki alternatif olduğu görülebilir: (1) gerekli koruyucu tabaka katmanına sahip bir alttemel ve (2) koruyucu tabaka katmanı olmayan bir alttemel. İlk alternatif için, gerekli alttemel kalınlığı tüm zemin ve zemin-KFASÇ numuneleri için sabit olarak 150 mm'dir. Zemin-A için, gerekli alttemel kalınlığı %9 KFAÇ oranıyla 330 mm'den 285 mm'ye düşmüştür. Zemin-B için, %3 KFAÇ ilavesiyle gerekli alttemel kalınlığı 185 mm'den 175 mm'ye düşürülmüş olup, daha fazla KFASÇ ilavesiyle bir koruyucu tabaka katmanı tasarımına gerek kalmamıştır. Zemin-C için, zemin karışımlarının CBR değerlerinin yüksek olmasından ötürü ek bir koruyucu tabaka tasarımına gerek kalmamıştır. İkinci alternatifte ise, gerekli alttemel kalınlığı %9 KFASÇ oranıyla 298 mm'den 250 mm'ye düşmüştür. Zemin-B için gerekli alttemel kalınlığı, %3 KFASÇ ilavesiyle 170 mm'den minimum 150 mm alttemel kalınlığına düşmüştür. Zemin-C için, tüm KFASÇ içeriğinde, gerekli alttemel kalınlığı, minimum 150 mm alttemel kalınlığına eşit olmuştur.

KFASÇ ile genleşen taban zemini iyileştirilmesinde dünya genelinde geleneksel stabilizör olarak kullanılan çimento ve kireç arasında karşılaştırma yapmak adına benzer CBR test aşamaları belirli bir oranda çimento ve kireç içeren zemin numunelerine uygulanmış ve test sonuçları Çizelge 4.6'da sunulmuştur. %3 kireçle elde edilen alttemel kalınlığına, Zemin-A için %9 KFASÇ içeriğiyle ulaşılabildiği görülmüştür. %12 KFASÇ içeriğine sahip Zemin-B ve %6 KFASÇ içeriğine sahip Zemin-C için aynı alttemel kalınlığı, %9 çimento ve %9 kireç içeriğiyle elde edilebileceği görülmüştür. Zemin-A'nın iyileştirilmesi için %9 KFASÇ kullanımıyla %3 oranında kireçten tasarruf edilebildiği sonucuna varılmıştır. Zemin-B'nin iyileştirilmesinde ise, %12 KFASÇ içeriğiyle %9 oranında çimento veya %9 oranında kireçten tasarruf sağlanabilir. Zemin-C için, %6 KFASÇ oranıyla %9 oranında çimento veya %9 oranında kireç tasarrufu sağlanabildiği tespit edilmiştir. Yayımlanmış literatürdeki bulgular göz önüne alındığında (Saini ve

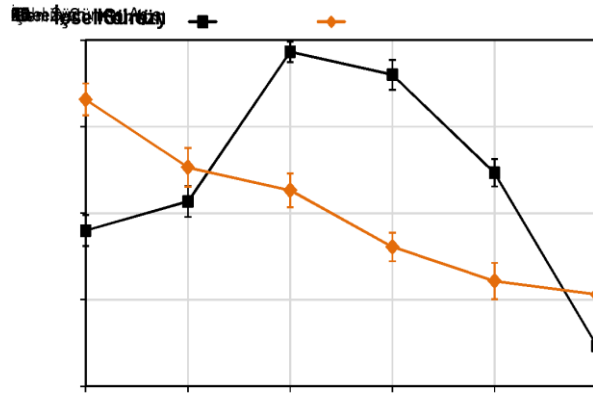
Vattipalli, 2020; Papa vd., 2015), 1000 m³ Zemin-B ve Zemin-C iyileştirilmesinde %9 çimento yerine KFASÇ kullanılarak yaklaşık 129 ve 115 ton CO₂ salımını azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu karşılaştırma, KFASÇ'nin CO₂ salımlarını en aza indirerek ve enerji tasarrufu sağlayarak genişleyen taban zeminlerin iyileştirilmesi için çimento ve kireç yerine sürdürülebilir alternatif stabilizör olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

4.8. Direkt Kesme Kutusu Deneyi Bulguları

Zeminlerin farklı KFASÇ içeriğiyle kohezyon ve içsel sürtünme açılarında meydana gelen değişimler Şekil 4.19'da ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.



(b)



(c)

Şekil 4.19. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin kohezyon ve içsel sürtünme açılarının KFASÇ içeriği ile değişimi

Çizelge 4.10. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin KFASÇ ile değişimi

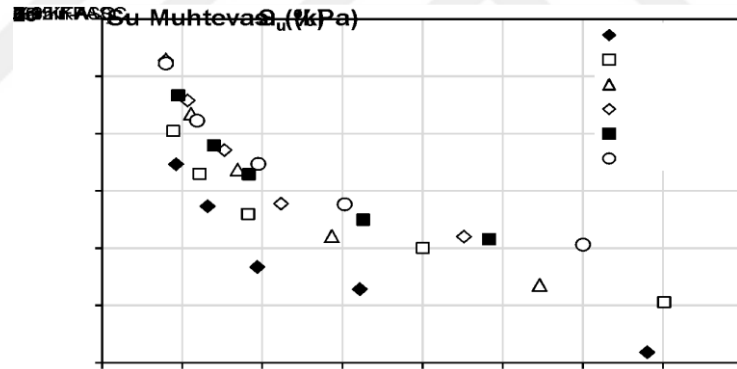
Zemin Türü	KFASÇ Oranı, %	Kohezyon (c), (%)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ°)
Zemin-A	0	40.67	21.03
	3	30.33	21.29
	6	26.67	22.87
	9	18.00	23.13
	12	16.67	25.50
	15	13.67	26.81
Zemin-B	0	23.33	43.10
	3	35.00	42.05
	6	43.00	36.27
	9	44.67	33.64
	12	47.00	33.12
	15	45.33	32.59
Zemin-C	0	14.00	38.63
	3	15.67	37.06
	6	24.33	36.53
	9	23.00	35.22
	12	17.33	34.43
	15	7.33	34.12

Şekil 4.19 ve Çizelge 4.10'da da görüldüğü üzere Zemin-A'nın kohezyon değeri KFASÇ ile azalırken içsel sürtünme açısı ise artan KFASÇ içeriği ile artmıştır. Zemin-A'nın kohezyon değeri %15 KFASÇ ile 40.67'den 13.67 kPa'ya düşerken, içsel sürtünme açısı ise 21.03°'den 26.81°'ye yükselmiştir. Zemin-B'nin kohezyon değeri %12 KFASÇ oranına kadar istikrarlı olarak artarken, %15 KFASÇ içeriği ile kısmen düşüş göstermiştir. Zemin-B'nin kohezyon değeri %12 KFASÇ ile 23.33 kPa'dan 47.00 kPa'ya yükselirken, %15 KFASÇ ile 45.33 kPa'ya düşmüştür. Zemin-B'nin içsel sürtünme açısı ise KFASÇ ile sürekli düşüş eğilimi göstererek %15 KFASÇ ile 43.10°'den 32.59°'ye düşmüştür. Zemin-C'nin kohezyon değeri %6 KFASÇ ile 14.00 kPa'dan 24.33 kPa'ya

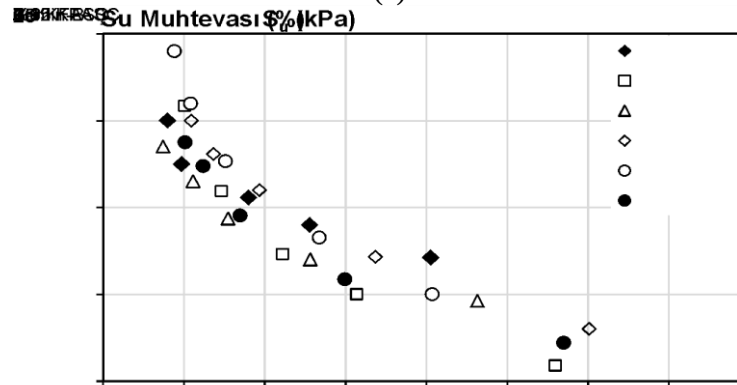
çıkarak en yüksek değerine ulaşmış daha fazla KFASÇ içeriği ile kohezyon değerinde düşüş elde edilmiştir. Zemin-C'nin içsel sürtünme açısı ise artan KFASÇ içeriği ile sürekli olarak düşüş eğiliminde olmuş ve %15 KFASÇ ile 38.63°'ten 34.12°'ye düşmüştür. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde farklı zemin türlerinde KFASÇ eklenmesiyle farklı eğilimlerin görülmesi zemin ve KFASÇ dane arasında meydana gelen kimyasal etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Taban zeminlerinin farklı kayma parametrelerinin belirli bir oranda KFASÇ içeriğiyle artması yol kaplamalarının stabilitesinin artmasına ve deformasyon riskinin azalmasına ile birlikte trafik yükleri ve çevresel koşullara karşı daha dayanıklı yol platformu oluşacağından çalışma bulguları önem arz etmektedir.

4.9. Drenajsız Kayma Mukavemeti (S_u) Deneyi Bulguları

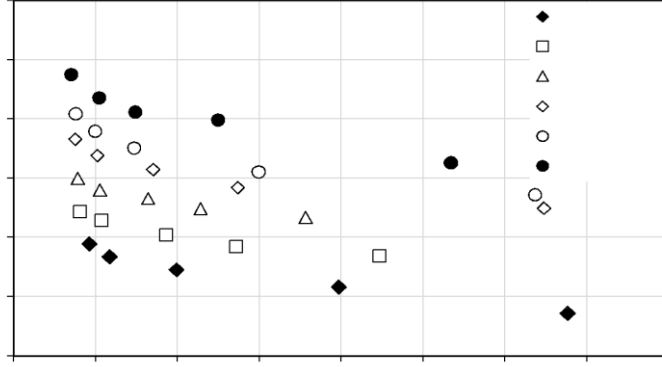
Zeminlerin farklı KFASÇ içeriği ve su muhtevalarında drenajsız kayma mukavemeti (S_u) değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.20'de verilmiştir.



(a)



(b)



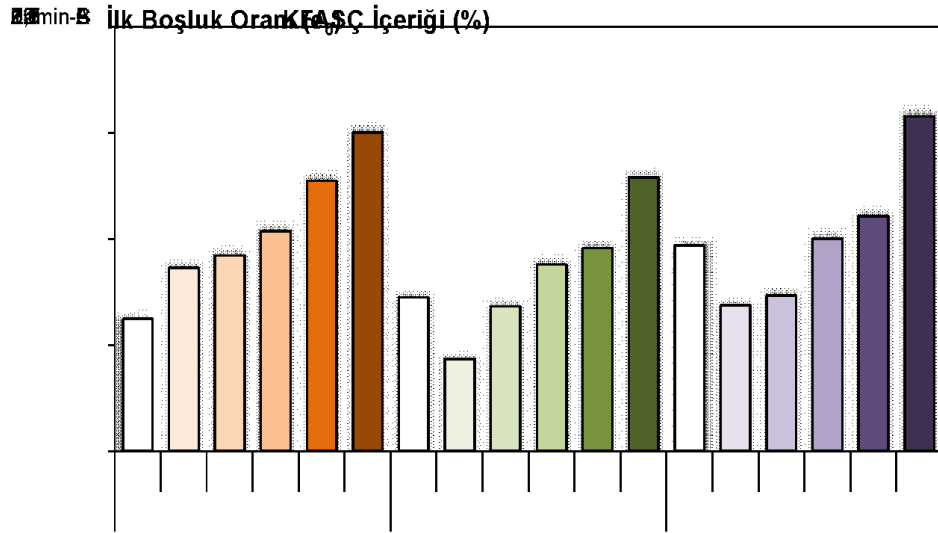
(c)

Şekil 4.20. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı su muhtevelarındaki S_u değerlerinin KFASÇ içeriği ile değişimi

Şekil 4.20'de verilen deney sonuçları incelendiğinde artan su muhtevası ile zemin-KFASÇ karışımlarının S_u değerlerinin düştüğü görülmektedir. Zemin-A için artan KFASÇ içeriği ile aynı su muhtevelarında S_u değerlerinin arttığı görülmektedir. Zemin-B için aynı su muhtevelarında en yüksek S_u değerlerine yaklaşık olarak %12 KFASÇ içeren numuneler ile ulaşıldığı görülmektedir. Zemin-C için ise artan KFASÇ içeriği ile S_u değerlerinin arttığı görülmekte ve en yüksek S_u değerlerine %15 KFASÇ içeriği ile ulaşıldığı görülmektedir. Genel olarak bu tez çalışmasında çalışılan zeminlerin penetrasyon direncinin ve S_u değerlerinin KFASÇ içeriği ile arttığı tespit edilmiştir. S_u parametrelerinin KFASÇ içeriği ile genellikle artması taban zeminlerinin tarfik ve çevresel yüklemeler altında göstereceği mukavemetinin artması açısından önemlidir.

4.10. Konsolidasyon Deneyi Bulguları

Bu tez çalışmasında, zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının zamana bağlı oturmalarını incelemek amacıyla konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21 ve Çizelge 4.11'de zeminlerin farklı KFASÇ içeriklerinde ilk boşluk oranında meydana gele (e_0) değişim gösterilmiştir.



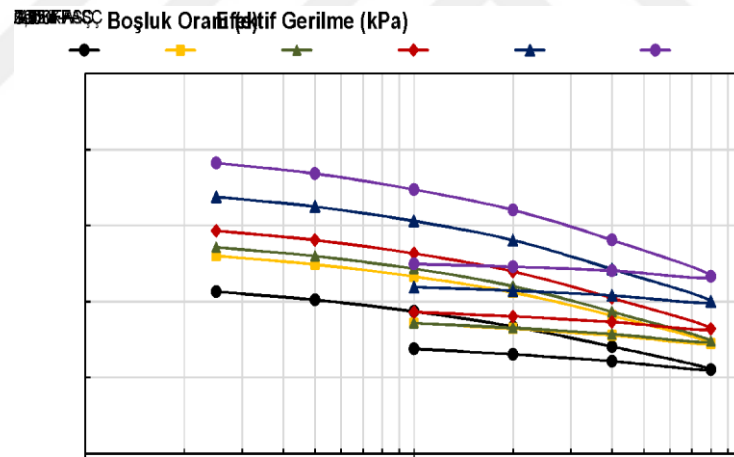
Şekil 4.21. Zeminlerin ilk boşluk oranının KFAŞÇ içeriği ile değişimi

Çizelge 4.11. Zemin karışımlarının ilk boşluk oranı değerleri

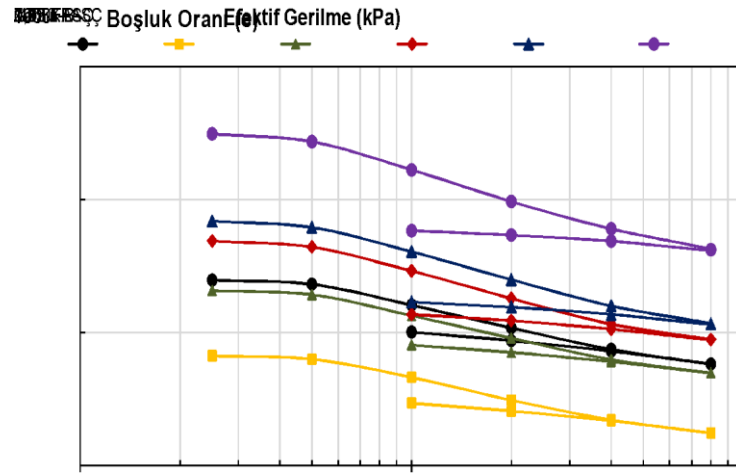
Zemin Türü	KFAŞÇ İçeriği (%)	İlk Boşluk Oranı(e_0)
Zemin-A	0	0.824598
	3	0.872895
	6	0.884305
	9	0.907596
	12	0.954907
	15	1.000501
Zemin-B	0	0.844825
	3	0.786870
	6	0.836468
	9	0.876138
	12	0.891381
	15	0.958068
Zemin-C	0	0.893915
	3	0.837442
	6	0.846633
	9	0.900288
	12	0.921493
	15	1.015585

Şekil 4.21’de ve Çizelge 4.11’de paylaşılan veriler ışığında, Zemin-A’nın e_0 değerinin KFAŞÇ içeriği ile arttığı görülmüştür. Zemin-A’nın boşluk oranı %15 KFAŞÇ içeriği ile 0.825’ten 1.0001’e çıkmıştır. e_0 değerlerinde KFAŞÇ ile görülen artış zemin karışımlarının w_{opt} değerinin KFAŞÇ ile artmasına bağlanabilir. Zemin-B ve Zemin-

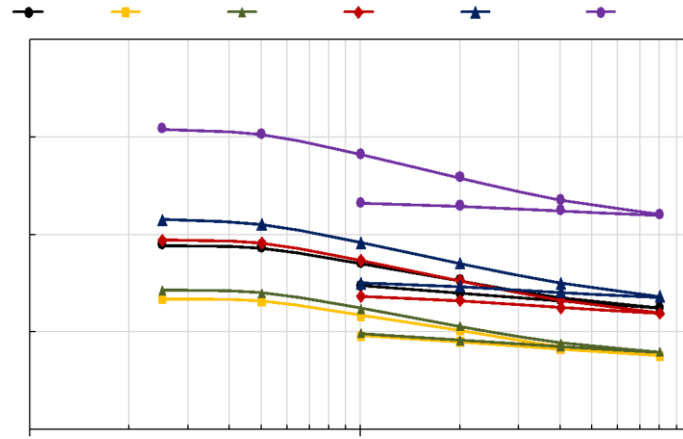
Her bir zemin ve zemin-KFASÇ karışımlarının uygulanan gerilmelerle ve KFASÇ içeriği ile boşluk oranlarında (e) meydana gelen değişimler Şekil 4.22 ve Çizelge 4.12’de verilmiştir.



84



(b)



(c)

Şekil 4.22. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin boşluk oranının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi

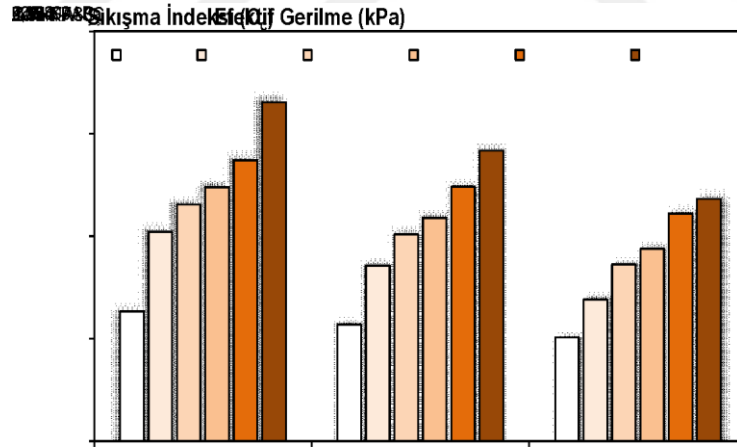
Çizelge 4.12. Boşluk oranı değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi

		Yükleme (kPa)						Boşaltma (kPa)		
Zemin Türü	KFASÇ İçeriği, %	25	50	100	200	400	800	400	200	100
Boşluk Oranı (e)										
Zemin-A	0	0.813	0.802	0.787	0.767	0.741	0.711	0.722	0.731	0.738
	3	0.860	0.849	0.833	0.812	0.782	0.745	0.756	0.764	0.771
	6	0.872	0.860	0.843	0.820	0.787	0.748	0.757	0.765	0.772
	9	0.893	0.881	0.863	0.840	0.805	0.764	0.773	0.781	0.786
	12	0.938	0.925	0.906	0.881	0.843	0.800	0.808	0.814	0.819
	15	0.983	0.969	0.948	0.921	0.881	0.833	0.841	0.846	0.850
Zemin-B	0	0.839	0.836	0.820	0.803	0.787	0.776	0.786	0.794	0.800
	3	0.782	0.780	0.766	0.749	0.734	0.724	0.734	0.741	0.747
	6	0.831	0.828	0.813	0.796	0.780	0.769	0.778	0.785	0.790
	9	0.869	0.864	0.846	0.825	0.806	0.795	0.802	0.809	0.813
	12	0.884	0.879	0.861	0.840	0.820	0.806	0.814	0.819	0.823
	15	0.949	0.943	0.922	0.898	0.878	0.862	0.869	0.873	0.876

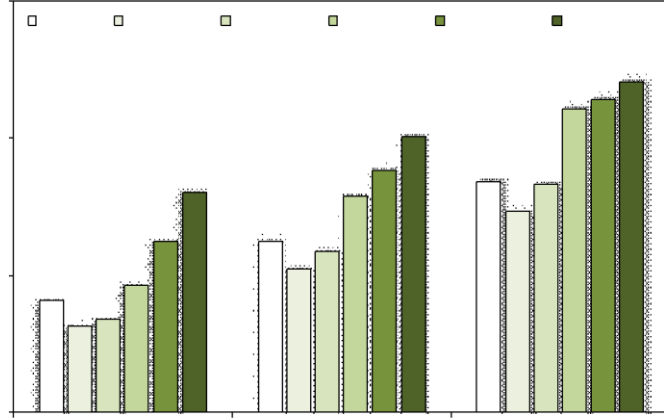
	0	0.889	0.886	0.870	0.853	0.835	0.825	0.832	0.840	0.848
	3	0.834	0.831	0.817	0.801	0.785	0.776	0.782	0.790	0.796
Zemin-	6	0.842	0.840	0.824	0.806	0.789	0.779	0.785	0.792	0.798
C	9	0.895	0.891	0.873	0.852	0.833	0.820	0.825	0.832	0.837
	12	0.915	0.910	0.892	0.870	0.850	0.836	0.841	0.847	0.850
	15	1.008	1.002	0.982	0.958	0.935	0.920	0.924	0.929	0.932

Şekil 4.22 ve Çizelge 4.12 incelendiğinde beklenildiği üzere uygulanan gerilmelerle basınç altında boşluklarda hapsolunan suyun drene olması sonucu artan gerilmeler altında boşluk oranı da düşmüştür.

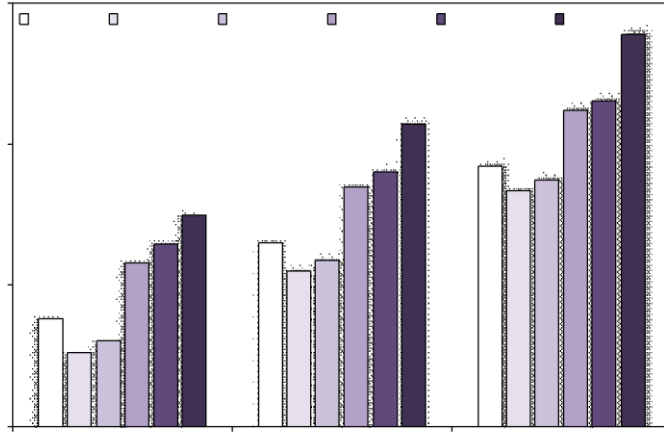
Şekil 4.23 ve Çizelge 4.13'te zeminlerin uygulanan gerilmelerle ve KFASÇ içeriğiyle sıkışma indislerinde (C_c) meydana gelen değişimler gösterilmiştir



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.23. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin sıkışma indekslerinin KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi

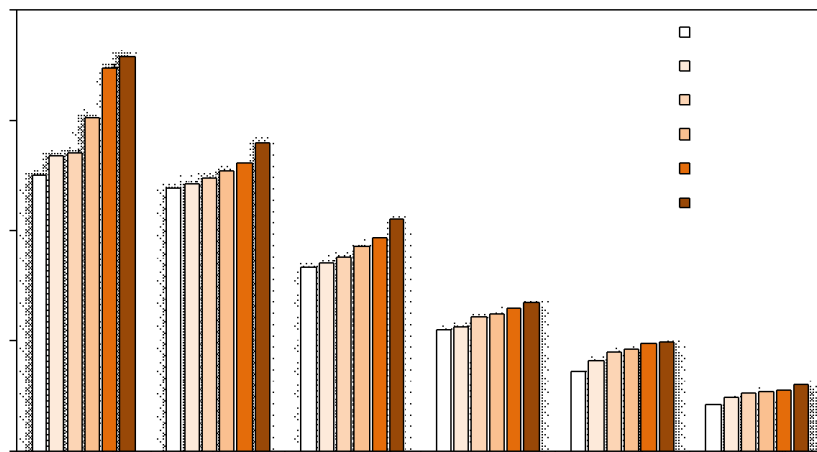
Çizelge 4.13. Sıkışma indeksi değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi

Gerilme (kPa)	KFASÇ İçeriği, %	Zemin-A	Zemin-B	Zemin-C
400-800	0	0.098	0.036	0.035
	3	0.121	0.033	0.031
	6	0.129	0.034	0.032
	9	0.134	0.039	0.043
	12	0.142	0.045	0.046
	15	0.159	0.052	0.050
200-800	0	0.094	0.045	0.046
	3	0.111	0.041	0.042
	6	0.120	0.043	0.044
	9	0.125	0.051	0.054
	12	0.134	0.055	0.056
	15	0.145	0.060	0.063
200-400	0	0.090	0.054	0.057
	3	0.101	0.049	0.053

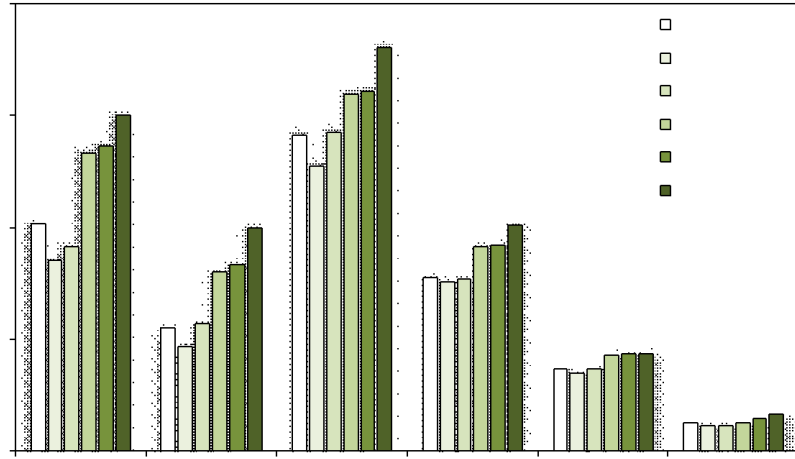
6	0.112	0.053	0.055
9	0.116	0.064	0.065
12	0.127	0.066	0.066
15	0.131	0.068	0.076

Şekil 4.23 ve Çizelge 4.13'teki veriler incelendiğinde Zemin-A'nın C_c değerlerinin KFASÇ içeriği ile arttığı görülmektedir. Zemin-A'nın KFASÇ içeriği arttıkça boşluk oranının arttığı bunun sonucunda sıkıştırılabilirliğinin artmasına sebep olduğu sonucuna varılabilir. Zemin-B ve Zemin-C'nin C_c değerlerinde KFASÇ içeriği ile değişimlerinde aynı eğilim gözlenmiştir. Zemin-B ve Zemin-C'nin C_c değerleri %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle saf zemine göre azalmış daha fazla KFASÇ eklenmesiyle C_c değerleri artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C'nin C_c değerlerinin %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle azalması zeminlerin bu oranlarda KFASÇ eklenmesiyle boşluk oranlarının azalması bunun sonucunda sıkıştırılabilirliğinin azalmasına sebep olmasına bağlanabilir. Daha fazla KFASÇ eklenmesiyle Zemin-B ve Zemin-C'nin boşluk oranı saf zemine kıyasla artmış, bunun sonucunda C_c değerlerinin artmasına dolayısıyla sıkıştırılabilirliğinin artmasına neden olmasına bağlanabilir.

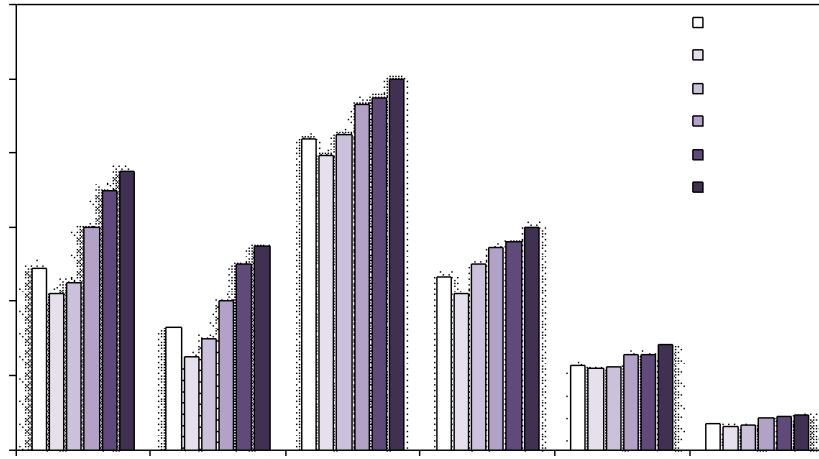
Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'da sırasıyla zeminlerin uygulanan gerilmelerle ve KFASÇ içeriğiyle hacimsel sıkışma katsayılarında (m_v) ve sıkışma katsayılarında (a_v) meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Zemin-KFASÇ karışımların uygulanan gerilmeler ile elde edilen m_v ve a_v değerleri Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'te sırasıyla verilmiştir.



