

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

DOKTORA TEZİ

**ARAZİ VERİLERİ KULLANILARAK ZEMİNLERİN ÜÇ BOYUTLU
LİTOLOJİK MODELLENMESİ VE GELİŞTİRİLEN METODUN OPTİMUM
KARIŞIM ORANLARI İLE İMAL EDİLEN DERİN KARIŞTIRMA
KOLONLARININ NÜMERİK ANALİZİNDE KULLANIMI**

Arda Burak EKMEN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2020**

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN danışmanlığında, Arda Burak EKMEN'in hazırladığı “**Arazi Verileri Kullanılarak Zeminlerin Üç Boyutlu Litolojik Modellenmesi ve Geliştirilen Metodun Optimum Karışım Oranları ile İmal Edilen Derin Karıştırma Kolonlarının Nümerik Analizinde Kullanımı**” konulu bu çalışma 27/10/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN

e-imzalıdır

Üye : Prof. Dr. Hanifi ÇANAKCI

e-imzalıdır

Üye : Prof. Dr. Murat ÖRNEK

e-imzalıdır

Üye : Doç. Dr. Kasım MERMERDAŞ

e-imzalıdır

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ALTAY

e-imzalıdır

Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAP Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 18253

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	13
3.1. Materyal	13
3.2. Yöntem	18
3.2.1. Elyaf takviyesiz karışımlar için numune hazırlama metodolojisi ve yapılan deneyler ...	19
3.2.2. Elyaf takviyeli karışımlar için numune hazırlama metodolojisi ve yapılan deneyler	23
3.2.3. Goal Attainment optimizasyon yöntemi	26
3.2.4. Arazi çalışması	28
3.2.5. DKK üretimi	35
3.2.6. Kolon yükleme testleri	38
3.2.7. DKK-zemin arayüz sürtünme katsayısının hesaplanması	43
3.2.8. Üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar modellemesi ve analizi	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	52
4.1. Doğal Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	52
4.2. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	54
4.3. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	60
4.4. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi	71
4.5. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi	74
4.6. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Optimizasyon Sonuçları	76
4.7. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Optimizasyon Sonuçları	84
4.8. Arazi Testleri ve DKK Yükleme Testi Sonuçları	90
4.9. DKK-Zemin Arayüz Sürtünme Katsayısı Deney Sonuçları	98
4.10. Üç Boyutlu Litolojik Hassas Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	99
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	111
5.1. Sonuçlar	111
5.2. Öneriler	114
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	121
EKLER	128
EK 1	128
EK 2	129

ÖZET

Doktora Tezi

ARAZİ VERİLERİ KULLANILARAK ZEMİNLERİN ÜÇ BOYUTLU LİTOLOJİK MODELLENMESİ VE GELİŞTİRİLEN METODUN OPTİMUM KARIŞIM ORANLARI İLE İMAL EDİLEN DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARININ NÜMERİK ANALİZİNDE KULLANIMI

Arda Burak EKMEN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
Yıl: 2020, Sayfa: 129

Arazi testlerinden elde edilen zemin özelliklerinin derinliğe bağlı değişiminden yararlanarak görüntü işleme tekniği ile zemin ortamının üç boyutlu hassas litolojik modellenmesine olanak sağlayan bazı yazılımlar, bu doktora tezi kapsamında kodlanmış ve örnek bir derin karıştırma kolon (DKK) arazi uygulaması üzerinde test edilmiştir. Gerçekleştirilen DKK uygulamaları için karışım oranları ve gerekli katkı malzemelerini belirlemek amacıyla, laboratuvar ortamında çok sayıda numune üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Elde edilen bu laboratuvar verileri kullanılarak performansa dayalı karışım oranları belirlenmiştir. Hedef Odaklı Metot (Goal Attainment Method, GAM) bu doktora çalışması sürecinde geliştirilmiş olup Tepki Yüzey Metodu (Response Surface Method, RSM) optimizasyon uygulamalarında kullanılan Çok-Amaçlı Arzu Edilebilirlik (Multi-Objective Desirability) metodolojisi, mevcut GAM optimizasyon algoritmasına eklenmiştir. Bu sayede, RSM optimizasyonunda mümkün olmayan, istenen regresyon modellerinin sürece dahil edilebilmesi olanağı sağlanarak daha yüksek düzeyli korelasyonların optimizasyonda kullanılabilmesi mümkün olmuştur. Uluslararası rehberlerin önerdiği hedeflenen serbest basınç değerlerine göre, optimum bağımsız değişkenler (çimento, uçucu kül, karbon elyaf) ve elastite modülü değerleri DKK karışımlarının optimizasyonu ile belirlenmiştir. Optimize edilen karışım oranları kullanılarak arazide bir DKK uygulaması yapılmış ve dört adet kolon imal edilmiştir. Bu DKK'lar üzerinde yapılan yükleme testlerinden yük-deformasyon değişimleri elde edilmiş ve bu veriler gerçekleştirilen üç boyutlu nümerik analizlerin doğrulanmasında kullanılmıştır. Uygulama alanındaki zeminin hem üç boyutlu litolojik hem de topolojik gerçek değişimleri, yapılan arazi testlerinden elde edilen tüm arazi verilerine dayanarak nümerik modele yansıtılmıştır. Geliştirilen bu metodoloji sayesinde, mevcut geoteknik literatüründe ilk defa, görüntü işleme metodu temelli bir kodlama yapılarak, sonlu elemanlar modellerinin, tüm farklı noktalarda ve derinliklerde elde edilen arazi test sonuçlarına bağlı olarak üç boyutlu oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Bu metodolojik katkılara ek olarak, DKK karışımlarında 1 MPa ve 2.1 MPa'lık hedeflenen serbest basınç değerleri için optimum elastisite modüllerinin yaklaşık olarak sırasıyla 425-435 MPa ve 846-863 MPa aralığında değiştiği, karbon elyaf takviyesinin DKK'ların mekanik özelliklerini anlamlı düzeyde iyileştirdiği, arazi şartlarında kıyaslamalı daha yüksek dayanıma uçucu kül ve karbon elyaf içeren DKK'nın sahip olduğu gibi birçok pratik sonuca ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modellemesi, Görüntü işleme yöntemi, Karbon elyaf ve uçucu kül katkılı derin karıştırma kolonları, Çok amaçlı optimizasyon

ABSTRACT

PhD Thesis

THREE-DIMENSIONAL LITHOLOGICAL MODELLING OF SOILS USING FIELD DATA AND UTILISATION OF THE DEVELOPED METHOD IN NUMERICAL ANALYSIS OF DEEP MIXING COLUMNS CONSTRUCTED WITH OPTIMUM MIXING RATIOS

Arda Burak EK MEN

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Halil Murat ALĖIN
Year: 2020, Page: 129**

A number of algorithms allowing the three-dimensional detailed lithological modelling of soils using the image processing technique have been developed and coded in this Ph.D. thesis by employing data obtained from the field tests, and these developed algorithms have been applied to a deep mixing column (DMC) application in practice. Various laboratory experiments were conducted to determine the optimum mixing ratios of DMCs with the additives that can be included in the mixture. Using these laboratory data, the required optimum mixing ratios based on the performance of DMC material were determined. Goal Attainment Method (GAM) was modified further in this Ph.D. study and the methodology of Multi-Objective Desirability currently used in Response Surface Method (RSM) optimization was included in the GAM optimisation algorithm. This modification is allowed to use the higher-level correlations in the optimisation process by providing the opportunity to include the desired regression models unlike the RSM optimisation. Complying with the targeted unconfined compressive strength (UCS) values suggested by international guidelines, the optimum independent variables (i.e., cement, fly ash and carbon fibre) and the values of elasticity modulus were specified using the optimisation analysis on the DMC mixtures. Utilizing the optimised mixing ratios, a DMC application was conducted in the field and four columns were constructed. The obtained load-deformation variations from the loading tests were accordingly considered to verify the performed three-dimensional numerical analyses. Both the three-dimensional lithological and topological variations of the soil in the application area were considered in the numerical model using all of the field data obtained from the field tests. By means of this developed methodology, the first time in the current geotechnical literature, the proceeding algorithm based on the image processing method was developed and the finite element models were simulated in three dimensions depending on the field test results obtained from all varying surface locations and depths. In addition to these methodological contributions, the many conclusions having the practical implications were obtained such as the optimum elasticity modules varying in the range of approximately 425-435 MPa and 846-863 MPa in turn were specified for the targeted UCS values of 1 MPa and 2.1 MPa in DMCs; the carbon fibre reinforcement significantly improves the mechanical properties of DMCs and the incorporation of fly ash and carbon fibre combination in DMC field application provides relatively higher loading capacity.

KEY WORDS: Three-dimensional lithological finite element modelling, Image processing method, Carbon fibre and fly ash additives, Deep mixing columns, Multi-objective optimisation

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam esnasında her anlamda beni yönlendiren ve araştırmalarımnda yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN'a (Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü), laboratuvar çalışmalarımnda bana yardımcı olan sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e (Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü), Arş. Gör. Egemen KAYA'ya (Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü), yüksek lisans öğrencisi Faruk ELMAS'a (Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü) ayrıca her zaman desteklerini hissettiğim eşim Arş. Gör. Şevin EKMEN'e (Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü) ve aileme teşekkür ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Orta sıklıktaki killi siltli kumun gradasyonu.....	14
Şekil 3.2. Doğal zeminin XRD analizi sonucu.....	16
Şekil 3.3. Kullanılan çimentonun XRD analizi sonucu.....	16
Şekil 3.4. Kullanılan uçucu külün XRD analizi sonucu.....	17
Şekil 3.5. Çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş zeminin XRD analizi sonucu.....	17
Şekil 3.6. Numuneleri kalıplama aşaması	20
Şekil 3.7. Numuneleri kürlenme aşaması.....	20
Şekil 3.8. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyi.....	21
Şekil 3.9. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli deneyi.....	22
Şekil 3.10. Çalışmanın ilk aşamasındaki numune hazırlama prosedürü ve deneyler	23
Şekil 3.11. Elyaf katkılı karışımlar için numune hazırlama prosedürü ve deneyler	25
Şekil 3.12. DKK uygulamalarının yapıldığı sahanın kampüs planı içerisindeki konumu.....	29
Şekil 3.13. DKK uygulamalarının yapıldığı sahanın arazi kotları ve koordinatları	30
Şekil 3.14. SPT ve DKK noktalarının arazi planı içerisindeki genel konumu	30
Şekil 3.15. SPT ve DKK noktalarının yakından detaylı görünümü	31
Şekil 3.16. SPT ve DKK noktalarının genel konumunu gösteren uydu görüntüsü	32
Şekil 3.17. SPT ve DKK noktalarının yakından detaylı uydu görüntüsü	32
Şekil 3.18. Sondaj çalışması.....	33
Şekil 3.19. Standart penetrasyon testi (SPT).....	34
Şekil 3.20. Sondaj noktalarından alınan örselenmemiş numuneler	34
Şekil 3.21. Arazi şartlarında DKK üretimi.....	35
Şekil 3.22. Henüz priz aşaması tamamlanmamış DKK'lar	36
Şekil 3.23. DKK'ların korumaya alınması	36
Şekil 3.24. DKK'ların kürlenme sonrası görüntüleri	38
Şekil 3.25. Kolonlara yük aktarımında kullanılan vinçler.....	39
Şekil 3.26. Kolonlara yük aktarımında kullanılan metal plaka	39
Şekil 3.27. Yükleme testinde kullanılan deformasyon saatleri.....	40
Şekil 3.28. Yükleme testinde kullanılan basınç göstergesi	40
Şekil 3.29. DKK üzerine yük aktarma işlemi.....	41
Şekil 3.30. Yükleme testinde verilerin forma aktarılması	42
Şekil 3.31. DKK'ların deformasyon biçimi	42
Şekil 3.32. Arayüz sürtünme katsayısını belirlemek için yapılan deneyin aşamaları.....	43
Şekil 3.33. Yarı otomatik dijital direkt kesme kutusu test cihazı	44
Şekil 3.34. Yazılım tarafından üretilen renkli görüntü	46
Şekil 3.35. Yazılım tarafından gri skalaya dönüştürülmüş görüntü	47
Şekil 3.36. Sayısal arazi verilerinden elde edilmiş görüntülerin 3B modele dönüştürülmesi	48
Şekil 3.37. Üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeli	48
Şekil 3.38. Üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeli DKK kesit görüntüsü	49
Şekil 3.39. Dikdörtgen prizma şeklinde bir bölümü kesilmiş model.....	50
Şekil 3.40. Modellerin karşılaştırılması; (a) standart model, (b) bu çalışmadaki litolojik model.....	51
Şekil 4.1. Killi siltli kum için test sonuçları, (a, b) CIU-üç eksneli deneyleri, (c) serbest basınç dayanımı deneyi, (d) UU üç eksenli deneyleri (e) konsolidasyon deneyi	53
Şekil 4.2. Çimento ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$	54
Şekil 4.3. Çimento ve %10 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$	55
Şekil 4.4. Çimento ve %20 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$	56
Şekil 4.5. Çimento ve %30 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$	57

Şekil 4.6. Toplam su içeriğinin dayanım üzerindeki etkisi; (a) sadece çimento ile stabilizasyon durumu, (b) 28 günlük kürlemede çimento ve uçucu kül ile stabilizasyon durumu (c) 90 günlük kürlemede çimento ve uçucu kül ile stabilizasyon durumu.....	58
Şekil 4.7. SEM görüntüleri, (a-c) doğal zemin, (d-f) 28 günlük kürlemede sadece çimento ile stabilizasyon, (g-i) 90 günlük kürlemede çimento ve uçucu kül ile stabilizasyon	59
Şekil 4.8. Sadece çimento ile stabilize edilmiş ($A_w=5.3$, $S_w=40$) elyaf takviyeli killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları	61
Şekil 4.9. Çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş ($A_w=5$, $S_w=44.55$, $FA_w=10$) elyaf takviyeli killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları	62
Şekil 4.10. Sadece çimento ile stabilize edilmiş ($A_w=5.3$, $S_w=40$) elyaf takviyeli killi siltli kumun üç noktalı eğilme dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları	64
Şekil 4.11. Çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş ($A_w=5$, $S_w=44.55$, $FA_w=10$) elyaf takviyeli killi siltli kumun üç noktalı eğilme dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları	65
Şekil 4.12. Tüm varyasyonlar için serbest basınç dayanımları ($q_{u(28)}$); (a) uçucu kül katkısız varyasyonlar, (b) uçucu kül katkılı varyasyonlar	67
Şekil 4.13. Tüm varyasyonlar için üç noktalı eğilme dayanımları (f_{dmc}); (a) uçucu kül katkısız varyasyonlar, (b) uçucu kül katkılı varyasyonlar	68
Şekil 4.14. Karbon elyaf takviye yüzdesindeki (FC) artışın etkileri; (a) 28 günlük serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) ve elastisite modülü ($E_{u(28)}$), (b) şişme yüzdesi, (c) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (d) statik segregasyon yüzdesi	70
Şekil 4.15. SEM görüntüleri, (a) doğal zemin, (b) 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilavesiz kontrol numunesi, (c) 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilaveli kontrol numunesi, (d) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.1$ $FL=4$ mm), (e) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.4$ $FL=6$ mm), (f) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.8$ $FL=12$ mm), (g) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.8$ $FL=4$ mm), (h) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.4$ $FL=6$ mm), (i) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($FC=0.1$ $FL=12$ mm) .	71
Şekil 4.16. Regresyon ile tahmin edilen ve gerçek değerler; (a) çimento ile stabilizasyon, (b) çimento ve uçucu kül ile 28 günlük kürleme sonucu stabilizasyon, (c) çimento ve uçucu kül ile 90 günlük kürleme sonucu stabilizasyon.....	74
Şekil 4.17. Faktörlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini gösteren 3B regresyon grafikleri; 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkısız numuneler (a-b), 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler (c-d), 90 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler (e-f)	77
Şekil 4.18. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun çimento ve toplam su içeriği bakımından değişimi; hedeflenen serbest basınç dayanımı $q_u=1$ MPa için (a) çimentolu karışım (b) 28 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım (c) 90 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım. Hedeflenen serbest basınç dayanımı $q_u=2.1$ MPa için (d) çimentolu karışım (e) 28 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım, (f) 90 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım.	80
Şekil 4.19. Çizelge 4.4.'te sunulan çözümlerdeki oranlar dikkate alınarak sadece çimento ile iyileştirilmiş killi siltli kum ($S_w = 40$ ve $A_w= 5.3$) için 28 günlük kürleme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi	83
Şekil 4.20. Çizelge 4.4.'te sunulan çözümlerdeki oranlar dikkate alınarak çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş killi siltli kum ($S_w = 44.55$, $A_w= 5$ ve $FA_w =10$) için 28 günlük kürleme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi.....	83

Şekil 4.21. Uçucu kül içermeyen elyaf takviyeli numuneler için faktörlerin (FC ve FL) çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri; (a) serbest basınç dayanımı ($qu(28)$), (b) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (c) statik segregasyon yüzdesi, (d) şişme yüzdesi	87
Şekil 4.22. Uçucu kül katkılı elyaf takviyeli numuneler için faktörlerin (FC ve FL) çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri; (a) serbest basınç dayanımı ($qu(28)$), (b) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (c) statik segregasyon yüzdesi, (d) şişme yüzdesi	88
Şekil 4.23. Standart çözüm için optimizasyon analizlerinden faktörlere bağlı olarak elde edilen kompozit arzu edilebilirlik grafikleri; (a) uçucu kül katkısız numuneler (b) uçucu kül katkılı numuneler	88
Şekil 4.24. Çizelge 4.7.'de sunulan ekonomik çözümdeki oranlar dikkate alınarak çimento ile iyileştirilmiş ($Sw = \%40$ ve $Aw = \%5.3$) elyaf takviyeli ($FC = \%0.1$ ve $FL = 4$ mm) killi siltli kum için 28 günlük kütleme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi.....	89
Şekil 4.25. Çizelge 4.7.'de sunulan ekonomik çözümdeki oranlar dikkate alınarak çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş ($Sw = \%44.55$, $Aw = \%5$ ve $FAw = \%10$) elyaf takviyeli ($FC = \%0.1$ ve $FL = 4$ mm) killi siltli kum için 28 günlük kütleme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi.....	89
Şekil 4.26. DKK1 yükleme testi sonucu	96
Şekil 4.27. DKK2 yükleme testi sonucu	96
Şekil 4.28. DKK3 yükleme testi sonucu	97
Şekil 4.29. DKK4 yükleme testi sonucu	97
Şekil 4.30. Kesme kutusu testinden elde edilen gerilmeler	98
Şekil 4.31. Sınır şartları gösterilmiş ve analiz için hazırlanmış model.....	101
Şekil 4.32. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımıdaki sonuçları.....	102
Şekil 4.33. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımıdaki sonuçları.....	102
Şekil 4.34. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 9-11. yükleme adımıdaki sonuçları.....	103
Şekil 4.35. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımıdaki sonuçları.....	104
Şekil 4.36. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımıdaki sonuçları.....	104
Şekil 4.37. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımıdaki sonuçları.....	105
Şekil 4.38. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımıdaki sonuçları.....	105
Şekil 4.39. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 9. yükleme adımıdaki sonuçları	106
Şekil 4.40. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımıdaki sonuçları.....	106
Şekil 4.41. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımıdaki sonuçları.....	107
Şekil 4.42. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 9. yükleme adımıdaki sonuçları	107
Şekil 4.43. DKK'ların arazi şartlarındaki ve sonlu elemanlar modelindeki genel oturma biçimi	108
Şekil 4.44. DKK1 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.45. DKK2 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.46. DKK3 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.47. DKK4 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Bu çalışmada kullanılan killi siltli kumun özellikleri.....	13
Çizelge 3.2. Doğal zeminin kimyasal içeriği (XRF analiz sonucu)	14
Çizelge 3.3. Bu çalışmada kullanılan çimento ve uçucu külün kimyasal içerikleri	15
Çizelge 3.4. Bu çalışmada kullanılan suyun pH değeri ve kimyasal içeriği.....	15
Çizelge 3.5. Üretilen derin karıştırma kolonlarının özellikleri.....	37
Çizelge 4.1. Elyaf takviyesiz karışımlar için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	72
Çizelge 4.2. Elyaf takviyeli karışımlar için varyans analizi (ANOVA) sonuçları.....	75
Çizelge 4.3. Elyaf takviyesiz karışımlar için çok amaçlı optimizasyon problemi değişken tanımları .	78
Çizelge 4.4. Elyaf takviyesiz karışımlar için optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları	79
Çizelge 4.5. Elyaf takviyeli karışımlar için çok amaçlı optimizasyon problemi değişken tanımları...	84
Çizelge 4.6. Elyaf takviyeli karışımlar için standart optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları	85
Çizelge 4.7. Elyaf takviyeli karışımlar için ekonomik optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları	86
Çizelge 4.8. SK1-SK3 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları	90
Çizelge 4.9. SK4-SK6 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları	91
Çizelge 4.10. SK7-SK9 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları	92
Çizelge 4.11. Elek analizi ve ıslak analiz sonuçları	93
Çizelge 4.12. Likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI) ve USCS zemin sınıfı değerleri.....	93
Çizelge 4.13. Doğal su muhtevası, birim hacim ağırlık ve özgül yoğunluk değerleri.....	94
Çizelge 4.14. Serbest basınç ve üç eksenli CU deney sonuçları	94
Çizelge 4.15. Konsolidasyon ve şişme deneyinin sonuçları.....	95
Çizelge 4.16. Üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin parametreleri	99
Çizelge 4.17. Üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan DKK parametreleri	100

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A_w	Çimento Oranı
C_c	Sıkışma İndisi
C_c^*	Derecelendirme Katsayısı
C_s	Kabarma İndisi
c_u	Efektif Kayma Mukavemeti
C_u^*	Üniformluk Katsayısı
D_{10}	Zeminin %10'luk Kısımının Geçtiği Çap
D_{30}	Zeminin %30'luk Kısımının Geçtiği Çap
D_{50}	Zeminin %50'lik Kısımının Geçtiği Çap
D_{60}	Zeminin %60'lık Kısımının Geçtiği Çap
DKK	Derin Karıştırma Kolonu
D_r	Rölatif Sıkılık
E	Elastisite Modülü
e_0	Başlangıç Boşluk Oranı
e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	Minumum Boşluk Oranı
$E_{u(28)}$	28 Gün Kürlenmiş Standart Numunenin Sekant Elastisite Modülü
$E_{u(28)}^{FA}$	28 Gün Kürlenmiş Uçucu Kül Katkılı Numunenin Sekant Elastisite Modülü
$E_{u(90)}^{FA}$	90 Gün Kürlenmiş Uçucu Kül Katkılı Numunenin Sekant Elastisite Modülü
FA_w	Uçucu Kül Oranı
F_c	Karbon Elyaf Oranı
f_{dmc}	Standart Numunenin Üç Noktalı Eğilme Dayanımı
f_{dmc}^{FA}	Uçucu Kül Katkılı Numunenin Üç Noktalı Eğilme Dayanımı
F_L	Karbon Elyaf Boyu
GS	Özgül Yoğunluk
LL	Likit Limit
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite İndisi
SK	Sondaj Kuyusu
s_u	Drenajsız Kayma Mukavemeti
S_w	Su Oranı
q_u	Zeminin Serbest Basınç Dayanımı
$q_{u(28)}$	28 Gün Kürlenmiş Standart Numunenin Serbest Basınç Dayanımı
$q_{u(28)}^{FA}$	28 Gün Kürlenmiş Uçucu Kül Katkılı Numunenin Serbest Basınç Dayanımı
$q_{u(90)}^{FA}$	90 Gün Kürlenmiş Uçucu Kül Katkılı Numunenin Serbest Basınç Dayanımı
w_n	Su Muhtevası
γ_n	Doğal Birim Hacim Ağırlık
γ_{dry}	Kuru Birim Hacim Ağırlık
σ_p	Ön Konsolidasyon Basıncı
ϕ^o	İçsel Sürtünme Açısı (Derece Cinsinden)
v	Poison Oranı

1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerleyişine paralel olarak gelişen inşaat sektöründe gün geçtikçe daha yüksek ve karmaşık yapılar inşa edilmektedir. Artan yapı yükseklikleri zeminler üzerinde büyük gerilme ve deformasyonlara neden olmaktadır. Zemin ortamının heterojen yapısı nedeniyle zemin davranışı tam ön görülemediğinden yapılan analizlerde yüksek güvenlik katsayıları kullanılmaktadır (Ekmen ve Algin, 2016). Standart projelerde kullanılan zemin yatak katsayısı yaklaşımında zemin yaylar ile temsil edilir. Ancak bu matematiksel model ile heterojen yapıya sahip olan zemin ve zemin içindeki unsurlar gerçekçi bir şekilde modellenemediğinden birçok araştırmacı tarafından (örn. Han ve ark., 2005; Rujikiatkamjorn, 2007; Ellis, 2010) iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Özellikle üçüncü boyutun analiz sonuçlarına etkisinin önemli olduğu geoteknik problemlerde iki boyutlu analizler yetersiz kalabilmektedir (Algin ve ark., 2018). Bilgisayarların işlemci ve bellek kapasitelerinin gelişmesi ile literatürdeki üç boyutlu analizlerin sayısı artmıştır (örn. Sinha ve Hanna, 2017; Hedge ve Sitharam, 2017; Algin ve ark., 2018). Algin (2013) literatürde ilk defa görüntü işleme yöntemini kullanarak zemini jet grout kolonları ile beraber farklı katmanlar halinde modelleyerek oldukça kapsamlı bir üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Ancak literatürdeki kapsamlı modellerde dahi (örn. Algin, 2013; Algin ve Ekmen, 2016; Algin ve ark., 2018) zemin ortamı ayrı katmanlar halinde kendi içinde homojen olarak kabul edilerek zeminin yüzeysel ve derinliğe bağlı litolojik değişimi (hem yatay hem düşey yönde) sonlu elemanlar modellerine yansıtılamamıştır. Arazi şartlarındaki zeminler heterojen bir şekilde dağılan litolojik değişimler göstermektedirler. Bu sebeple çok kısa mesafelerde zemin profillerinin değişmesi mümkün olabilmektedir. Zeminlerin gerçek arazi şartlarındaki bu litolojik değişimini yapılan analizlere yansıtmak homojen katman kabulü ile yapılan analizlere göre daha gerçekçi bir durumu göz önünde bulundurmak anlamına gelmektedir. Özellikle büyük ve önemli projelerde gerçeğe uygun modellemeler hem ekonomik hem de güvenli tasarım yapılmasına imkan sunmaktadır. Dolayısıyla literatürdeki bu eksikliğe yönelik olarak arazinin farklı noktalarında tekrarlanan testlerden elde edilen zemin özelliklerinin derinliğe bağlı değişiminden yararlanarak görüntü işleme tekniği

ile zemin ortamının üç boyutlu hassas litolojik modellenmesine olanak sağlayan yazılımlar MATLAB (2017) aracılığıyla bu doktora tezi kapsamında kodlanmıştır. Bu bağlamda geliştirilen kodlamalarla, literatürde ilk defa görüntü işleme yöntemi ile arazinin farklı yüzey koordinatlarında tekrarlanan derinliğe bağlı arazi testlerinin tüm verileri kullanılarak arazinin gerçek topolojik değişimi kapsanacak şekilde zemin ortamının üç boyutlu litolojik değişimi elde edilebilmiştir. Geliştirilen yazılım ve metodolojinin, litolojik değişimi dikkate alarak zemin ortamını içindeki unsurlarla beraber modelleme yeteneğini test etmek için Harran Üniversitesi Şair Nabi kampüsünde derin karıştırma kolon (DKK) imalatı yapılmasına karar verilmiştir.

DKK ve jet grout kolon uygulamaları, zayıf zeminler için sıklıkla kullanılan zemin iyileştirme teknikleri arasındadır. Derin karıştırma ile stabilizasyon işlemi tipik olarak mekanik kuru karıştırma, ıslak karıştırma veya enjeksiyon ile gerçekleştirilir (Porbaha, 1998; Kamon, 1996). DKK'lar zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve geniş çaplı dolguların oturmalarını etkili bir şekilde azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Lai ve ark., 2006; Bergado ve ark., 1999). Bu teknik, bazı durumlarda daha ekonomik çözümler sunmak için kazıklara alternatif olarak veya kazık inşasının elverişli olmadığı bazı zayıf zeminleri iyileştirilmek amacıyla kullanılır. Derin karıştırma uygulamasında, çimento vb. bağlayıcılarla karışan zemin mineralleri arasında bağların oluşmasıyla zemin yapısının mekanik özellikleri iyileşir ve taşıma kapasitesi, oturma, sıvılaşma gibi problemler azaltılır veya önlenir (Mohammadinia ve ark., 2019; Lorenzo ve Bergado, 2006; Boehm, 2004; Shen ve ark., 2013). Derin karıştırmada, sondaj işlemi başlangıçta burgu veya ekskavatore monte edilen bir teçhizat kullanılarak zemini ayrıştırmak için yapılır ve daha sonra harç, jet grout uygulamasına benzer bir şekilde ancak basınç kullanmadan gevşetilmiş zemin ile karıştırılır. Bu yüzden harç basıncının etkisi jet grout enjeksiyonuna kıyasla daha az olmakta ve mekanik karıştırma nedeniyle daha yüksek inşa hızında uygulamaların gerçekleştirilmesiyle malzeme değişimlerinde ani geçişler azaltılarak kalitede tutarlılık sağlanmaktadır. (Porbaha, 1998; Porbaha ve ark., 2000). Yapılandırılmış DKK için istenen dayanım seviyesi temel olarak uygulanan yüke, mevcut zeminin tipine, tasarım kısıtlamalarına, temelin deformasyon özelliklerine, DKK'ların yerleşimine ve geometrik konfigürasyonlarına bağlı olmaktadır.

Geleneksel olarak DKK'ların inşa aşamalarında, çimento harcı, büyük ölçüde değişken olabilecek zemin tabakalarının doğal su içeriğini dikkate almadan, kolay pompalama ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla yüksek su içeriğiyle üretilmektedir. Bu nedenle, zemin bağlayıcı karışımı için su içeriğinin yeterliliğinin sağlanması, DKK malzemesinin hedeflenen nihai dayanımı açısından oldukça önemlidir. Harcın akışkanlığı ekipmanın hareket hızının düzenlenmesini sağlar ve bu akışkanlık zemin katmanlarındaki su içeriği göz önünde bulundurularak ayarlanabilmektedir (Croce ve ark., 2014; Flora ve ark., 2013). Uygulamada genellikle, dayanım ve deformasyon direncini azalttığı bilinmesine rağmen, uygun olmayan yüksek işlenebilirlik durumu oluşsa dahi, kolay pompalamayı sağlamak amacıyla, karışımda ihtiyaç duyulan suyun, kullanılan tüm çimentoyu hidrate etmek için gereken miktarın iki katı olduğu varsayılır (Mohammadinia ve ark., 2019; Golder Associates, 2013). Uçucu kül katkısının, benzer işlenebilirlik aralığında su gereksinimlerini yaklaşık %10 azalttığı vurgulanmaktadır (Mohammadinia ve ark., 2019; Golder Associates, 2013). Çimento ile beraber özellikle uçucu kül vb. tamamlayıcı madde kullanarak zemin iyileştirmesi popüler bir araştırma alanıdır (örn. Kafodya ve Okonta, 2018; Wang ve ark., 2019). Çimento katkılı kil üzerinde yapılan önceki araştırmalarda (örn. Broms, 1986; Watabe ve ark., 2000; Yin, 2001) çimento içeriği (A_w) ve kürlenme süresi parametrik çalışmalarda ana faktörler olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, daha önceki bazı çalışmalarda (Miura ve ark., 2001; Lorenzo ve Bergado, 2004; Lorenzo ve Bergado, 2006), doğal zeminin su içeriğinin (S_w), aynı zamanda çimento ile stabilize edilmiş zeminin dayanımına etki eden önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Zemin iyileştirmesi için uçucu kül kullanımı, düşük kalsiyum sağladığından daha yüksek dayanım elde etmeye yarayan sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Mohammadinia ve ark., 2018 ve 2019). Karışıma uçucu kül ilave edilmesinin bir başka avantajı karışımın priz süresini uzatmaktır (Mohammadinia ve ark., 2019). Bu durum, donatılandırmanın gerekli olduğu çalışmalarda takviyeyi zemin-beton karışımına yerleştirmede kolaylık sağlamaktadır. Dayanım gerekliliklerine bağlı olarak kullanılan çimento, gevşek halde zeminin kuru ağırlığının yaklaşık %4-20'si arasında değişir ve bu aralık arazi koşullarına bağlı olarak çeşitlenebilir (Porbaha, 1998; Porbaha ve ark., 2000). Derin karıştırma işlemine uçucu kül katılması, çimento tüketimini azaltmak, priz süresini uzatmak ve su içeriğini azaltmak gibi etkilerinden faydalanmak için de yararlı

olabilmektedir. Uçucu kül, USEPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı) tarafından tehlikeli olmayan atık madde olarak belirtilmiş olup DKK uygulamalarında çimento yerine belirli oranlarda kullanılmaktadır.

DKK'lar çeşitli durumlarda yatay yüklemelerin neden olduğu eğilme momentlerine maruz kaldıklarında, yeterli eğilme dayanımına sahip değillerse uygulamalarda problemler oluşabilir (Sukontasukkul ve Jamsawang, 2012). Örneğin zemin üzerine yapılan bir dolgu nedeniyle yatay yönde büyük yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir (Wu ve ark., 2005). Buna ek olarak, yatay yükler DKK'larda eğilme momenti oluşturabilmekte ve DKK'ların çekme etkisi altında yenilmeye uğramasına neden olabilmektedirler. Standart derin karıştırma tekniği, DKK'ların basınç dayanımını iyileştirmede etkili olmasına rağmen, bu gibi durumlarda DKK'ların eğilme davranışlarını iyileştirmede yetersiz kalabilmektedir (Sukontasukkul ve Jamsawang, 2012). Bu tarz problemleri aşmak için DKK'lara çeşitli elyaf takviyeleri yapılabilir. Bu kapsamda elyaf takviyesinin, sadece kullanılan çimento miktarındaki azalmaya değil, aynı zamanda dayanım ve deformasyonun iyileştirilmesine de katkıda bulunması birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Duan ve Zhang, 2019; Tran ve ark., 2018; Chen, 2016; Danso ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2015; Sharma ve ark., 2015; Olgun, 2013).

Bu doktora tezi kapsamında arazide üretilecek DKK'ların malzeme oranlarını ve karışıma eklenebilecek katkı malzemelerini belirlemek için laboratuvar ortamında birçok numune üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. DKK laboratuvar numuneleri çeşitli çimento oranları (kuru zemin ağırlığına göre %5, %10, %15 ve %20) ile bağlanan yüksek su içeriği varyasyonlarındaki (kuru zemin ağırlığına % 40, % 60, % 80, % 100 ve % 120) killi siltli kum ve F sınıfı uçucu kül (çimento ağırlığına ilave olarak %10, %20 ve %30) kullanılarak üretilmiştir. Gevşek kum, yüksek derecede sıkıştırılmış siltli kil ve siltli formasyonlar gibi zeminler daha önce bazı çalışmacılar tarafından incelenmiştir (örn. Mohammadinia ve ark., 2019; Lorenzo ve Bergado, 2006; Boehm, 2004; Shen ve ark., 2013; Porbaha, 1998; Porbaha ve ark., 2000; Terashi, 2005), ancak Avrupa ve Asya'nın ova bölgelerinde nadiren karşılaşılan zemin tipleri olan killi siltli kumları dikkate alan sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu doğrultuda,

uçucu kül katkısı ile ve uçucu kül katkısı olmaksızın derin karıştırma kolonlarının sağladığı zemin iyileştirmesinin etkisini incelemek amacıyla, bu tez çalışmasında zemin tipi orta sıkılıktaki killi siltli kum seçilmiştir. Önceki araştırmalarda kabul edilen örnekleme prosedürü (örn. Lorenzo ve Bergado, 2006) bu çalışmada uygulanmış ve serbest basınç dayanımı deneyleri 28 ve 90 günlük kür dönemlerinden sonra gerçekleştirilmiştir. Numuneler, kürleme süresi sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuş olup bazı karışımlar için tipik konsolidasyonsuz drenajsız (UU) ve konsolidasyonlu izotropik drenajlı (CIU) üç eksenli deneyler yapılmıştır. Optimizasyonlar, dikkate alınan her bir kürleme süresi için ayrı ayrı 1 MPa ve 2.1 MPa tasarım hedefi (Terashi, 2005; Lorenzo ve Bergado, 2006; Bruce ve ark., 2013) gözetilerek serbest basınç dayanımı değerlerinin sonuçları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları değerlendirilerek çalışma gereksinimlerine uygun olacak şekilde 28 günlük kürleme periyodu için serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) 1 MPa olan uçucu kül katkılı ve katkısız olmak üzere iki kontrol karışımı belirlenmiştir. Uçucu kül içeren karışım için su içeriği (S_w) kuru zemin ağırlığınca %44.55, çimento içeriği (A_w) kuru zemin ağırlığınca %5 ve F sınıfı uçucu kül içeriği (FA_w) çimento ağırlığınca ilave olarak %10'dur. Uçucu kül içermeyen karışım için su içeriği (S_w) kuru zemin ağırlığınca %40, çimento içeriği (A_w) kuru zemin ağırlığınca %5.3 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, sürekli olarak üretilen ve depolama sahasında saklanan Çatalağzı, Zonguldak'ta bulunan bir termik santralden alınmıştır. Aynı dayanımı sağlayan uçucu küllü alternatif kontrol karışımı, uçucu külün işlenebilirliğe ve priz süresine yaptığı katkılarla birlikte atık olarak değerlendirilmesi nedeniyle çevreci bir yaklaşım da sağlamaktadır. Belirlenen bu iki kontrol karışımına 4 mm ,6 mm ve 12 mm boylarında (F_L) ve hacimce (F_C) %0.1, %0.4, %0.8 oranlarında tüm varyasyonlar için karbon elyaf ilavesi yapılmıştır. Belirtilen varyasyonların tümüne taze haldeyken segregasyon, 28 günlük kürleme süresinden sonra ise şişme, serbest basınç ve üç noktalı eğilme dayanımı deneyleri yapılarak elyaf katkısının uçucu kül ilaveli ve ilavesiz karışımlara etkisi araştırılmıştır. Optimizasyonlar segregasyon, şişme, eğilme ve serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) için belirlenen hedefler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu doktora tezi kapsamında sunulan deneysel çalışmalar ve optimizasyon çalışmalarından elde edilen pratik sonuçlar, özellikle zemin iyileştirme

projelerindeki karbon elyaf takviyeli ve takviyesiz derin karıştırma uygulamalarının optimum tasarımı için bazı önerilerde bulunmaktadır. Göz önünde bulundurulacak faktörler arasındaki optimum hedef değerlerine çok amaçlı arzu edilebilirlik içeriğinin ve yüksek derecede regresyon modellerinin dahil edilmesini sağlamak için mevcut Goal Attainment optimizasyon yöntemi (GAM) bu doktora tezi kapsamında MATLAB (2017) ortamında geliştirilerek kullanılmıştır. Böylece arazi şartlarında üretilecek DKK'ların malzeme oranları ve karışıma eklenebilecek elyaf miktarı belirlenmiş olup uçucu kül katkılı ve karbon elyaf takviyeli DKK optimizasyonuna yeni bir pratik kavrayış olarak ayrı bir katkı sağlanmıştır.

Optimizasyon çalışması ile arazi şartlarında üretilecek DKK'ların malzeme içeriği ve oranları belirlendikten sonra, arazi yapısını modellemek için Harran Üniversitesi Şair Nabi kampüsünde bir alan için özel izin alınmış ve DKK imal edilecek arazi üzerinde farklı koordinatlarda ve derinliklerde, geliştirilen yazılımın gereksinimlerine uygun bir biçimde standart penetrasyon testleri (SPT) yapılmıştır. Arazi yapısı ve yer altı suyu seviyesi belirlendikten sonra ilgili arazide optimum karışım oranlarında 4 farklı kolon imal edilmiştir. 28 günlük kürlenme süresinin ardından DKK'lara yükleme testleri yapılmıştır. İmal edilen derin karıştırma kolonları üzerinde yapılan yükleme testleri, geliştirilen yazılım sayesinde görüntü işleme tekniği kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesiyle simüle edilmiştir. Bu modellemelerde zeminin hem litolojik hem de topolojik yüzey değişimleri arazi testleri ile uyumlu olacak şekilde dikkate alınmıştır. Bu doktora tezinde geliştirilen yazılımlar sayesinde literatürde ilk defa görüntü işleme metodu temelinde üç boyutlu hassas litolojik zemin değişimlerinin modellenemediği bir sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilebilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Christopher ve Jasperse (1989), olası bir deprem sırasında sıvılaşmaya müsait olan Jackson Gölü Barajı'nda yapılan derin karıştırma uygulaması ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. İlgili araştırmacılar stabilize edilmiş zeminin dayanımını incelemiş ve belirledikleri alanda kapsamlı kalite kontrol testleri yaparak DKK numunelerinin üretildikten sonra en az 112 gün boyunca dayanımlarını arttırmaya devam ettirdiği, su çimento oranının nihai dayanımda belirleyici anahtar faktör olarak çimento içeriğinden daha etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Lin ve Wong (1999) tarafından yapılan çalışmada Çin'de bulunan bir köprü ile köprüye yakın alanda yer alan bir dolgu arasında oluşan diferansiyel oturmalar incelenmiş, yumuşak kil üzerindeki otoyol setlerinin yapımında büyük bir problem olduğu görülmüş ve farklı uzunluklara sahip olan derin karıştırma kolonlarının Çin Fu-Xia otoyolundaki diferansiyel oturmaları azaltmak için kullanılabileceği açıklanmıştır. Derin karıştırma yönteminin performansı ve fizibilitesi, ana uygulamadan önce yapılmış bir deneme setinde araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, değişen uzunluklara sahip derin karıştırma uygulamasının, yumuşak bir kil zemindeki toplam ve diferansiyel oturmaları azaltmak için basit ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Karinaj ve Havanagi (2001) çimento ile stabilize edilmiş elyaf takviyeli uçucu kül-zemin karışımlarının davranışı üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmada Hint uçucu külü, silt ve kum farklı oranlarda karıştırılmıştır. Elyaf ve uçucu kül katkısının dayanım üzerine etkileri Karinaj ve Havanagi (2001) tarafından incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgiler ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

Han ve ark. (2005) derin karıştırma kolonları üzerine inşa edilmiş geosentetik takviyeli bir dolgunun iki boyutlu sayısal modellemesini gerçekleştirmiştir. Sayısal modelleme ve analiz için Finlandiya'nın Hertsby kentinde bulunan derin karıştırma kolonları ile inşa edilen bir geosentetik takviyeli dolgu seçilmiştir. Bu dolguyu

modellemek için sonlu farklar metodunu temel alan FLAC 2D yazılımı kullanılmıştır. Nümerik analizde, derin karıştırma kolonları iki boyutlu sürekli duvar gibi düşünülerek modellenmiştir.