(a)



(b)

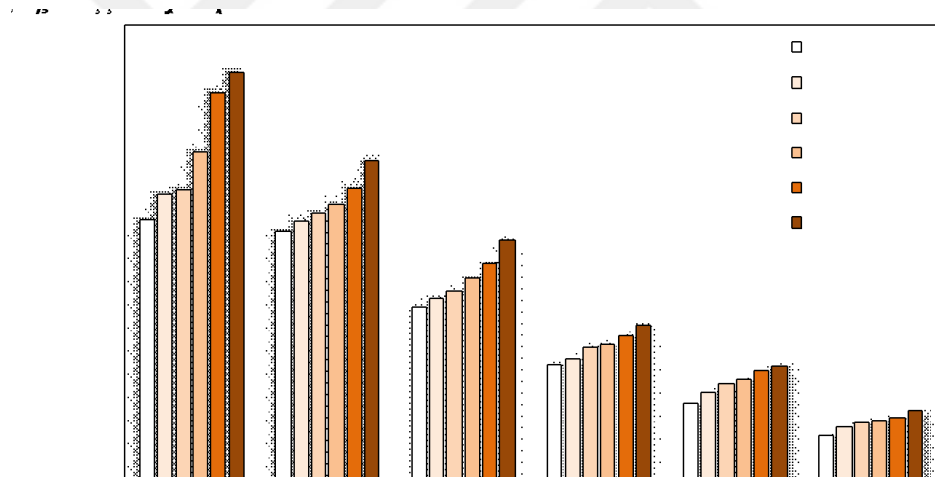


(c)

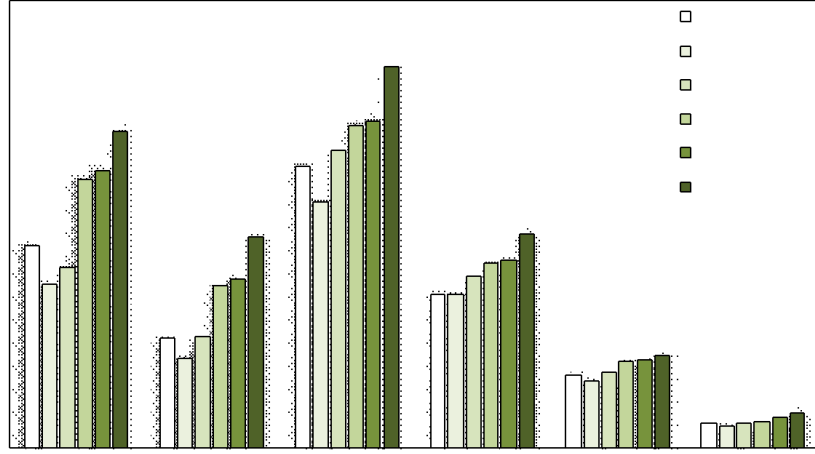
Şekil 4.24. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin hacimsel sıkışma katsayılarının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi
Çizelge 4.14. Hacimsel sıkışma katsayısı (m^2/kN) değerlerinin uygulanan gerilmelerle değişimi

Zemin Türü	KFASÇ İçeriği. %	Yüklemeye (kPa)					
		25	50	100	200	400	800
Zemin-A	0	0.000250	0.000238	0.000166	0.000110	0.000072	0.000042
	3	0.000268	0.000242	0.000170	0.000112	0.000082	0.000049
	6	0.000270	0.000248	0.000176	0.000122	0.000089	0.000052
	9	0.000302	0.000254	0.000186	0.000124	0.000092	0.000053
	12	0.000348	0.000262	0.000194	0.000129	0.000098	0.000055
	15	0.000358	0.000280	0.000210	0.000135	0.000099	0.000060
Zemin-B	0	0.000122	0.000066	0.000170	0.000093	0.000044	0.000015
	3	0.000102	0.000056	0.000153	0.000091	0.000042	0.000014
	6	0.000110	0.000068	0.000171	0.000093	0.000044	0.000014
	9	0.000160	0.000096	0.000192	0.000110	0.000052	0.000016
	12	0.000164	0.000100	0.000193	0.000111	0.000052	0.000018
	15	0.000180	0.000120	0.000217	0.000122	0.000053	0.000020

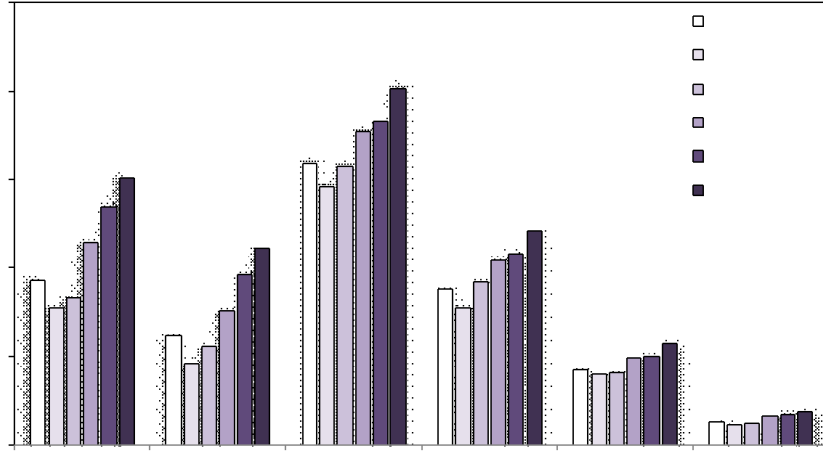
Zemin- C	0	0.000098	0.000066	0.000168	0.000093	0.000045	0.000014
	3	0.000084	0.000050	0.000159	0.000084	0.000043	0.000013
	6	0.000090	0.000060	0.000170	0.000100	0.000048	0.000013
	9	0.000120	0.000080	0.000186	0.000110	0.000051	0.000017
	12	0.000140	0.000100	0.000190	0.000112	0.000052	0.000018
	15	0.000150	0.000110	0.000200	0.000120	0.000057	0.000019



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.25. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin sıkışma katsayılarının KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi

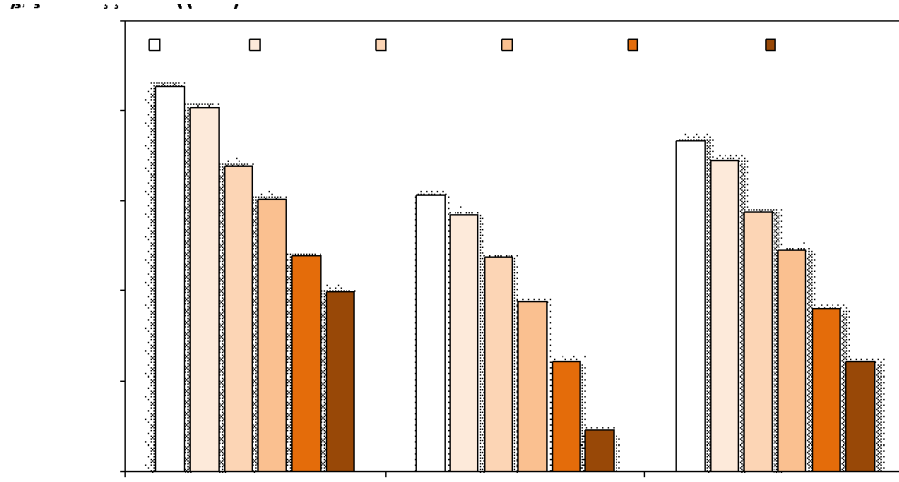
Çizelge 4.15. Sıkışma katsayısı (m^2/kN) değerlerinin uygulanan gerilmelerle değişimi

Zemin Türü	KFASÇ İçeriği. %	Yüklemeye (kPa)					
		25	50	100	200	400	800
Zemin-A	0	0.000456	0.000434	0.000302	0.000199	0.000131	0.0000759
	1	1	3	9	8	4	
	3	0.000501	0.000453	0.000318	0.000209	0.000152	0.0000913
	9	9	2	4	8	6	
	6	0.000508	0.000467	0.000331	0.000229	0.000168	0.0000973
	8	8	3	6	9	2	
	9	0.000576	0.000484	0.000354	0.000236	0.000175	0.0001011
Zemin-B	1	1	5	8	5	0	
	12	0.000680	0.000512	0.000379	0.000252	0.000190	0.0001070
	3	3	2	3	2	6	
	15	0.000716	0.000560	0.000420	0.000270	0.000197	0.0001198
Zemin-C	2	2	1	1	1	0	
	1	1	1	1	1	1	

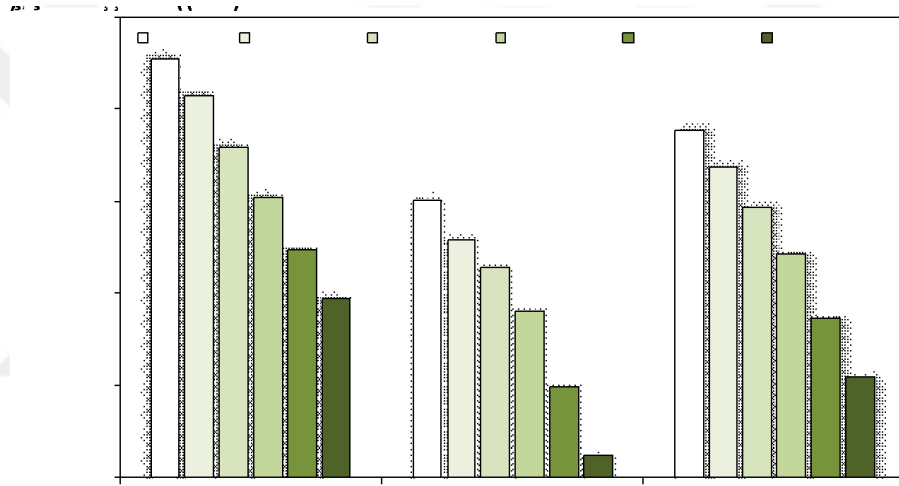
Zemin-B	0	0.000225 1	0.000121 8	0.000313 6	0.000171 6	0.000080 7	0.0000274
	3	0.000182 3	0.000100 1	0.000273 4	0.000171 5	0.000074 2	0.0000246
	6	0.000202 0	0.000124 9	0.000332 4	0.000191 9	0.000083 1	0.0000275
	9	0.000300 2	0.000180 1	0.000360 2	0.000206 4	0.000096 6	0.0000291
	12	0.000310 2	0.000189 1	0.000365 0	0.000209 9	0.000098 8	0.0000338
	15	0.000352 5	0.000235 0	0.000424 9	0.000237 9	0.000102 8	0.0000392
Zemin-C	0	0.000185 6	0.000125 0	0.000318 2	0.000177 1	0.000085 7	0.0000265
	3	0.000154 3	0.000091 9	0.000292 2	0.000155 3	0.000080 4	0.0000230
	6	0.000166 2	0.000110 8	0.000313 9	0.000184 7	0.000082 6	0.0000242
	9	0.000228 0	0.000152 0	0.000353 5	0.000208 1	0.000097 4	0.0000325
	12	0.000269 0	0.000192 1	0.000365 1	0.000215 2	0.000099 4	0.0000346
	15	0.000302 3	0.000221 7	0.000403 1	0.000241 9	0.000113 9	0.0000375

Şekil 4.24-4.25 ve Çizelge 4.14-4.15'te verilen bulgular incelendiğinde Zemin-A'nın m_v ve a_v değerlerinin KFASÇ içeriği ile arttığı görülmüştür. Zemin-A'nın KFASÇ içeriği arttıkça boşluk oranının arttığı bunun sonucunda sıkıştırılabilirliğinin artmasına sebep olduğu gösterilebilir. Sıkışma indisinde olduğu gibi, m_v ve a_v değerlerinde de Zemin-B ve Zemin-C için benzer eğilimler gözlenmiştir. %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle Zemin-B ve Zemin-C'nin saf zemine göre sıkışma katsayılarının azaldığı, daha fazla KFASÇ içeriğiyle zeminlerin sıkışma katsayılarının arttığı görülmektedir. Zemin-B ve Zemin-C'nin boşluk oranlarının %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle azaldığı bunun sonucunda sıkışma katsayılarının dolayısıyla sıkıştırılabilirliğinin azaldığının sonucuna varılabilir. Daha fazla KFASÇ içeriği eklenmesinin Zemin-B ve Zemin-C'nin sıkışma katsayılarının dolayısıyla sıkıştırılabilirliğinin artmasına yol açmasına sebep olmuştur.

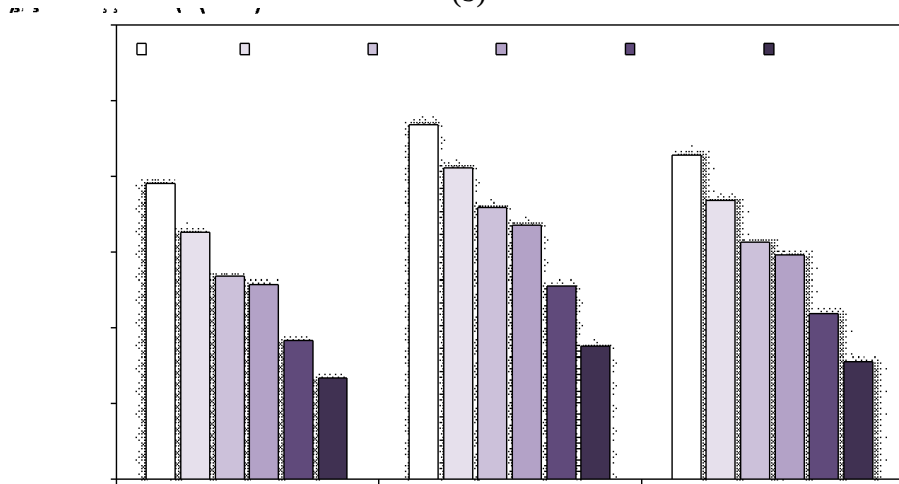
Şekil 4.26 ve Çizelge 4.16'da zeminlerin KFASÇ içeriğiyle konsolidasyon deneyinden elde edilen şişme indisi (C_s) değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

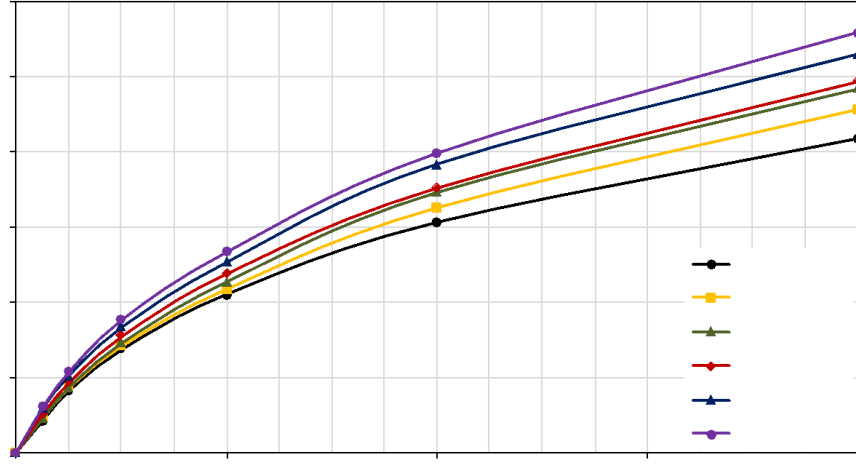
Şekil 4.26. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin şişme indisi değerlerinin KFASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi

Çizelge 4.16. Şişme indisi değerlerinin uygulanan gerilmeler ile değişimi

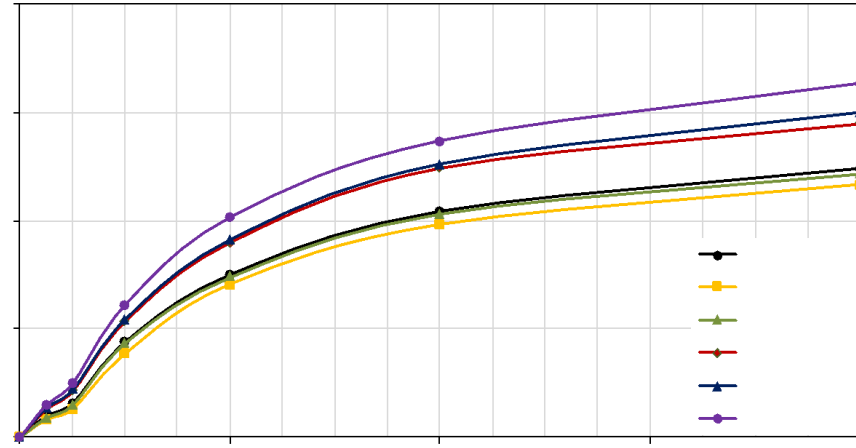
Gerilme (kPa)	KFASÇ İçeriği. %	Zemin-A	Zemin-B	Zemin-C
800-400	0	0.0363	0.0321	0.0235
	3	0.0351	0.0305	0.0210
	6	0.0319	0.0283	0.0187
	9	0.0301	0.0261	0.0183
	12	0.0269	0.0238	0.0153
	15	0.0249	0.0217	0.0133
400-200	0	0.0303	0.0260	0.0251
	3	0.0292	0.0243	0.0227
	6	0.0268	0.0231	0.0205
	9	0.0243	0.0211	0.0198
	12	0.0211	0.0179	0.0167
	15	0.0172	0.0149	0.0142
800-200	0	0.0333	0.0291	0.0251
	3	0.0321	0.0274	0.0227
	6	0.0294	0.0257	0.0205
	9	0.0272	0.0236	0.0198
	12	0.0240	0.0208	0.0167
	15	0.0210	0.0183	0.0142

Şekil 4.26 ve Çizelge 4.16’da verilen bulgular incelendiğinde C_s değerlerinin her bir zemin için KFASÇ içeriği arttıkça azaldığı dolayısıyla şişme potansiyellerinin düştüğü görülmektedir.

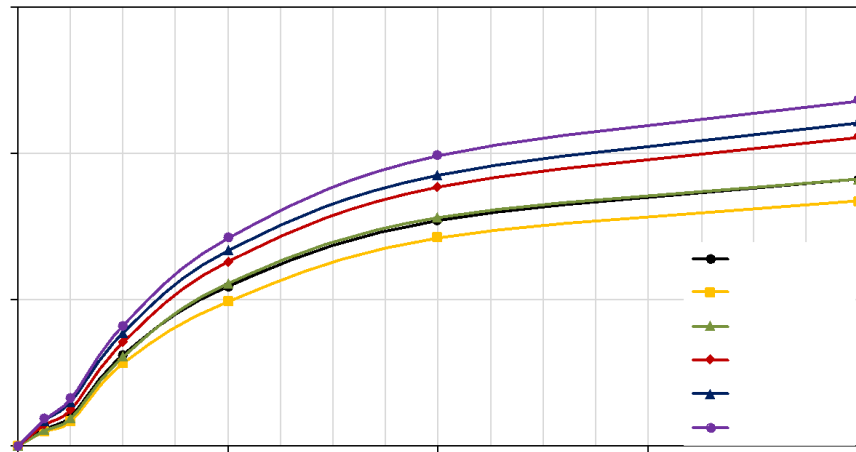
Şekil 4.27 ve Çizelge 4.17’de zeminlerin KFASÇ içeriğiyle ve uygulanan gerilmelerle konsolidasyon oturmalarında meydana gelen değişimler verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.27. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının KfASÇ içeriği ve uygulanan gerilmeler ile değişimi

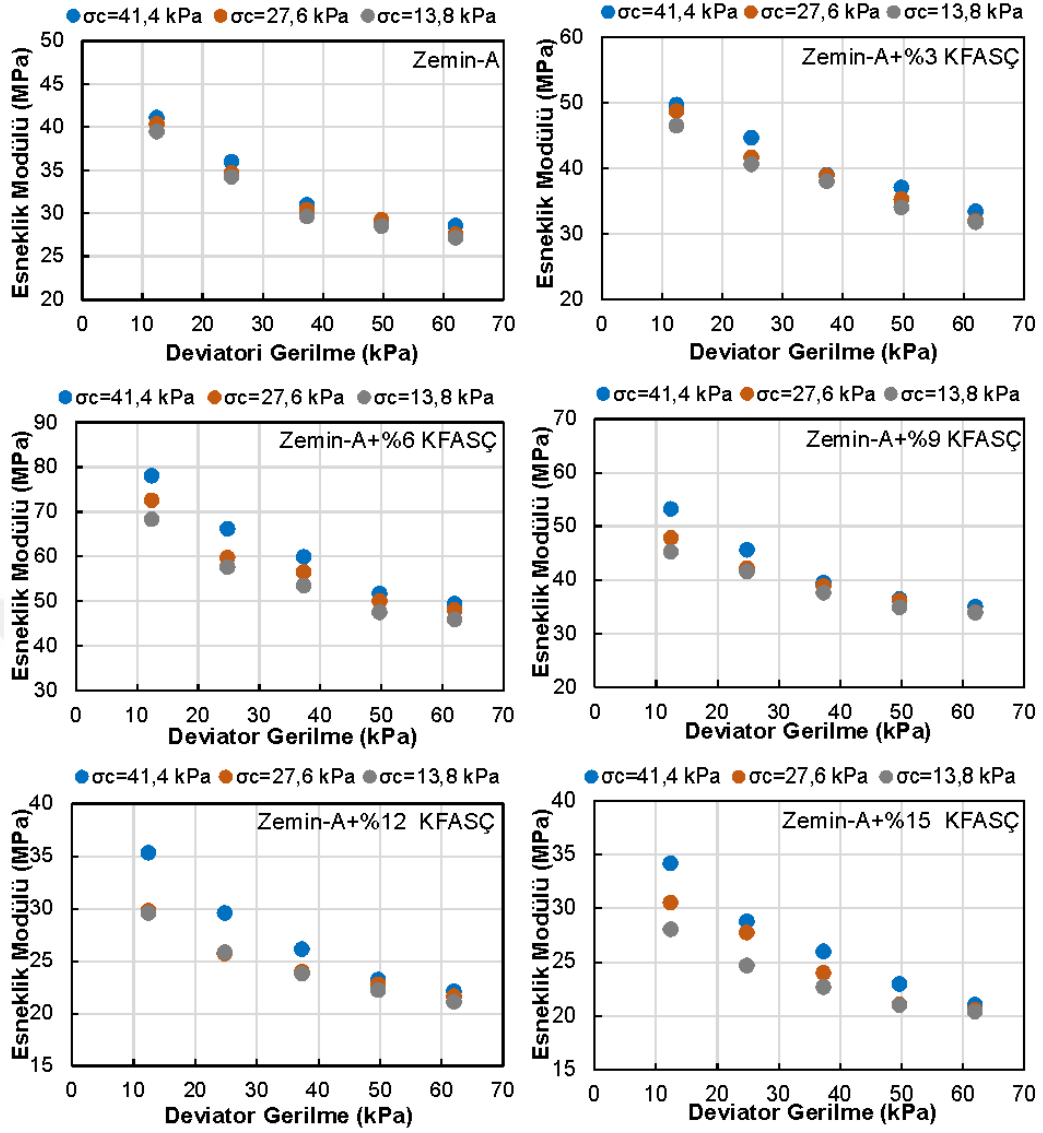
Çizelge 4.17. Konsolidasyon oturmalarının (mm) uygulanan gerilmeler ile değişimi

		Yükleme (kPa)					
Zemin Türü	KFAS Ç İçeriği %	25	50	100	200	400	800
Oturma (mm)							
Zemin-A	0	0.125	0.244	0.410	0.629	0.917	1.250
	3	0.134	0.255	0.425	0.649	0.975	1.365
	6	0.135	0.259	0.435	0.679	1.036	1.449
	9	0.151	0.278	0.464	0.712	1.056	1.480
	12	0.174	0.305	0.499	0.757	1.147	1.585
	15	0.179	0.319	0.529	0.799	1.193	1.672
Zemin-B	0	0.061	0.094	0.264	0.45	0.625	0.744
	3	0.051	0.079	0.232	0.424	0.590	0.700
	6	0.055	0.089	0.260	0.445	0.620	0.730
	9	0.080	0.128	0.320	0.540	0.746	0.870
	12	0.082	0.132	0.325	0.547	0.756	0.899
	15	0.090	0.150	0.367	0.610	0.820	0.980
Zemin-C	0	0.049	0.082	0.250	0.437	0.618	0.730
	3	0.042	0.067	0.226	0.395	0.570	0.670
	6	0.045	0.075	0.245	0.445	0.624	0.729
	9	0.060	0.100	0.286	0.505	0.710	0.847
	12	0.070	0.120	0.310	0.534	0.741	0.885
	15	0.075	0.130	0.330	0.570	0.796	0.945

Şekil 4.27 ve Çizelge 4.17’de paylaşılan bulgular incelendiğinde Zemin-A’nın konsolidasyon oturması KFASÇ içeriği arttıkça boşluk oranı arttığından ötürü artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C’nin konsolidasyon oturmalarında benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Zemin-B ve Zemin-C’nin saf zemine göre %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle boşluk oranı azaldığından konsolidasyon oturmaları azalmış, daha fazla KFASÇ içeriğiyle boşluk oranı arttığından konsolidasyon oturmaları artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C’de belirli bir KFASÇ oranında konsolidasyon oturmaların azaltılması zamanla yol kaplamalarında meydana gelebilecek farklı oturmaların önüne geçilmesi açısından önemli bir bulgudur.

4.11. Esneklik Modülü Deneyi Bulguları

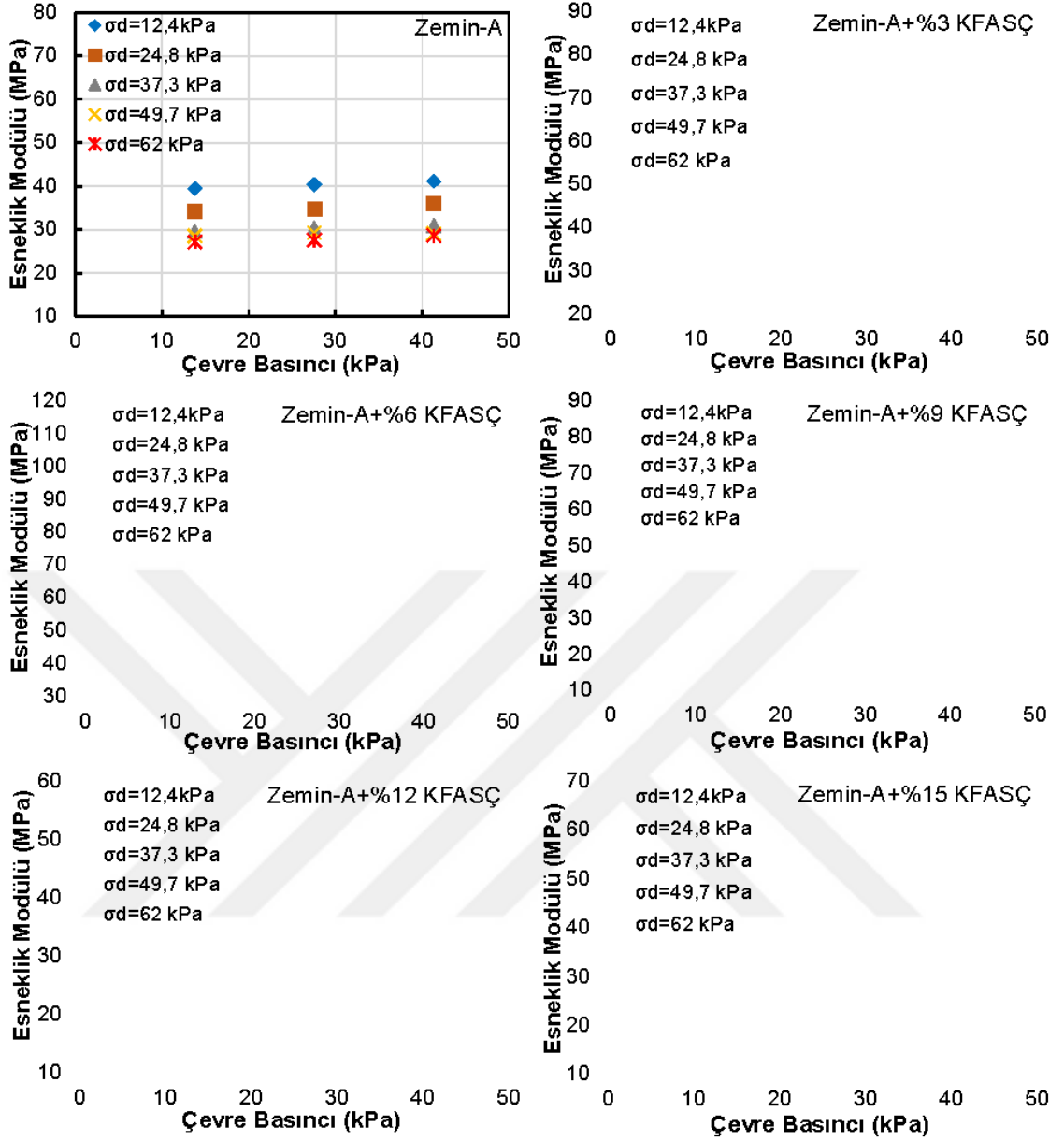
Zemin-A ve Zemin-A+KFASÇ karışımlarının deviatör gerilme ile birlikte M_r değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28. Zemin-A'nın farklı KFASÇ içeriği ve deviatör gerilme ile M_r değerlerinde meydana gelen değişimler

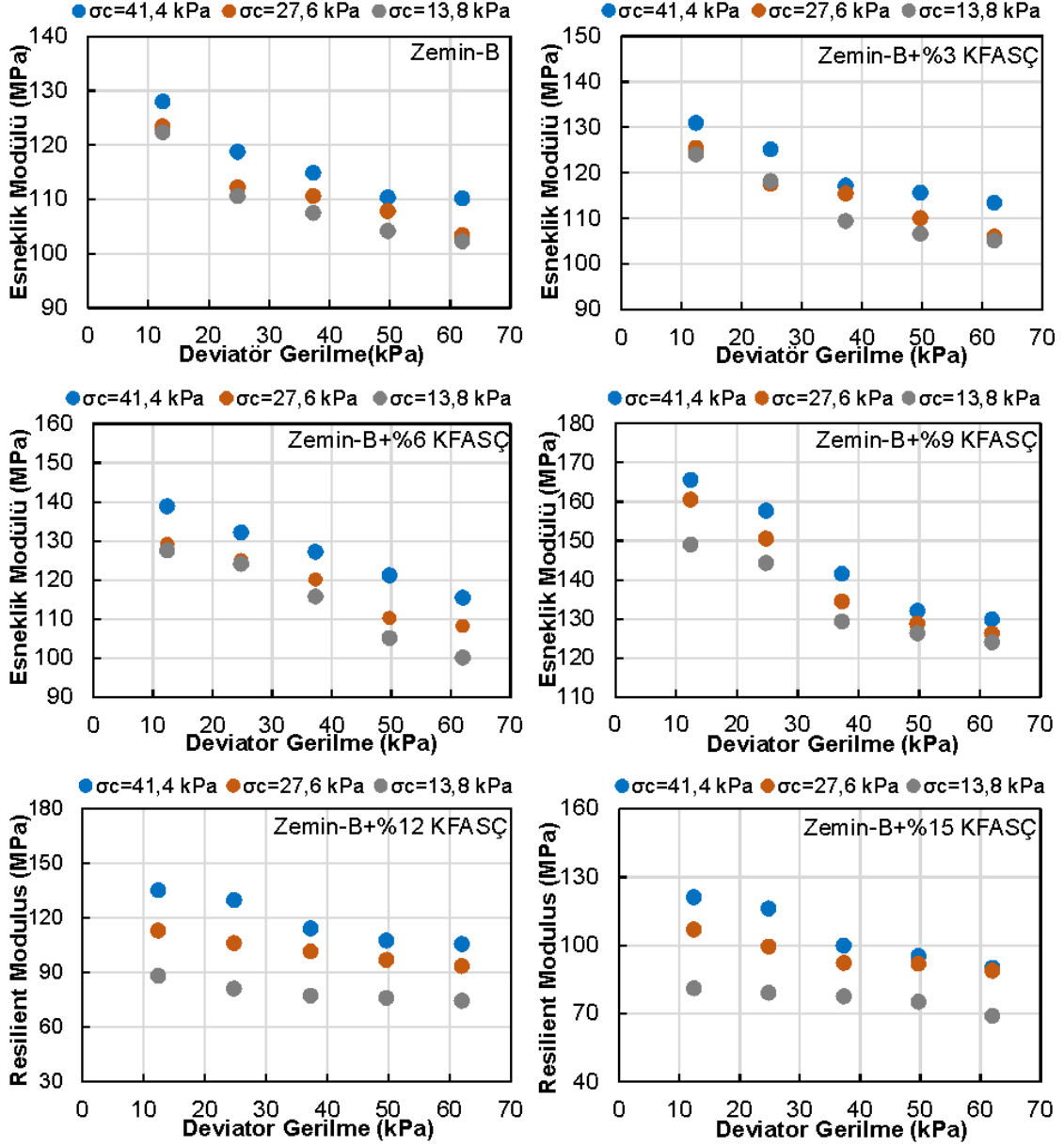
Şekil 4.28 incelendiğinde saf Zemin-A ve çeşitli oranlarda KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-A-KFASÇ karışımlarının artan deviatör gerilme ile gerilme yumuşaması davranışı göstermiş olup deviatör gerilme arttıkça M_r değerleri düşmüştür. Saf Zemin-A için M_r değerleri 27.14 MPa ile 41.10 MPa arasında değişmekte iken %3 KFASÇ içeren Zemin-A karışımı için M_r değerleri 31.78 MPa ile 49.68 MPa arasında değişmiştir. En yüksek M_r değerlerine %6 KFASÇ içeren Zemin-A karışımı ile ulaşılırken M_r değerleri 45.89 MPa ile 78.05 MPa arasında değişmiştir. Daha fazla KFASÇ eklenmesiyle (%9, %12 ve %15) M_r değerlerinde düşüş trendi gözlemlenmiştir.

Çevre basıncı ile Zemin-A ve Zemin-A+KFASÇ karışımlarının M_r değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Zemin-A'nın farklı KFAŞÇ içeriği ve çevre basıncı ile M_r değerlerde meydana gelen değişimler

Zemin-B ve Zemin-B-KFAŞÇ karışımlarının M_r değerlerinde deviyör gerilme ile meydana gelen değişimler Şekil 4.30'da sunulmuştur.

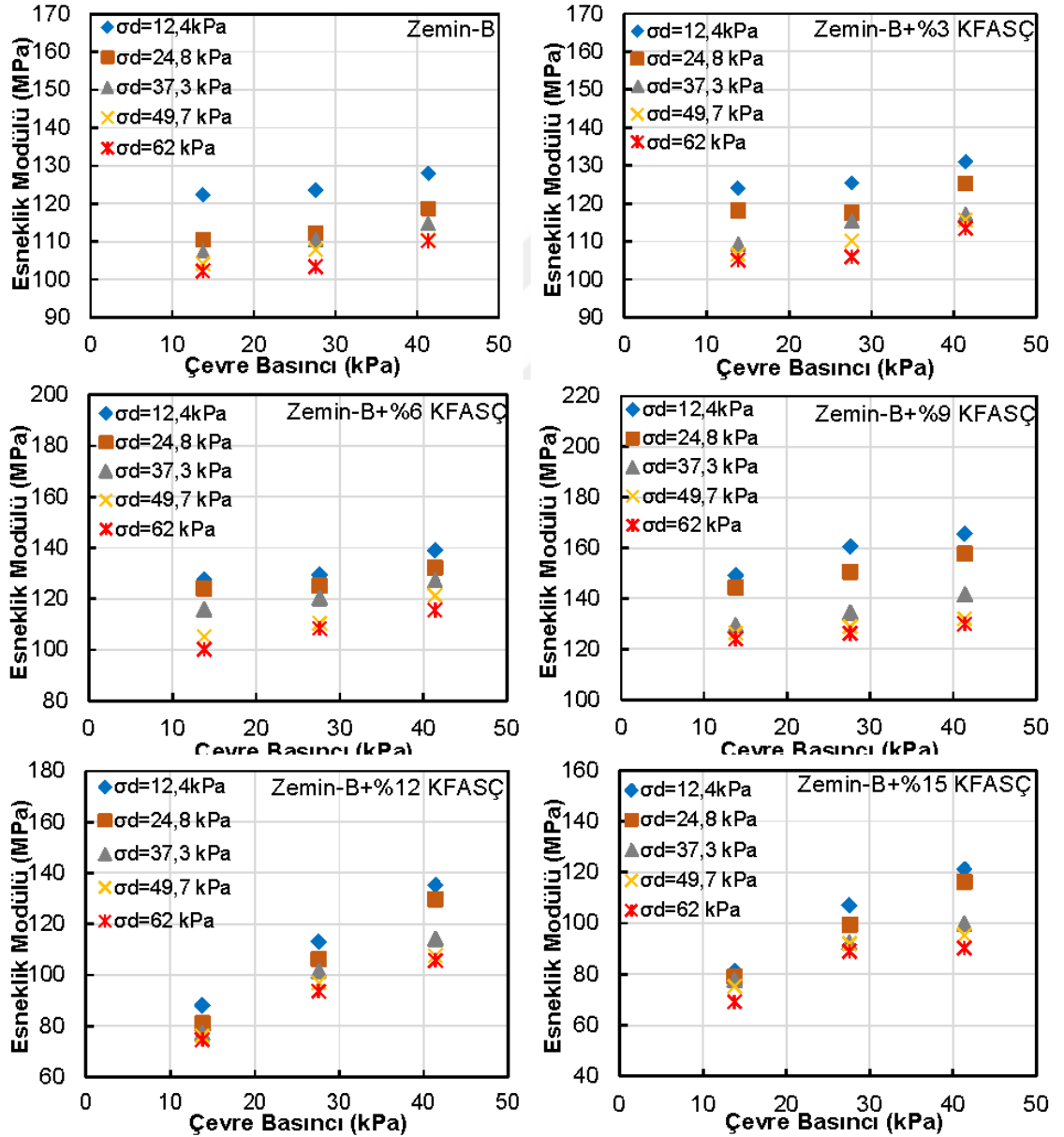


Şekil 4.30. Zemin-B'nin farklı KFASÇ içeriğinde ve deviator gerilme altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler

Şekil 4.30 incelendiğinde aynı deviator gerilme altında artan çevre basıncı ile zemin karışımlarının M_r değerlerinin arttığı görülmüştür. Şekil 4.45 incelendiğinde Zemin-A karışımlarına benzer şekilde Zemin-B ve çeşitli oranlarda KFASÇ içeren Zemin-B karışımlarının artan deviator gerilme karşısında gerilme yumuşaması davranışı gösterdiği görülmüştür. Artan deviator gerilmeler ile M_r değerleri düşmüştür. Saf Zemin-B için M_r değerlerinin 102.22 MPa ile 127.97 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Zemin-B için M_r değerleri %9 KFASÇ içeriğine kadar artarken daha fazla katkı eklenmesiyle M_r değerlerinde düşüş trendi gözlemlenmiştir. %3 KFASÇ içeren Zemin-B

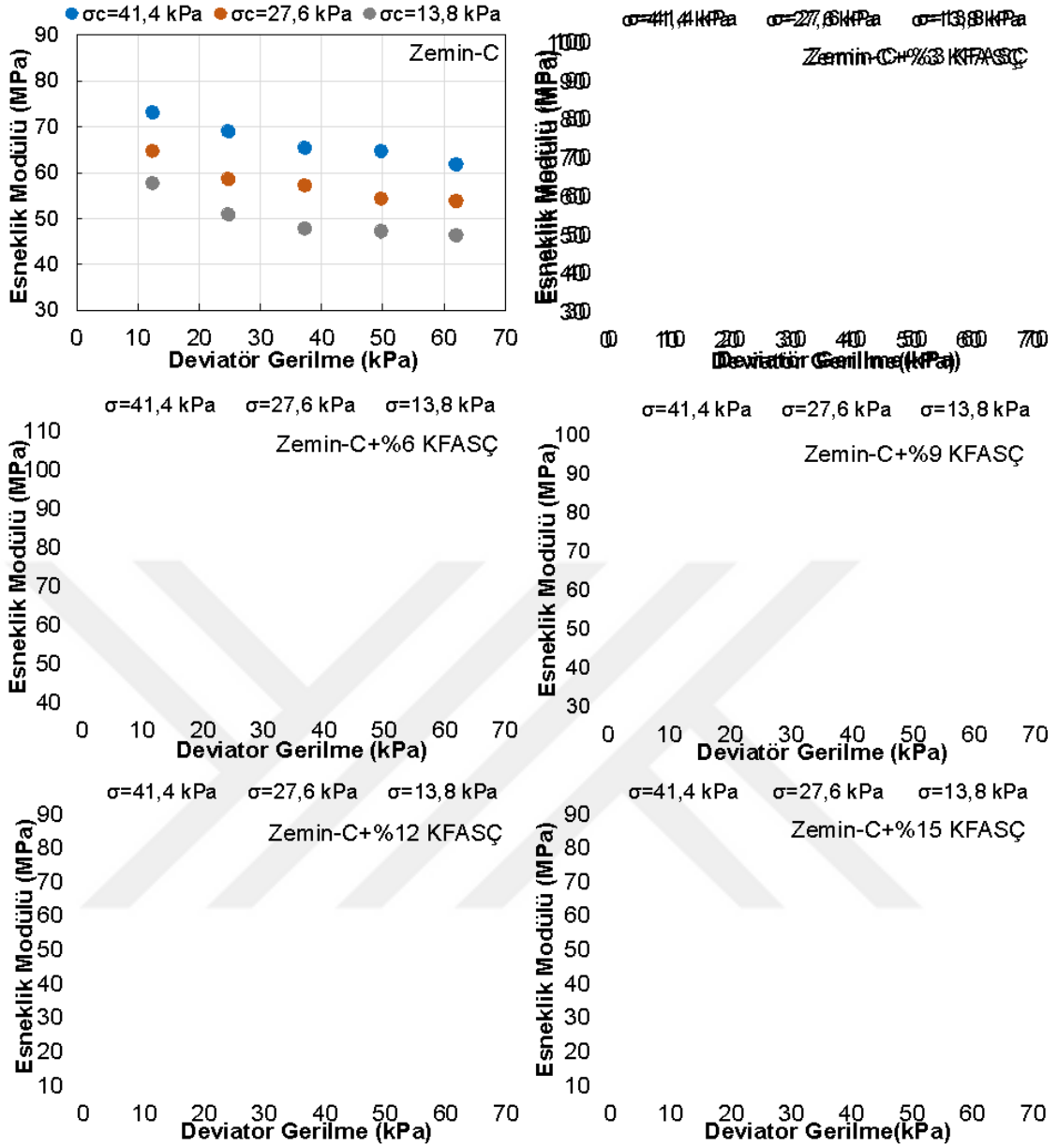
karışımı için M_r değerleri 105.12 MPa ile 130.98 MPa arasında değişirken %6 KFASÇ içeren Zemin-B karışımı için ise M_r değerleri 108.2 MPa ile 138.89 MPa arasında değişmektedir. En yüksek M_r değerleri %9 KFASÇ içeren Zemin-B karışımı ile elde edilirken M_r değerleri 123.97 MPa ile 165.6 MPa arasında değişmektedir.

Çevre basıncı ile Zemin-B ve Zemin-B+KFASÇ karışımlarının M_r değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Zemin-B’nin farklı KFASÇ içeriğinde ve çevre basıncı altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler

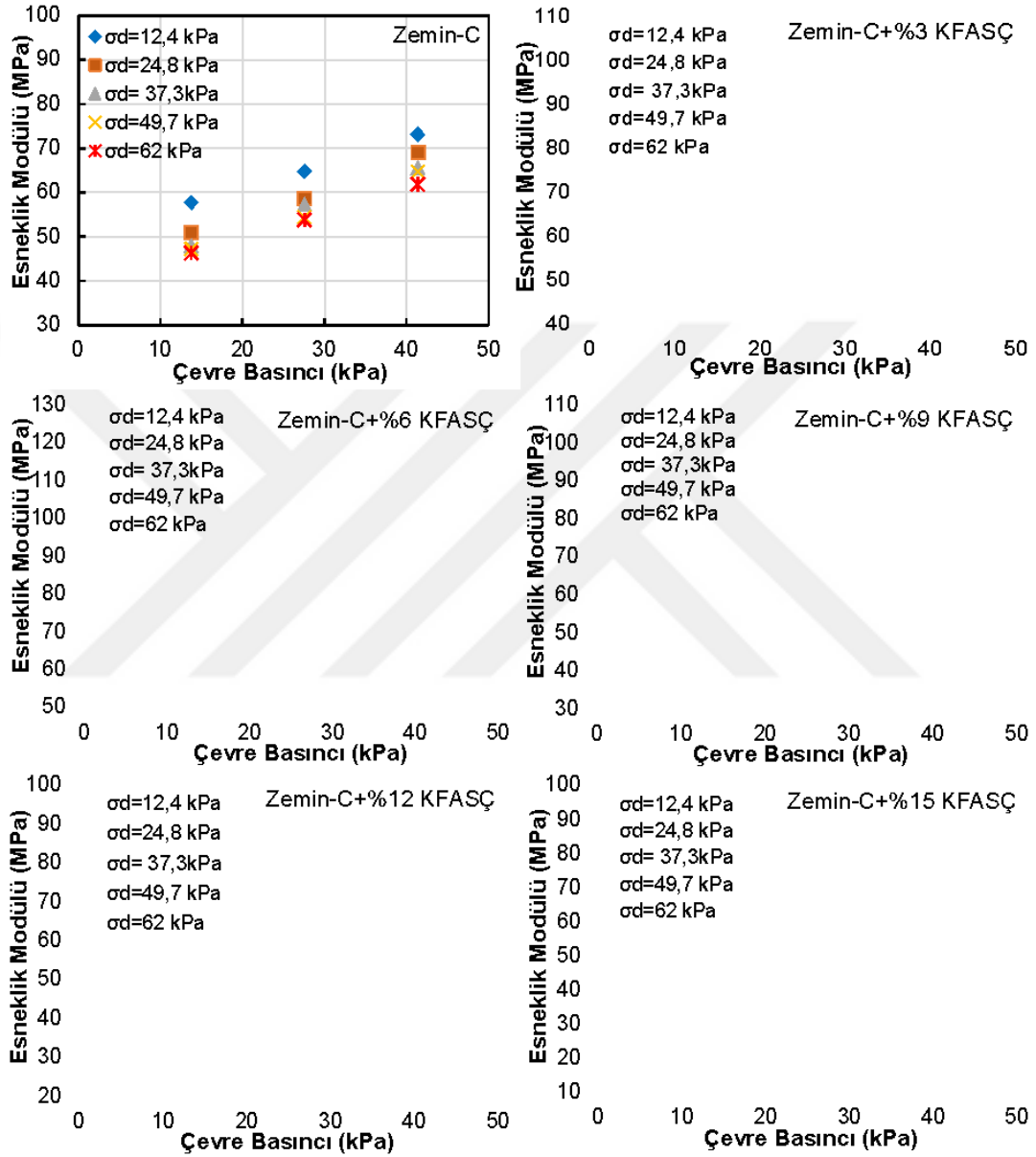
Zemin-C ve Zemin-C+KFASÇ karışımlarının deviator gerilmelerinin değişmesiyle M_r değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Zemin-C'nin farklı KFASÇ içeriğinde ve deviator gerilme altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler

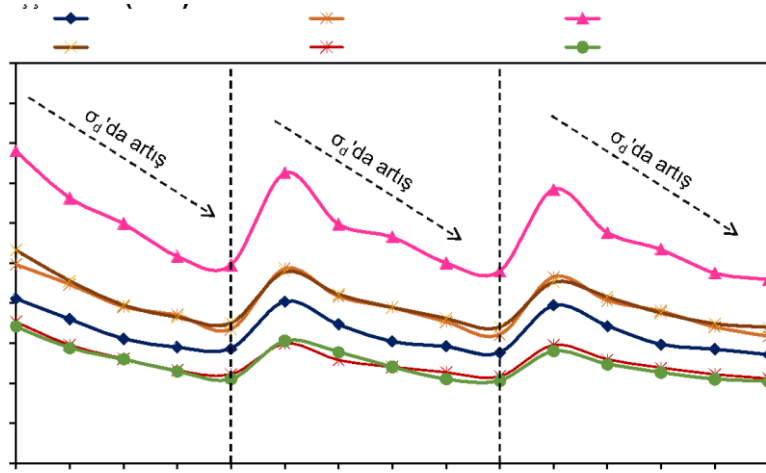
Şekil 4.32 incelendiğinde Zemin-A ve Zemin-B karışımlarına benzer şekilde Zemin-C ve çeşitli oranlarda KFASÇ içeren Zemin-C karışımlarının da artan deviator gerilme ile gerilme yumuşaması davranışı gösterdiği görülmüştür. Zemin-C karışımlarının M_r değerleri artan deviator gerilmeler ile düşüş trendi göstermiştir. Zemin-C için esneklik modülü değerleri 46.3 MPa ile 73.1 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. Zemin-C'ye %3 ve %6 oranında KFASÇ eklenmesiyle M_r değerleri artarken daha fazla KFASÇ içeriğiyle (%9, %12 ve %15) M_r değerleri düşüş trendi göstermiştir. %3 oranında KFASÇ içeren Zemin-C karışımı için M_r değerleri 50.12 MPa ile 83.05 MPa

arasında değişmektedir. En yüksek M_r değerleri %6 KFASÇ içeren zemin karışımı ile elde edilmiştir ve M_r değerlerinin 58.58 MPa ile 91.72 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 4.33'te Zemin-C ve Zemin-C+KFASÇ karışımlarının M_r değerlerinde çevre basıncı ile meydana gelen değişimler verilmiştir.

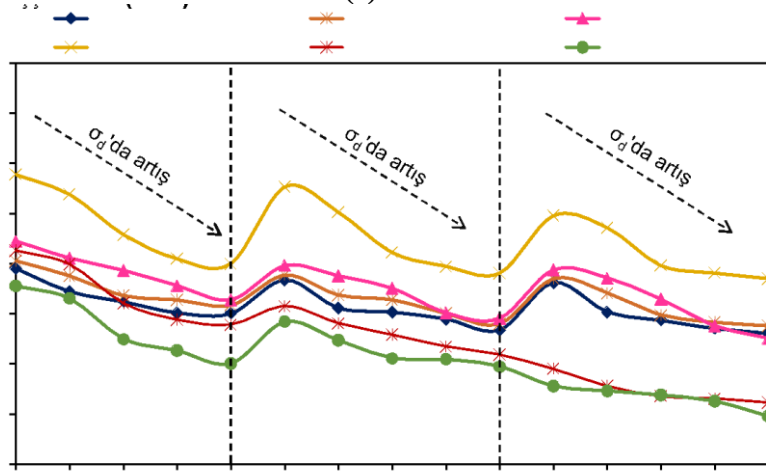


Şekil 4.33. Zemin-C'nin farklı KFASÇ içeriğinde ve çevre basıncı altında M_r değerlerinde meydana gelen değişimler

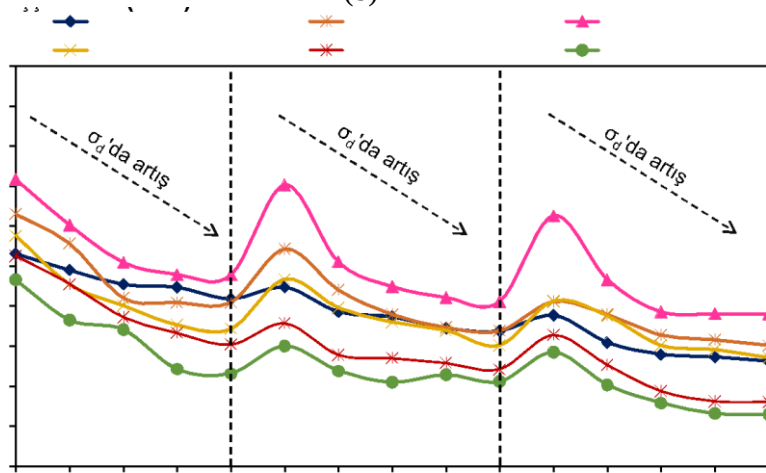
Şekil 4.33 incelendiğinde aynı deviator gerilme altında artan çevre basıncı ile zeminlerin M_r değerlerinin artış eğilimine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 3.4'te verilen yükleme serileri ile zeminlerin M_r değerlerinde görülen değişimler Şekil 4.34'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.34. Zemin-A (a), Zemin-B (b) ve Zemin-C (c)'nin farklı KFAŞÇ içeriği ve yükleme serileri ile M_r değerlerinin değişimi

Şekil 4.34 incelendiğinde M_r değerini etkileyen esas parametrenin deviatör gerilme olduğu görülmektedir. Deviatör gerilme ile M_r değerlerinde meydana gelen değişimler çevre basıncı ile değişiminden daha belirgindir. Zeminlerin artan deviatör gerilmeler karşısında M_r değerlerinin düşmesi gerilme-yumuşama davranışının bir sonucudur. Bu, artan deviatör gerilme karşısında kohezyonlu zeminlerde görülmesi beklenen bir davranıştır (Bozbey vd., 2016; Pinilla vd., 2011). Yani artan deviatör gerilme ile M_r değerlerinde düşüş gözlemlenmesi muhtemeldir. Çevre basıncının artması ile zeminlerin M_r değerlerinin artması zemin ile KFASÇ taneleri arasındaki temas yüzeyinin ve kenetlenmenin artması sonucu zemin kompozitinin rijitliğinin artmasına bağlanmıştır (Zimar vd. 2024). Ayrıca, uygulanan sabit deviatör gerilme altında çevre basıncının artması ile malzemenin eksenel yönde şekil değiştirmesi zorlanmakta ve M_r değerleri artmaktadır (Yılmaz, 2008; Yaghoubi vd., 2021).

Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü M_r deney standardı (2008) 15 yükleme serisinin ortalaması sonucu elde edilen değerler tasarım M_r değeri olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Yanısıra, Ulusal Karayolu Araştırma Programı (NCHRP) (1997) ise tasarım M_r değeri olarak taban zemini için $\sigma_d = 41$ kPa ve $\sigma_c = 14$ kPa gerilme koşulları altındaki M_r değerlerinin kullanılmasını tavsiye etmektedir. Bu koşullar gözönüne alındığında hesaplanan tasarım M_r değerleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Karayolları ve NCHRP’ye göre tasarım M_r değerleri

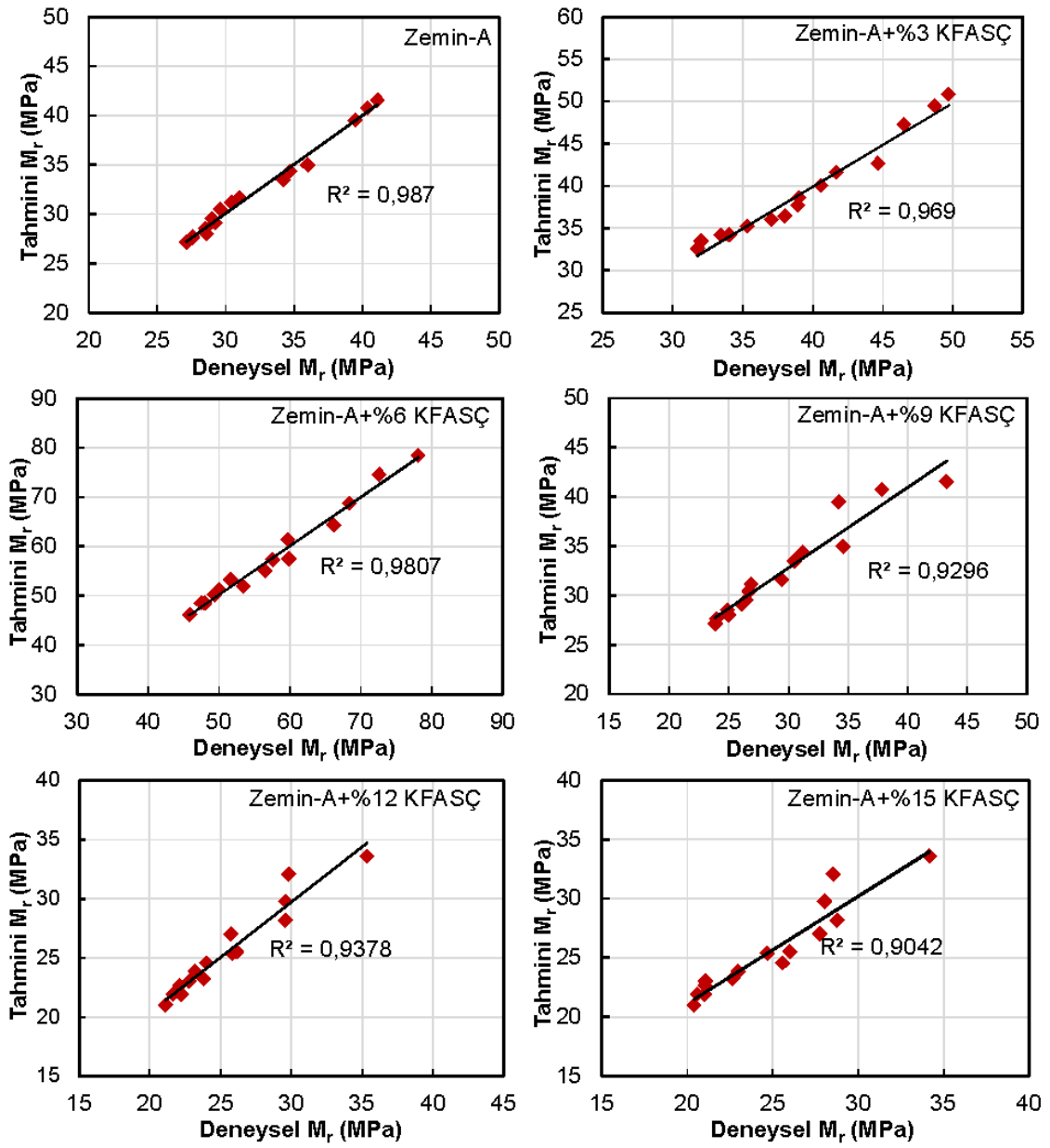
Zemin Türü	KFASÇ Oranı. %	Karayolları (2008)	NCHRP (1197)
		M_r (MPa)	M_r (Mpa)
Zemin-A	0	32.46	29.61
	3	39.43	38.01
	6	57.65	53.46
	9	40.12	37.59
	12	25.53	23.81
	15	24.89	22.67
Zemin-B	0	112.15	107.46
	3	116.01	109.40
	6	120.04	115.80
	9	139.43	129.30
	12	100.00	77.15
	15	92.24	77.56
Zemin-C	0	58.06	47.90
	3	61.51	52.74
	6	70.16	58.54
	9	57.49	50.15
	12	50.06	38.78
	15	45.16	35.78

Çizelge 4.18 incelendiğinde Karayolları M_r Deney Standardı temel alınarak hesaplanan tasarım M_r değerlerinin kısmen daha yüksek olduğu görülmüştür.