Kolias ve ark. (2005) killi zeminlerde yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve çimento ile stabilizasyon üzerine bir çalışma yapmıştır. Laboratuvarda kil zeminlerde (CL, CH) stabilize edilmek üzere yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve çimento kullanmanın etkisi araştırılmıştır. Tek eksenli sıkıştırmada, gerilme ve eğilme dayanım testleri çeşitli yüzdelere uçucu kül ve çimento eklenmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ve çimento içeren killi zeminlerin stabilize edilmesinin avantajlarını göstermiştir.

Lorenzo ve Bergado (2006) yüksek su içeriğine sahip olan çimento katkılı killerin sıkıştırılabilme ve dayanım özelliklerini derin karıştırma uygulamalarında incelemiştir. Priz süresi boyunca, çimento içeriği ve harcın toplam su içeriğinin, elde edilen stabilize kilin dayanımını ve sıkışabilirliğini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Optimum iyileştirme sağlamak adına, belirli bir çimento içeriğine sahip karışım için uygun toplam su içeriğinin önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, derin karıştırma uygulamasında faydalı ampirik ilişkiler Lorenzo ve Bergado (2006) tarafından sunulmuştur.

Oliveira ve ark. (2011) derin karıştırma kolonlarıyla güçlendirilmiş yumuşak zemin üzerinde yer alan bir dolgunun nümerik analizini gerçekleştirmiştir. Derin karıştırma kolonlarıyla güçlendirilmiş normal konsolide yumuşak kil üzerine inşa edilmiş bir dolgunun davranışı incelenmiştir. Sayısal analizlerde düşey efektif gerilme artışları ve boşluk suyu basıncı değişimleri dikkate alınmıştır. Öncelikle, DKK kullanımının etkileri incelenmiş olup kolon aralıklarının, dolgu ve kolonların deformasyonu üzerine etkileri araştırılmıştır.

Sukontasukkul ve Jamsawang (2012), DKK'ların çeşitli durumlarda yatay yüklemelerin neden olduğu eğilme momentlerine maruz kalması halinde, bu durumun çeşitli sorunlara yol açabileceğini belirtmiştir. Yapılan çalışmada DKK'ların eğilme

davranışını iyileştirmek için kullanılan çelik ve polypropylene elyafların eğilme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Çelik ve polypropylene elyafların derin karıştırma kolonlarının eğilme performansını arttırdığı belirtilmiştir.

Esmeali ve ark. (2013), derin karıştırmanın gevşek kumlu zeminlerdeki taşıma kapasitesi üzerindeki etkililiği ve oturmanın azaltılması üzerine bir araştırma yapmıştır. Yapılan çalışmada 2 boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve gevşek kum zemindeki istinat duvarı $c - \phi$ azaltma yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. İlgili analiz, derin karıştırma kolonlarına sahip olan ve olmayan iki ayrı alt tabaka için yürütülmüştür.

Algın (2013), jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zemini, radye temel sistemi ile birlikte üç boyutlu sonlu elemanlar metoduyla analiz etmiştir. Çok elektrotlu elektrik özdirenç test verilerinin doğrudan kullanılması ile model oluşturulmuştur. Jet grout kolonlarının derinliğe bağlı olarak çaplarında oluşan üç boyutlu değişim modellenmiş ve tüm sistem analiz edilmiştir. Geoteknik açıdan karmaşık olarak nitelendirilen modellerin tanıtılan yöntem ile üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin yapılabileceği açıklanmıştır.

Kitazume ve Terashi (2013) çimento karışımı DKK malzemesinin viskozitesi ile dayanımını ilişkilendirmiş olup derin karıştırma ve jet grouting karışımları arasındaki en belirgin farkın, taze zemin bağlayıcı karışımlarının likiditesi olduğunu, homojen olmayan ve düşük kaliteli karışımlara neden olan yetersiz bağlayıcı içeriği ile düzgün olmayan aralıktaki akışkanlığın önemli farklılıklar yarattığını belirtmiştir.

Croce ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, derin karıştırma ve jet-grout tekniklerinin, diğer bazı zemin iyileştirme tekniklerine kıyasla daha düşük oturmalar sağladığı ve çok daha az titreşim gürültüsüne neden olduğu bu yüzden zorlu saha koşullarında bu tekniklerin uygulanabileceği belirtilmiştir.

Güllü (2015) kil, kum, kireç, taban küllü ve çimento karışımlarının viskoz davranışı üzerine bir araştırma yapmıştır. Çimento karışımlarının reolojik yapısı bu çalışmada incelenmiş ve bu davranış özellikleri dayanım ile ilişkilendirilmiştir.

Liu ve ark. (2015), mekanik karıştırma ile zemin değişiminin çimento ile stabilize edilmiş karışımlar üzerine olan etkisini incelemiştir. DKK'lar mekanik karıştırma ile oluşturulduğundan, dayanım ve deformasyon direnci parametrelerinin değişken olmasının beklendiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada dayanım ve elastisite modülündeki değişkenlik, sonlu eleman analizleri kullanılarak araştırılmıştır.

Jamsawang ve ark. (2016) Tayland'da bulunan DKK'lar ile desteklenmiş bir otoyol dolgusunun üç boyutlu sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Analizlerde üç boyutlu mekanik ve hidrolik sayısal bir model kullanılmıştır. Sonuçlar, oturma baz alınarak zemin ile DKK'lar arasındaki yük dağılımı açısından incelenmiş olup aşırı boşluk suyu basıncı ve yanal hareketler bakımından değişimlerin saha ölçümleriyle kıyaslaması yapılmıştır.

Chen (2016), bazalt elyafın, çimento ile stabilize edilmiş zeminin çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmış olup karışıma optimum düzeyde bazalt elyaf eklenmesi ile maksimum çekme dayanımına ulaşabileceğini belirtmiştir.

Algın ve Ekmen (2016), radye temeller ile darbeli kırma taş kolon gruplarının etkileşimini araştırmış ve görüntü işleme yöntemi ile üç boyutlu sonlu elemanlar zemin modeli oluşturmuştur. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tepki Yüzey Metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Görüntü işleme tekniğinin geoteknik açıdan bu tarz karmaşık modellemelerde geçerli bir yöntem olduğu ve optimizasyon için kullanılan Tepki Yüzey Metodunun geoteknik mühendisliği açısından yararlı ve pratik bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Algın (2016), çeşitli yüklere maruz kalan jet grout destekli radye temellerin görüntü işleme yöntemiyle üç boyutlu olarak modellenebileceğini ve bu karmaşık sistemin üç boyutlu olarak sonlu elemanlar metodu ile analiz edilebileceğini

göstermiştir. Bu kapsamda Tepki Yüzey Metodu kullanılarak jet grout kolonlarla desteklenmiş radye temel sistemi parametrelerinin optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Gao ve ark. (2017) karbon elyaf katkısının kil zeminlerin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmış ve karbon elyaf yüzeyi ile zemin arasındaki arayüz etkileşimini, tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelemiştir. Karbon elyaf katkısının belirli bir orana kadar zeminin serbest basınç dayanımını arttırdığı ve optimum değeri aştıktan sonra dayanımı azalttığı belirtilmiştir.

Anggraini ve ark. (2017), işlenmemiş ve işlenmiş Hindistan cevizi elyafı ve çimento kullanılarak stabilize edilmiş tropikal deniz kilinin üç noktalı eğilme davranışını araştırmış ve bu elyafın eğilme davranışını iyileştirdiği sonucuna varmıştır.

Tran ve ark. (2018), çimento ile stabilize edilmiş zeminde atık mısır elyafının dayanım üzerine etkisini araştırmış ve kuru zemin ağırlığına %0.25-%0.5 oranlarında bu elyaf kullanımını önermiştir.

Chen ve ark. (2018) çok katmanlı Graphene Oxide karbon elyaf katkılı çimento kompozitlerinin mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Karbon elyaf ilavesinin çimento kompozitinin basınç ve eğilme dayanımını sırasıyla yaklaşık %24, ve % 138 oranında arttırdığı belirtilmiştir.

Algın ve ark. (2018), literatürdeki bir derin kazı çalışmasının üç boyutlu sonlu elemanlar modelini görüntü işleme metodu ile oluşturmuştur. Yapılan analizde literatürdeki çalışmalardan farklı olarak kazı öncesi durum ve kazı aşamaları dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları ile arazi ölçüm sonuçlarının örtüştüğü belirtilmiş olup çalışmada kullanılan tekniğin bu tip karmaşık problemlerin analizi için geçerli bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Algın ve ark. (2019), görüntü işleme tekniğini kullanarak Viyana'da yer alan Avrupa'nın en büyük gökdelenlerinden olan Donau City kulelerinin baret kazılarıyla

desteklenmiş temel sistemlerini görüntü işleme tekniği kullanarak üç boyutlu olarak modellemiştir. Sistemdeki tüm unsurların birbiri ile olan etkileşimini incelemek ve oturma değerlerini tespit etmek amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları gerçek ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntem ile karmaşık modelleme ve oturma analizlerinin hassas bir biçimde yapılabileceği açıklanmıştır.

Liu ve ark. (2019), arazideki su muhtevası değişiminin kil zeminde üretilen çimento esaslı DKK'ların dayanımı üzerine etkisini araştırmış ve bu konuda bir istatistiksel analiz sunmuştur.

Duan ve Zhang (2019), polipropilen elyaf (kuru zeminin ağırlıkça %0, %0.1, %0.2, %0.3, %0.4, ve % 0.5'i olarak alınmıştır) ve uçucu kül katkısının (kuru zeminin ağırlıkça %0, %4, %8, ve %12'si olarak alınmıştır), çimento ile stabilize edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, çekme dayanımı, deformasyon özellikleri, kırılma modu ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş zeminin serbest basınç ve eğilme dayanımının, polipropilen elyaf ve uçucu kül içeriğinin artmasıyla önce artma, sonra azalma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir.

Elkhebu ve ark. (2020) ağır dolgular altında çimento ile stabilize edilmiş kolonlarda sismik yüklemeler altında yatay yer değiştirmelerin meydana gelmesinin muhtemel olduğunu ve bu durumun eğilme davranışı nedeniyle stabilize edilmiş kolonların göçmesine neden olabileceğini belirtmiştir. Bu sorunu çözmek için Elkhebu ve ark. (2020) sabit uçucu kül içeriği ve %0.5, % 0.75, % 1 ve % 1.25 aralığında polipropilen elyaf kullanımının etkisini araştırmıştır.

Wang ve ark. (2020), bazalt elyaf ve çimento malzemelerini kaolin karışımına ilave etmiş, mekanik özelliklerin ve mikro yapının nasıl etkilendiğini incelemiştir. Bazalt elyafın karışıma dahil edilmesinin sünekliliği arttırdığı ve çimentolu kaolinin kırılma dayanımını iyileştirdiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

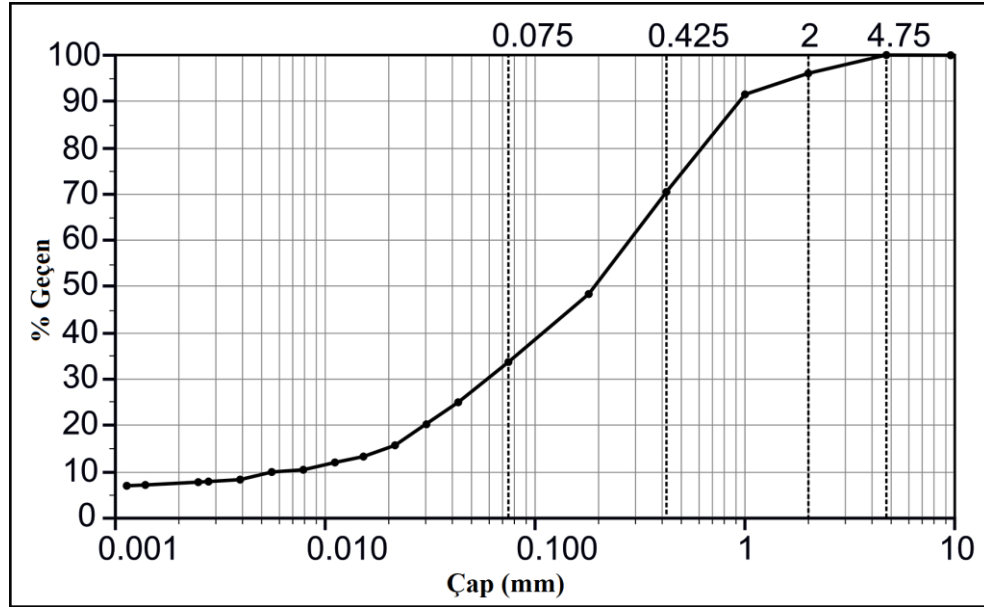
3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan orta sıkılıktaki killi siltli kum, Harran Üniversitesi'nin Şair Nabi Kampüsünde 5 ile 7 m derinlikte açık kesimli bir kazıdan elde edilmiştir ve örnekleme 4 ile 5 m derinlik aralığında gerçekleştirilmiştir. Kum parçacıklarının bazı fiziksel özellikleri ve zeminin orta sıkılıkta olduğu Çizelge 3.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Bu çalışmada kullanılan killi siltli kumun özellikleri

Özellikler	Değerler	Özellikler	Değerler
D_{10}	0.01	e_{min}	0.56
D_{30}	0.06	w_n	13.5–13.9%
D_{50}	0.20	Likit limit (LL)	56%
D_{60}	0.31	Plastik limit (PL)	32%
C_u^*	1.55	G_s	2.69
C_c^*	0.06	γ_n	18.2–19.3 kN/m ³
e_0	0.65	γ_{dry}	16–16.9 kN/m ³
e_{max}	0.8	D_r	0.64

Orta sıkılıktaki killi siltli kumun gradasyon dağılımı Şekil 3.1.'deki gradasyon eğrisinde gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan zemin, lastik bir çekiç kullanılarak küçük parçacıklara ayrılmadan önce yaklaşık 25 C°'deki oda sıcaklığında kurutulmuştur. ABD standardına göre 4.75 mm'lik açıklığa sahip olan 4 No.lu elekten geçen zemin deneylerde kullanılıncaya kadar kapalı torbalarda saklanmıştır. Bu çalışmada kullanılan doğal zeminin kimyasal bileşimi XRF (X-ışını floresansı) analizinden elde edilmiş ve Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Sunulan çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu külün özgül ağırlığı (G_s) 2.0 olup Zonguldak'taki Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir.



Şekil 3.1. Orta sıklıktaki killi siltli kumun gradasyonu

Çizelge 3.2. Doğal zeminin kimyasal içeriği (XRF analiz sonucu)

Bileşim	Değer (%)	Element	Değer (ppm)	Element	Değer (ppm)
Na ₂ O	0.044	Zn	73.1	Nb	21.2
MgO	3.587	Ga	16.9	Mo	6.4
Al ₂ O ₃	11.81	Ge	0.4	Th	6.9
SiO ₂	38.88	As	9.5	U	9.3
P ₂ O ₅	0.0925	Se	0.3	Ag	4.2
SO ₃	0.1763	Br	4.9	Cd	2.8
Cl	0.0072	Rb	58.7	In	1
K ₂ O	2.29	Sr	134.6	Sn	3.4
CaO	1 6.93	Y	25 .9	Sb	1
TiO ₂	0.7576	Zr	183.6	Te	1.3
V ₂ O ₅	0.0257	Pb	15.7	I	2.3
Cr ₂ O ₃	0.0281	Bi	0.6	Cs	6.3
MnO	0.1051	Co	37.7	Ba	321
Fe ₂ O ₃	9.957	Ni	114.8	La	37.8
LOI	1 4.96	Cu	30.7	Ce	70.2
-	-	Hf	5.1	W	3
-	-	Ta	3.7	Au	<0.1

Kullanılan çimento tipi (CEM IV / BP-32.5N) ve uçucu külün kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3.'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Bu çalışmada kullanılan çimento ve uçucu külün kimyasal içerikleri

Bileşim (wt. %)	Çimento (CEM IV / B (P) 32.5 N)	Uçucu Kül
SiO ₂	33.6	55.460
Al ₂ O ₃	8.85	26.330
Fe ₂ O ₃	4.93	6.706
CaO	40.84	1.689
MgO	1.96	2.422
SO ₃	2.99	0.051
Na ₂ O	0.65	1.084
K ₂ O	1.1	4.222
LOI	5.05	1.20

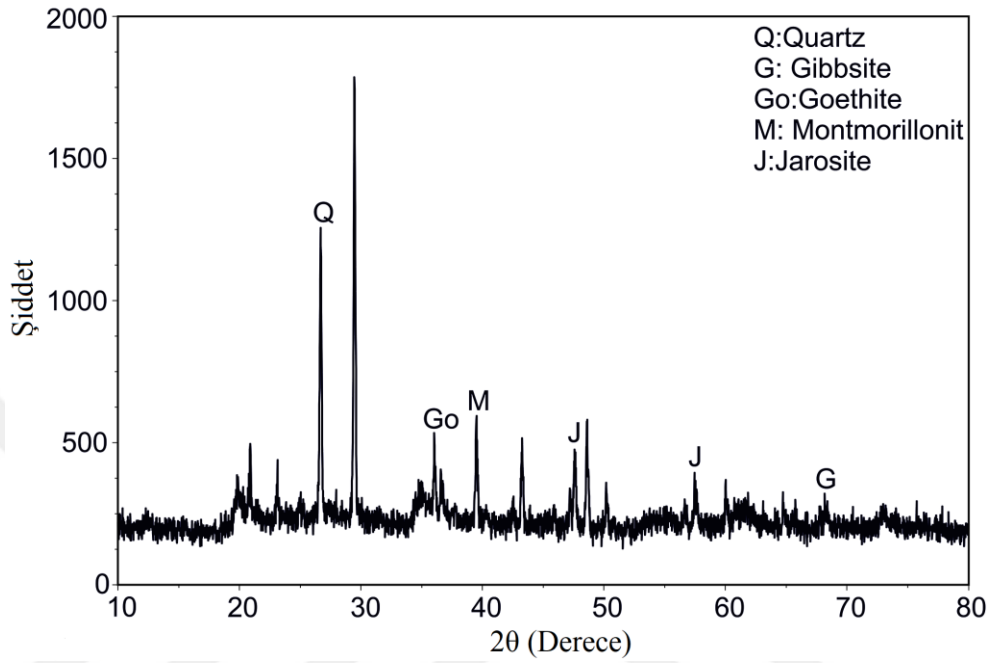
DKK'ların uzun süreli performansı boşluk suyu kimyasından etkilendiğinden (Shen ve ark., 2003, Shen ve Miura, 1999), bu tez çalışmasında kullanılan suyun pH ve kimyasal içerik değerleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bu çalışmada kullanılan suyun pH değeri ve kimyasal içeriği

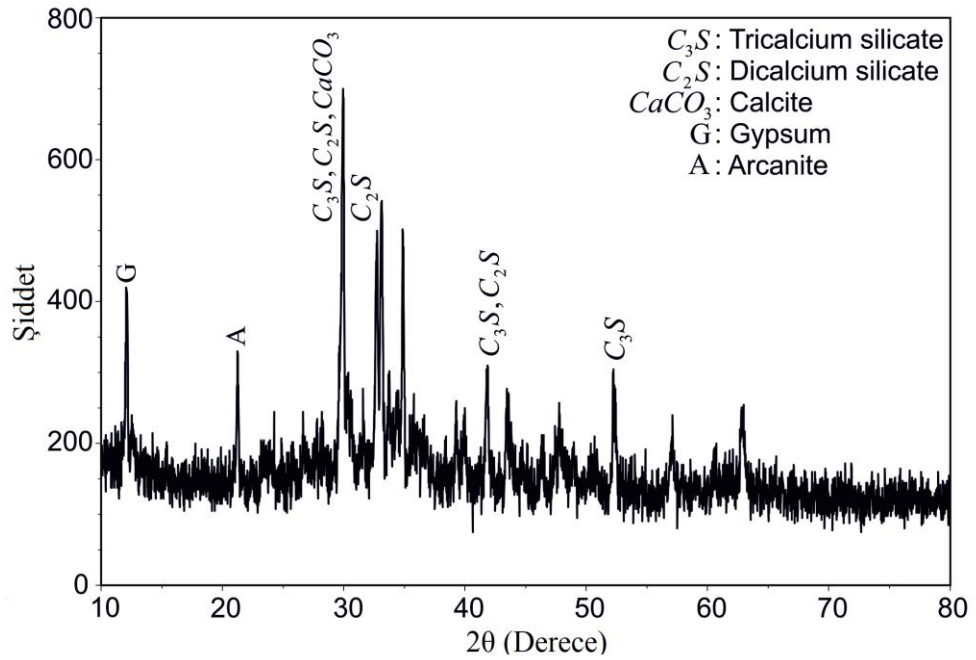
İçerik	Değer (mg/l)
NO ₂	0
SO ₄ ²⁻	35
F	5.054
Cl	21.89
NO ₃	5.85
PO ₄	148.24
CO ₃	12.5
Ca	27.9
P	2.65
Mg	14.9
Arcanite (mg CaCO ₃ /l)	120
pH	7.74

Şekil 3.2., 200 nolu (75 µm) elekten geçen kurutulmuş zemin numuneleri üzerinde yapılan X ışını kırınımı (XRD) analizinin sonucunu göstermektedir. Kil mineralinin karakterizasyonunu tanımlamak için monokromatik radyasyona sahip bir Philips X-ışını difraktometresi kullanılarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Katmanlar arası suyun etkisini en aza indirmek için, zemin numunesi 3 gün boyunca 60 C°'de ısıtılmış ve %60 bağıl nemin altındaki aralığı doğrudan ölçmek için bir XRD numune tutucuya yerleştirilmiştir. XRD analizi, ilgili zemin numunesinde montmorillonit

kilinin yanı sıra jarosit, kuvars, goetit, gibbsit gibi diğer minerallerin varlığını ve mineralojik özelliklerini göstermiştir. Şekil 3.3.'te bu çalışmada kullanılan çimentonun XRD analiz sonucu gösterilmiştir.