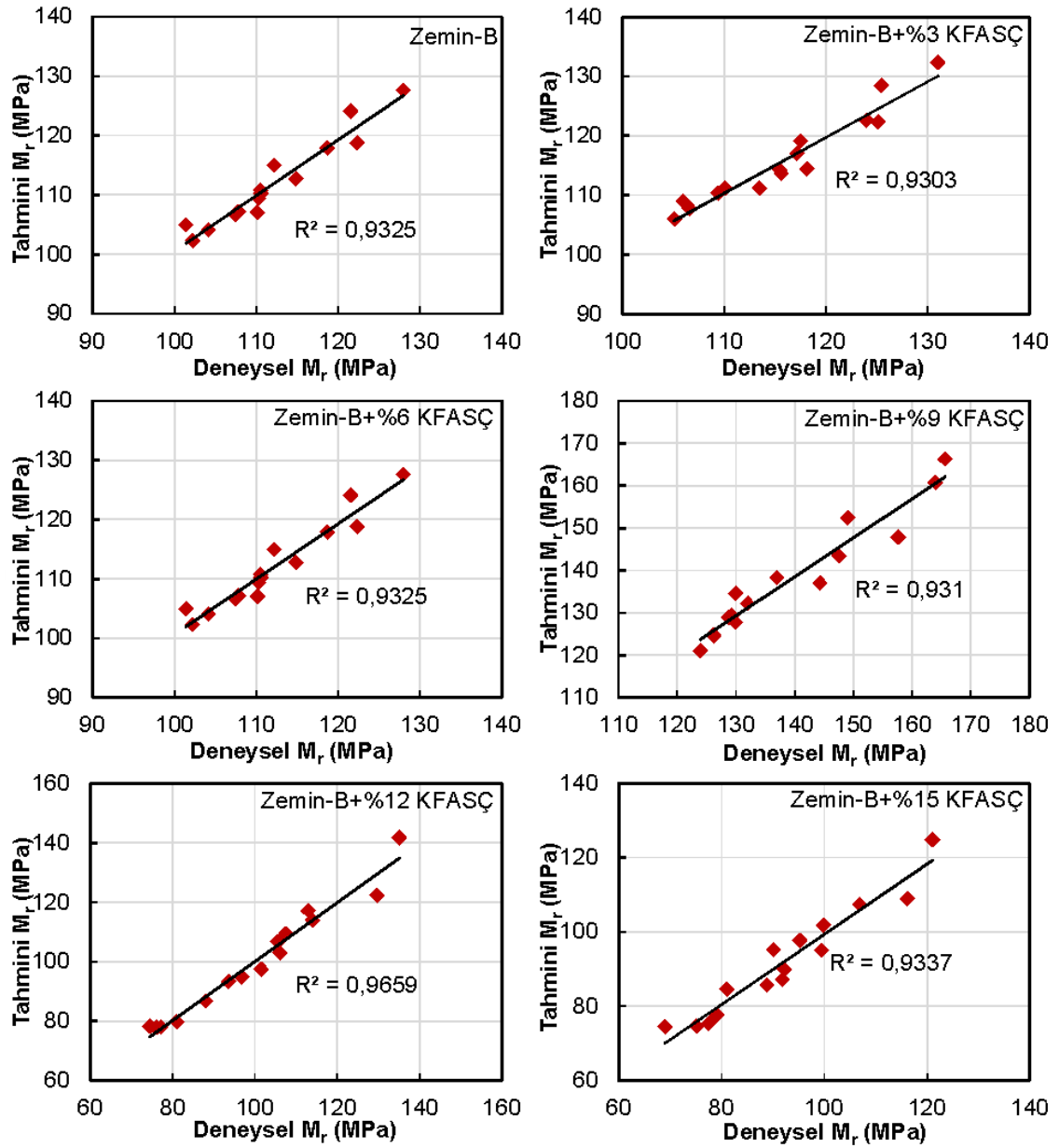
Taban zeminlerinin M_r parametrelerinin belirli bir oranda KFASÇ içeriği ile artması tekrarlı trafik yükleri altında zeminlerin göstereceği rijitliğin artmasına neden olur. Taban zeminlerinin rijitliğinin artması ile yol kaplamaları deformasyona karşı daha dirençli hale gelerek yol platformunda daha az deformasyonların oluşmasına sebep olur.

4.11.1. Esneklik Modülü tahmin modelleri bulguları

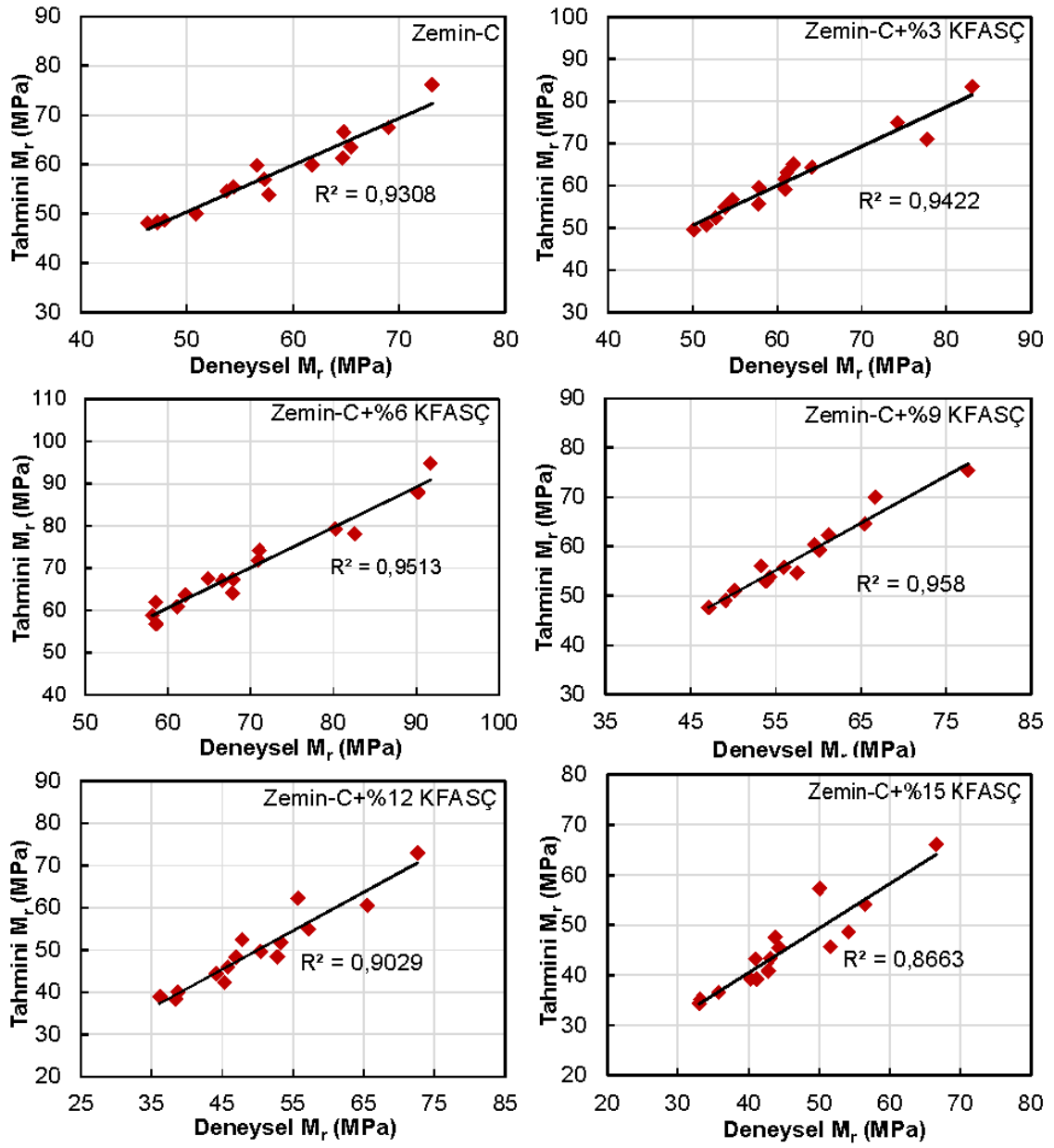
Esneklik modülü (M_r) numuneye uygulanan gerilmeye göre lineer olmayan bir şekilde değişim göstermektedir. Bu non-lineer değişimi modellemek amacıyla araştırmacılar tarafından pek çok formül geliştirilmiştir. Bölüm 3.2.2.7.1.'de ayrıntısı verilen M_r tahmin modellerinden bu tez çalışmasında sık kullanılan kullanılan modellerden olan UZAN modeli kullanılmıştır. Uzan modeli ile karşılaştırmak yapmak amacıyla AASHTO modeli tez kapsamında kullanılan bir diğer tahmin modelidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar regresyon analizine tabi tutularak malzemelerin yukarıda bahsedilen UZAN ve AASHTO modellerin katsayıları belirlenmiştir. Saf zeminler ve çeşitli oranlarda KFASÇ içeren zemin karışımları için Uzan ve AASHTO modellerinden elde edilen tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişkiler Şekil 35-40 arasında verilmiştir. Elde edilen katsayılar ile istatistiksel analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20'de verilmiştir.



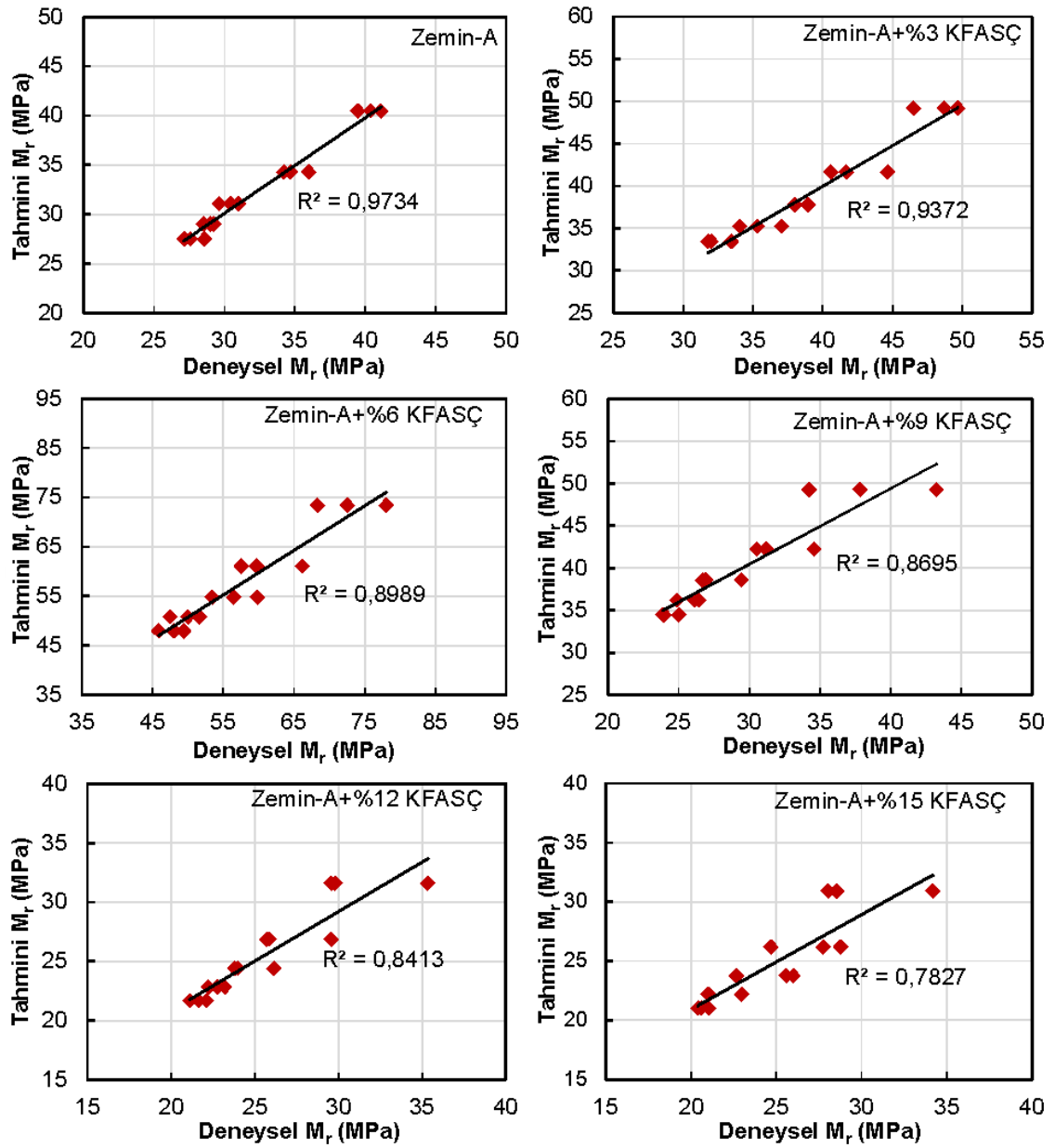
Şekil 4.35. Zemin-A ve Zemin-A/KFASÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



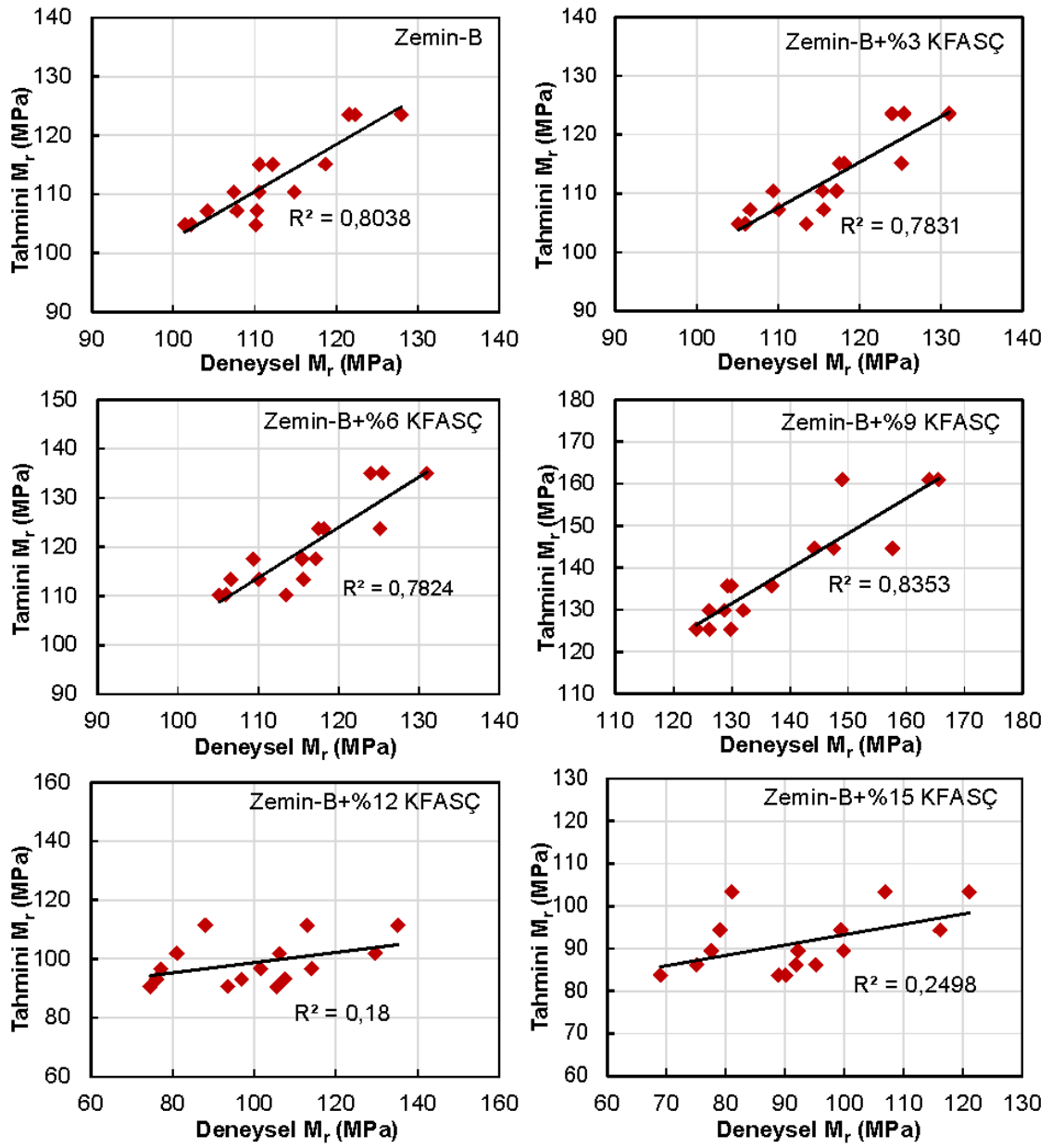
Şekil 4.36. Zemin-B ve Zemin-B/KFASÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



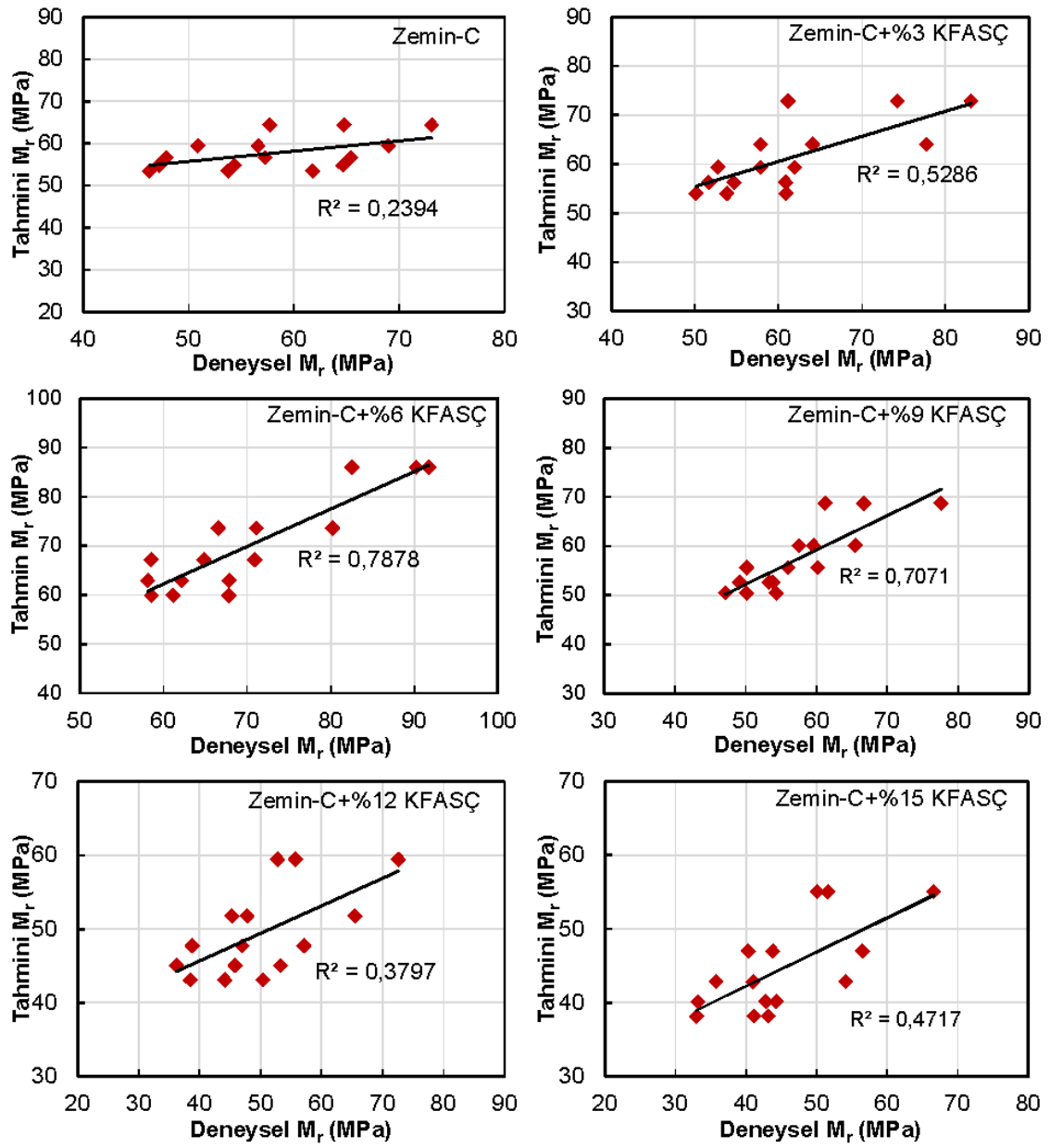
Şekil 4.37. Zemin-C ve Zemin-C/KFAŞÇ karışımlarının Uzan modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



Şekil 4.38. Zemin-A AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



Şekil 4.39. Zemin-B AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



Şekil 4.40. Zemin-C AASHTO modeli tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki

Çizelge 4.19. Zeminlere ait UZAN modeli katsayıları ve istatistiksel analizi

UZAN Modeli								
Karışım	k ₁	k ₂	k ₃	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
Zemin-A	60.52	0.054	-0.255	0.9860	0.427	0.285	0.534	1.316
Zemin-A+%3 KFASÇ	66.83	0.079	-0.263	0.9666	0.852	1.019	1.010	2.175
Zemin-A+%6 KFASÇ	89.14	0.142	-0.305	0.9796	1.148	1.769	1.330	1.996
Zemin-A+%9 KFASÇ	44.26	0.155	-0.331	0.9717	0.798	0.927	0.963	2.548
Zemin-A+%12 KFASÇ	34.99	0.130	-0.270	0.9464		0.928	0.964	2.755
Zemin-A+%15 KFASÇ	30.97	0.160	-0.284	0.9154	0.749	1.358	1.165	3.656
Zemin-B	119.4	0.077	-0.124	0.9307	1.451	3.758	1.939	1.288
Zemin-B+%3 KFASÇ	120.7	0.082	-0.123	0.9302	1.756	4.025	2.006	1.506
Zemin-B+%6 KFASÇ	119.4	0.077	-0.124	0.9324	1.451	3.758	1.939	1.288
Zemin-B+%9 KFASÇ	165.9	0.093	-0.181	0.9322	1.851	3.889	1.972	1.304
Zemin-B+%12 KFASÇ	21.38	0.527	-0.278	0.9719	1.775	3.668	1.915	1.244
Zemin-B+%15 KFASÇ	29.92	0.418	-0.249	0.9319	1.815	3.778	1.944	1.319
Zemin-C	21.33	0.372	-0.221	0.9344	1.818	4.408	2.099	3.073
Zemin-C+%3 KFASÇ	37.67	0.301	-0.272	0.9453	1.614	5.154	2.270	2.561
Zemin-C+%6 KFASÇ	69.50	0.208	-0.283	0.9486	1.990	5.644	2.375	2.810
Zemin-C+%9 KFASÇ	51.64	0.205	-0.250	0.9587	1.263	2.547	1.595	2.130
Zemin-C+%12 KFASÇ	18.84	0.441	-0.324	0.9062	2.268	7.019	2.649	4.472
Zemin-C+%15 KFASÇ	22.03	0.397	-0.339	0.8759	2.531	7.773	2.788	5.485

Çizelge 4.20. Zeminlere ait AASHTO modeli katsayıları ve istatistiksel analizi

AASHTO Modeli							
Karışım	k ₁	k ₂	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
Zemin-A	74.067	-0.240	0.9715	0.558	0.579	0.761	1.715
Zemin-A+%3 KFASÇ	89.985	-0.240	0.9365	1.108	2.017	1.420	2.825
Zemin-A+%6 KFASÇ	143.00	-0.265	0.9033	2.475	9.110	3.018	4.153
Zemin-A+%9 KFASÇ	86.166	-0.222	0.9106	10.493	114.032	10.679	36.678
Zemin-A+%12 KFASÇ	56.939	-0.234	0.8676	1.145	2.364	1.538	4.064
Zemin-A+%15 KFASÇ	56.415	-0.239	0.8080	1.565	3.289	1.814	5.933
Zemin-B	159.69	-0.102	0.7965	10.861	155.699	12.478	12.139
Zemin-B+%3 KFASÇ	164.29	-0.101	0.7779	4.016	26.913	5.187	3.389
Zemin-B+%6 KFASÇ	185.31	-0.126	0.6856	7.752	75.369	8.682	6.919
Zemin-B+%9 KFASÇ	237.80	-0.155	0.8426	4.178	31.269	5.592	2.924
Zemin-B+%12 KFASÇ	159.19	-0.129	0.1647	14.171	269.807	16.426	14.706
Zemin-B+%15 KFASÇ	143.72	-0.131	0.2326	16.616	342.532	18.508	16.092
Zemin-C	86.149	-0.116	0.2320	5.905	48.213	6.944	10.268
Zemin-C+%3 KFASÇ	116.32	-0.186	0.5345	5.047	41.953	6.477	7.987
Zemin-C+%6 KFASÇ	151.54	-0.225	0.7575	4.353	24.699	4.970	6.254
Zemin-C+%9 KFASÇ	111.27	-0.192	0.7182	3.336	17.693	4.206	5.638
Zemin-C+%12 KFASÇ	98.405	-0.200	0.3710	6.510	57.894	7.609	12.839
Zemin-C+%15 KFASÇ	97.443	-0.227	0.4599	5.762	41.916	6.474	12.714

UZAN ve AASHTO modellerinin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) gibi bazı farklı istatistiksel parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.35-4.40 ve Çizelge 4.19-4.20 incelendiğinde UZAN modelinin AASHTO modeline kıyasla daha iyi her bir zemin karışımı için daha yüksek determinasyon

katsayıları ve düşük hata parametreleri ile daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışması kapsamında UZAN modelinin taban zeminlerin davranışını daha iyi ortaya koyduğu sonucuna varılmıştır.

4.12. Yapay Sinir Ağları Bulguları

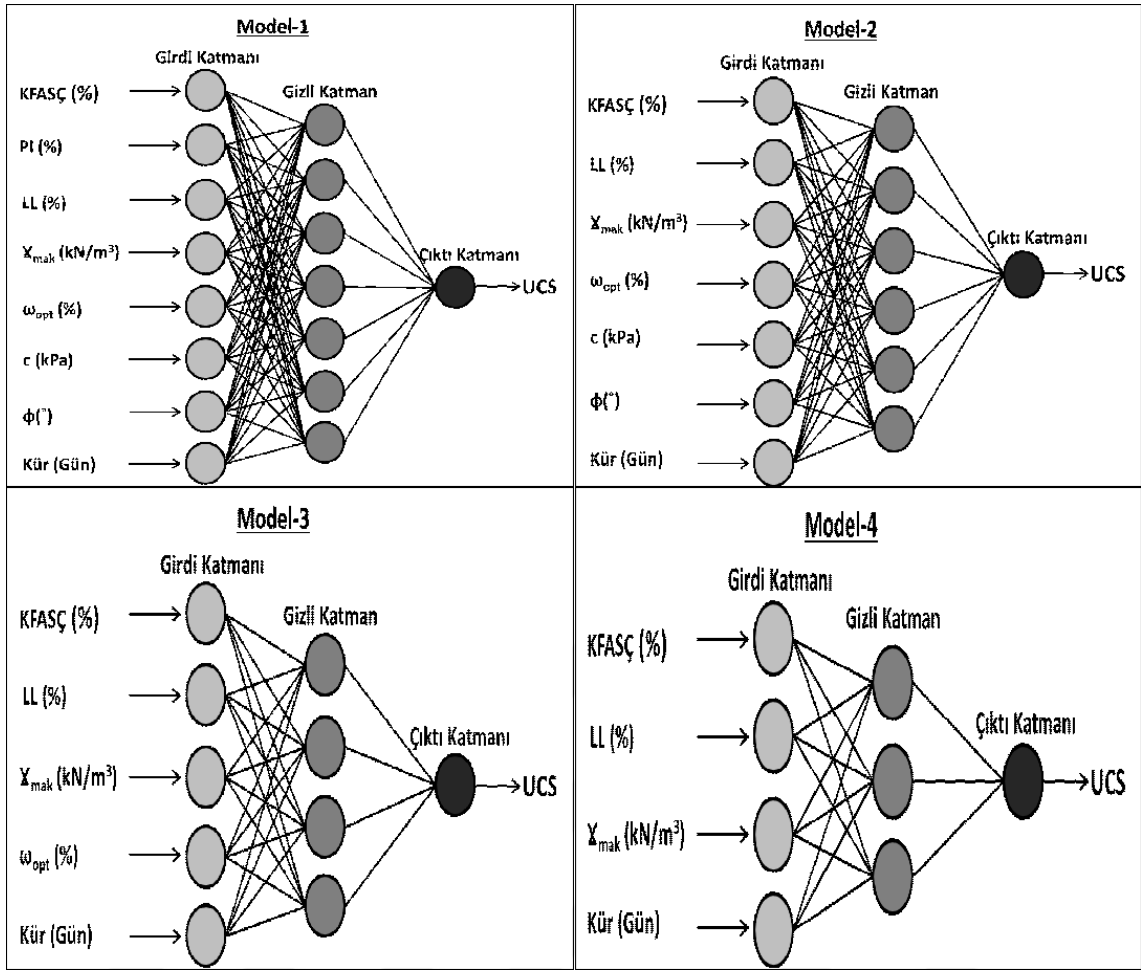
4.12.1. YSA ile UCS değerlerinin tahmini

UCS, yol alt tabakalarının mukavemetinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir (Little, 2009). Bu çalışmada, saf zeminlerin ve çeşitli oranlarda KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminlerin UCS değerlerini tahmin etmek için farklı yapay sinir ağı (YSA) ve çoklu regresyon (MR) modelleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, farklı kürlenme sürelerinde (0, 7, 28 ve 90 gün) farklı KFASÇ oranları ile iyileştirilmiş zeminlerin UCS test sonuçları YSA ve MR modellerini geliştirmek için kullanılmıştır. YSA modelleri oluşturmak için toplam 72 veri seti kullanılmış olup, bunlardan 60'ı eğitim setinde ve 12'si test setinde kullanılmıştır. Model-1 üzerinde gerçekleştirilen girdi parametrelerinin göreceli önemini ortaya koymak amacıyla yapılan duyarlılık analizleri sonucuna göre YSA ve MR ile UCS tahmininde farklı modeller benimsenmiştir. KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminlerin UCS değerini etkileyen girdi parametrelerinin göreceli önemi hakkında bilgi sağlama açısından modelin güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla farklı başlangıç rastgele ağırlıkları ile eğitilen ağlar için duyarlılık analizleri tekrarlanmıştır. Bu çalışmada, ağırlık eğitimi farklı rastgele başlangıç ağırlıklarıyla dört kez tekrarlanmıştır (Erzin and Turkoz, 2016). Çizelge 4.21'de MR modellerinin geliştirilmesinde kullanılan bağımsız ve bağımlı değişkenler verilmiştir. 4 farklı YSA modeli geliştirilmiş olup geliştirilen farklı YSA modellerinin mimarileri Şekil 4.41'de sunulmuştur. YSA modelleri bir girdi, bir gizli ve bir çıktı katmanından oluşmuştur. Girdi katmanları, atık kâğıt çamuru oranı (%), plastisite indeksi (PI), likit limiti (LL), maksimum kuru birim hacim ağırlık (V_{mak}), optimum su muhtevası (w_{opt}), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısının (ϕ°) farklı kombinasyonlarından oluşturulmuştur. YSA modellerinin geliştirilmesinde eğitim ve test aşamaları için MATLAB bilgisayar destekli yazılımının sinir ağı araç kutusu kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin optimum gizli katman sayısı, deneme yanılma yoluyla sayısı değiştirilerek belirlenmiştir. Deneme yanılma yoluyla optimum YSA modellerini geliştirmek için farklı transfer ve eğitim fonksiyonlarından tan-sigmoid ve trainlm (Levenberg-Marquardt) optimum fonksiyon

olarak seçilmiştir. Geliştirilen YSA ve MR modellerinin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) gibi bazı farklı istatistiksel parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir.

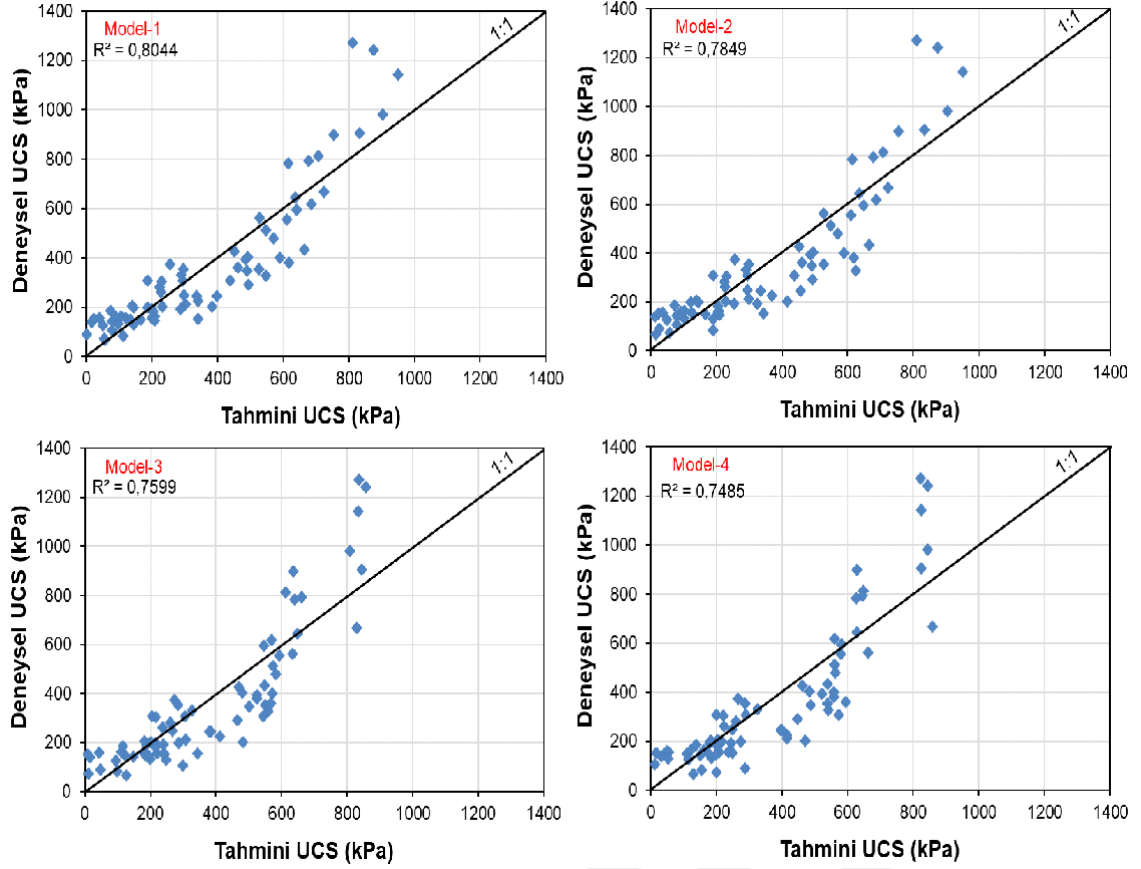
Çizelge 4.21. UCS tahmin etmede geliştirilen MR modellerinin mimarisi

	Bağımsız Değişkenler	Bağımsız Değişken Sayısı	Bağımlı Değişken
Model-1	KFASÇ (%) PI (%) LL (%) γ_{mak} (kN/m ³) w_{opt} (%) c (kPa) ϕ (°) Kür (Gün)	8	UCS
Model-2	KFASÇ (%) LL (%) γ_{mak} (kN/m ³) w_{opt} (%) c (kPa) ϕ (°) Kür (Gün)	7	
Model-3	KFASÇ (%) LL (%) γ_{mak} (kN/m ³) w_{opt} (%) Kür (Gün)	5	
Model-4	KFASÇ (%) LL (%) γ_{mak} (kN/m ³) Kür (Gün)	4	



Şekil 4.41. UCS değerlerini tahmin etmede geliştirilen YSA modellerin mimarisi

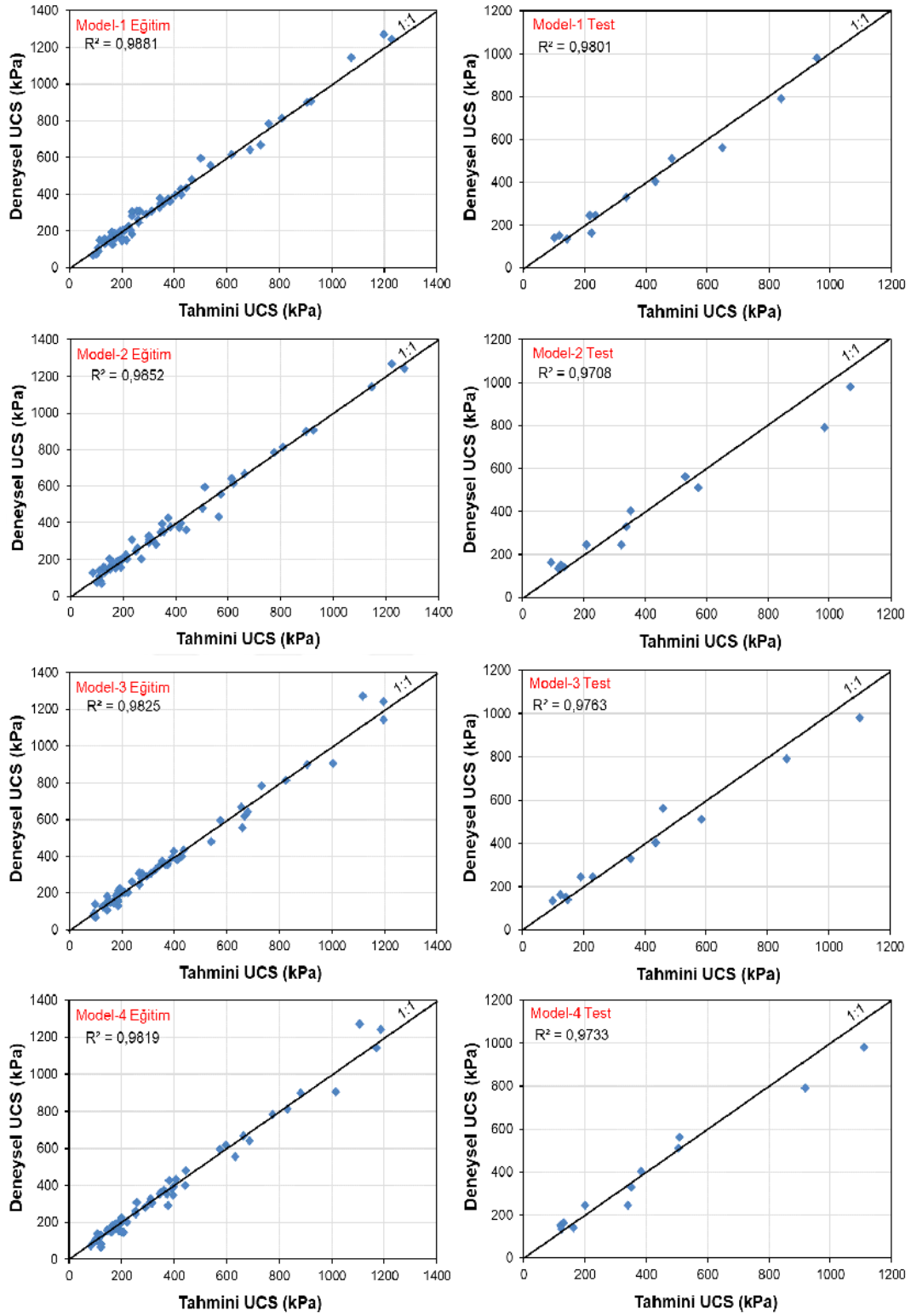
Deneyssel analizden elde edilen UCS değerlerinin MR modelleri tarafından tahmin edilen UCS değerleriyle karşılaştırılması Şekil 4.42’de sunulmuştur.



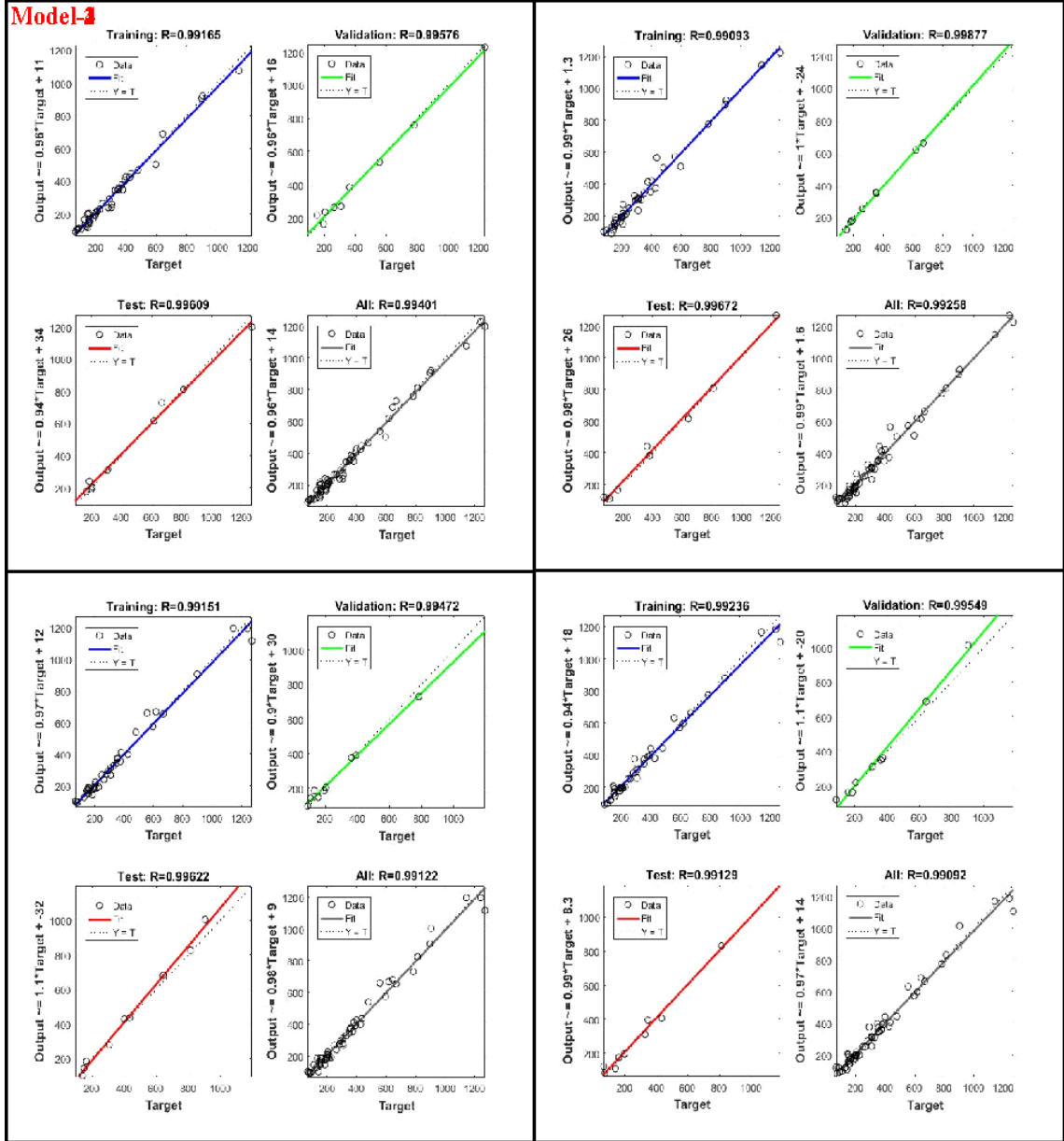
Şekil 4.42. MR modelleri UCS tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki

Şekil 4.42 incelendiğinde geliştirilen dört MR modeli arasında Model-1 nispeten daha yüksek bir R^2 değerine (0.8044) sahip olduğu görülmektedir. Model-2, Model-3 ve Model-4'ün sırasıyla 0.7849, 0.7599 ve 0.7485 R^2 değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.43'te deneysel analizden elde edilen UCS değerlerinin geliştirilen YSA modelleri tarafından tahmin edilen UCS değerleriyle karşılaştırılması sunulmuştur. MATLAB programından elde edilen YSA modellerinin regresyon performansları Şekil 4.44'te sunulmuştur.



Şekil 4.43. YSA modelleri UCS tahmini veriler ile deneyel veriler arasındaki ilişki



Şekil 4.44. YSA modelleri UCS tahmin MATLAB performans çıktıları

Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 incelendiğinde tüm YSA modellerinin R^2 değerlerinin 0.95'in üzerinde oldukça yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Geliştirilen YSA modelleri arasında Model-1 hem eğitim hem de test fazları için sırasıyla 0.9881 ve 0.9801 ile nispeten daha yüksek R^2 değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

UCS değerlerini tahmin etmek amacıyla geliştirilen MR ve ANN modellerinin MAE, RMSE ve MAPE değerleri Çizelge 4.22'de sunulmuştur.

Çizelge 4.22. UCS tahmin etmede geliştirilen MR ve YSA modelleri istatistiksel analizi

	Model	Data	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
MR	Model-1	Tüm Set	0.8044	85.33	14424.5	120.10	27.61
	Model-2		0.7849	88.07	15397.9	124.09	28.66
	Model-3		0.7599	93.82	17274.2	131.43	30.59
	Model-4		0.7485	94.61	18044.4	134.33	31.69
ANN	Model-1	Eğitim Seti	0.9881	22.75	1010.69	31.79	9.76
		Test Seti	0.9801	33.15	1602.72	40.03	12.19
	Model-2	Eğitim Seti	0.9852	23.54	1187.51	34.46	10.58
		Test Seti	0.9708	55.71	5452.33	73.84	15.97
	Model-3	Eğitim Seti	0.9825	26.06	1403.31	37.46	10.87
		Test Seti	0.9763	53.62	5171.07	71.91	13.67
	Model-4	Eğitim Seti	0.9819	25.37	1465.24	38.28	9.74
		Test Seti	0.9733	49.68	4243.31	65.14	14.40

Çizelge 4.22’de sunulunan ANN modellerinin istatistiksel parametreleri incelendiğinde MR modellerine kıyasla daha yüksek tahmin performansı sergilediği sonucuna varılabilir; bu da geliştirilen ANN modellerinin yararlılığını ve verimliliğini göstermektedir. Geliştirilen üç model arasında, MR ve ANN’deki Model-1’in genel olarak nispeten daha düşük MAE, RMSE ve MAPE değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Model-1’in kullanılan deney verileri ile UCS değerlerini tahmin etmede optimum model olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.23’te Model-1 üzerinde gerçekleştirilen hassasiyet analizi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.23. UCS hassasiyet analizi sonuçları

Trial No	Girdi Değerlerinin Bağlı Önemi (%)							Kür (Gün)
	KFAS Ç	PI	LL	Y _{mak}	W _{opt}	c	φ°	
1	9.94	12.34	13.26	14.67	11.76	10.91	12.68	14.44
2	10.75	11.71	12.95	14.18	13.50	12.23	12.69	11.99
3	11.25	9.55	14.84	13.93	12.01	13.86	11.42	13.15

4	9.79	11.77	13.31	11.93	14.85	11.73	13.4	13.22
Ortalama	10.43	11.34	13.59	13.69	13.03	12.18	12.5	13.20
Sıralama	8	7	2	1	4	6	5	3

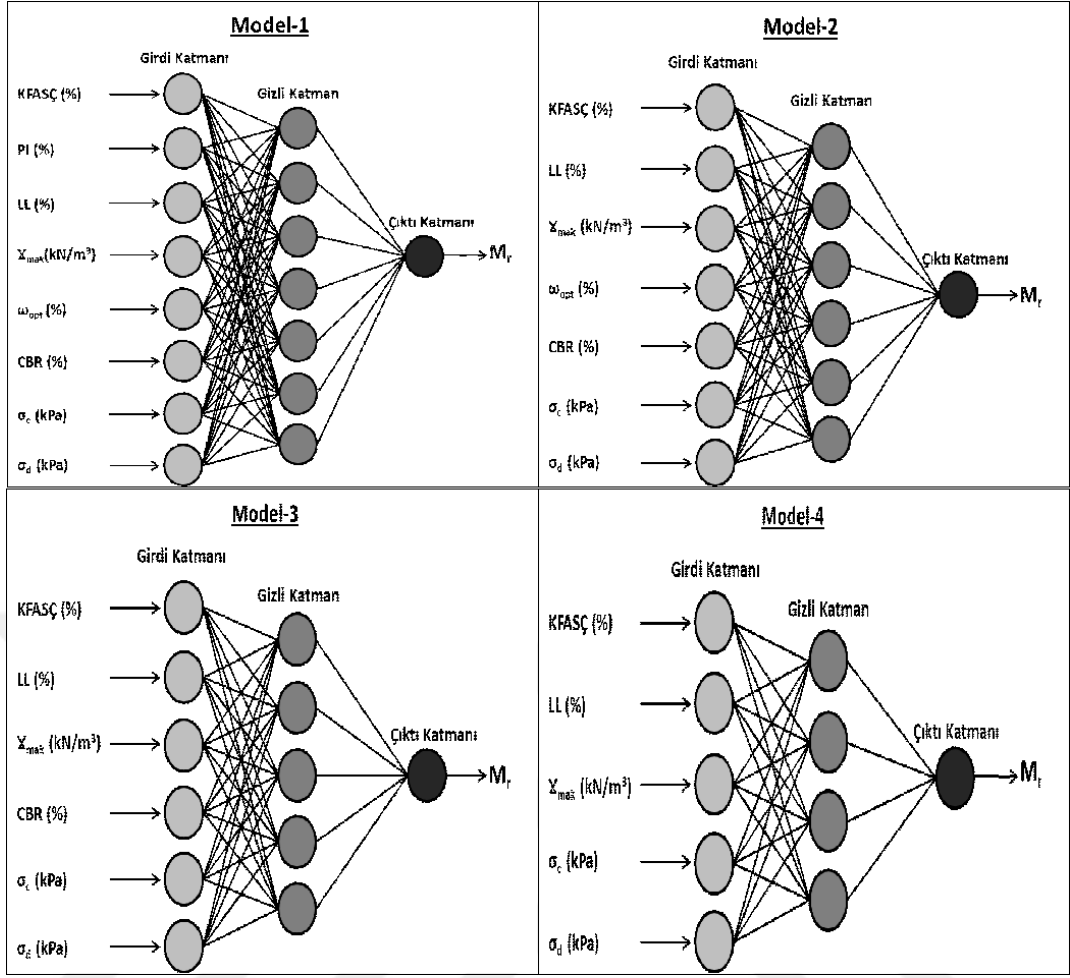
Çizelge 4.23 incelendiğinde UCS değerlerini tahmin etmede girdi değerlerinin içerisinde en yüksek bağıl öneme V_{mak} parametresinin sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Hassasiyet analizinin sonuçları incelendiğinde V_{mak} , LL and Kür parametrelerinin sırasıyla 13.69%, 13.59% and 13.20% gibi bağıl yüzdeleriyle en önemli parametreler olduğu görülmektedir. Bu parametreleri sırasıyla w_{opt} , ϕ° , c, PI ve KFASÇ değerlerinin takip ettiği görülmektedir.

4.12.2. YSA ile M_r değerlerinin tahmini

Bu çalışmada, çeşitli oranlarda KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminlerin Esneklik Modülü (M_r) değerlerini tahmin etmek için farklı yapay sinir ağı (YSA) ve çoklu regresyon (MR) modelleri geliştirilmiştir. Saf zeminlerin ve farklı KFASÇ oranları ile iyileştirilmiş zeminlerin farklı deviatör gerilme ve çevre basıncı altında elde edilen M_r değerleri, YSA ve MR modellerini geliştirmek için kullanılmıştır. YSA modelleri oluşturmak için toplam 270 adet veri seti kullanılmış olup, bunlardan 216'sı eğitim setinde ve 54'ü ise test setinde kullanılmıştır. Çizelge 4.24'te MR modellerinin geliştirilmesinde kullanılan bağımsız ve bağımlı değişkenler verilmiştir. 4 farklı YSA modeli geliştirilmiş olup geliştirilen farklı YSA modellerinin mimarileri Şekil 4.45'te sunulmuştur. YSA modelleri bir girdi, bir gizli ve bir çıktı katmanından oluşmuştur. Girdi katmanları, atık kâğıt çamuru oranı (%), plastisite indeksi (PI), likit limiti (LL), maksimum kuru birim hacim ağırlık (V_{mak}), optimum su muhtevası (w_{opt}), çevre basıncı (σ_c) ve deviatör gerilme (σ_d)'nin farklı kombinasyonlarından oluşturulmuştur. YSA modellerinin geliştirilmesinde eğitim ve test için MATLAB bilgisayar destekli yazılımının sinir ağı araç kutusu kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin optimum gizli katman sayısı, deneme yanılma yoluyla sayısı değiştirilerek belirlenmiştir. Deneme yanılma yoluyla optimum YSA modellerini geliştirmek için farklı transfer ve eğitim fonksiyonlarında tan-sigmoid ve trainlm (Levenberg-Marquardt) seçilmiştir. Geliştirilen YSA ve MR modellerinin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) gibi bazı farklı istatistiksel parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir.

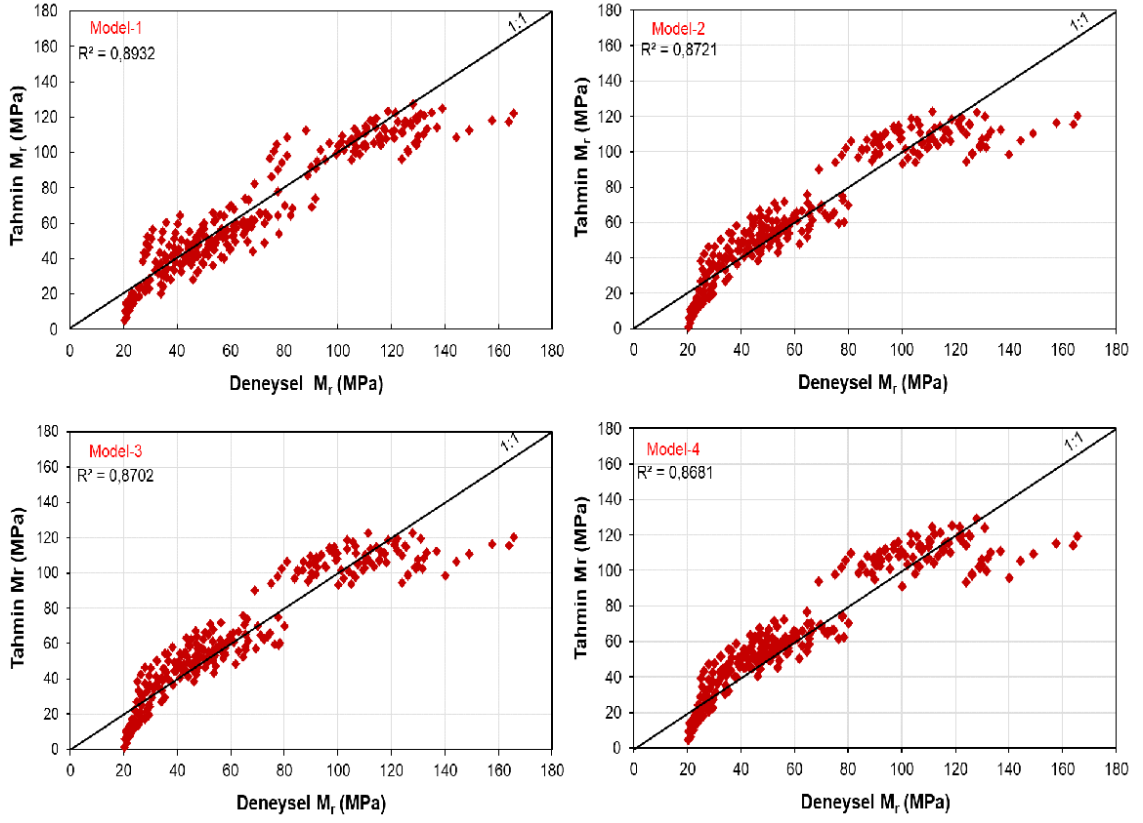
Çizelge 4.24. M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen MR modellerinin mimarisi

	Bağımsız Değişkenler	Bağımsız Değişken Sayısı	Bağımlı Değişken
Model-1	KFASÇ (%) PI (%) LL (%) MDD (kN/m ³) OMC (%) CBR (%) σ_c (kPa) σ_d (kPa)	8	
Model-2	KFASÇ (%) LL (%) MDD (kN/m ³) OMC (%) CBR (%) σ_c (kPa) σ_d (kPa)	7	M_r
Model-3	KFASÇ (%) LL (%) MDD (kN/m ³) CBR (%) σ_c (kPa) σ_d (kPa)	6	
Model-4	KFASÇ (%) LL (%) MDD (kN/m ³) σ_c (kPa) σ_d (kPa)	5	



Şekil 4.45. M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen YSA modellerin mimarisi

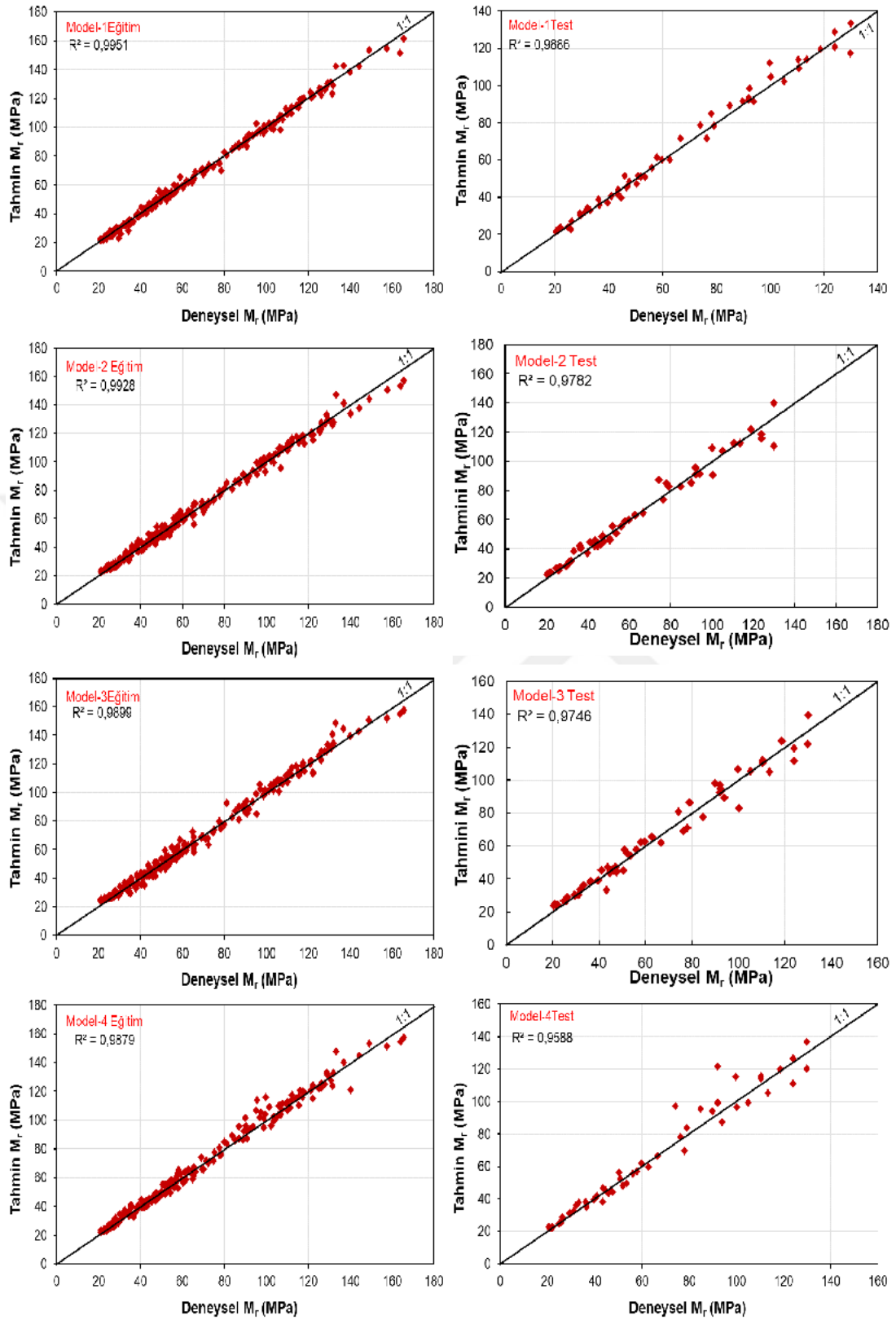
Deneyisel analizden elde edilen M_r değerlerinin MR modelleri tarafından tahmin edilen M_r değerleriyle karşılaştırılması Şekil 4.46’da verilmiştir.