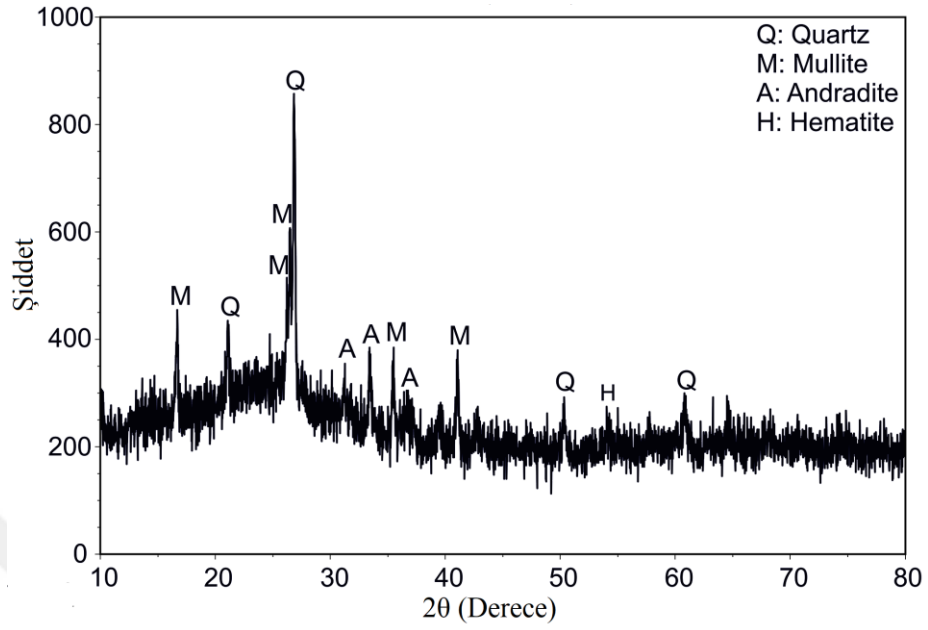


Şekil 3.2. Doğal zeminin XRD analizi sonucu



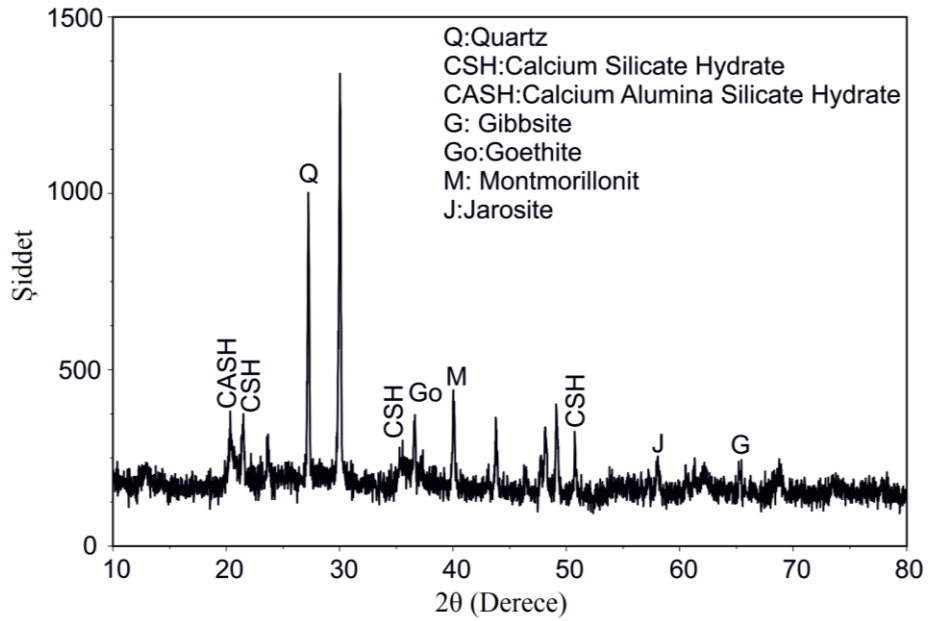
Şekil 3.3. Kullanılan çimentonun XRD analizi sonucu

Şekil 3.4.'te bu çalışmada kullanılan uçucu külün XRD analiz sonucu sunulmuştur.



Şekil 3.4. Kullanılan uçucu külün XRD analizi sonucu

Şekil 3.5.'te çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin XRD analiz sonucu gösterilmiştir. Hidratasyon reaksiyonunun göstergesi olan CSH ve CASH jelleri, ilgili XRD testinde görülmektedir.



Şekil 3.5. Çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş zeminin XRD analizi sonucu

Bu doktora tez çalışmasında, hedef kontrol dayanımına göre optimizasyon ile belirlenmiş sabit su ve çimento içeriğine ek olarak, orta sıklıktaki killi siltli kumun F sınıfı uçucu kül ilavesi (FA_w) ve karbon elyaf takviyesi ile birlikte kullanımı dikkate alınmıştır. Literatürde zeminlerin ve çimento kompozitlerinin serbest basınç ve eğilme dayanımını oldukça etkili bir şekilde iyileştirdiği belirtilen karbon elyaf (Gao ve ark., 2017; Chen ve ark., 2018), bu çalışmada DKK'ların eğilme dayanımlarını arttırmak ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirmek için takviye malzemesi olarak kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında, arazi şartlarında üretilecek DKK'lar için ilk aşamada laboratuvar ortamında uçucu kül katkılı ve katkısız olmak üzere çeşitli su ve çimento oranı varyasyonlarında karışımlar hazırlanarak uluslararası rehber çalışmalarda belirtilen hedef dayanımlara ulaşmak için ön araştırmalar yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, bu doktora tezi kapsamında ileri bir aşamaya taşınan mevcut Goal Attainment optimizasyon yöntemi temelli algoritma kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon analizi ile hedef dayanım değerleri ile örtüşen kontrol karışımları belirlenmiştir. Kontrol karışımlarına çeşitli boy ve oranlarda karbon elyaf takviyesi yapılarak elyafın etkisi incelenmiştir. Tüm deney sonuçları ve optimizasyon çalışması dikkate alınarak bu doktora tezi kapsamında arazi şartlarında üretilecek DKK'ların malzeme içeriği ve oranları belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada Harran Üniversitesi Şair Nabi kampüsünde yer alan DKK imal edilecek arazide standart penetrasyon testleri (SPT) yapılmıştır. İlgili arazide optimum karışım oranlarında 4 farklı DKK imal edilmiştir. 28 günlük kürlleme süresinin ardından DKK'lara yükleme testleri yapılmıştır. Üretilen derin karıştırma kolonları bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım sayesinde görüntü işleme tekniği kullanılarak zeminin hem litolojik hem de yüzeysel değişimlerinin dikkate alınmasıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Bu doktora çalışması kapsamında her aşamada kullanılan yöntemler aşağıda alt başlıklar halinde detaylandırılarak anlatılmıştır.

3.2.1. Elyaf takviyesiz karışımlar için numune hazırlama metodolojisi ve yapılan deneyler

Çimento ve uçucu kül katkılı karışımlar, kuru zeminin kütlesine dayanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan çimento oranları (A_w) zeminin kuru kütlesine göre %5, %10, %15 ve %20 olup uçucu kül oranları (FA_w) karışıma ilave olarak, çimento oranına göre %0 (uçucu kül içermeyen karışım), %10, %20 ve %30 olarak alınmıştır. Bu kombinasyonların tümü, zeminin kuru kütlesine göre %40, %60, %80, %100 ve %120 su muhtevalarının (S_w) her bir varyasyonu için uygulanmıştır. Numune hazırlama metodolojisi, nihai numune dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğundan (Chen ve ark., 2011; Bruce ve ark., 2013), pratik uygulamalarla uyumluluk sağlanması için numuneler FHWA (Federal Highway Administration, Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolu İdaresi) kılavuzunun (Bruce ve ark., 2013) ana hatlarıyla belirtilen karıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Hedeflenen su muhtevasına uygun olacak şekilde karışım kıvamını ayarlamak için öncelikle zemin numunesi içermeyen %30 su içeriğinde harç hazırlanmıştır. Harç, 3 dakika boyunca karıştırma aparatları bulunan portatif mekanik bir mikser ile karıştırılmıştır. Homojen karışımlar oluşturmak için çalıştırılan başka bir mikserde zemin numunesine, hedef su içeriğine ulaşmak için kademeli olarak kalan su ilave edilmiştir. Daha sonra bu iki karışım birleştirilmiş ve homojen bir karışım harcı elde edilene kadar 10 dakika boyunca portatif bir mikserde karıştırılmıştır. Serbest basınç deneyine tabi tutulacak numuneleri oluşturan karışımlar 100 mm iç çapa ve 200 mm yüksekliğe sahip PVC numune kalıplarına aktarılmıştır (Şekil 3.6.). Numuneler 1 gün sonra kalıplardan çıkarılıp 25 C° ortam sıcaklığında %97 oranında nem içeriğini saklı tutabilmesi için plastik kütleme paketlerine ince bir silikon tabaka uygulanarak hava geçirmez olarak sarılmıştır (Şekil 3.7.).

Yüksek işlenebilirliğe sahip sıvı olmayan karışımlar, üç itici aparat ile numune kalıplarına aktarılmıştır. Aparat çıkarma işlemleri, oluşan hava boşluklarını yok etmek ve karışımın delikli bir yapıda olmasını engellemek için her itici aparata kademeli olarak ince bir çubuğun hafifçe vurulması ile yapılmıştır. Bu işlemin amacı, derin

karıştırma kolonu üretiminin gerçek durumunu simüle etmektir. Bu yöntem Lorenzo ve Bergado (2006) tarafından da önerilmiştir.



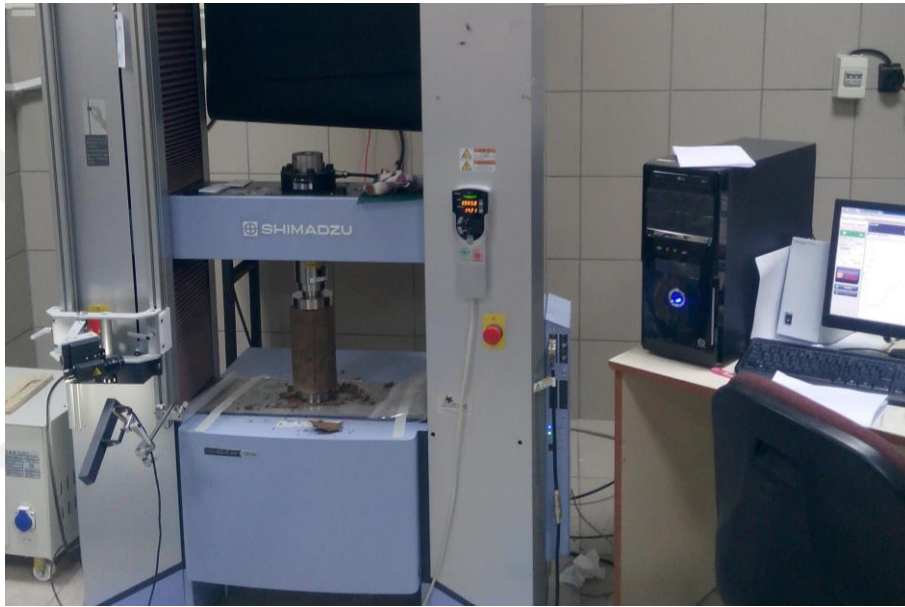
Şekil 3.6. Numuneleri kalıplama aşaması



Şekil 3.7. Numuneleri kütleme aşaması

FHWA kılavuzunda belirtildiği gibi serbest basınç dayanımı deney numunelerinin yükseklik/çap oranı 2 olarak belirlenmiştir (Bruce ve ark., 2013).

Serbest basınç dayanımı deneyinde çok önemli bir etken olan düz yüzeyi elde etmek için tesviye, her bir kalıbın düz kenarı kullanılarak yüzeyin dikkatlice taranmasıyla uygulanmıştır. FHWA kılavuzu (Bruce ve ark., 2013) dikkate alınarak hava boşluklarının olumsuz etkisinden kaçınmak için yoğunluğu, en ağır numunenin yoğunluğunun %95'inden az olan numuneler elenmiştir ve geri kalan numuneler serbest basınç dayanımı deneyi için seçilmiştir. Serbest basınç deneyleri, 0.1 mm/s deformasyon oranı kullanılarak ASTM D2166 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyi

Deneyler, 28 ve 90 günlük kürlenme sürelerinden sonra yapılmıştır. Her karışım için 3 numune test edilmiş ve dayanım sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Ödometre halkası, Lorenzo ve Bergado (2004) tarafından önerildiği gibi dağılmayı önlemek amacıyla doğrudan ödometre deneyi için kullanılmıştır (Şekil 3.10. (c)). Üç eksenli test için yapılan sondajdan 67.5 mm çapında numuneler elde edilmiş ve laboratuvara götürülecek paketler açık havaya maruz bırakılmadan doğrudan kapatılmıştır. Numuneler laboratuvarında sabit sıcaklık ve nemde tutulup örselenmeden tam otomatik üç eksenli test cihazına aktarılmıştır. DKK üç eksenli test numunelerinin hazırlanması için iç çapı 50 mm ve yüksekliği 100 mm olan PVC numune tüpler kullanılmıştır. Tüm numuneler için başlangıç doygunluk derecesi %95'e ayarlanarak doygunluk aşamaları,

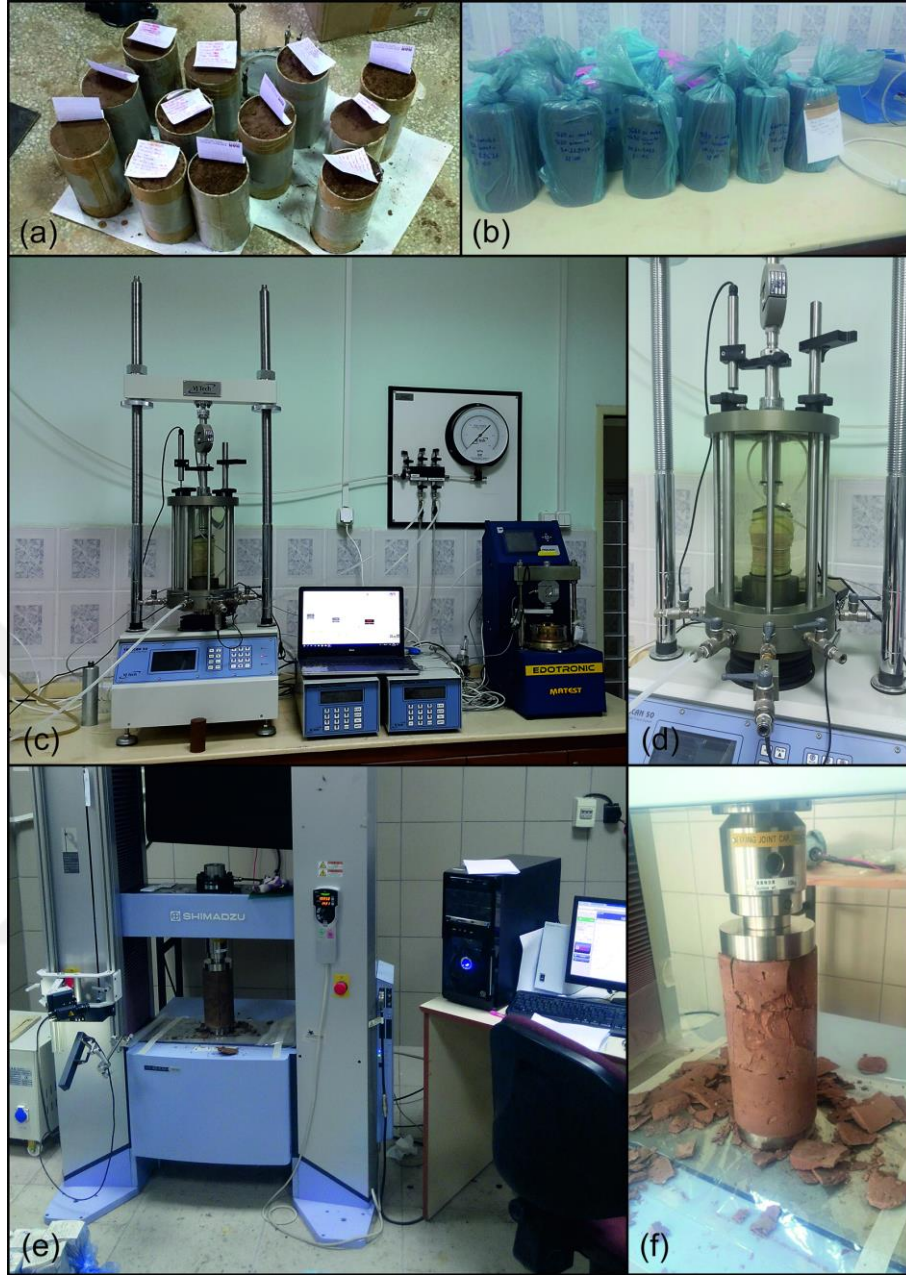
ASTM D 4767-88 standartlarına uygun olacak biçimde tam otomatik bir üç eksenli test cihazı ile yürütülmüştür (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli deneyi

Üç eksenli deneyler için numuneler, serbest basınç deney numunelerine uygulanan prosedür izlenerek hazırlanmıştır. Kürlleme işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler plastik kürlleme torbasından çıkarılıp test sırasında deplasman davranışı, yük hücresi ve merkezi veri toplama sistemine bağlı yer değiştirme transdüserleri kullanılarak otomatik olarak kaydedilmiştir.

Şekil 3.10.'da çalışmanın bu aşamasında gerçekleştirilen deneylerin bir aradaki görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3.10. (a) numune hazırlama prosedürünü, Şekil 3.10. (b) kürlleme için ayrılmış numuneleri, Şekil 3.10. (c) tam otomatik dijital üç eksenli deney düzeneğini ve tam otomatik dijital konsolidasyon deney setini, Şekil 3.10. (d) üç eksenli deneye tabi tutulmuş olan bir numunenin yakından görünümünü, Şekil 3.10. (e) serbest basınç dayanımı deney düzeneğini ve Şekil 3.10. (f) serbest basınç deneyine tabi tutulmuş olan bir numunenin yakından görünümünü göstermektedir.



Şekil 3.10. Çalışmanın ilk aşamasındaki numune hazırlama prosedürü ve deneyler

3.2.2. Elyaf takviyeli karışımlar için numune hazırlama metodolojisi ve yapılan deneyler

Uçucu kül ilaveli ve ilavesiz olmak üzere 1 MPa serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) sağlayan çimento esaslı iki farklı kontrol karışımı için oranlar araştırılmıştır. Uçucu kül içeren karışım için su içeriği (S_w) kuru zemin ağırlığınca %44.55, çimento içeriği (A_w) kuru zemin ağırlığınca %5 ve F sınıfı uçucu kül içeriği (FA_w) çimento ağırlığınca

ilave olarak %10 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül içermeyen karışım için su içeriği (S_w) kuru zemin ağırlığınca %40, çimento içeriği (A_w) kuru zemin ağırlığınca %5.3 olarak belirlenmiştir. Elyaf katkısının etkisini görebilmek için belirlenen kontrol karışımlarına 4 mm, 6 mm ve 12 mm boylarında (F_L) ve hacimce (F_C) %0.1, %0.4, %0.8 oranlarında tüm varyasyonlar için karbon elyaf ilavesi yapılarak 18 ayrı karışım oluşturulmuştur.

Karbon elyaf takviyeli karışımlar için numune hazırlama metodolojisi, elyaf takviyesiz karışımlar için uygulanan metodolojiye benzer şekilde uygulanmış olup karışımlara karbon elyaf takviyesi eklenirken iyi bir dağılım sağlanmasına dikkat edilmiştir.