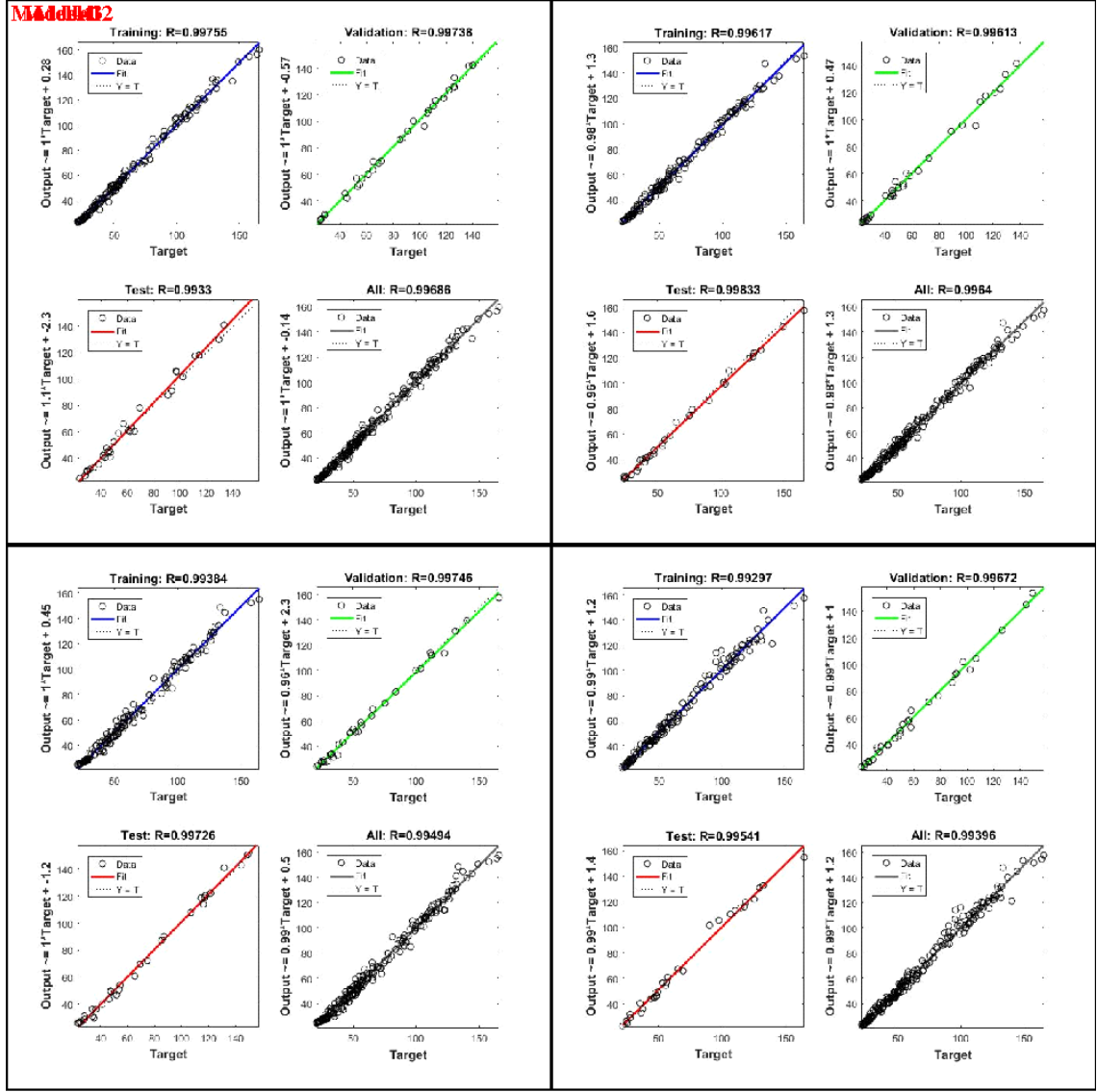
Şekil 4.46. MR modelleri M_r tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki

Şekil 4.46 incelendiğinde geliştirilen 4 MR modeli arasında Model-1'in nispeten daha yüksek bir R^2 değerine (0.8932) sahip olduğu görülmektedir. Model-2, Model-3 ve Model-4'ün R^2 değerlerinin sırasıyla 0.8721, 0.8702 ve 0.8681 olduğu görülmüştür.

Şekil 4.47'de deneysel analizlerden elde edilen M_r değerlerinin YSA modelleri tarafından tahmin edilen M_r değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. MATLAB programından elde edilen YSA modellerinin regresyon performansları Şekil 4.48'de sunulmuştur.



Şekil 4.47. YSA modelleri M_r tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki ilişki



Şekil 4.48. YSA modelleri M_r tahmin MATLAB performans çıktıları

Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da verilen tüm YSA modellerinin R^2 değerlerinin oldukça yüksek olduğu (> 0.95) görülmektedir. YSA modelleri arasında Model-1 hem eğitim hem de test fazları için sırasıyla 0.9951 ve 0.9886 nispeten daha yüksek R^2 değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

MR ve YSA modellerinin MAE, RMSE ve MAPE değerleri Çizelge 4.25’te verilmiştir.

Çizelge 4.25. M_r tahmin etmede geliştirilen MR ve YSA modelleri istatistiksel analizi

		R^2	MAE	MSE	RMSE	MAPE
Model-1	ANN-Eğitim	0.9951	1.668	6.124	2.475	2.874
	ANN-Test	0.9886	2.612	13.336	3.652	4.378
	Regresyon	0.8932	8.845	143.54	11.981	15.527
Model-2	ANN-Eğitim	0.9928	2.240	9.283	3.047	3.819
	ANN-Test	0.9782	3.501	24.309	4.930	5.864
	Regresyon	0.8721	9.504	157.459	12.548	17.580
Model-3	ANN-Eğitim	0.9899	2.670	12.759	3.572	4.815
	ANN-Test	0.9746	4.117	28.432	5.332	7.083
	Regresyon	0.8702	9.626	159.836	12.643	17.751
Model-4	ANN-Eğitim	0.9879	2.704	15.511	3.938	4.253
	ANN-Test	0.9588	4.549	50.360	7.096	6.724
	Regresyon	0.8681	9.639	166.336	12.897	17.852

Çizelge 4.25'te verilen istatistiksel parametreler incelendiğinde MR modellerine kıyasla YSA modellerinin daha yüksek tahmin performansı sergiledikleri sonucuna varılabilir; bu da YSA modellerinin yararlılığını ve verimliliğini göstermektedir. Geliştirilen 4 farklı tahmin modelleri arasından, MR ve YSA'daki Model-1'in genel olarak nispeten daha yüksek belirleme katsayısı ve daha düşük hata parametrelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Model-1'in kullanılan deney verileri ile M_r değerlerini tahmin etmede optimum model olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.26'da Model-1 üzerinde gerçekleştirilen hassasiyet analizi sonuçları verilmiştir.

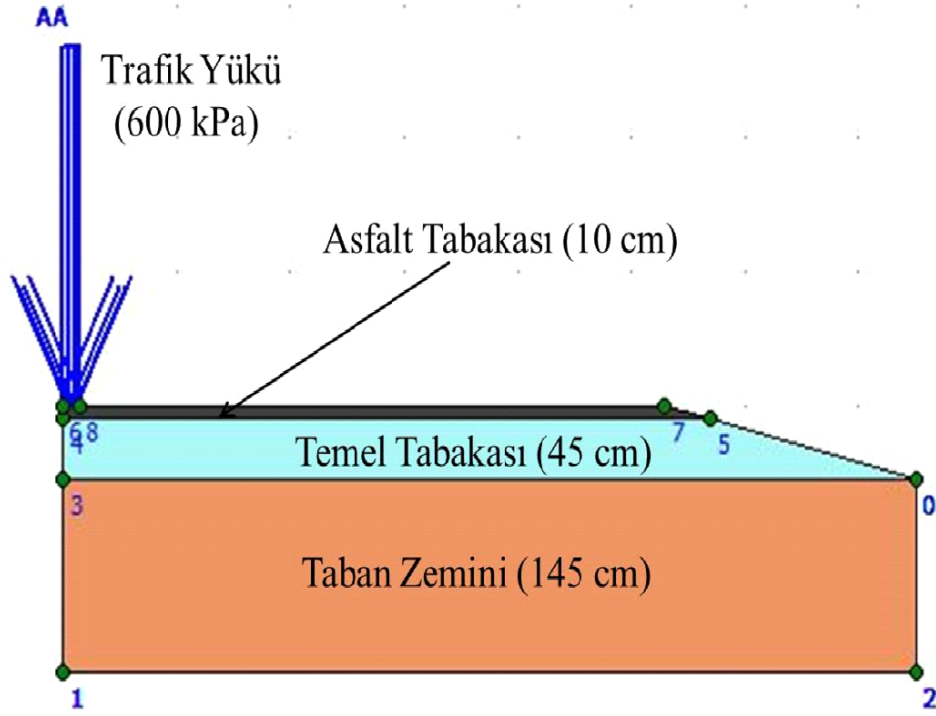
Çizelge 4.26. M_r hassasiyet analizi sonuçları

Deneme No	Girdi Değişkenlerinin Bağlı Önemi (%)							
	KFAS	PI	LL	γ_{mak}	w_{opt}	CBR	σ_c	σ_d
	Ç							
1	8.55	6.20	21.38	30.98	9.77	17.28	3.66	2.18
2	8.41	6.33	21.49	30.50	9.97	16.90	3.81	2.34
3	8.48	6.12	21.24	31.21	9.88	17.22	3.58	2.27
4	8.57	6.22	21.32	30.85	9.87	17.17	3.70	2.22
Ortalama	8.50	6.22	21.36	30.89	9.87	17.14	3.69	2.25
Sıralama	5	6	2	1	4	3	7	8

Çizelge 4.26 incelendiğinde M_r değerlerini tahmin etmede γ_{mak} parametresinin girdi değerlerinin içerisinde en yüksek bağlı öneme sahip olduğu görülmektedir. Hassasiyet analizinin sonuçları incelendiğinde γ_{mak} , LL and CBR parametrelerinin sırasıyla %30.89, %21.36 and %17.14 gibi bağlı yüzdeleriyle zemin karışımlarının M_r değerlerini etkilemede en önemli parametreler olduğu görülmektedir. Bu parametreleri sırasıyla w_{opt} , KFASÇ, PI, σ_c ve σ_d parametrelerinin takip ettiği görülmektedir.

4.13. Plaxis 2D ile Taban Zemini Modelleme Bulguları

Bu tez çalışmasında Plaxis 2D ile zemin modellemesinde Şekil 4.49’da verilen karayolu tabakası modeli eksenel simetri ile geliştirilmiştir.



Şekil 4.49. Plaxis 2D tabaka modelleri

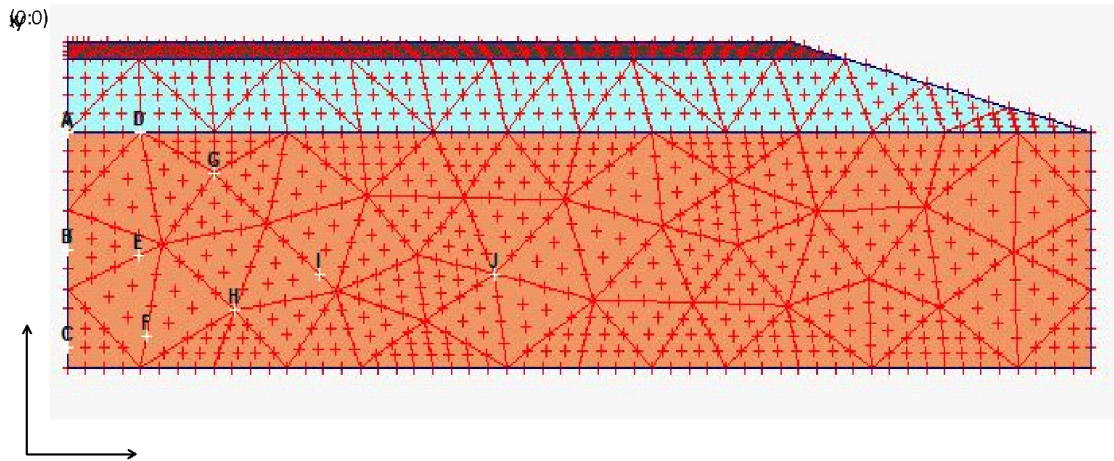
Geliştirilen model 145 cm kalınlığına sahip taban zemini üzerine inşa edilen 45 cm kalınlığındaki temel tabakası ve 10 cm kalınlığındaki sıcak karışım asfalt tabakasından oluşmaktadır. Trafik yüklerini simüle etmek amacıyla 15 cm çapında 600 kPa tekerlek yükü asfalt tabakası üzerine etki ettirilmiştir (Jassim, 2022). Yol eğimi karayollarında genellikle tercih edilen (1:4; dikey: yatay) oranı kullanılmıştır.

Tabaka modellerini oluştururken kullanılan veriler Çizelge 4.27’de verilmiştir.

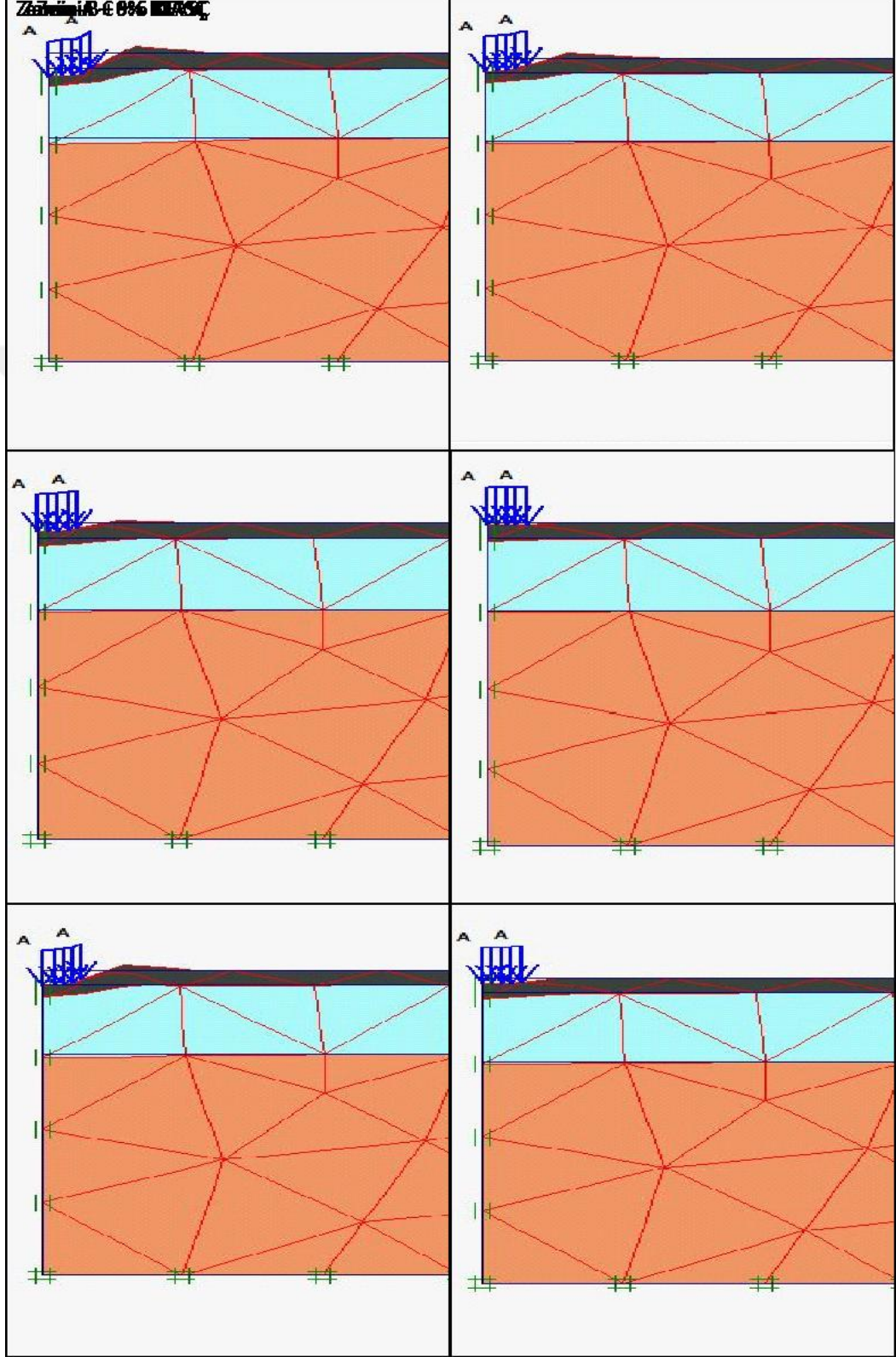
Çizelge 4.27. Plaxis 2D analizlerinde kullanılan tabaka verileri

	Karışım	c (kPa)	Φ (°)	γ (kN/m ³)	M_r (MPa)	ν
	Asfalt Tabakası	1	35	23	1000	0.30
	Temel Tabakası	1	30	19	200	0.30
Zemin-A	%0 KFASÇ	40.37	21.03	20.79	32.46	0.40
	%3 KFASÇ	30.33	21.19	19.60	39.43	0.40
	%6 KFASÇ	26.67	22.87	19.33	57.65	0.40
	%9 KFASÇ	18.00	23.13	19.30	40.12	0.40
	%12 KFASÇ	16.66	25.5	18.10	25.53	0.40
	%15 KFASÇ	13.67	26.81	17.83	24.89	0.40
Zemin-B	%0 KFASÇ	23.33	43.1	20.54	112.15	0.40
	%3 KFASÇ	35.00	42.05	19.92	116.01	0.40
	%6 KFASÇ	43.00	36.27	19.76	120.04	0.40
	%9 KFASÇ	44.37	33.64	19.48	139.43	0.40
	%12 KFASÇ	47.00	33.12	19.30	100.00	0.40
	%15 KFASÇ	45.33	32.59	19.49	92.24	0.40
Zemin-C	%0 KFASÇ	14.00	38.63	18.83	58.06	0.40
	%3 KFASÇ	15.67	37.06	18.33	61.51	0.40
	%6 KFASÇ	24.33	36.53	18.28	70.16	0.40
	%9 KFASÇ	23.00	35.22	18.10	57.49	0.40
	%12 KFASÇ	17.33	34.43	17.78	50.06	0.40
	%15 KFASÇ	7.33	34.12	17.70	45.16	0.40

Asfalt ve temel tabakası verileri literatürden varolan çalışmalardan alınmıştır (Ali, 2012; Jassim, 2022; Tanyıldızı ve Çınar; 2023). Tabakaların analizinde Çizelge 4.15’te verilen Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (2008) önerdiği tasarım M_r değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, taban zemininde trafik yükü etkisiyle meydana gelen deplasmanlar taban zemini içerisinde Şekil 4.50’de seçilen noktalar için incelenmiştir. Bu noktaların koordinatı A(0:1.45), B(0:0.73), C(0.54:1.45), D(0.52:0.69), E(1.52:1.69) F(0.57:0.19), G(1.07:1.20), H(1.22:0.35), I(1.84:0.57), J(3.13: 0.58)’dir.

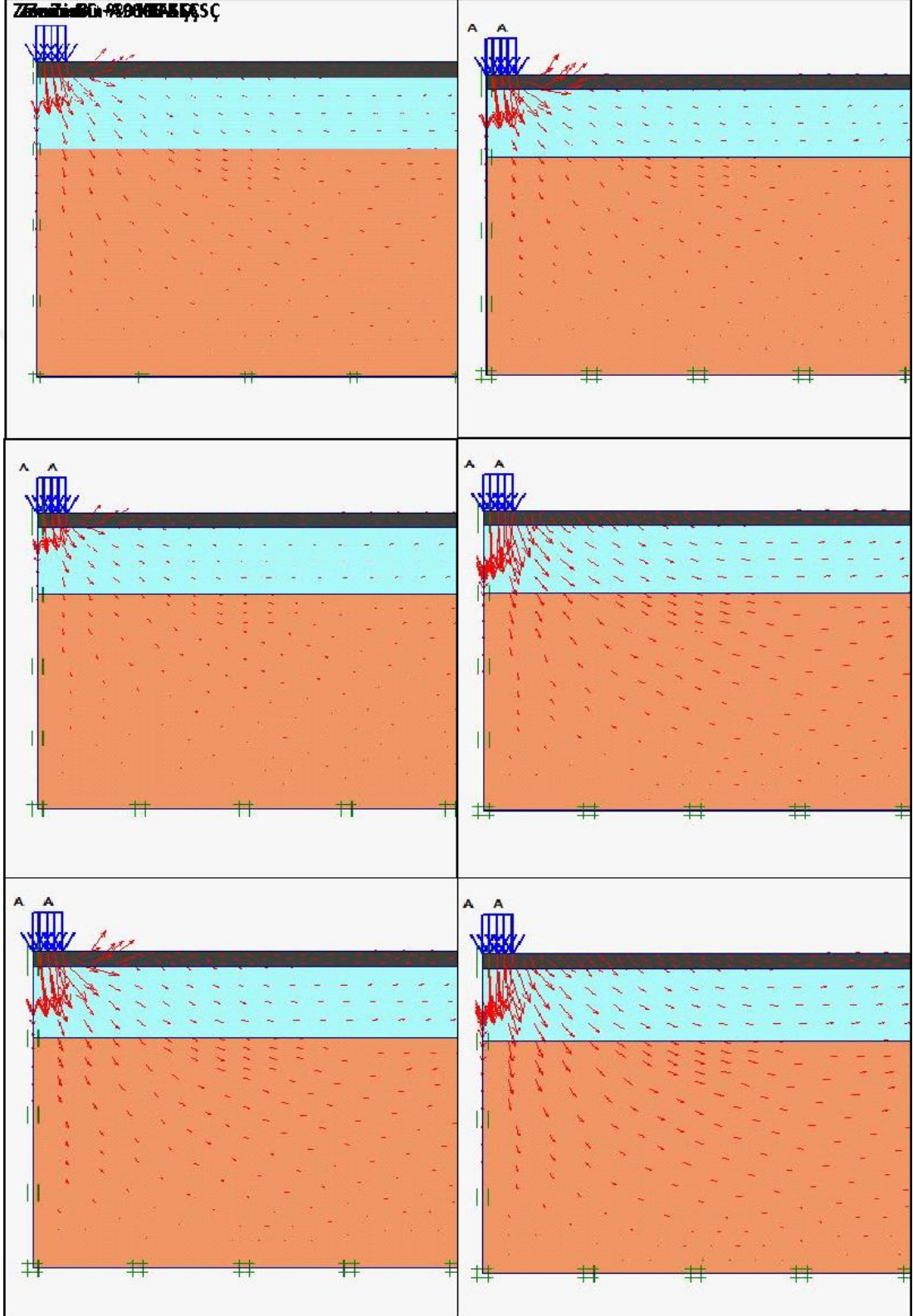


Şekil 4.50. Deplasman analizinde seçilen noktalar
Zeminlerin analiz sonucu yük altında gösterdikleri deformasyon şekilleri Şekil 4.51’de verilmiştir.



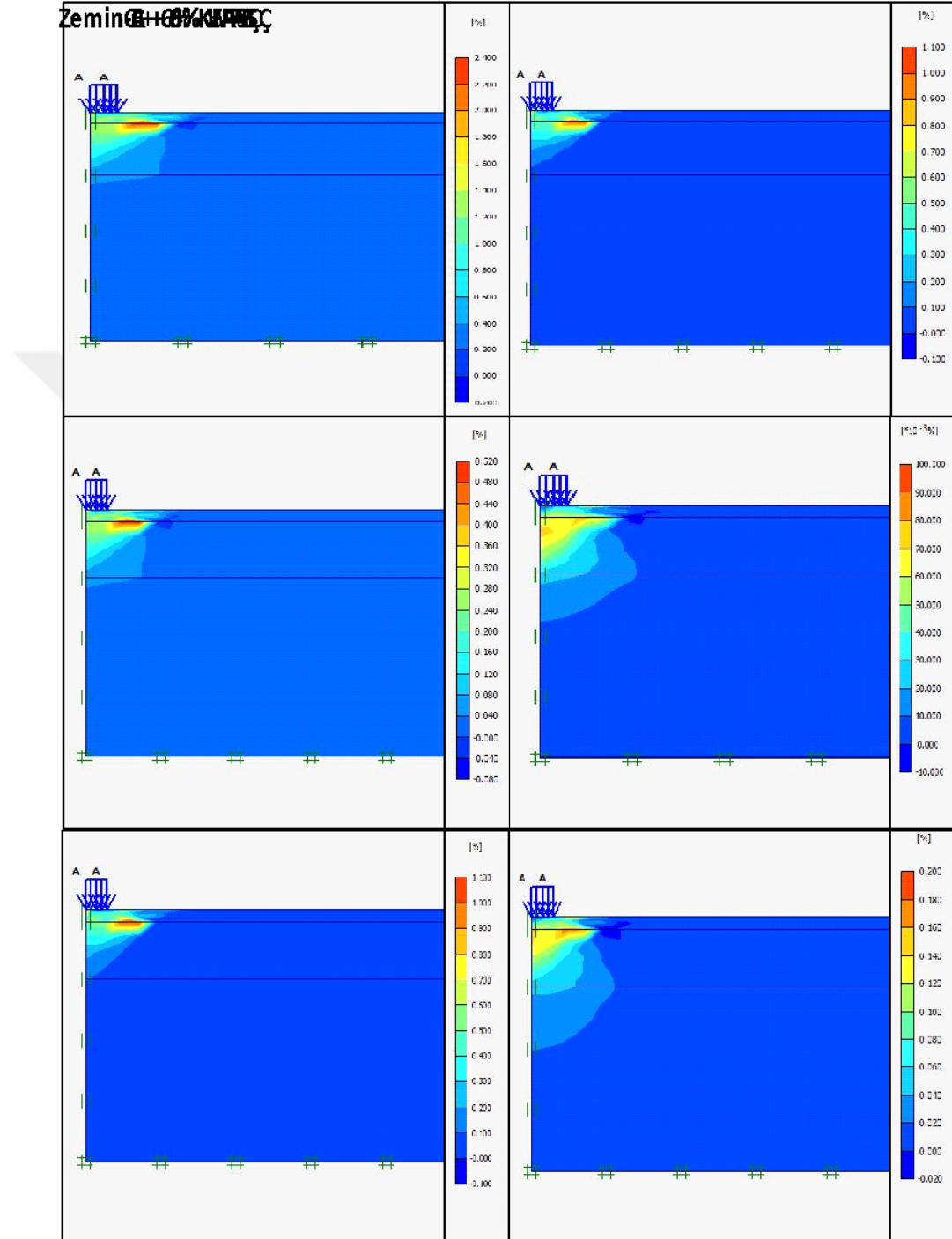
Şekil 4.51. Zeminlerin yük altındaki deformasyonları

Etki eden yük sonrası zeminlerde meydana gelen yer değiştirme etkisi Şekil 4.52’de sunulmuştur.



Şekil 4.52. Zeminlerin yük altındaki toplam yer değiştirmeleri

Şekil 4.53'te zemin tabakasında yükleme sonucu meydana gelen kayma gerinimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.53. Zeminlere etki eden kesme gerinimleri

Plaxis 2D analiz sonucu zeminlerde meydana gelen yatay yer değiştirme, toplam yer değiştirme, toplam gerinme ve kayma gerinimleri Çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28. Plaxis 2D analiz sonuçları

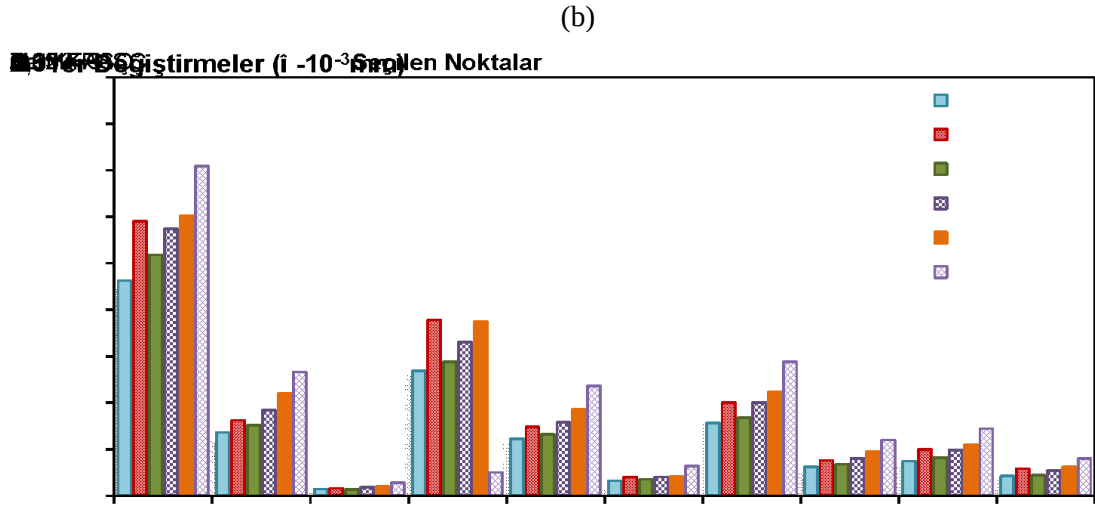
	Karışım	Yatay Yer Değiştirme ($\times 10^{-3}$ m)	Toplam Yer Değiştirme ($\times 10^{-3}$ m)	Toplam Gerinme (%)	Kayma Gerinimi (%)
Zemin-A	%0 KFASÇ	1.39	3.25	4.33	2.39
	%3 KFASÇ	1.73	2.97	3.04	1.72
	%6 KFASÇ	0.85	1.82	1.92	1.06
	%9 KFASÇ	1.88	3.19	4.67	2.61
	%12 KFASÇ	1.94	3.40	4.81	2.69
	%15 KFASÇ	2.13	4.60	4.86	2.74
Zemin-B	%0 KFASÇ	0.45	1.18	0.94	0.51
	%3 KFASÇ	0.27	0.82	0.72	0.34
	%6 KFASÇ	0.10	0.48	0.21	0.11
	%9 KFASÇ	0.08	0.39	0.18	0.09
	%12 KFASÇ	0.23	0.81	0.59	0.25
	%15 KFASÇ	0.47	1.25	0.97	0.53
Zemin-C	%0 KFASÇ	0.91	2.11	1.99	1.10
	%3 KFASÇ	0.35	1.31	0.61	0.34
	%6 KFASÇ	0.18	0.78	0.37	0.19
	%9 KFASÇ	0.25	1.02	0.53	0.27
	%12 KFASÇ			0.77	0.39
	%15 KFASÇ	0.36	1.33		
				1.13	0.64
		0.57	1.72		

Sonuçlar incelendiğinde zeminlerde meydana gelen deformasyonların ve gerinimlerin KFASÇ ile azaldığı gözlemlenmiştir. En büyük deformasyon ve gerinimler iyileştirilmemiş Zemin-A numunesinde görülmüştür. En düşük deformasyon ve gerinimler ise %9 oranında KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-B numunesinden elde edilmiştir. Zeminin rijitliğinin artması ile etki eden trafik yükleri altında gösterdiği deformasyonların azaldığı görülmüştür.

Taban zemini içerisinde seçilen nokta bazlı deplasman değerleri Çizelge 4.29’da verilmiştir. Şekil 4.54’te seçilen noktalarda deplasman değerlerinde meydana gelen değişimler şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.29. Plaxis 2D taban zemini noktasal deplasman sonuçları

		Deplasman ($\times 10^{-4}$ m)										
	Karışım	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Zemin-A	%0 KFASÇ	3.8	1.0	0.1	2.4	1.0	0.2	1.4	0.55	0.66	0.41	
		3	1	0	0	3	7	3				
	%3 KFASÇ	2.9	0.8	0.0	1.7	0.7	0.2	0.9	0.39	0.47	0.28	
		1	6	9	6	9	1	9				
	%6 KFASÇ	2.5	0.6	0.0	1.5	0.6	0.1	0.7	0.25	0.32	0.20	
		1	8	5	0	1	6	8				
	%9 KFASÇ	3.1	0.9	0.0	1.8	0.8	0.2	1.0	0.42	0.50	0.29	
		1	1	9	8	1	3	5				



(c)

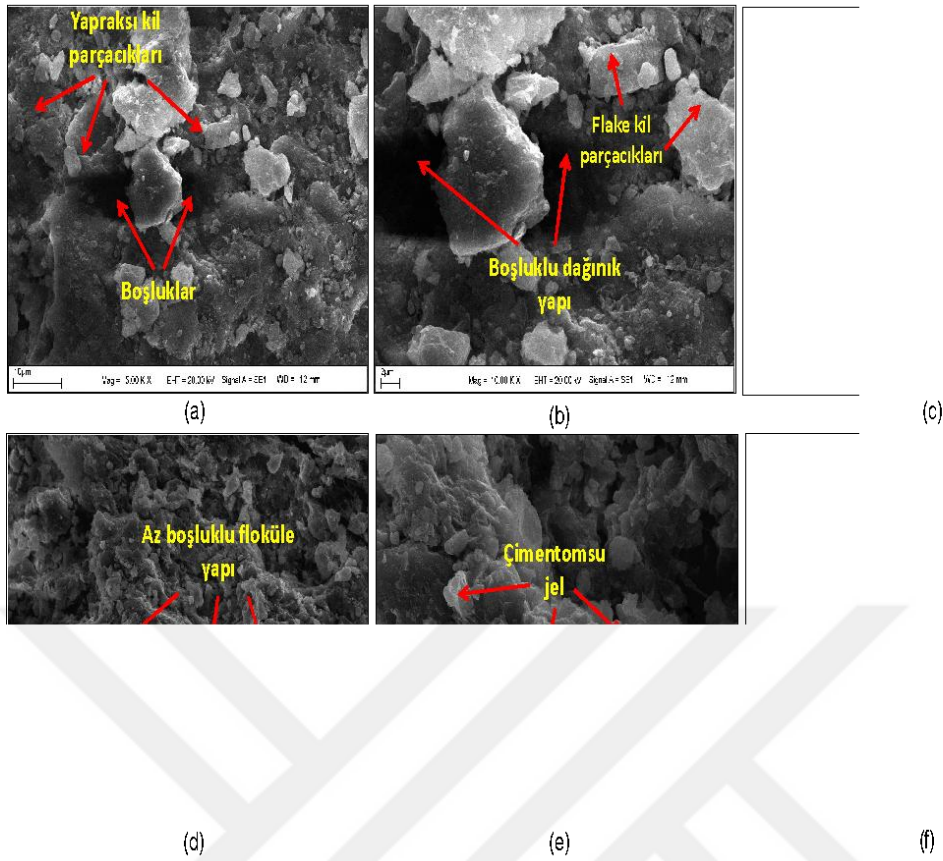
Şekil 4.54. Yol platformu taban zemini içerisinde seçilen noktalarda meydana gelen yer değiştirmeler

Şekil 4.54 incelendiğinde etki eden yükten uzaklaştıkça ve taban zemini alt noktalarına doğru deplasman değerlerinin azaldığı görülmüştür. En yüksek deplasmanlar saf Zemin-A'da görülürken, en düşük deplasman değerleri %12 KFASÇ ile iyileştirilen Zemin-B karışımında görülmüştür. Taban zeminlerinin KFASÇ ile iyileştirilmesinin sonucunda trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonların ve gerilmelerin azalması iyileştirilme ile beraber daha rijit ve stabil bir yol platformu elde edilebileceği açısından önem arz etmektedir.

4.14. İçyapı Analizi Bulguları

4.14.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analizi bulguları

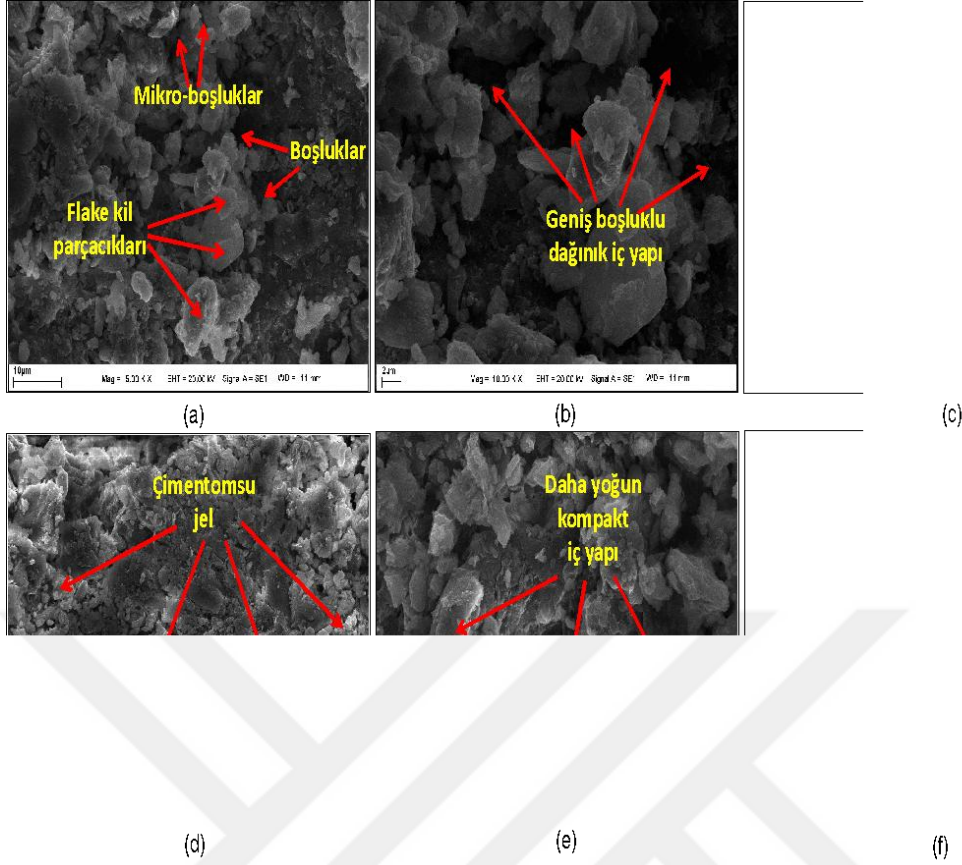
Zemin-A ve %6 oranında KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-A'nın SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 4.55'te verilmiştir.



Şekil 4.55. Zemin-A 10µm (a), 2µm (b), EDX (c) ve Zemin-A+%6 KFASÇ 10µm (d), 2µm (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri

Saf Zemin-A'nın SEM görüntülerinde, flake kil parçacıkları ve büyük ölçüde dağınık boşluklu ve gözenekli içyapı tespit edilmiştir. Zemin-A'nın %6 oranında KFASÇ ile iyileştirilmesinin sonucunda zemin ve KFASÇ parçacıkları arasındaki katyon değişimi ile beraber floküle olmuş bir içyapı görüntülenmiştir. Ayrıca, zemin yapısında bulunan silika ile KFASÇ atıklarındaki kalsiyum arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar sonucu çimentomsu jel oluşumu tespit edilmiştir ve bu da saf zemine kıyasla daha kompakt ve yoğun bir içyapı oluşmasına neden olmuştur. %6 KFASÇ içeren Zemin-A'nın EDX analizi, Ca (kalsiyum) içeriğinde bir artışın ve buna karşılık Si (silisyum) ve Al (alüminyum) içeriğinde bir azalmayı östermiştir. Si ve Al içeriklerindeki azalmalar, nem varlığında topraktaki Al ve Si ile KFASÇ'de bulunan Ca arasında çimentomsu bileşikler oluşturmak için meydana gelen puzolanik reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır.

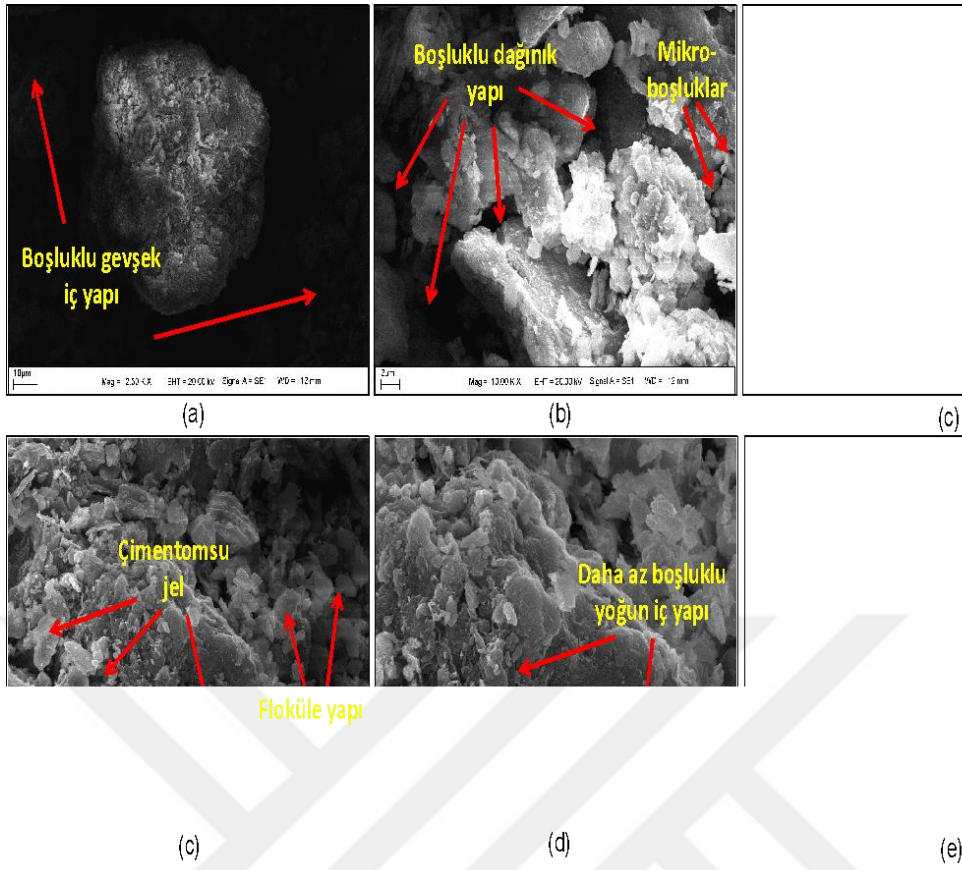
Saf Zemin-B ve %9 KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-B'nin SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.56. Zemin-B 10µm (a), 2µm (b), EDX (c) ve Zemin-B+%9 KFASÇ 10µm (d), 2µm (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri

Saf Zemin-B'nin mikro yapısı, büyük gözenekler ve mikro boşluklar ile dağılmış bir içyapıdan oluşmaktadır. Zemin-B'nin %9 KFASÇ ile iyileştirilmesinin bir sonucu olarak, daha kompakt ve yoğun bir yapı oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca, %9 KFASÇ ile Zemin-B'nin mikro görüntülerinde daha önce de belirtildiği gibi zemin yapısında bulunan silika ile KFASÇ'nin yapısında bulunan kalsiyum arasında meydana gelen pozolanik reaksiyonlar sonucu çimentomsu jel oluşumu tespit edilmiştir ve bu da Zemin-A'nın EDX analizinde olduğu gibi Zemin-B için gerçekleştirilen EDX analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 4.57'de saf Zemin-C ve %12 KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-C'nin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.

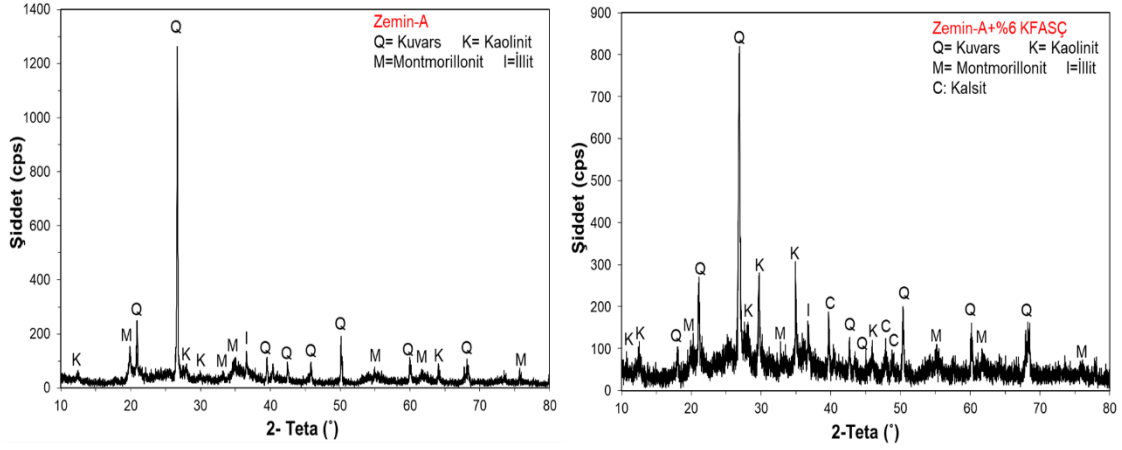


Şekil 4.57. Zemin-C 10µm (a), 2µm (b), EDX (c) ve Zemin-C+%12 KFASÇ 10µm (d), 2µm (e), EDX (f) karışımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri

Saf Zemin-A ve Zemin-B'nin mikro yapısına benzer şekilde, Zemin-C'nin çekilen SEM görüntülerinde de oldukça gevşek ve mikro boşluklarla beraber büyük boşluklar ile dağılmış bir içyapı görülmüştür. Zemin-C'nin dağınık ve boşluklu iç yapısı, %12 oranında KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu çimentomsu jellerin oluşmasıyla beraber daha kompakt, daha az boşluklu ve yoğun stabil bir yapıya dönüşmüştür. Zemin-A ve Zemin-B üzerinde gerçekleştirilen EDX analizlerinde olduğu gibi, Zemin-C numuneleri üzerinde gerçekleştirilen EDX analizleri de pozolanik reaksiyonların varlığını desteklemiştir.

4.14.2. X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi bulguları

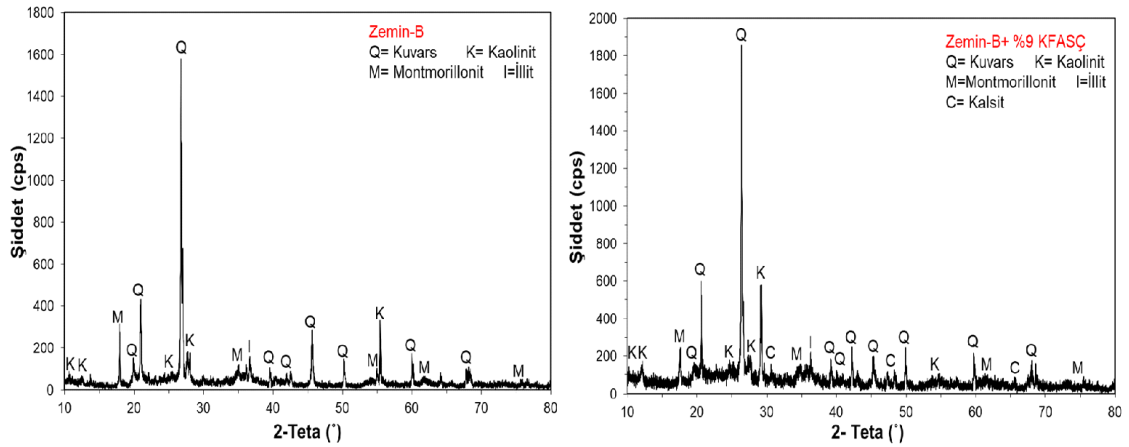
Saf Zemin-A ve %6 oranında KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-A'nın X-ışını difraksiyonu (XRD) analiz sonuçları Şekil 4.58'de verilmiştir.



Şekil 4.58. Zemin-A ve %6 KFASÇ içeren Zemin-A karışımının XRD analizi

Şekil 4.58 incelendiğinde Zemin-A için %6 KFASÇ ile iyileştirilmesinin sonucu difraksiyon deseninin değiştiği görülmüştür. İyileştirme sonucu 2-teta 10.72° , 29.71° ve 34.94° açılarında kaolinit piklerinin olduğu görülmektedir. 2-teta 39.69° , 47.87° ve 48.76° açılarında kalsit piklerinin olduğu gözlemlenmiştir.

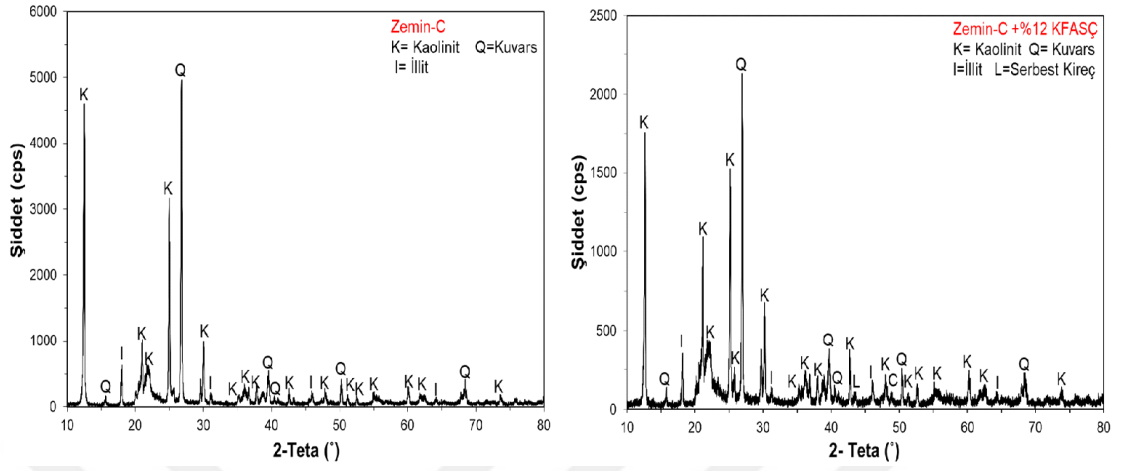
Saf Zemin-B ve %9 oranında KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-B'nin X-ışını difraksiyonu (XRD) analiz sonuçları Şekil 4.59'da verilmiştir.



Şekil 4.59. Zemin-B ve %9 KFASÇ içeren Zemin-B karışımının XRD analizi

Şekil 4.59 incelendiğinde Zemin-B için %9 KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu difraksiyon deseninin değiştiği yeni piklerin olduğu görülmüştür. İyileştirme sonucu 2-teta 29.17° açısında kaolinit pikinin olduğu görülmektedir. 2-teta 30.63° , 47.32° ve 48.34° açılarında kalsit piklerinin olduğu gözlemlenmiştir. Zemin-B'de 2-teta 55.56° açısında bulunan montmorillonit pikinin iyileştirme sonucu kaybolduğu görülmüştür.

Saf Zemin-C ve %9 oranında KFASÇ ile iyileştirilmiş Zemin-B'nin X-ışını difraksiyonu (XRD) analiz sonuçları Şekil 4.60'ta verilmiştir.



Şekil 4.60. Zemin-C ve %12 KFASÇ içeren Zemin-C karışımının XRD analizi

Şekil 4.60 incelendiğinde Zemin-C'nin %12 oranında KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu yeni difraksiyon piklerinin oluştuğu görülmüştür. İyileştirme sonucu 2-teta 28.78° açısında kaolinit pikinin oluştuğu gözlemlenmiştir. 2-teta 42.79° açısında serbest kireç difraksiyonu görülmüştür. Zemin-B'de 2-teta 55.56° açısında bulunan montmorillonit pikinin iyileştirme sonucu kaybolduğu görülmüştür. Zeminlerin XRD desenlerinin iyileştirme sonucu değişiminin zemin daneleri ile KFASÇ daneleri arasında meydana gelen katyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlara bağlanabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı şişme-büzülme potansiyeline sahip üç farklı karayolu taban zemininin geoteknik ve mühendislik özelliklerinin kâğıt fabrikası arıtma suyu çamuru (KFASÇ) kullanarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. KFASÇ'nin %3, %6, %9, %12 ve %15 olmak üzere farklı oranlarda taban zeminlerine kuru ağırlığınca ilave edilmiş ve zeminlerin mühendislik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir.

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılabilir:

- KFASÇ içeriği arttıkça zeminlerin LL değerleri düşmüş, PL değerleri artmıştır. Bunun sonucunda zeminlerin PI değerleri artan KFASÇ içeriğiyle birlikte azalmıştır.
- Zeminlerin sınıflandırması KFASÇ ile iyileştirilmesi sonucu değişmiştir. CH olarak sınıflandırılan Zemin-A %3 KFASÇ içeriğinden itibaren sınıflandırması ML olarak değişmiştir. Zemin-B CL olarak sınıflandırılmaktadır. %3 KFASÇ ile CL olarak

sınıflandırılan Zemin-B, daha fazla KFASÇ eklenmesiyle sınıflandırılması ML olarak değişmiştir. Zemin-C ise CL olarak sınıflandırılmaktadır. Artan KFASÇ içeriği ile Zemin-C'nin sınıflandırılması ML bölgesine doğru kaymakta olup sınıflandırılması %15 KFASÇ içeriği ile ML olarak değişmiştir.

- Zeminlerin şişme ve büzülme potansiyelleri KFASÇ içeriğinden önemli derecede etkilenmiştir. KFASÇ içeriği arttıkça zeminlerin şişme-büzülme potansiyelleri de giderek azalmıştır.

- Proktor deneyinden elde edilen kompaksiyon parametreleri zemin türünden etkilenmiştir. V_{mak} tüm zemin türleri için KFASÇ içeriği arttıkça azalmıştır. Zemin-A (CH) için w_{opt} değerleri artan KFASÇ içeriğiyle giderek artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C (CL) için ise w_{opt} saf zemine kıyasla %3 ve %6 oranında KFASÇ içeriğiyle azalmış, daha sonra artan KFASÇ içeriğiyle artmıştır.

- Zeminlerin UCS dayanımı kür süresinden ve KFASÇ içeriğinden etkilenmiştir. Zemin-A için en yüksek UCS dayanımına %6 KFASÇ içeriğiyle 245.44 kPa olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır. Zemin-B için en yüksek UCS dayanımına %9 KFASÇ içeriğiyle 1270.70 kPa olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır. Zemin-C için en yüksek UCS dayanımına %12 KFASÇ içeriğiyle 426.30 kPa olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır.

- Zeminlerin EAC kapasitesi kür süresinden ve KFASÇ içeriğinden etkilenmiştir. Zemin-A için en yüksek EAC değerine %12 KFASÇ içeriğiyle 28.53 kJ/m³ kPa olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır. Zemin-B için en yüksek EAC değerine %3 KFASÇ içeriğiyle 52.41 kJ/m³ olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır. Zemin-C için en yüksek EAC değerine %12 KFASÇ içeriğiyle 12 kJ/m³ olarak 90 gün kür sonunda ulaşılmıştır.

- Zeminlerin CBR değeri belirli bir oranda KFASÇ içeriği ile artmıştır. Zemin-A'nın CBR değeri %9 KFASÇ içeriğiyle maksimuma ulaşmış ve saf zemine kıyasla %33,11 oranında artmıştır. Zemin-B için %12 KFASÇ içeriği ile maksimum CBR değeri elde edilmiş olup saf zemine göre CBR değeri %131.92 oranında artmıştır. Zemin-C'de ise maksimum CBR değeri %6 KFASÇ ulaşılmış olup saf zemine göre CBR değerinde %26.85 oranında bir artış elde edilmiştir.