Karışımlar taze haldeyken ASTM C1610/C1610M – 17 standartlarına uygun olarak segregasyon deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.11. (d)). 200 mm çapında 660 mm yüksekliğindeki alt, orta ve üst kısımdan oluşan 3 parçalı segregasyon kalıbı standartta belirtildiği gibi 2 dakika içerisinde taze karışım ile doldurulmuştur. Kalıp doldurulduktan sonra, karışım yüzeyini kalıbın üstü ile aynı hizaya getirmek için bir kesme çubuğu kullanılmıştır. Karışım 15 dakika boyunca kalıpta bekledikten sonra kalıbın üst kısmı sıkıca tutularak bağlantı sistemi çıkartılmıştır. Geri kalan işlemlerin belirtilen standarda uygun olacak şekilde 20 dk içinde tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Kalıbın alt ve üst kısmındaki karışım yatay bir dönme hareketi kullanılarak çıkarılmış ve ayrı bir kaba alınmıştır. Benzer şekilde orta kısımdaki karışım çıkarılmış ve kullanılmamak üzere atılmıştır. Kalıbın alt ve üst kısımdan alınan karışımların ayrıştırılmasıyla kalan iri agrega kütlelerine göre statik segregasyon yüzdesi belirlenmiştir.

Serbest basınç deneyine tabi tutulacak numuneleri oluşturan karışımlar 100 mm iç çapa ve 200 mm yüksekliğe sahip PVC numune kalıplarına aktarılmıştır. Elyaf takviyesiz numuneler ile aynı prosedür uygulanarak elyaf takviyeli numuneler için serbest basınç deneyleri, 0.1 mm/s deformasyon oranı kullanılarak ASTM D2166 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11. (h)). Deneyler, 28 günlük

kürleme sürelerinden sonra yapılmıştır. Her karışım için 3 numune test edilmiş ve dayanım sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

Üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulacak numuneleri oluşturan karışımlar 100x100x350 mm (Şekil 3.11. (a)) boyutlarındaki metal kalıplara aktarılmıştır. Serbest basınç deneyi için ayrılan numunelerde uygulandığı gibi örnekler 1 gün sonra kalıplardan çıkarılıp 25 C° ortam sıcaklığında %97 oranında nem içeriğini saklı tutabilmesi için plastik kürleme paketlerine ince bir silikon tabaka uygulanarak hava geçirmez olarak sarılmıştır (Şekil 3.11. (c)). Üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulacak DKK numuneleri için Sukontasukkul ve Jamsawang (2012) tarafından kullanılan ASTM C1609 standardının güncel versiyonu (ASTM C1609 / C1609M-19) uygulanmıştır. Deneyler, 28 günlük kürleme süresi sonrasında ilgili standarda uygun olarak 0.1 mm/s deformasyon oranı kullanılarak 300 mm mesnet aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11. (f)). Her karışım için 3 numune test edilmiş ve dayanım sonuçlarının ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.11. Elyaf katkılı karışımlar için numune hazırlama prosedürü ve deneyler

Şişme deneyine tabi tutulacak numuneleri oluşturan karışımlar 50 mm çaplı 20 mm yüksekliğindeki metal kalıplara (Şekil 3.11. (b)) aktarılmıştır. Örnekler 1 gün sonra kalıplardan çıkarılıp 25 C° ortam sıcaklığında %97 oranında nem içeriğini saklı tutabilmesi için plastik kütleme paketlerine ince bir silikon tabaka uygulanarak hava geçirmez olarak sarılmıştır. Şişme deneyi ASTM D4546–14 standardına uygun olacak şekilde yürütülmüştür. İlgili standartta yer alan metotlar arasından *B* metodu seçilip uygulanmıştır. Tam otomatik konsolidasyon cihazı (Şekil 3.11. (e)) ile deneyler yürütülmüş olup her karışım için 3 numune test edilmiş ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Üç eksenli testler, elyaf takviyesiz numunelere uygulanan prosedürdeki gibi ASTM D 4767-88 standartlarına uygun olarak yürütülmüştür (Şekil 3.11. (g)).

3.2.3. Goal Attainment optimizasyon yöntemi

DKK imalatında kullanılan malzemeler ile ilgili tasarım, performans, maliyet ve gereklilik arasında doğru dengenin kurulması önemlidir. Bu doktora tezi kapsamında optimizasyon problemlerinin çözümü için Gembicki (1974) tarafından geliştirilen Goal Attainment yöntemi (GAM) temel alınmıştır. Minimizasyon için GAM fonksiyonu MATLAB (2017)' de yer almaktadır ve çok amaçlı sınırlandırılmış optimizasyonların etkili kullanımını ve verimliliğini büyük ölçüde sağlamaktadır. Bu optimizasyon fonksiyonunda, problemler performans ölçümleri olarak tanımlanan hedeflerle karakterize edilir. Hedef sayısı aynı anda en aza indirilir. Daha sonra, ağırlık katsayıları ve hedef değerleri göz önünde bulundurularak problemi tek bir hedef önceliği haline getirmek için uygun bir uzlaşma çözüm seti belirtilir. “Arzu edilebilirlik” değeri olarak tanımlanan genel fayda ölçüsünün dikkate alınmasıyla uygulanan ağırlıklandırma katsayıları, hedeflerin etkilerini dengeleyip göreceli önemini ifade eder. GAM, bir dizi hedefle ilgili bir dizi tasarım amacının belirlenmesini içerir (Gembicki, 1974). Tasarım hedeflerinin göreceli başarı derecesi, bir ağırlıklandırma katsayısı vektörü tarafından kontrol edilir. Bu yöntemi kullanan tipik bir optimizasyon problemi şu şekilde formülize edilir:

$$\min_{f \in R, p \in U} f \quad (3.1)$$

$$\varphi_k(p) - w_k f \leq \varphi_k^*, k = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Denklem 3.1 ve 3.2’de U , p ’nin olası tasarım parametreleri için evrensel kümeyi, k , i ’ninci hedefi, f , hedef fonksiyonunu, φ_k , hedefi, φ_k^* , tasarım hedefini ve w_k , ağırlık katsayısını ifade etmektedir. Bu yöntem, standart bir optimizasyon prosedürü ve doğrusal olmayan programlama kabiliyetinin avantajı ile mühendislik tasarım problemlerinin uygun bir sezgisel yorumunu sağlamaktadır (Liu ve ark. 2003).

Tasarım hedefleri (φ_k^*) proje uygulayıcısı tarafından seçilir ve tasarımın amacı eşitsizlik kümesini aynı anda karşılayan (p) parametresini belirlemektir. $\varphi_k(p)$, basınç dayanımı gibi tepkilerin işlevlerini temsil eder. Doğrusal olmayan programlama kullanılarak, fiziksel kısıtlamalara dayanan ek eşitsizlikler de probleme dahil edilebilir ve interaktif bir süreçte sayısal arama algoritmaları kullanılarak eşitsizlik kümesinde çözüm elde edilebilir. Bu ekleme, proje uygulayıcısının probleme yönelik olası çözümleri keşfetmesi için tasarımını yapılandırmasına olanak tanır. Buna göre, doğrusal olmayan programlama, uygulayıcıya çelişen tasarım gereksinimleri hakkında bilgiler sunar ve tasarımcının belirli bir problem için tasarım gereksinimlerinin tercih edilmesi konusundaki durumla ilgili karar vermesini sağlar.

GAM’ın temel fonksiyonu MATLAB (2017)’de halihazırda bulunmaktadır. Ancak, detaylı optimizasyon problemlerinde, çoklu arzu edilebilirlik işlevleri, tasarım kısıtlamaları ve eşitsizlikler gibi genel eklentilerin çözüme entegre edilmesi, literatürde ilk defa bu doktora tezi kapsamındaki çalışmalarla gerçekleştirilmiştir. MATLAB (2017)’de GAM için sağlanan ana işlevler arasında çoklu arzu edilebilirlik bulunmamaktadır. Bununla birlikte, tasarım sorunlarının çoğu, belirli bir optimizasyon probleminde çoklu objektif fonksiyonların ele alınmasını gerektirir. Bu işlevlerin birleştirilmesi önemli ölçüde zaman ve derin bilgi gerektirir.

Bu doktora tezi kapsamında geliştirilen kodlama tasarımcının optimizasyon süreci üzerinde daha fazla kontrol sahibi olmasını sağlayan bir sisteme sahiptir. GAM’ın doğrusal olmayan çok amaçlı programlama yeteneğine ek olarak tüm tasarım için çoklu değişkenli formatta çalışan tek bir arzu edilebilirlik değerinin tanımı ve arzu edilebilirlik aralığı grafikleri oluşturma kabiliyeti GAM optimizasyon yöntemine ilave edilmiştir ve böylece mevcut optimizasyon metodu daha da geliştirilmiştir. Bu metodoloji uygulanırken her bir çıktı için arzu edilebilirlik fonksiyonlarının (f_k)

tanımlandığı Tepki Yüzey Metodu (Response Surface Method, RSM) referans alınmıştır. Bu yöntemde her bir çıktı için ayrı ayrı arzu edilebilirlik değerleri (d_k) elde edilir ve tüm problem için tekil kompozit çıktı olarak tanımlanan "arzu edilebilirlik" (D) değeri, her bir çıktı için ayrı ayrı elde edilen arzu edilebilirlik değerlerinin geometrik ortalaması alınarak Denklem 3.3'teki gibi elde edilir (örn. Pradeep, 2008, Myers ve ark., 2009, Algin, 2016).

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n)^{1/k} \quad (3.3)$$

Arzu edilebilirlik (D) değeri $0 \leq D \leq 1$ aralığında değişmektedir. Bu değer "1" olması istenen tüm hedeflere tamamen ulaşıldığını gösterirken "0" olması istenilen durumun dışına çıkıldığını belirtir.

Bu doktora tezi kapsamında geliştirilen kodlama (Ekmen ve ark., 2020), MATLAB (2017)'de mevcut olan hedefe ulaşma fonksiyonunu ve doğrusal olmayan programlamanın kombinasyonunu kapsamaktadır. GAM tabanlı bu optimizasyon yaklaşımı, deneysel verileri temsil eden kullanıcı tanımlı modeli optimizasyon probleminin çözümüne dahil etme esnekliği de sağlamaktadır. Bu nedenle, RSM'deki bazı sistemler için uyumsuz olabilecek polinom modelinin oluşturduğu dezavantajlardan da kurtulmuş olmaktadır. Bu anlamda RSM optimizasyon çözümlemesinden daha iyi bir yaklaşım sunulmuştur. Bu tez kapsamında geliştirilen GAM tabanlı optimizasyon yaklaşımı, aynı zamanda tasarımcının sayısal arama algoritmasının ilerlemesi hakkında bilgi sağlayan çeşitli grafiksel ekranlar elde etmesini sağlamak ve optimize edilmiş çözümleri etkileyen tasarım gereksinimlerini ve parametrelerini göstermektedir. GAM tabanlı optimizasyon yaklaşımı sayesinde hedefe ulaşmaya dayalı GAM optimizasyonunda çok değişkenli arzu edilebilirlik fonksiyonu, RSM optimizasyonunda olduğu gibi kullanılmıştır.

3.2.4. Arazi çalışması

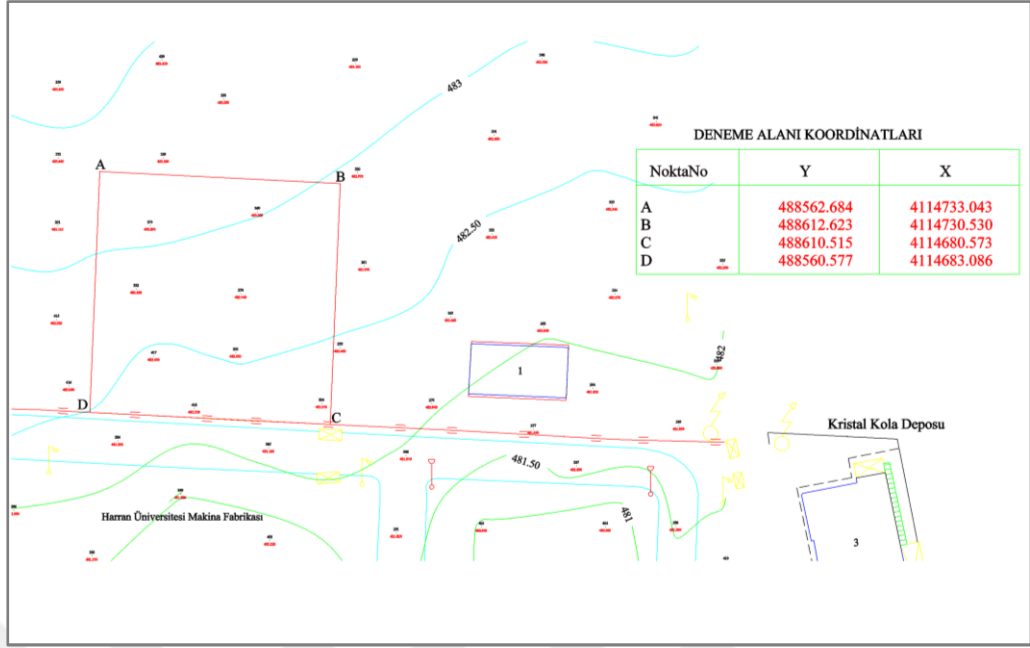
Laboratuvar deneylerinin tamamlanmasının ardından yürütülen optimizasyon çalışması ile arazi şartlarında imal edilecek DKK'ların malzeme içeriği ve oranları belirlenmiştir. Bu kapsamda uygun bir arazi belirlemek için araştırmalar yapılmış ve

Harran Üniversitesi Şair Nabi kampüsünde uygun bir alan belirlenmiştir. Harran Üniversitesi Rektörlüğü ile yapılan yazışmalar sonucunda ilgili alanda çalışma izni alınmıştır. Şekil 3.12.'de çalışılan alanın kampüs planı içerisindeki konumu gösterilmiştir.



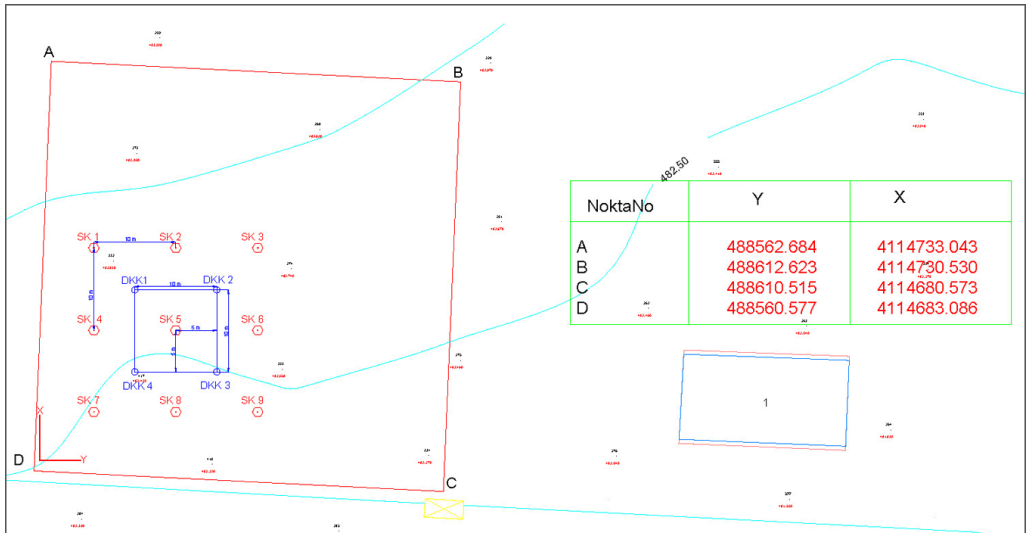
Şekil 3.12. DKK uygulamalarının yapıldığı sahanın kampüs planı içerisindeki konumu

Arazi modellemesinin detaylı bir şekilde yapılabilmesi için arazi kotları ve koordinatlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda gerekli bilgiler Harran Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığından temin edilmiş ve sahada GPS cihazı ile doğrulama yapılmıştır. Şekil 3.13.'te ABCD dikdörtgeni ile belirtilen çalışılan alan, arazi kotları ve koordinatlar gösterilmiştir.



Şekil 3.13. DKK uygulamalarının yapıldığı sahanın arazi kotları ve koordinatları

Saha araştırmaları yapılarak arazide standart penetrasyon testlerinin (SPT) ve DKK'ların yapılacağı noktalar belirlenmiştir. Şekil 3.14.'te SPT ve DKK noktalarının arazi planı içerisindeki genel konumu gösterilmiştir.



Şekil 3.14. SPT ve DKK noktalarının arazi planı içerisindeki genel konumu



Şekil 3.16. SPT ve DKK noktalarının genel konumunu gösteren uydu görüntüsü

Şekil 3.17.'de ilgili arazide belirlenen SPT ve DKK noktalarının yakından detaylı uydu görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.17. SPT ve DKK noktalarının yakından detaylı uydu görüntüsü

GPS cihazı ile koordinatların belirlenmesinin ardından ilgili arazide geliştirilen yazılımın gereksinimlerine göre üç boyutlu modellemeye uygun olacak bir biçimde 9 farklı sondaj noktasında standart penetrasyon testi (SPT) yapılmıştır. Şekil 3.18.'de yapılan sondaj çalışmasından görüntüler sunulmuştur.



Şekil 3.18. Sondaj çalışması

Belirlenen 9 noktada yapılan sondajlarda her 1.5 metrede bir standart penetrasyon testi (SPT) yapılmıştır. Kritik görülen noktalarda ise laboratuvara gönderilmek üzere çok sayıda örselenmemiş zemin numunesi alınmıştır. Şekil 3.19.'da bu çalışma kapsamında Harran Üniversitesi Şair Nabi kampüsünde gerçekleştirilen standart penetrasyon testinden (SPT) görüntüler sunulmuştur.



Şekil 3.19. Standart penetrasyon testi (SPT)

Şekil 3.20.'de laboratuvara götürülmek üzere sondaj noktalarından alınan örselenmemiş numunelerin görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 3.20. Sondaj noktalarından alınan örselenmemiş numuneler

3.2.5. DKK üretimi

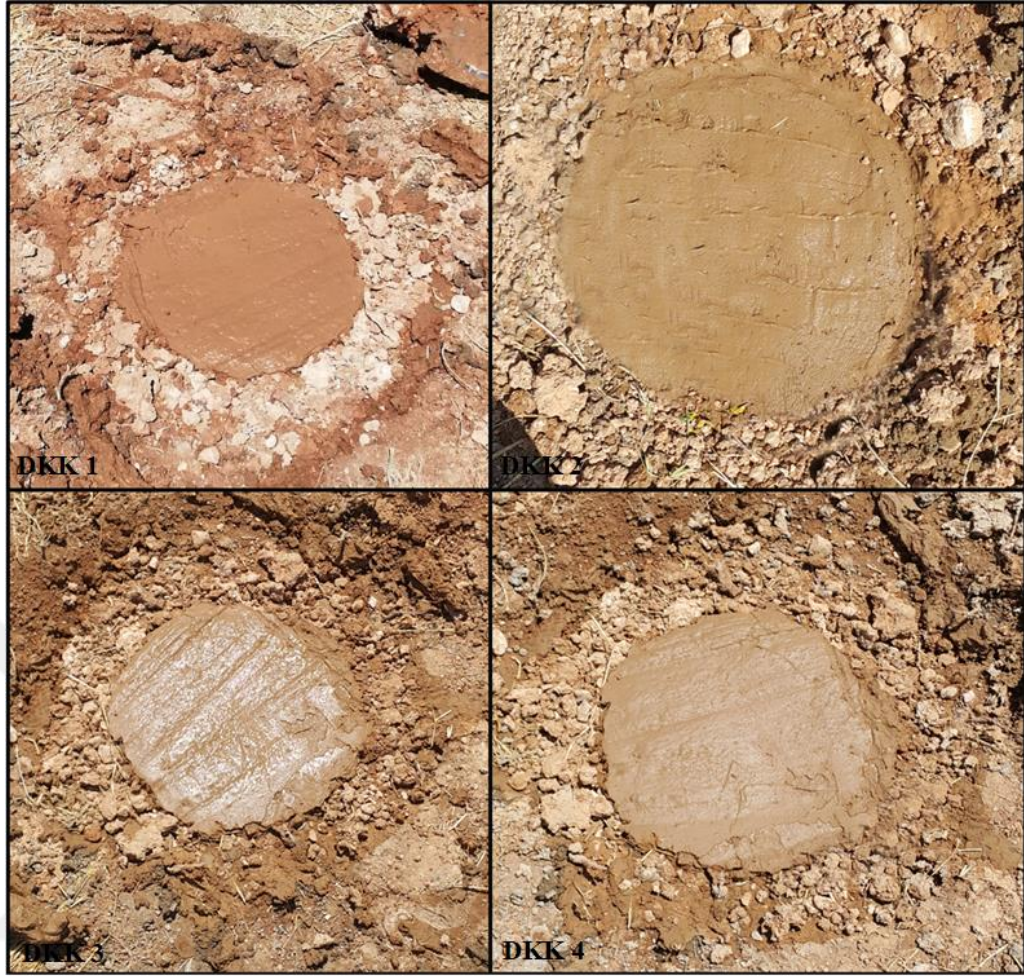
Arazi testlerinin tamamlanmasından sonra, optimum karışım oranlarında çapı 30 cm ve boyu 5 metre olan 4 adet DKK imal edilmiştir. Şekil 3.21.'de gösterilen biçimde bu çalışma kapsamında arazi şartlarında DKK üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.21. Arazi şartlarında DKK üretimi

DKK üretimine başlanmadan önce üretilecek kolonların SPT noktalarına göre konumları GPS cihazı kontrol edilmiştir. Yapılan sondaj noktalarında belirlenen yer altı suyu seviyeleri (YASS) gözetilerek üretim esnasında hangi derinlikte YASS ile karşılaşılacağı öngörülmüştür.

Şekil 3.22.' de üretilen DKK'ların henüz priz aşaması tamamlanmamış görüntüsü sunulmuştur. Üretilen DKK'lar dışarıdan gelebilecek etkilere karşı Şekil 3.23.'teki gibi korumaya alınmıştır.



Şekil 3.22. Henüz priz aşaması tamamlanmamış DKK'lar



Şekil 3.23. DKK'ların korumaya alınması

Çizelge 3.5'te üretilen derin karıştırma kolonlarının özellikleri verilmiştir. Laboratuvar şartlarında etkileri araştırılan uçucu kül ve karbon elyafın arazi şartlarındaki etkisinin de görülmesi için DKK harç içeriklerinde uçucu kül ve karbon elyaf yer almıştır. DKK 1'in üretildiği bölgede yer altı suyu seviyesi (YASS) 3.85 metredir, bu yüzden bu kolonun 1.15 metrelik kısmı tamamen su altında üretilmiştir. 2,3 ve 4 numaraları diğer kolonlar için su altında üretilen kısım sırasıyla 1.20 metre, 1.40 metre ve 1.40 metredir. Su altında kalan kısımda kullanılacak harç ile su altında kalmayan kısımdaki harcın aynı dayanım değerini sağlaması için ihtiyaç duyduğu su ve çimento oranları farklıdır. Bu yüzden her noktada aynı özelliği gösteren DKK'lar üretmek amacıyla optimizasyon fonksiyonu dikkate alınarak su altında kalan ve kalmayan kısımlar için ayrı karışım oranlarının kullanıldığı dinamik karışım yöntemi ile üretim yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.5. Üretilen derin karıştırma kolonlarının özellikleri

DKK No	Çap (cm)	Boy (m)	Harç içeriği	YASS (m)	Üretim Şekli
1	30	5	Sadece Çimento	3.85	Tek karışım oranı kullanılarak
2	30	5	Çimento ve Karbon Elyaf	3.8	Dinamik karışım oranı kullanılarak
3	30	5	Uçucu kül, Çimento ve Karbon Elyaf	3.6	Dinamik karışım oranı kullanılarak
4	30	5	Sadece Çimento	3.6	Dinamik karışım oranı kullanılarak

Bu kapsamda optimizasyon fonksiyonuna göre hazırlanan dinamik karışım oranının etkisini araştırmak amacıyla DKK 2,3 ve 4 dinamik karışım oranı ile üretilirken DKK 1 diğer kolonlardan farklı olarak tek karışım oranı kullanılarak üretilmiştir. DKK 1 harcının dinamik olmayan tek karışım oranı belirlenirken su altında kalan ve kalmayan kısımdaki parametrelerin ortalaması alınmıştır. Arazi şartlarında üretilen DKK'lar için optimizasyon fonksiyonuna göre dinamik karışım oranı kullanmanın etkisi bu çalışmanın "Araştırma Bulguları ve Tartışma" kısmında değerlendirilmiştir. Ayrıca DKK harçlarına katılan uçucu kül ve karbon elyaf takviyesinin etkileri de aynı kısımda tartışılmıştır.

Kolonlar üretildikten sonra 28 gün boyunca arazi şartlarında küremeye bırakılmıştır. Şekil 3.24.'te kolonların küreme sonrası görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 3.24. DKK'ların küreme sonrası görüntüleri

3.2.6. Kolon yükleme testleri

28 günlük küreme aşaması tamamlandıktan sonra tüm DKK'lara ASTM D 1143 standartlarına uygun olarak yükleme testi yapılmıştır. Uygulanan yüke ve zamana bağlı olarak kolonlarda oluşan deformasyonlar kaydedilmiştir. Kolonlara yük aktarımı Şekil 3.25.'te gösterilen 30 ton kapasiteli vinçler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.25. Kolonlara yük aktarımında kullanılan vinçler

Vinçlerden gelen yükü kolonlara düzgün bir yüzeyde aktarmak için kullanılan metal plaka Şekil 3.26.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Kolonlara yük aktarımında kullanılan metal plaka

Yükleme testi esnasında oluşan deformasyonlar Şekil 3.27.'de gösterilen 3 ayrı deformasyon saati ile ölçülen verilerin ortalamasının alınması ile elde edilmiştir.



Şekil 3.27. Yüklemeye testinde kullanılan deformasyon saatleri

Kolonlar üzerine aktarılan basınç Şekil 3.28.'de gösterilen cihaz ile kontrol edilmiştir.



Şekil 3.28. Yüklemeye testinde kullanılan basınç göstergesi

Şekil 3.29.'da arazi şartlarında üretilen DKK üzerine yük aktarma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.29. DKK üzerine yük aktarma işlemi

Yükleme testi esnasında zaman, deformasyon ve kolonlara etkitilen yük değerleri bilgisayarda işlenmek üzere önceden yükleme testi için hazırlanmış bir forma kaydedilmiştir. Şekil 3.30.'da yapılan yükleme testinde verilerin forma aktarılması işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Yüklemeye testinde verilerin forma aktarılması

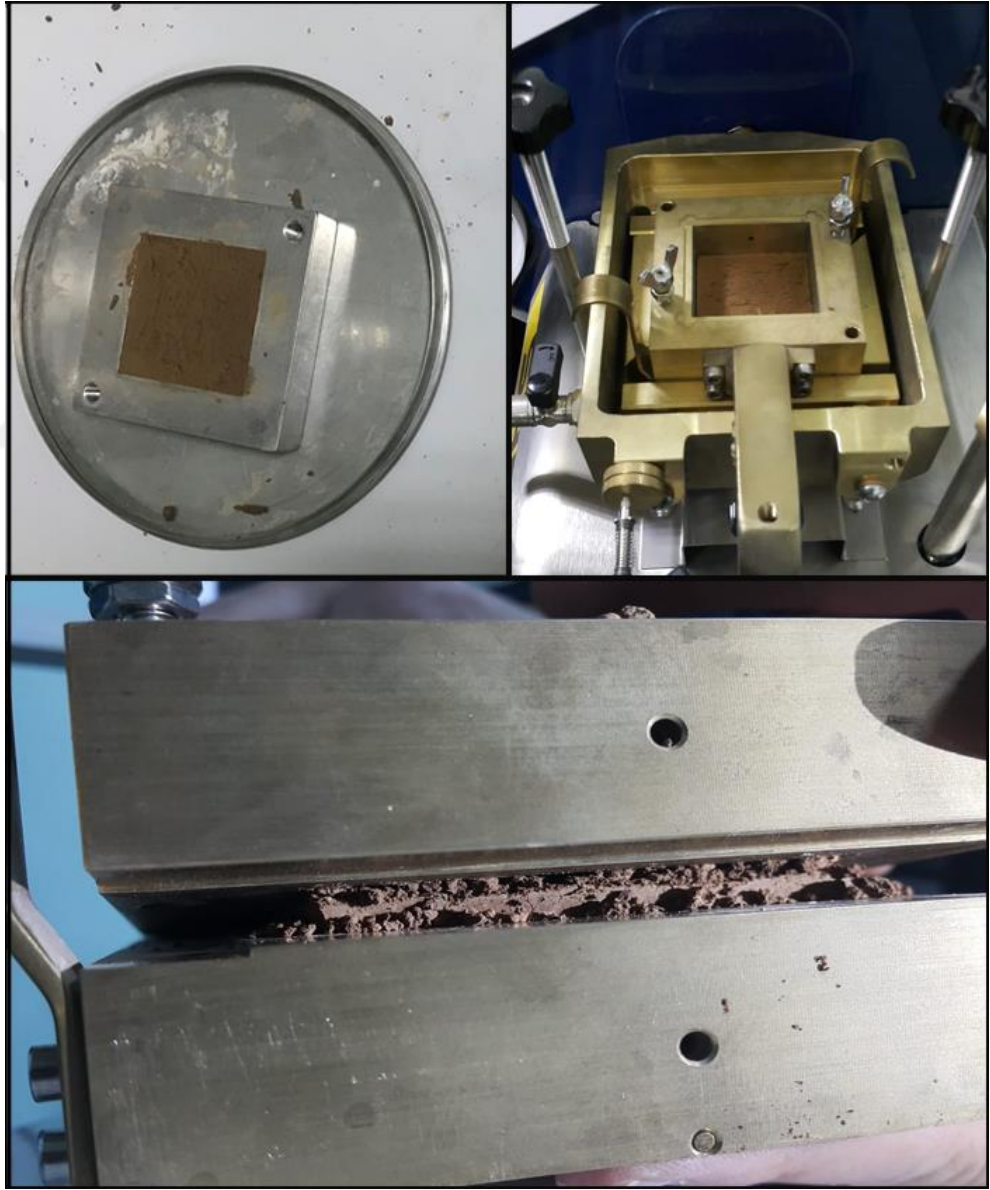
Yüklemeye testi sonrasında DKK'lar Şekil 3.31. de gösterilen biçimde deforme olmuştur. Yüklemeye testi sonuçları bu çalışmanın "Araştırma Bulguları ve Tartışma" kısmında değerlendirilmiştir.



Şekil 3.31. DKK'ların deformasyon biçimi

3.2.7. DKK-zemin arayüz sürtünme katsayısının hesaplanması

Zemin ve DKK'ların arazi şartlarına uygun bir şekilde modellenebilmesi için DKK-zemin arası arayüz sürtünme katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple arayüz sürtünme katsayısının belirlenmesi için ASTM D3080/D3080M-11 standardına uygun olarak 60 mm x 60 mm boyutlarındaki DKK ve zemin örnekleri üzerinde direkt kesme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.32.'de arayüz sürtünme katsayısını belirlemek için yapılan deneyin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Arayüz sürtünme katsayısını belirlemek için yapılan deneyin aşamaları

Kesme kutusunun alt kısmına Şekil 3.32.'de gösterilen metal kalıp kullanılarak üretilen 28 gün kürlenmiş DKK numunesi, üst kısmına ise arazideki zemin numunesi konularak Şekil 3.33.'te gösterilen yarı otomatik dijital kesme kutusu cihazında deney yürütülmüştür.



Şekil 3.33. Yarı otomatik dijital direkt kesme kutusu test cihazı

Yarı otomatik dijital direkt kesme kutusu test cihazından alınan normal ve kayma gerilme değerlerine göre arayüz sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Elde edilen katsayının hesap detayları “Araştırma Bulguları ve Tartışma” kısmında verilmiştir.

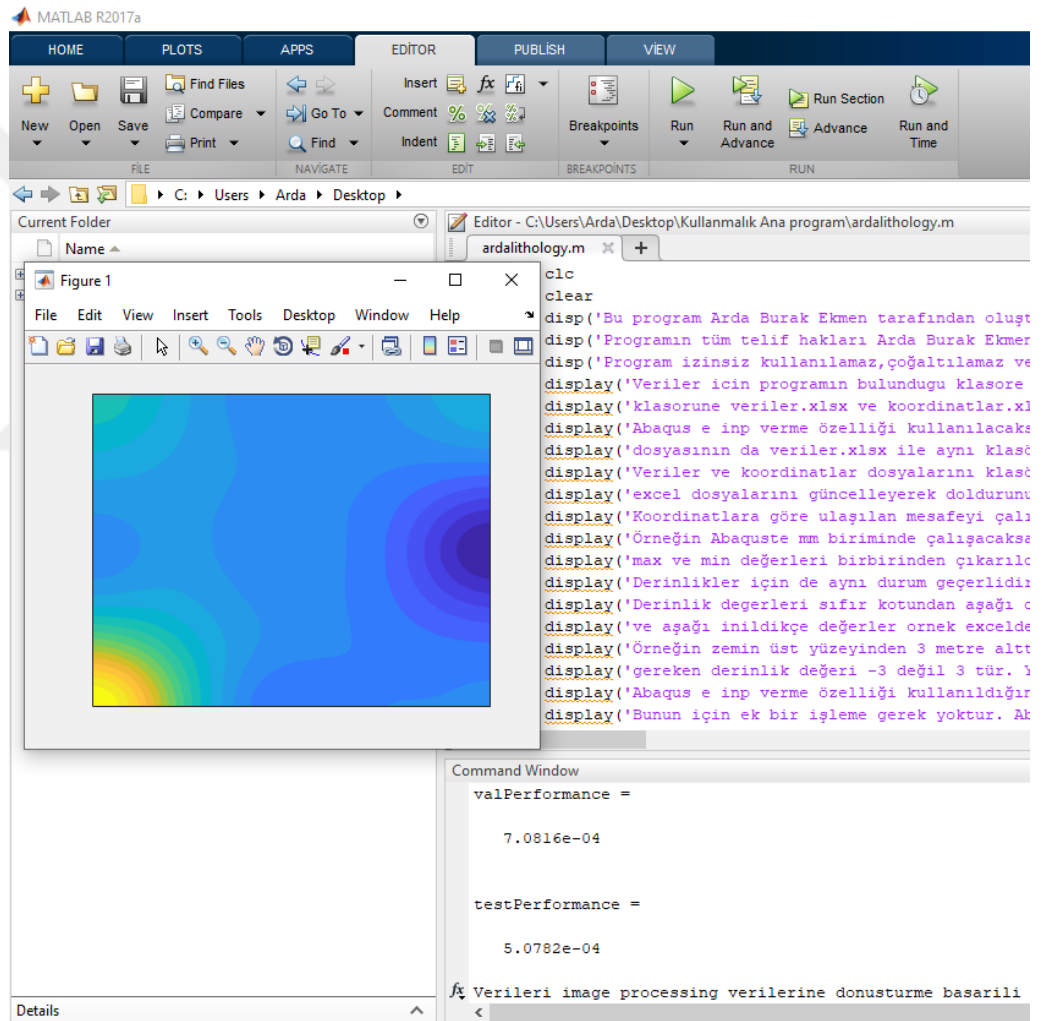
3.2.8. Üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar modellemesi ve analizi

İmal edilen derin karıştırma kolonları üzerinde yapılan yükleme testlerini gerçek duruma uygun bir şekilde üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesiyle simüle edebilmek için görüntü işleme tekniğinden yararlanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım zeminin hem litolojik hem de topolojik değişimlerinin arazi testleri ile uyumlu olacak şekilde modellenmesini sağlamıştır. Bu tezde geliştirilen yazılım sayesinde literatürde ilk kez üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilmiştir. İlgili yazılımın geliştirilme süreci ve sahip olduğu özellikler aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

Arazi test sonuçları kullanılarak zeminlerin üç boyutlu litolojik modellemesinin yapılabilmesi için öncelikle bir akış diyagramı oluşturulmuştur. Oluşturulan akış diyagramına göre kodlanması düşünülen algoritmanın hangi yazılım diliyle en efektif şekilde oluşturulabileceği araştırılmış ve MATLAB (2017) programlama dili seçilmiştir. Uygun program seçiminin ardından kodlamanın altyapısını oluşturan algoritma hazırlanmıştır. Hazırlanan algoritmaya göre değişken tanımları düzenlenmiş ve sayısal verileri görüntülere çevirmek için hangi fonksiyonların kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak zeminin litolojik değişimini modele yansıtılabilmek için görüntü işleme yönteminde kullanılmak üzere elde edilmesi gereken gri skaladaki resimleri, sayısal arazi verilerini kullanarak üretecek bölüm kodlanmıştır.

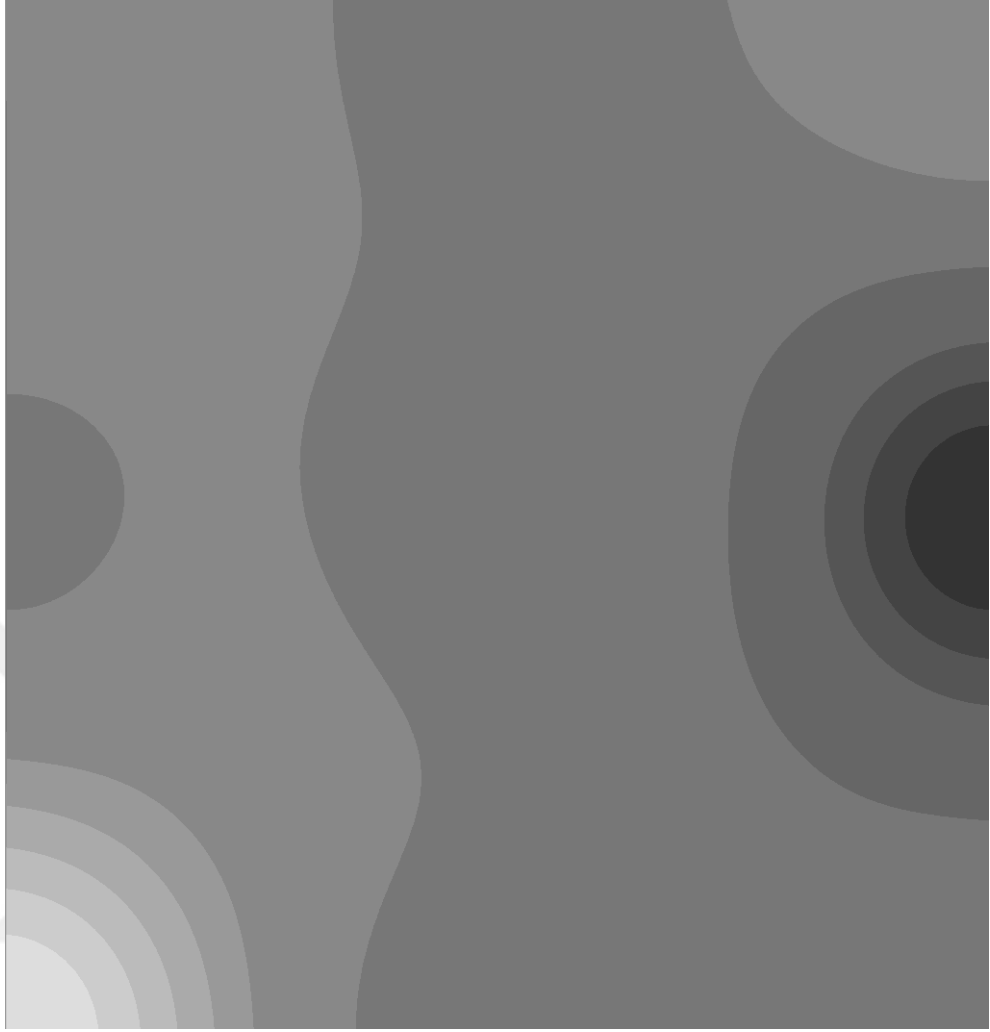
Arazi verilerinin ve ilgili koordinatların programa kolay entegre edilebilmesi ve her problemde değişebilecek verileri sorunsuz bir şekilde aktarabilmek amacıyla programa Excel tablosundan veri okuyabilme özelliği kazandırılmıştır. Modelleme yapılırken kullanılacak katmanlar için elde edilecek görüntülerin derinliğe bağlı olarak ne sıklıkta veya ne sayıda olacağı program tarafından kullanıcıya sorulacak şekilde ayarlanmıştır. Arazi testlerinden elde edilen verilerin görüntülere dönüştürülmesi için bu verileri çeşitli işlem aşamalarından geçirmek gerekmektedir. Bu kodlamada arazi test verilerinden yararlanarak hem düşeydeki hem de her iki yatay yöndeki değişimi öngörmek için veri tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Hazırlanan yazılıma üç boyutta

değişen verileri yüksek korelasyon katsayıları ile elde etmek için birden çok yöntem kullanarak fonksiyon oluşturma özelliği kazandırılmıştır. Yazılım kullanıcısına tahmin algoritması seçme seçeneği sunulmuştur. Böylece kullanıcının hangi problem için hangi metot ile uygun korelasyonlar elde edebileceğini görmesi sağlanmıştır. Zemini üç boyutlu modelleyebilmek için kullanılacak yazılımların ihtiyaç duyduğu son görüntü seti gri skaladadır. Geliştirilen yazılım arazi testlerinden elde edilen verileri kullanarak üç boyutlu model oluşturmak için ilk aşamada Şekil 3.34.'te gösterilen türde renkli görüntüler üretir.



Şekil 3.34. Yazılım tarafından üretilen renkli görüntü

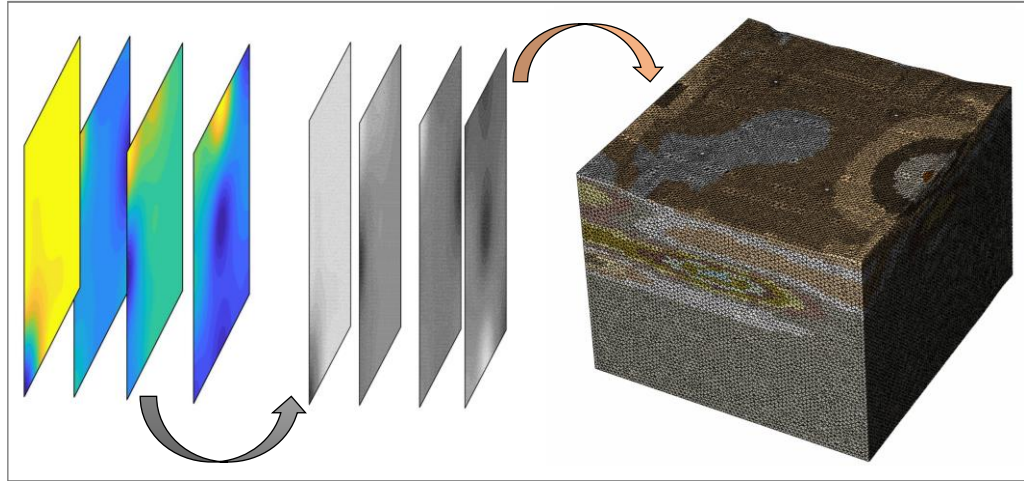
Bu renkli görüntüler yazılım tarafından işlenerek Şekil 3.35.'te gösterilen gri skala resim formatına dönüştürülür.