- Zeminlerin direkt kesme kutusu deneyinden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açıları değerlerinin zemin türünden ve KFASÇ içeriğinden etkilenmiştir.

Zemin-A için kohezyon değeri %15 KFASÇ içeriğiyle 40.67 kPa'dan 13.67 kPa'ya düşmüştür. İçsel sürtünme açısı ise %15 KFASÇ içeriğiyle 21.03°'den 26.81°'ye yükselmiştir. Zemin-B için kohezyon değeri %15 KFASÇ içeriğiyle 23.33 kPa'dan 45.33 kPa'ya yükselmiş olup, içsel sürtünme açısı ise %15 KFASÇ içeriğiyle 43.10°'den 32.59°'ye düşmüştür. Zemin-C'nin kohezyon değeri %6 KFASÇ ile maksimuma ulaşmış, 14.00 kPa'dan 24.33 kPa'ya yükselmiştir. Daha fazla KFASÇ eklenmesi kohezyon değerinde düşüşe sebep olmuş, %15 KFASÇ içeriğiyle kohezyon değeri 7.33 kPa'ya düşmüştür. Zemin-C'nin içsel sürtünme açısı ise KFASÇ içeriğiyle giderek azalmış olup %15 KFASÇ içeriğiyle 38.63°'den 34.12°'ye düşmüştür.

- Zeminlerin düşen koni testiyle elde edilen S_u değerlerinin ve penetrasyon direncinin genellikle KFASÇ içeriğiyle arttığı görülmüştür. Zemin-A'nın S_u değerleri artan KFASÇ içeriğiyle giderek artmıştır. Zemin-B için en yüksek S_u değerlerine yaklaşık olarak %12 KFASÇ içeriğiyle ulaşılmıştır. Zemin-C için ise KFASÇ içeriği arttıkça S_u değerleri artmakta %15 KFASÇ ile maksimum S_u değerlerine ulaşılmıştır.

- Konsolidasyon parametrelerinin zemin türü ve KFASÇ içeriğinden önemli derecede etkilendiği belirlenmiştir. Zemin-A'nın boşluk oranı KFASÇ içeriği ile sürekli olarak artarken, Zemin-B ve Zemin-C'nin saf zemine kıyasla %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle boşluk oranı azalmış daha fazla KFASÇ eklenmesiyle boşluk oranı artmıştır. Zemin-A'nın sıkışma indisi (C_c) KFASÇ içeriği ile sürekli artmıştır. Zemin-B ve Zemin-C'nin C_c değerleri %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle azalmış daha fazla KFASÇ eklenmesiyle C_c değerleri yükselmiştir. Hacimsel sıkışma katsayıları (m_v) ve sıkışma katsayılarında da (a_v) Zemin-A için tüm KFASÇ ile artan bir eğilim gözlenirken, Zemin-B ve Zemin-C için %3 ve %6 KFASÇ ile düşüş elde edilmiş artan KFASÇ içeriği ile yükselmeye başlamıştır. Zeminlerin konsolidasyon deneyinden elde edilen şişme indisi (C_s) değerleri tüm zeminler için KFASÇ içeriği arttıkça azalmıştır. Konsolidasyon oturması Zemin-A KFASÇ içeriği ile artmakta olup Zemin-B ve Zemin-C için %3 ve %6 KFASÇ içeriğiyle saf zemine göre azalmış fakat daha fazla KFASÇ eklenmesiyle artmıştır.

- M_r deney sonuçları incelendiğinde M_r değerlerinin KFASÇ içeriğinden etkilendiği görülmüştür. M_r değerlerinin her bir zemin için belirli bir oranda KFASÇ içeriği ile arttığı belirlenmiştir. Zemin-A için M_r değeri %6 KFASÇ içeriği ile yaklaşık %78 artarak maksimum değere ulaşmıştır. Zemin-B için maksimum M_r değeri %9 KFASÇ içeriği ile elde edilmiş olup saf zemine kıyasla yaklaşık %25 oranında bir artış

elde edilmiştir. Zemin-C için ise maksimum M_r değerleri %6 KFASÇ içeriği ile elde edilmiş olup yaklaşık %21 oranında bir artış elde edilmiştir.

- Bu çalışmada UCS ve M_r değerlerini tahmin etmede geliştirilen YSA modelleri MR modellerine kıyasla daha yüksek tahmin performansı göstermiştir. YSA modellerinin daha yüksek R^2 değerlerine sahip olması ve istatistiksel analizlerden elde edilen hata parametrelerinin daha düşük olması YSA'nın tahmin etmede verimliliğini ve yüksek performansını ortaya koymuştur. Bu nedenle geliştirilen YSA modellerinin laboratuvar testlerine ucuz ve daha az zaman gerektiren bir alternatif olarak taban zeminlerinin UCS ve M_r değerlerini tahmin etmede oldukça kolay ve etkili bir şekilde kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur.

- Plaxis 2D gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucu taban zeminlerinde KFASÇ ile iyileştirilmesinin sonucunda trafik yüklerinden kaynaklanan deformasyonların ve gerilmelerin azaldığı ve iyileştirilme ile beraber daha rijit ve stabil bir yol platformu elde edildiği ortaya koyulmuştur.

- SEM, EDX ve XRD analizleri ile yapılan mikroyapısal, elementel ve mineralojik incelemelerde, KFASÇ ile iyileştirilmiş taban zeminlerde, zemin ile KFASÇ taneleri arasındaki katyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlar sonucu daha kompakt, daha az gözenekli, yoğun, floküle bir yapı elde edilmiş ve yeni mineralojik oluşumlar ortaya çıktığı belirlenmiştir.

- Genel olarak değerlendirildiğinde belirli bir orana kadar KFASÇ kullanımının genişleyen karayolu taban zeminlerinin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. CL türü zeminlerde elde edilen iyileşme CH türü zeminlere nispeten daha belirgindir. Bir endüstriyel atık türü olan KFASÇ'nin genişleyen karayolu taban zemini mühendislik özelliklerini iyileştirmede kullanılabilirliğinin ortaya koyulması ile karayolunda sürdürülebilir bir yaklaşım elde edildiği ortaya koyulmuştur.

5.2. Öneriler

Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında aşağıda belirtilen ifadelerin gelecek çalışmalar için araştırma konusu olarak önerilmektedir:

- KFASÇ'nin taban zeminlerin durabilite özelliklerine etkisini incelemek amacıyla ıslanma-kuruma ve donma-çözülme deneylerinin çalışılması önerilmektedir.

- KFASÇ'nin taban zeminin esneklik modülü parametreleri üzerinde optimum su muhtevaları dışındaki su içeriklerinde etkisinin incelenmesi önerilmektedir.
- Laboratuvar deneylerinden ve sayısal modellemelerden elde edilen veriler doğrultusunda, uygulama sahasında iyileştirme yöntemleri uygulanarak KFASÇ'nin performansının değerlendirilmesi önerilmektedir.
- Farklı makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı yöntemleri (SVM, Decision Trees, Deep Learning) ile tahmin modellerinin geliştirilip karşılaştırılma yapması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO M-145. (1991). *Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- AASHTO T307-99. (2012). *Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- Abbey, S., Eyo, E. U., & Ng'ambi, S. (2020). Swell and microstructural characteristics of high-plasticity clay blended with cement. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 2119-2130.
- Abdelkader, H. A., Hussein, M. M., & Ye, H. (2021). Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils. *Advances in Civil Engineering*, 1, 1–13.
- Abduljawwad, S. N. (1993). Treatment of calcareous expansive clays. Fly Ash For Soil Improvement. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36.
- Abiodun, A. A., & Nalbantoglu, Z. (2015). Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), 760-768.

- Adem, H. H. (2015). *Modulus of elasticity based method for estimating the vertical movement of natural unsaturated expansive soils*. [Doctoral Dissertation]. Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada.
- Akbarimehr, D., Eslami, A., & Aflak, E. (2020). Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122632.
- Akbulut, N. (2020). *Arıtma Çamuru Külünün Zemin İyileştirmede Kullanımı*. [Doktora Tezi]. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Ali, M. M. (2012). *Kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen şişen killerde esneklik modülü tayini* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amakye, S. Y., & Abbey, S. J. (2021). Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100159.
- Amakye, S. Y., Abbey, S. J., Booth, C. A., & Mahamadu, A. M. (2021). Enhancing the Engineering Properties of Subgrade Materials Using Processed Waste: A Review. *Geotechnics*, 1(2), 307-329.
- Alabachew, F. (2005). *Pavement Distresses on Addis Ababa City Arterial Roads, Causes and Maintenance Options* [Master Thesis]. Addis Ababa University.
- Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. (2006). *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*, CRC Press.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M. M. Y., & Bo, M. W. (2010). Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pelemen Sub-Base Applications. *Geotechnical Testing Journal*, 35(5), 743-751.
- Ashiq, S. Y., Akbar, A., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2022). Sustainable improvement in engineering behavior of Siwalik Clay using industrial waste glass powder as additive. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00883.
- ASTM D6528. (2000). *Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils*. Annual book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D1140. (2017). *Standard test methods for determining the amount of material finer than 75- μ m (No. 200) sieve in soils by washing*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1557. (2021). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56.000 ft-lbf/ft³ (2.700 kN-m/m³))*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1883. (2021). *Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM D2166. (2010). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2487. (2020). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D422. (2007). *Standard test method for particle-size analysis of soils*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D854. (2010). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2435. (2011). *Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Atahu, M. K., Saathoff, F., & Gebissa, A. (2019). Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 337-348.
- ATUM: Prof. Dr. Adnan Tekin Malzeme Bilimleri ve Üretim Teknolojileri Uyg.-Arş. Merkezi (2023, Ocak 09). *X-ışınları Difraktometresi*. <https://atum.itu.edu.tr/>
- Austroroads G. (2012). *Pavement technology, Part 2: Pavement structural design*. Australia, Sydney.
- Ayodele, A. L., Adebisi, A. O., & Kareem, M. A. (2016). Use of sludge ash in stabilising two tropical laterite. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7 (8), 104–108.
- Barman, R. L., & Li, T. (2006). Investigation of graded aggregate base (gab) courses, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Carolina, FHWA-SC-06-03 Final Report, Columbia.
- Baus, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(4), 1319-1344.
- Bawa, A., & Bawa, N. (2017). Development of strength in soft soil stabilized with waste paper sludge. *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, III(XII), 821-826.
- Besq, A., Malfoy, C., Pantet, A., Monnet, P., & Righi, D. (2003). Physicochemical characterisation and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, 23(5-6), 275-286.
- BGS (British Geological Survey). (2023, May 25). *Swelling and Shrinkage Soil*. <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/shallow-geohazards/clay-shrink-swell/>

- Bizualem, T., & Alemgena, A. (2015). *Stabilization of expansive clay soil with sugarcane molasses and cement* [Conference presentation]. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation in Africa (ICTA2015), (pp. 25-27).
- Blayi, R.A., Sherwani, A. F. H., Ibrahim, H. H., Faraj, R. H., & Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427.
- Bozbey, İ., Keleşoğlu, M. K., Demir, B., Komut, M., Çömez, S., Öztürk, T., Mert, A., Öcal, K., & Öztoprak, S. (2010). Effects of soil pulverization level on resilient modulus and freeze and thaw resistance of a lime stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 323-334.
- Bozbey, İ., Demir, B., Komut, M., Sağlık, A., Çömez, S., Mert, A., Keleşoğlu, M. K., & Gökgöz, A. (2016). *Kireç ile stabilize edilen killi bir zeminin esneklik modülü değerleri* [Konferans Sunumu]. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum (ss. 1-10).
- BRE (Building Research Establishment). (1993). *Low-rise buildings on shrinkable clay soils*. Digest, Garston, Watford, England.
- BS 1377-2. (2022). *Methods of test for soils for civil engineering purposes, classification tests and determination of geotechnical properties*. BSI Standards Publications.
- BS EN ISO 17892-6. (2017). *Geotechnical investigation and testing, Laboratory testing of soil, Fall cone test*. British Standard.
- Cabalar, A.F., Ismael, I. A., & Yavuz, A. (2020a). Use of zinc coated steel CNC milling waste for road pavement subgrade. *Transportation Geotechnics*, 23, 100342.
- Cabalar, A. F., Hayder, G., Abdulnafaa, M. D., & Isik, H. (2020b). Aluminum waste in road pavement subgrade. *Ingeniería e Investigación*, 40(1), 8-16.
- Cabalar, A. F., Hassan, D., & Abdulnafaa, M. (2017). Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 882–896.
- Cadir, C. C., & Vekli, M. (2022). Usage of waste marble powder and pumice powder to improve the engineering properties of soft clays. *International Journal of Environment Science and Technology*, 19(7), 6481–6490.
- Caliendo, C. (2012). Local calibration and implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide for flexible pavement design. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 348-360.
- CGS (Colorado Geological Survey). (2022, June 18). *Expansive soil and rock*, <https://coloradogeologicalsurvey.org/hazards/expansive-soil-rock/>

- Chakraborty, A., & Goswami, D. (2017). Slope stability prediction using artificial neural network (ANN). *International Journal of Engineering and Computer Science*, 6(6), 21845-21848.
- Chenarboni, H. A., Lajevardi, S., Molaabasi, H., & Zeighami, E. (2022). Consolidation behavior of the expansive clay treated with cement and zeolite. *Journal of Central South University*, 29(9), 3140-3157.
- Çelebi, H. (2023). Radye Temellerde Sonlu Elemanlar ve Analitik Yöntemler ile Taşıma Gücü Hesabının Değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Daryati, M. R. (2020). *Improvement of expansive soils stabilized with rice husk ash (RHA)* [Conference presentation]. 2nd International Conference on Sustainable Infrastructure. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 012006, (pp. 1-7).
- Danielewicz, D., & Surma-Ślusarska, B. (2019). Miscanthus × giganteus stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fibre and paper properties. *Industrial Crops & Products*, 141, 111744.
- Dehghanbanadaki, A., Sotouodeh, M.A., Golpazir, I., Keshtkarbanaeemoghadam, A., & Ilbeigi, M. (2018). Prediction of geotechnical properties of treated fibrous peat by artificial neural networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1345–1358.
- Dumlu, N., (2014). *Kâğıt Endüstrisi Atıksularına Uygun Arıtma Teknolojilerinin Belirlenmesi ve Türkiye’deki Mevcut Durumun Analizi* [Uzmanlık Tezi]. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Eboukou, R. C. D., & Manguet, D. E. (2022). California Bearing Ratio Test on the Bearing Capacity of a Foundation in Unsaturated Soil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(6), 367–373.
- E.C. (2001). *Integrated pollution prevention and control (IPPC)*. References document on Best Available Techniques in Pulp and paper Industry, European Commission.
- Edeh, E., Agbede, I. O., & Tyoyila, A. (2014). Evaluation of sawdust ash–stabilized lateritic soil as highway pavement material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 367–373.
- Elarabi, H. (2010). *Damage mechanism of expansive soils* [Conference presentation]. Conference of Graduate Studies and Scientific Research, University of Khartoum, (pp. 349-58)
- Erzin, Y., & Turkoz, D. (2016). Use of neural networks for the prediction of the CBR value of some Aegean sands. *Neural Computing and Applications*, 27(5), 1415-1426.

- Fedekar, H. İ. (2021). Investigation of resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures with different clay contents under repeated traffic loads. *NOHU Journal of Engineering Science*, 10(1), 351- 357.
- Gobena, J.A., & Suppiah, S. (2019). Strength characteristics of tropical expansive soil–A review. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(7), 710-715.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J. H. J., & Joy, D.C. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer, New York.
- Gougazeh, M., & Al-Shabatat, A. (2013). Geological and geotechnical properties of soil materials at Tannur dam. Wadi Al Hasa, South Jordan. *Journal of Taibah University for Science*, 7(4), 216-224.
- Gökalp, İ. (2021). *Karayolu Pürüzlendirmesinde Cürufların Kullanılabilirliğinin ve Pürüzlendirilmiş Tabakaların Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi* [Doktora Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Haldankar, S., & Lewis, P. (2016). Improvement of lateritic soil using eggshell powder and marble dust and its comparison with lime stabilized clay. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 4(3), 28–30.
- HD 26/06. (2006). *Pavement design and maintenance-foundations, design manual for roads and bridges (DMRB)*. The Stationery Office London.
- Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.
- Hossain, M., Sultana, N., Bhowmic, S., Hoque, S., & Shantana, F. A. (2019). Modification of Expansive Soil Using Recycled Plastic Bottle Chips. *Journal of Geotechnical Studies*, 4(3), 7-13.
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. Englewood cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2019). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 423-440.
- Ince, B.K., Cetecioğlu, Z., & Ince, O. (2011). Pollution Prevention in the Pulp and Paper Industries. *Environmental Management in Practice*, 5, 224-226.
- IS:2720 (Part XL) (1977). *Determination of free swell index of soils*. Indian Standard.
- Islam, S., Islami, J., & Hoque, N. M. R. (2022). Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste. *Heliyon*, 8(10), e11029.

- Jain, A. & Dohare, D. (2018). Utilization of sugarcane ash & waste paper sludge ash in stabilization of black cotton soil. *Global Journal of Engineering Science and Researches*, 5(8), 103-111.
- Jiang, H., Wang, B., Inyang, H. I., Liu, J. Gu, K., & Shi, B. (2013). Role of expansive soil and topography on slope failure and its countermeasures, Yun County, China. *Engineering Geology*, 152(1), 155-161.
- Jwaida, Z., Dulaimi, A., Alyhya, W., Algretawee, H., & Al-Busaltan, S. (2024). Recycling and utilization of paper sludge ash -current status review and future perspectives. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00960.
- Jones, L., & Jefferson, I. (2012). *Expansive Soil*. Institution of Civil Engineers Manuals Series, ICE Publishing, British Geological Survey, Nottingham: UK.
- Kadhim, Y. M., Al-Adhamii, R. A. J., & Fattah M. Y. (2022). Geotechnical properties of clayey soil improved by sewage sludge ash. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72(1), 34-47.
- Kâğıt Sektör Raporu. (2020). *Doğu Marmara Kâğıt Sektör Raporu*. Doğu Kalkınma Ajansı.
- Karaşahin, M., & Tığdemir, M. (1998). *Türkiye koşullarında uygun bir esnek üstyapı kalınlık tasarım metodu geliştirilmesi için yeni bir yaklaşım*. [Konferans Sunumu]. Asfalt'98, Uluslararası Asfalt Sempozyumu, Ankara, (ss. 238-247).
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2008). *Esneklik Modülü Deneyi*. Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Kaur, M. (2019). Improvement of CBR value of expansive soil with industrial waste. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 6(5), 320-324.
- Kodikara, J., Islam, T., & Sounthararajah, A. (2018). Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, 17, 24-34.
- Korkut, S. (2023, Mayıs 21). *Sonlu Elemanlar Metodu*. <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/09/sonlu-elemanlar-metodu/>
- Krenz, J., Lee, B., & Owens, P. (2006, June 04). *Swelling Clays and Septic Systems, Rural Wastewater*. Purdue University. <https://mdc.itap.purdue.edu>
- Kumar, A., & Gupta, S. S. (2016). Strength development of soil using waste paper sludge (WPS). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(6), 2144-2147.
- Kumar, S., Mishra, M. K., & Singh, J. P. (2020). Stabilisation of clayey soil with shredded tyre using lime. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(4), 1732-1737.

- Li, P., Xu, Y., Yin, L., Liang, X., Wang, R., & Liu, K. (2023). Development of Raw Materials and Technology for Pulping—A Brief Review. *Polymers*, 15(22), 4465.
- Little, D.N., & Nair, S. (2009). *Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- Mahedi, M., Cetin, B., & White, D. J. (2020). Cement, lime and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 04020177.
- Matthis, S. (2015, September 04). *Global paper and paperboard market forecast to grow 1.1 percent*. <http://www.pulpapernews.com/20161229/6549/global-paper-and-paperboard-market-forecast-grow-11-cent>
- Mintek Resources. (2023, August 13). *Expansive Soil: Foundation Problems*. <https://mintekresources.com/expansive-soils>
- Mohammadia, M., Mallikarjuna, H. M., & Hussain. A. (2017). Stabilization of clay subgrade soils for pavements using ground granulated blast furnace slag. *International Journal of Engineering Development and Research*, 5(4), 764-773.
- Mokhtari, M., & Dehghani, M. (2012). Swell-shrink behavior of expansive soils, Damage and control. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2673-2682.
- Monismith, C. L., Harvey, J. T., Long, F., & Weissman, S. (2000). *Test to evaluate the stiffness and permanent deformation characteristics of asphalt/binder-aggregate mixes*. Technical Memorandum, TM-UCB, PRC-2001.
- Mosa, A. M. (2017). Modification of subgrade properties using waste material. *Applied Research Journal*, 3(5), 160-166.
- Mukherjee, S. (2013). Physical properties of clay and soil mechanics. *The Science of Clays*, 54-68.
- Munirwan, R. P., Taha M. R., Taib, A. M., & Munirwansyah. M. (2022). Shear strength improvement of clay soil stabilized by coffee husk ash. *Applied Sciences*, 12(11), 5542.
- Narendra, K., & Prasad, A. D. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag on expansive soils under static loading. *VFSTR Journal of STEM*, 3(1), 2455-2062.
- NCHRP (2004). *National Cooperative Highway Research Program*. Research Results Digest, 285.
- NCHRP (1997). Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Research Results Digest, 285.
- Nnochiri, E. S. and Adetayo, O. A., 2019, Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with corn cob ash. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 12(1), 73-76.

- Noaman, M. F., Khan, M. A., Ali, K., & Jamal, A. (2023). Effect of fly ash on the shear strength of clay soil. *Materials Today: Proceedings*.
- Noolu, V. HeeraLal, M., & Pillai, R. K. (2021). Resilient modulus of clayey subgrade soils treated with calcium carbide residue. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 288-297.
- Onyelowe, K. C., Bui Van, D., Ikpa, C., Osinubi, K., Eberemu, A., Salahudeen, A. B., Nnadi, O.C., Chima, M.C., Obimba-Wogu, J., & Ibe, K. (2020). Resilient modulus and deviatoric stress of cemented soils treated with crushed waste ceramics (CWC) for pavement subgrade construction. *Epitoanyag-Journal of Silicate Based & Composite Materials*, 72(3), 86-90.
- Polo-Mendoza, R., Duque, J., & Masin, D. (2020). Prediction of California bearing ratio and modified proctor parameters using deep neural networks and multiple linear regression: A case study of granular soils. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02800.
- Özay, O., & Güngör, A. G. (2008). *Esneklik Modülü Deneyi*. T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şube Müdürşüğü, Ankara.
- Pauzi, M. N. I. M., & Ismail, H. M. S. (2019). Waste soil improvement using egg shell powder and lime at open dumping area. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(4), 268–277.
- Papa, E., Medri, V., Landi, E., Ballarin, B., & Miccio, F. (2014). Production and characterization of geopolymers based on mixed compositions of metakaolin and coal ashes. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 409-415
- Pereira, P., & Pais, P. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(4), 316-346.
- Pereira, S. T. A. M., Saberiani, M., Zhu, J., Roychand, R., & Li, J. (2022). Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01244.
- Ping, W. V., Xiong, W., & Yang, Z. (2003). *Implementing resilient modulus test for design of pavement structures in Florida*. Final Report for the Florida Department of Transportation, USA.
- Pinilla, J.D., Miller, G.A., Cerato, A.B., & Snethen, D.S. (2011). Influence of curing time on the resilient modulus of chemically stabilized soils. *Geotechnical Testing Journal*, 34(4), 103369.
- Postek, M.T. (1997). *The Scanning Electron Microscope*. Jon Orloff (Ed) Handbook of Charged Particle Optics, 363-399. CRC Press, 666p. London.

- Prakash, M., & Raveendran, R. (2016). *Comparison between paper sludge and rice husk ash as a stabilizing agent for soft soil* [Conference presentation]. International Conference on Emerging Trends in Engineering & Management, (pp. 8-11).
- Rahgozar, M. A., Saberian, M., & Li, J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics*, 14, 52-60.
- Roustaei, M., Ghazavi, M., & Aliaghaei, E. (2016). Application of tire crumbs on mechanical properties of a clayey soil subjected to freeze-thaw cycles. *Sharif University of Technology*, 23(1), 122-132.
- Rivera, J., Orobio, A., Mejia, R., & Cristelo, N. (2020). Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. *Materials de Construccin*, 70(337).
- Sadrossadat, E., Heidariapan, A., & Osouli, S. (2015). Prediction of the resilient modulus of flexible pavement subgrade soils using adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Construction and Building Materials*, 123, 235-247.
- Saini, G., & Vattipalli, U. (2020). Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00352.
- Salahudeen, A., & Ochepo, J. (2015). Effect of bagasse ash on some engineering properties of lateritic soil. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 159(3092), 1–9.
- Santha, B.L. (1994). *A Study on Resilient modulus of subgrade soil: Comparison of two constitutive equations and predictability of k parameters using material and physical properties of soil*. Paper 940270 Georgia Department of Transportation.
- Shahin, M.A., Jaksa, M.B., & H. R. Maier. (2008). State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8(1), 1-26.
- Shahin, M.A., Maier, H.R., & Jaksa, M. B. (2002). Predicting settlement of shallow foundations using neural networks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9), 785-793.
- Steinberg, M. (2012). Expansive soils and the geomembrane remedy. *Advances in Unsaturated Geotechnics*, 2000, 456-466.
- Singh, N., & Bisen, S. S. (2021). Soil stabilization and modification using waste paper sludge. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 9(6).
- Sousa, J. B., Deacon, J. A., Weissman, S. Harvey, J. T., Monismith, J. L., Leahy, R. B., Paulsen, G., & Jopantz, J. S. (1994). *Permanent deformation response of asphalt-aggregate mixes*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D, Report No. SHRP-A-415.

- Soyer, N. (2004). *Avrupa Birliği'ne uyum sürecinde Türkiye'de kâğıt sektörü için çevre standartları ve atık kâğıt geri kazanımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Stokes, G. (1891). *Mathematical and Physical Paper III*. Cambridge University Press, Cambridge, MA.
- Taha, M. M. M., Feng, C. P., & Ahmed, S. H. S. (2021). Modification of mechanical properties of expansive soil from North China by using rice husk ash. *Materials*, 14(11), 2789.
- Tanyıldızı, M., & Çınar, M. (2023). The Effect of The Bearing Capacity of Sub-Grade Soil on The Thickness and Cost of The Superstructure of Chip Seals. *Bitlis Eren University Journal of Science*, 12(2).
- Teja, V. S., Sindhuja, S., & Krishna, G. S. (2016). Improvement of properties of highly swelling soil by using waste paper sludge. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4(2), 417-419.
- Thambiratham, K., Reduan, S. A., Tiu, Z. C., & Ahmad, H. (2020). Application of two-dimensional materials in fiber laser systems. *Nano-Optics*, 227-264.
- Toll, D., Abedin, Z., Buma, J., Cui, Y., Osman, A., & Phoon, K. (2012). The impact of changes in the water table and soil moisture on structural stability of buildings and foundation systems: systematic review. *Collaboration for Environmental Evidence*, CEE10-005 (SR90).
- UNECE/FAO (United Nations Economic Commission for Europa). (2022, September 01). <https://unece.org/DAM/timber/statsdata/fpamr-2020-tables.pdf>
- Uz, V. E. (2012). *Sathi kaplamalardaki kalıcı deformasyona etki eden parametrelerin incelenmesi* [Doktora Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Waterhouse, J. F. (2001). Paper Products: Classification. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 6685-6696.
- Wood, D. M. (1985). *Some Fall-Cone Tests*. *Geotechnique*, 35, 64-68.
- Vaníček, I., & Herza, J. (2021). *Geotechnical engineering and alternative aggregates, tailings* [Conference presentation]. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing.
- Yakut, A. (2012). Geri dönüştürülebilir kullanılmış kâğıttan yeni kâğıt kullanımının irdelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 127, 68-75.
- Yang, X., Xiao, G., Du, Y., Liu, Y., Wei, D., & Y. Gui (2021). Heat transfer with interface effects in high-enthalpy and high-speed flow: Modelling review and recent progress. *Applied Thermal Engineering*, 195, 116721.

- Yaghoubi, E., Yaghoubi M., Guerrieri, N., & Sudarsanan, N. (2021). Improving expansive clay subgrades using recycled glass: Resilient modulus characteristics and pavement performance. *Construction and Building Materials*, 302, 124384.
- Yılmaz, A. (2008). *Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufları ile silis dumanının yol üst yapısında kullanımının incelenmesi* [Doktora Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Zadhesh, J., Rastegar, F., Sharifi, F., Amini, H., & Nasirabad, H.M. (2015). Consolidation grouting quality assessment using artificial neural network (ANN). *Indian Geotechnical Journal*, 45(2), 136-144.
- Zimar, Z., Robert, D., Giustozzi, F., Zhou, A., Setunge, S., & Kodikara, J. (2024). Use of industrial wastes for stabilizing expansive clays in pavement applications: durability and microlevel investigation. *Acta Geotechnica*, 19, 6259-6287.
- Zumrawi, M. M., Abdelmarouf, A. O., & Gameil, A. E. (2017). Damages of buildings on expansive soils: diagnosis and avoidance. *International Journal of Multidisciplinary and Scientific Emerging Research*, 6(2), 108-116.