Şekil 3.35. Yazılım tarafından gri skalaya dönüştürülmüş görüntü

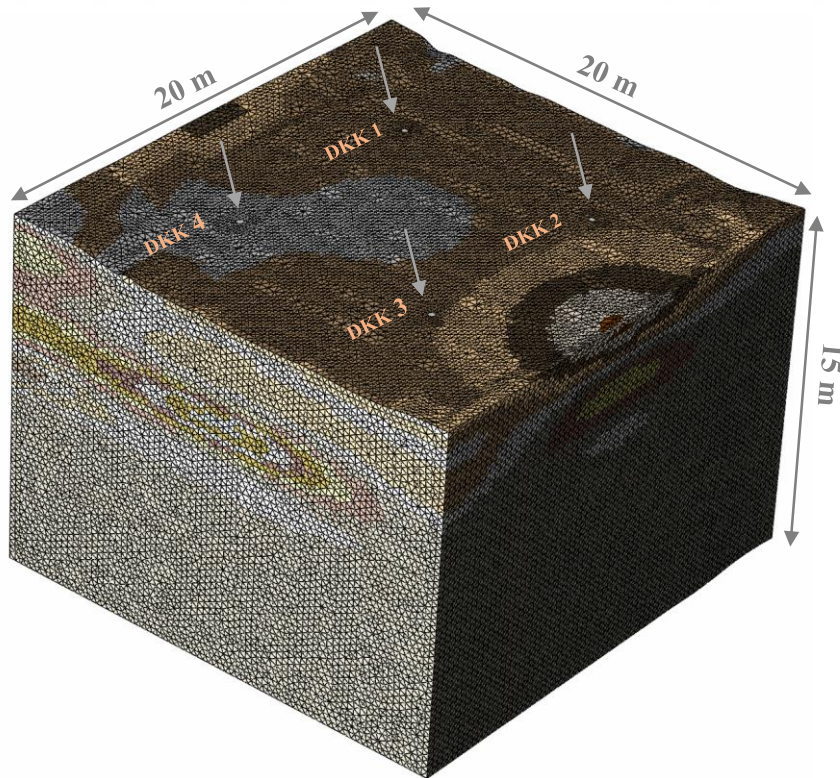
Bu tezin temelini oluşturan görüntü katmanları üreten kodlamaya, oluşturulacak görüntülerin boyutunu, renk düzenini ve görüntü kalitesini ayarlama gibi ek özellikler kazandırılmıştır. Böylece yazılım kullanıcısına daha geniş bir yetkilendirme sağlanmıştır. Ayrıca eğimli araziler için de model yapmayı sağlayacak bölge yok etme özelliği geliştirilmiş ve böylece tüm geometrilerdeki arazi tipleri bu yazılım ile modellenebilecek duruma gelmiştir.

Şekil 3.36.'da sayısal arazi verilerinden elde edilmiş görüntülerin yazılım aracılığıyla üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeline dönüştürülmesi gösterilmiştir.



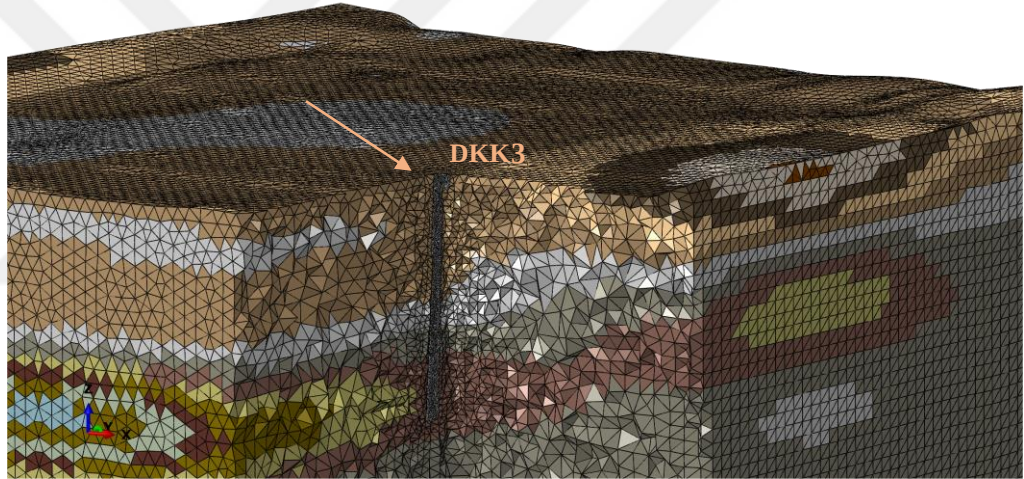
Şekil 3.36. Sayısal arazi verilerinden elde edilmiş görüntülerin 3B modele dönüştürülmesi

Bu tez çalışması kapsamında üzerinde çalışılan arazinin modellenmesi yapılırken üç boyutlu hacim oluşturmak için her 50 mm’de bir resim üretilerek oldukça hassas çalışılmıştır. Model boyutları arazi test koordinatları ve verileri dikkate alınarak x,y ve z yönlerinde sırasıyla 20x20x15 metre olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.37.’de geliştirilen yazılım aracılığıyla oluşturulan 3B litolojik sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir.



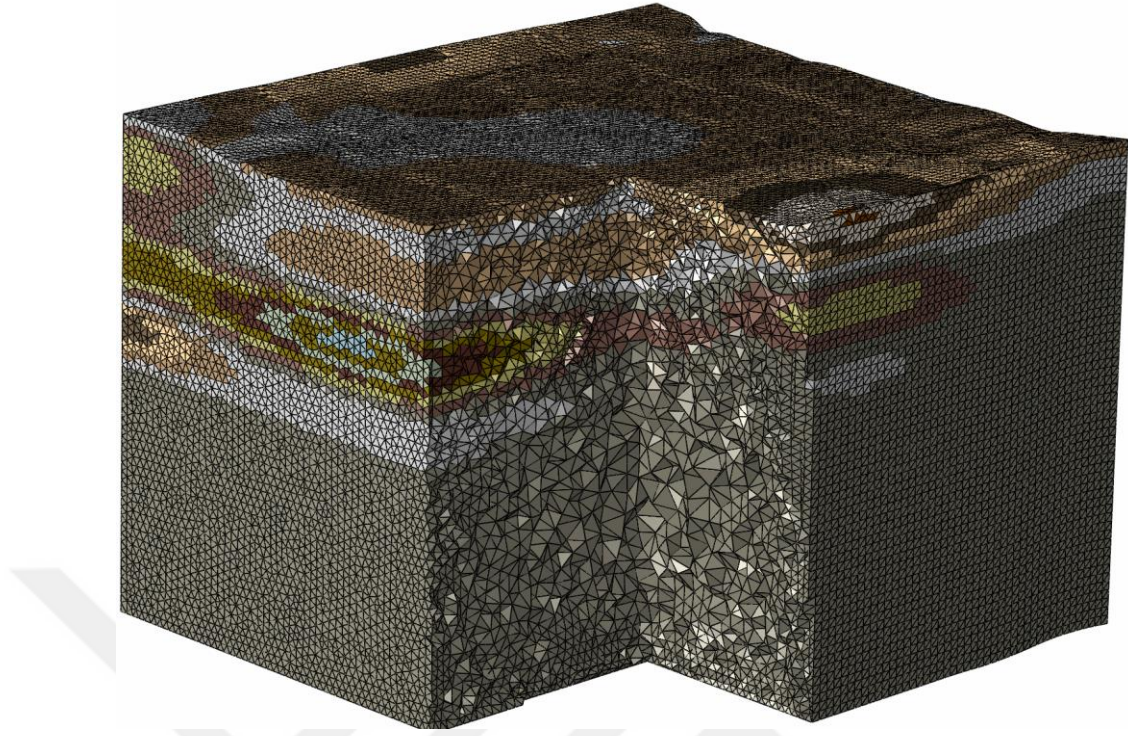
Şekil 3.37. Üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeli

Şekil 3.37.'de görüldüğü gibi oluşturulan modele üç boyuttaki zemin değişimi yansıtılmış olup zeminin üst yüzeyi arazi kotu verilerinden yararlanarak gerçek arazi şartlarındaki gibi eğimli olarak tasarlanmıştır. Böylece arazi modeli hem geometrik olarak hem de malzeme açısından gerçek durumu oldukça iyi bir biçimde yansıtmıştır. Model boyutları, analizin sınır şartlarından etkilenmeyeceği şekilde yapılan yakınsama çalışması ile üç boyutlu sonlu elemanlar analizine uygun olarak belirlenmiştir. Modeli sonlu elemanlar matrislerine bölmek için karmaşık geometrilere uyum sağlayabilen dört üçgen yüzlü hacimsel elemanlar kullanılmıştır. Çapı 30 cm ve boyu 5 metre olan 4 adet DKK, modele arazideki konumlarına uygun olarak dahil edilmiştir. Şekil 3.38.'de gösterilen modelden alınan kesit görüntüsünde DKK 3'ün boykesiti de görülebilmektedir.



Şekil 3.38. Üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeli DKK kesit görüntüsü

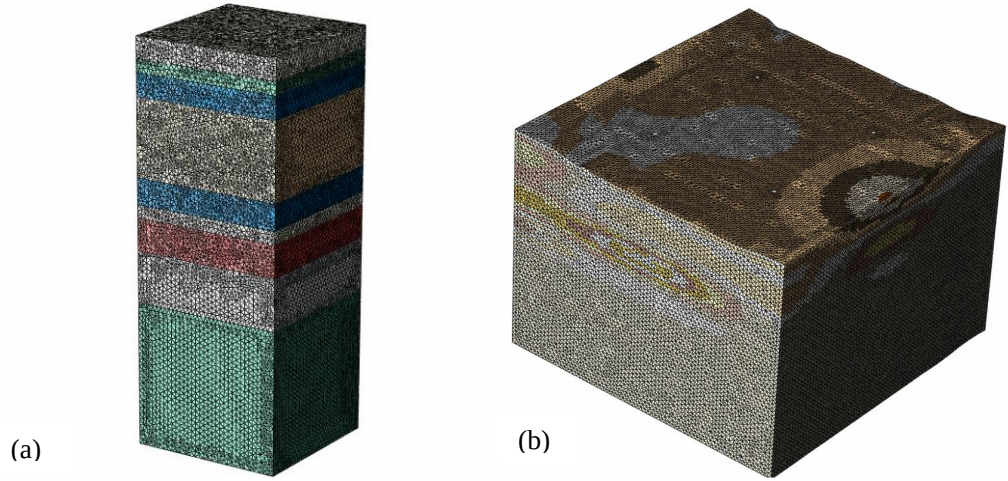
DKK'lar arasında bulunan 10 metre mesafe kolonların birbirlerini etkilememesi için gayet yeterlidir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde yükleme adımları arazi şartlarında gerçekleştirilen yükleme testlerine paralel olarak tanımlanmıştır. Kolonlara tanımlanan malzeme özellikleri laboratuvar çalışmasından elde edilen verilere göre belirlenmiştir. Zeminin malzeme özellikleri tanımlanırken standart penetrasyon testi (SPT) verileri ve laboratuvar deneyleri dikkate alınmıştır. Bu bağlamda sonlu elemanlar analizinde zemin ve DKK'lar için Mohr-Coulomb malzeme modeli seçilmiştir. Şekil 3.39.'da zeminin iç yapısındaki değişimi göstermek amacıyla dikdörtgen prizma şeklinde bir bölümü kesilmiş modelin görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 3.39. Dikdörtgen prizma şeklinde bir bölümü kesilmiş model

Kolonlar ve zemin arasındaki arayüz sürtünme katsayısını tanımlamak için “Penalty” yöntemi kullanılmıştır. Tüm parametreler modele tanıtıldıktan sonra üç boyutlu sonlu elemanlar modeli analiz için ABAQUS (2014) programına aktarılmıştır. Analiz sonuçlarına “Araştırma Bulguları ve Tartışma” kısmında değinilmiştir.

Kodlanan yazılım arazi testlerinden elde edilen verilerin derinliğe bağlı değişimini görüntü işleme tekniği için anlamlı görüntülere dönüştürürken sadece arazide yapılan her bir testin koordinatlarına ve derinliğe bağlı sonuç verilerine ihtiyaç duyacak şekilde planlandığından, belirtilen özellikleri taşıyan tüm arazi testlerinde (SPT, CPT vs.) kullanılabilecek genel bir yazılım olma özelliği taşımaktadır. Böylece geliştirilen yazılımın algoritması sadece bu tez çalışmasındaki problemleri çözmeye yönelik değil, derinliğe bağlı olarak uygun sayısal verilerin sağlandığı tüm arazi testlerinde kullanılabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Şekil 3.40.’ta standart üç boyutlu zemin modeli ile bu tezde geliştirilen modelleme tekniği ile üretilmiş hassas litolojik gerçeğe uygun üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Modellerin karşılaştırılması; (a) standart model, (b) bu çalışmadaki litolojik model

Şekil 3.40.'ta görüldüğü gibi bu tez çalışması kapsamında yazılan kodlama ile oluşturulan litolojik model standart üç boyutlu modellere göre hem geometrik hem de malzeme değişkenliği açısından çok daha kapsamlıdır. Arazi test verilerinin bulunduğu her projeye uygulanabilecek bu kapsamlı modelleme tekniği ile gerçek zemin ortamına oldukça yakın simülasyonlar yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Böylece, zemindeki belirsizlikler nedeniyle geoteknik mühendisliğinde yüksek güvenlik katsayısı kullanma problemine ışık tutulmuştur. Bu tezde geliştirilen yazılım sayesinde literatürde ilk defa üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilmiştir.

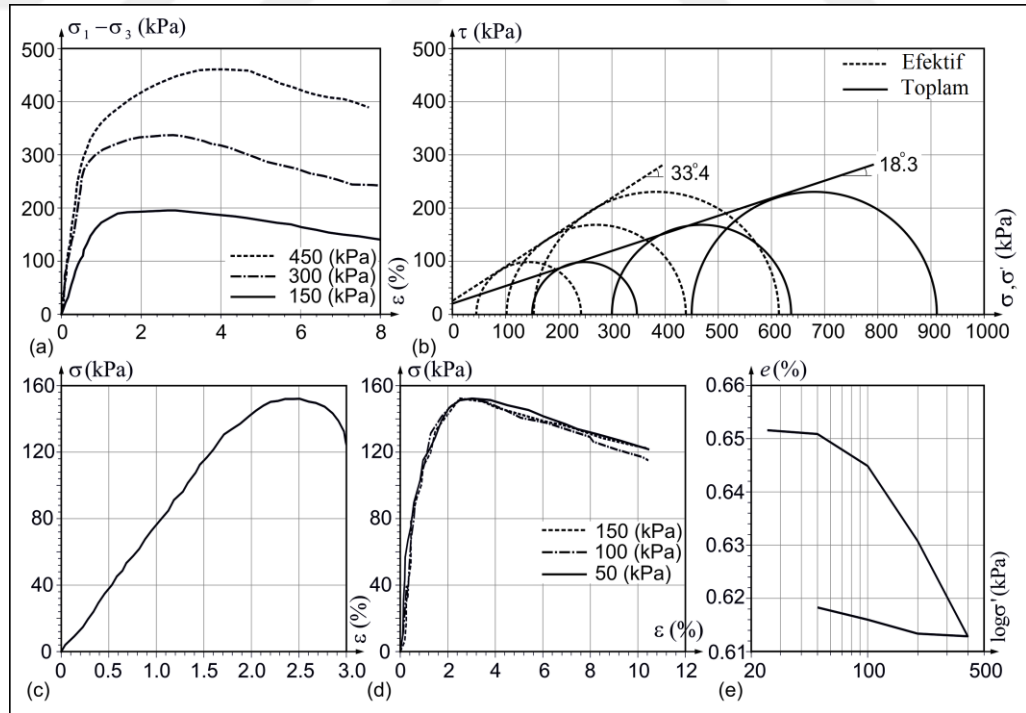
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu kısmında “Materyal ve Yöntem” bölümünde değinilen tüm araştırma konularıyla ilgili sonuçlar yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgiler kapsamında tartışılmıştır.

4.1. Doğal Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

Doğal zemin üzerinde konsolidasyonlu izotropik drenajsız (CIU) olarak gerçekleştirilen üç eksenli testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1. (a, b) 'de gösterilmiştir. Testler, ASTM D 4767-88'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunenin aşırı konsolidasyonunu önlemek ve uygun doygunluğu sağlamak için standart doygunluk prosedürü uygulanmıştır. Başlangıçtaki doygunluk derecesi %95 ve geri basınç 630 kPa olarak belirlenmiştir. Arazi şartlarını yansıtmak için tüm numunelere izotropik bir şekilde 100 kPa'lık basınç (K_0) uygulanarak konsolidasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1. (a), numunelerin eksenel olarak yüklendiği ve deviatör gerilme-eksenel deformasyon ilişkilerinin drenajsız durum altında elde edildiği kesme sırasındaki doğal zemininin eksenel gerilme varyasyonunu göstermektedir. Bu çalışmadaki CIU deneylerinin sonuçları, killi siltli kumlar üzerinde yapılan önceki çalışmalar (örn. Soranzo, 1988; Shahin ve Cargeeg, 2011) ile uyumludur. Bu testler, Şekil 4.1. (a) 'da gösterildiği gibi üç farklı hücre basıncı (yani 150, 300 ve 450 kPa) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her karışım kombinasyonu için üç deney yapıp ASTM standardında (D4767) belirtildiği gibi deneylerin ortalaması alınmıştır. Buna göre Mohr daireleri Şekil 4.1. (b) 'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Toplam ve efektif gerilme durumları dikkate alınarak kayma yenilme zarfları oluşturulmuştur. Bu durumlar için elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Şekil 4.1. (b) 'de gösterilmiştir. Karşılaştırılabilir sonuçlar sağlamak için bu testler sırasında standart CIU test prosedürü kullanılmıştır. Şekil 4.1. (a), zeminin likit ve plastik limitine (sırasıyla %56 ve %32) bağlı olarak %8 eksenel deformasyondan daha fazlasına dayanabileceğini göstermektedir. Şekil 4.1. (c) eksenel birim deformasyona karşılık gelen serbest basınç gerilme değerlerini sunmaktadır ve %2.5 eksenel birim

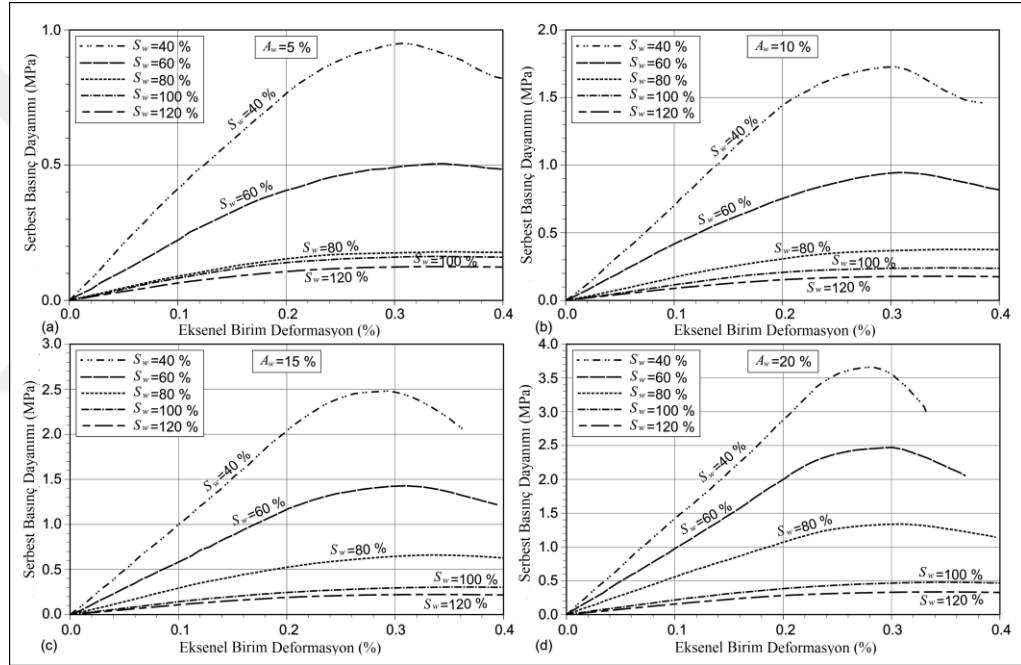
deformasyonda serbest basınç değerinin (q_u) yaklaşık 152 kPa olduğunu göstermektedir. Doğal zemin üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1. (d) 'de gösterilmiştir. Numunenin alındığı derinlik dikkate alınarak tam otomatik üç eksenli test cihazı tarafından gerçekleştirilen yakınsama çalışması ile UU testi için maksimum hücre basıncı sınırının 150 kPa olduğu belirlenmiştir. 150 kPa üzerindeki basınçların sonuçlar üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı yakınsama çalışması ile ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda testler Şekil 4.1. (d) 'de gösterildiği gibi üç farklı hücre basıncı (yani 50, 100 ve 150 kPa) göz önünde bulundurularak ASTM D4767 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Birincil gerilme değerlerinin, serbest basınç dayanımı deneyinden elde edilen gerilme değeri (q_u) ile uyumlu olarak %2.5 eksenel deformasyonda yaklaşık 151.5-152.3 kPa olduğu Şekil 4.1. (c) 'de gösterilmiştir. Şekil 4.1. (e) 'de gösterilen tek boyutlu basınç eğrisi, doğal zemin için yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilmiştir. İlgili eğriye bakılarak ön konsolidasyon basıncının yaklaşık 80.5 kPa olduğu, sıkışma ve şişme endekslerinin sırasıyla 0.047 ve 0.0086 olduğu görülebilir.



Şekil 4.1. Killi siltli kum için test sonuçları, (a, b) CIU-üç eksneli deneyleri, (c) serbest basınç dayanımı deneyi, (d) UU üç eksenli deneyleri (e) konsolidasyon deneyi

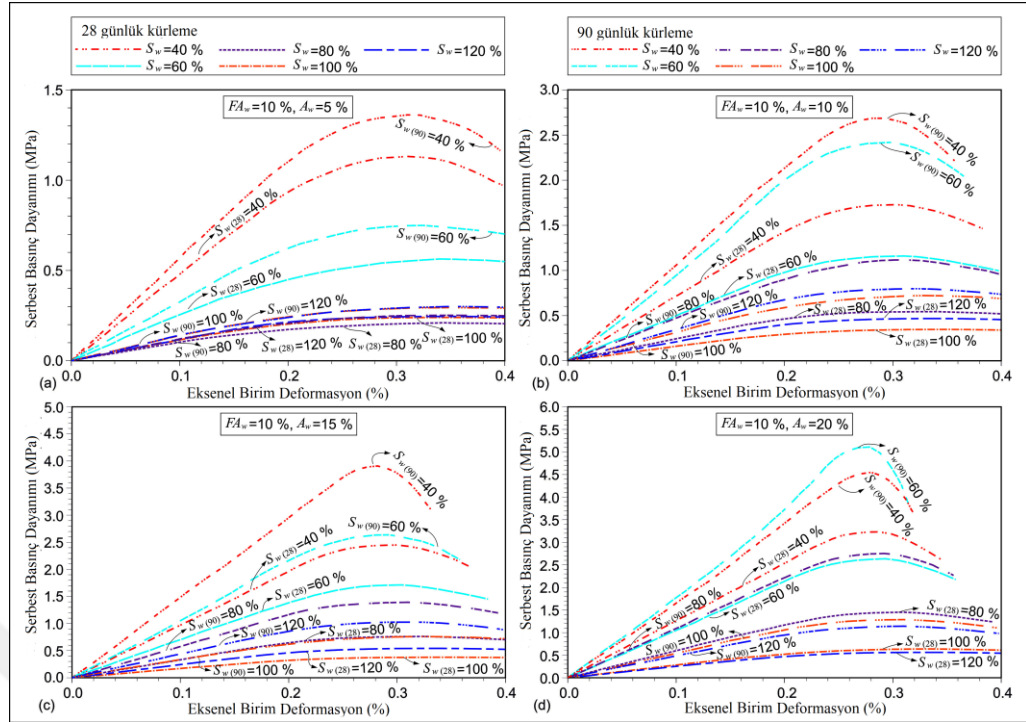
4.2. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

28 ve 90 gün kürlenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar, Şekil 4.2.-4.5.'te sunulmuştur. Serbest basınç gerilme-deformasyon eğrileri, toplam su içeriği (S_w), çimento içeriği (A_w) ve uçucu kül içeriği (FA_w) için dikkate alınan tüm varyasyonlarda tanımlanmıştır. Sadece çimento ile stabilize edilerek 28 gün kürlenmiş numuneler için gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çimento ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$

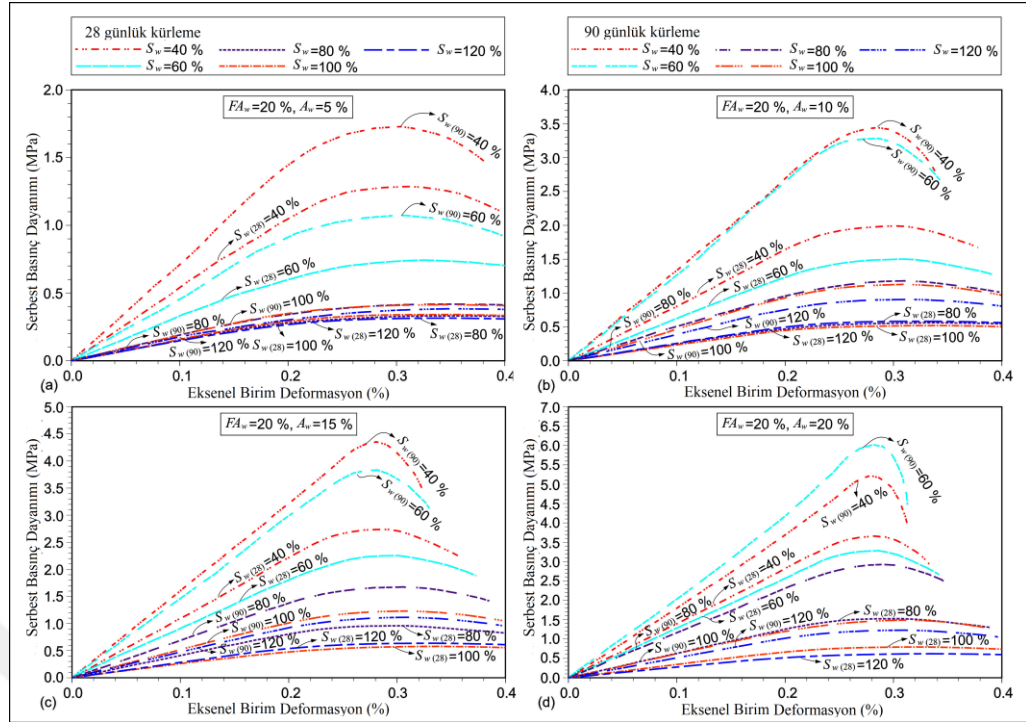
%10 uçucu kül ilavesi (çimentonun ağırlığınca) ile beraber çimento ile stabilize edilmiş zemin için gerilme-deformasyon eğrileri her iki kür periyodu için Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Çimento ve %10 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$

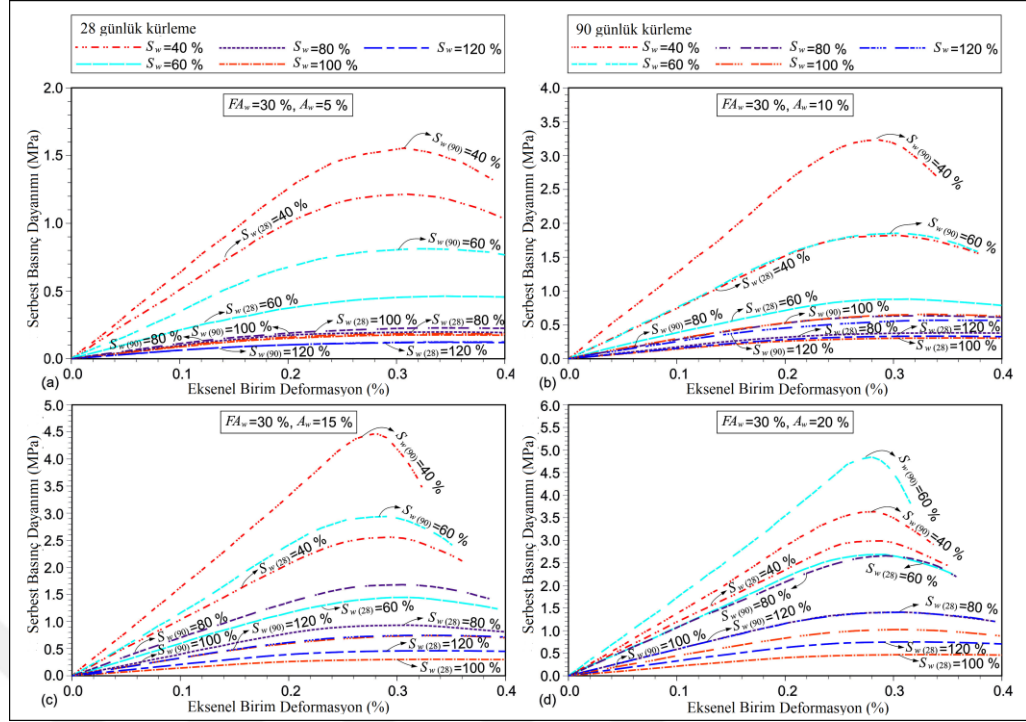
%20 ve %30 uçucu kül ilavesiyle (çimentonun ağırlığınca) beraber çimento ile stabilize edilmiş zemin için gerilme-deformasyon eğrileri, her iki kürleme periyodu için sırasıyla Şekil 4.4. ve 4.5.'te gösterilmiştir.

Şekil 4.2.-4.5.'te, serbest basınç gerilme-deformasyon eğrilerinin toplam su içeriğinden önemli ölçüde etkilendiği ve stabilize edilmiş numunelerin taşıyabildiği gerilmenin, su içeriğindeki artışla önemli ölçüde azaldığı görülebilir. Örneğin, Şekil 4.2. (a)'da, %40 su muhtevasında (S_w) stabilize edilmiş zemin için, su muhtevasının (S_w) %60'a çıkarılması durumunda, yaklaşık %50 dayanım azalmasının ($q_{u(28)}$) olduğu gösterilmektedir. Bu dayanım azalması, eksenel deformasyon üzerinde de etkili olmuştur. Taşınabilen gerilmenin azalması durumu, düşük çimento içeriğinde daha belirgindir. Çimento içeriğindeki artışla birlikte dayanım artar ancak bu artış aynı miktardaki su muhtevası artışı ile azaltılan dayanıma karşılık gelmemektedir. Derin karıştırmanın geleneksel aşamalarında kullanılan çimento harcı, zemin tabakalarının doğal su içeriğini dikkate almadan kolay pompalama ve yüksek işlenebilirlik sağlamak için genellikle yüksek su içeriği ile hazırlandığından, bu sonuç uygulamada kullanılacak su miktarının önemini göstermektedir.



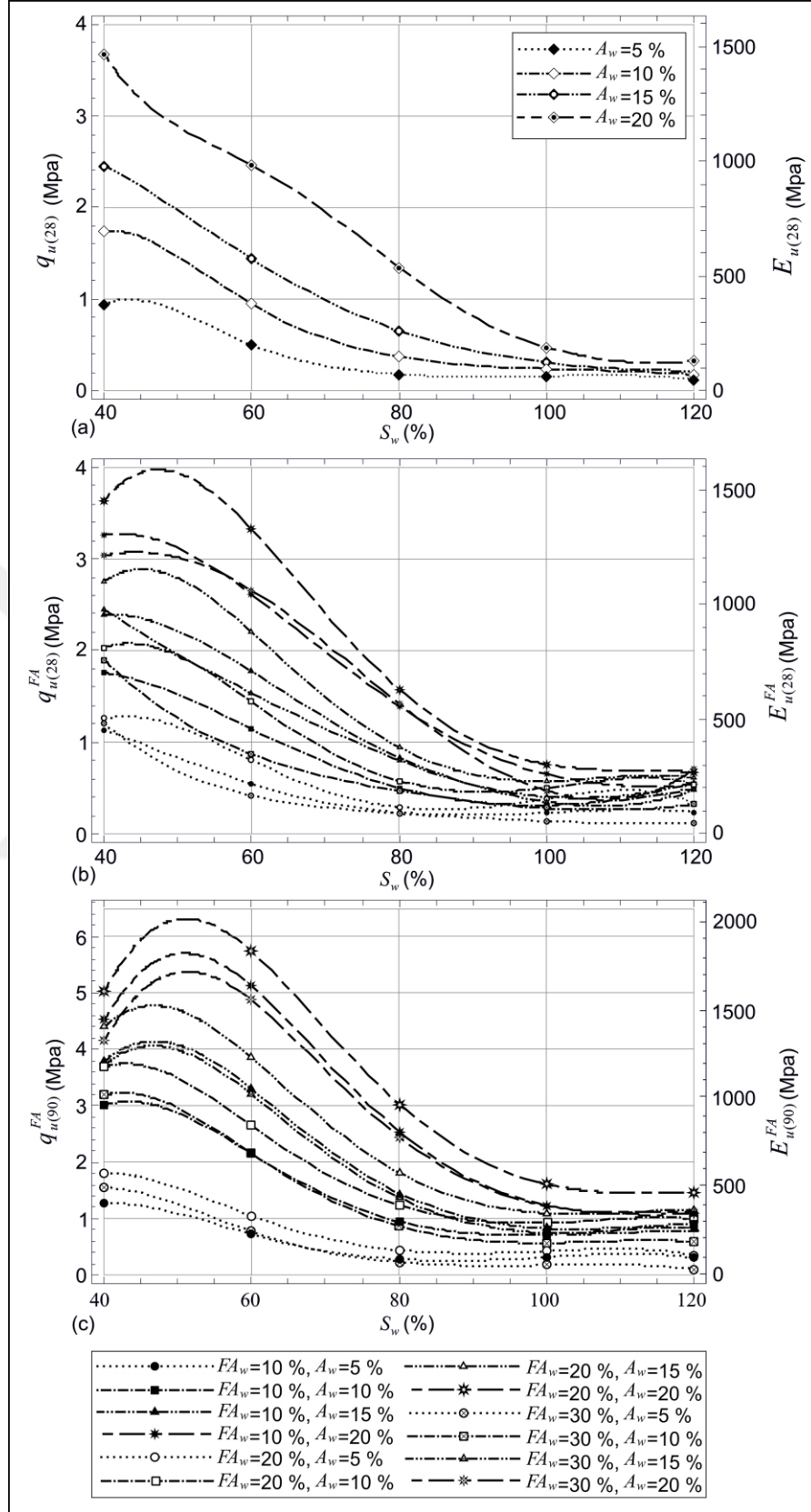
Şekil 4.4. Çimento ve %20 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$

Şekil 4.6.'da dayanım-rijitlik varyasyonlarının, çimento veya uçucu kül içeriğinden çok su muhtevassından önemli ölçüde etkilendiği gösterilmiştir. Bu sonuç aynı zamanda bu çalışmada “Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi” başlıklı bölümde açıklanan istatistiksel varyans analizi kullanılarak belirlenen katkı yüzdesi ile doğrulanmıştır. Şekil 4.2. ve 4.3. ile Şekil 4.6. (a) ve 4.6. (b) arasındaki karşılaştırma, karışıma %10 uçucu kül ilavesinin, özellikle uzun süreli kürlemede en az %10 dayanım artışı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, sahadaki uygulamalar için uçucu külün ileri yaş üzerindeki olumlu etkisinden söz edilebilir. Uçucu kül ilavesi kaynaklı dayanım artışının nedenlerinden biri, uçucu külün hidratasyon ürünlerini arttıran puzolanik etkisinin olmasıdır. Dayanımdaki artış aynı zamanda zemin parçacıkları arasındaki boşlukları dolduran uçucu kül parçacıklarının inceliğinden de kaynaklanmaktadır. Şekil 4.2.-4.6.'da gösterilen gerilme-deformasyon eğrilerine bağlı olan dayanım-rijitlik değerlerinin çimento oranı ve kürleme süresinin artışına paralel olarak artması önceki araştırmaların sonuçları ile iyi uyum sağlamaktadır (örn. Lorenzo ve Bergado, 2006). Bu artış, zemin parçacıklarının birbirine daha iyi bir şekilde bağlanmasını sağlayan çimento hidratasyonunun bir sonucudur.



Şekil 4.5. Çimento ve %30 uçucu kül ile stabilize edilmiş killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları (a) $A_w=5\%$, (b) $A_w=10\%$, (c) $A_w=15\%$ ve (d) $A_w=20\%$

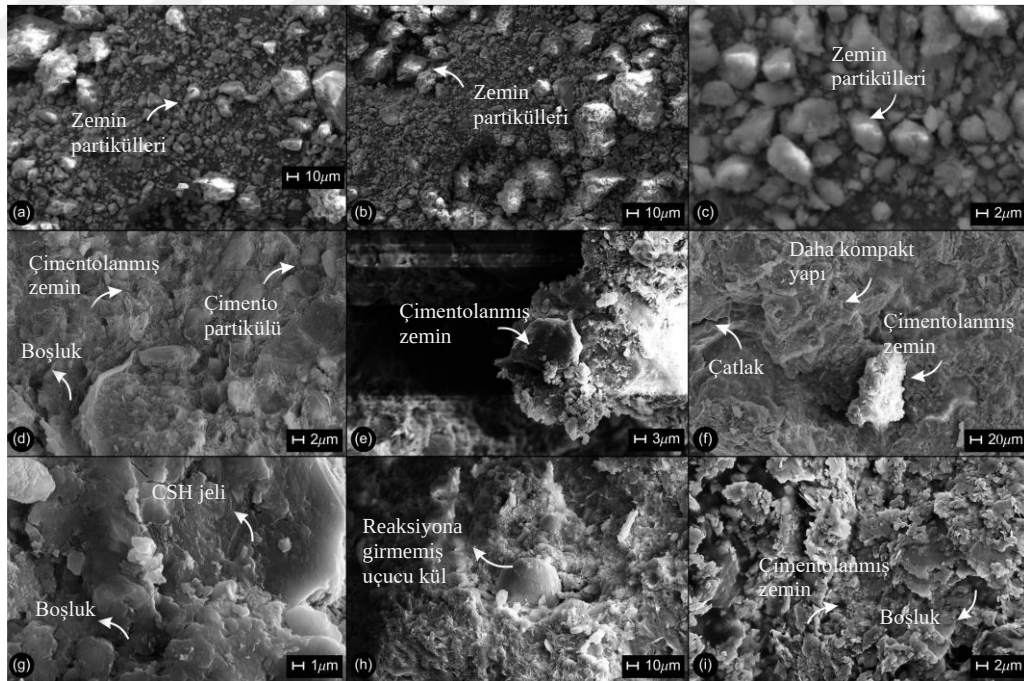
28 günlük kürleme sonrası su muhtevasına bağlı dayanım ve rijitlik değerlerinin ($q_{u(28)}$ ve $E_{50(28)}$) değişimi, çimento ile stabilize edilmiş karışım için Şekil 4.6. (a)'da, çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş karışım için ($q_{u(28)}^{FA}$ ve $E_{50(28)}^{FA}$) Şekil 4.6. (b)'de verilmiştir. 90 günlük kürleme sonrası su muhtevasına bağlı dayanım ve rijitlik değerlerinin ($q_{u(90)}^{FA}$ ve $E_{50(90)}^{FA}$) değişimi ise çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş karışım için Şekil 4.6. (c)'de gösterilmiştir. Her bir serbest basınç deneyi için sekant modülü (E_{50}), derin karıştırma uygulamalarında stabilize zemin için yaygın olarak kullanılan %50 q_u prosedürü (örn. Lorenzo ve Bergado, 2006; Porbaha, 1998) göz önünde bulundurularak Şekil 4.2.-4.5.'de sunulan serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilmiştir. Sekant modülü, q_u varyasyonuna benzer bir biçimde elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Toplam su içeriğinin dayanım üzerindeki etkisi; (a) sadece çimento ile stabilizasyon durumu, (b) 28 günlük kürlemede çimento ve uçucu kül ile stabilizasyon durumu (c) 90 günlük kürlemede çimento ve uçucu kül ile stabilizasyon durumu

Grafiklerin daha pratik bir şekilde değerlendirilebilmesi için Şekil 4.6.'da su muhtevalarına bağlı dayanım değerleri tüm karışım kombinasyonları için gösterilmiştir. Sekant modülünün serbest basınç değeri kullanılarak doğrudan elde edilmesi yaygın bir uygulamadır (rn. Lorenzo ve Bergado, 2006; Porbaha, 1998; Petchgate ve ark., 2003; Saitoh ve ark., 1980). Bu alışma için Şekil 4.6.'dan yola çıkılarak $E_{50(28)}$, $E_{50(28)}^{FA}$ ve $E_{50(90)}^{FA}$ sekant modülü değerleri, $q_{u(28)}$, $q_{u(28)}^{FA}$ ve $q_{u(90)}^{FA}$ serbest basınç dayanımı değerlerine göre doğrudan hesaplanmış olup $E_{50(28)} = 395 \times q_{u(28)}$, $E_{50(28)}^{FA} = 393 \times q_{u(28)}^{FA}$ ve $E_{50(90)}^{FA} = 314 \times q_{u(90)}^{FA}$ bağıntıları elde edilmiştir.

Şekil 4.7. (a-c)'de, doğal zeminden elde edilen SEM görüntüleri, Şekil 4.7. (d-f)'de 28 günlük kürleme sonrası %10 imento ile stabilize edilmiş %80 su muhtevastaki karışımdan elde edilen SEM görüntüleri ve Şekil 4.7. (g-i)'de 90 günlük kürleme sonrası %10 imento ile stabilize edilmiş %30 uçucu kül içeren %80 su muhtevastaki karışımdan elde edilen SEM görüntüleri gösterilmiştir.

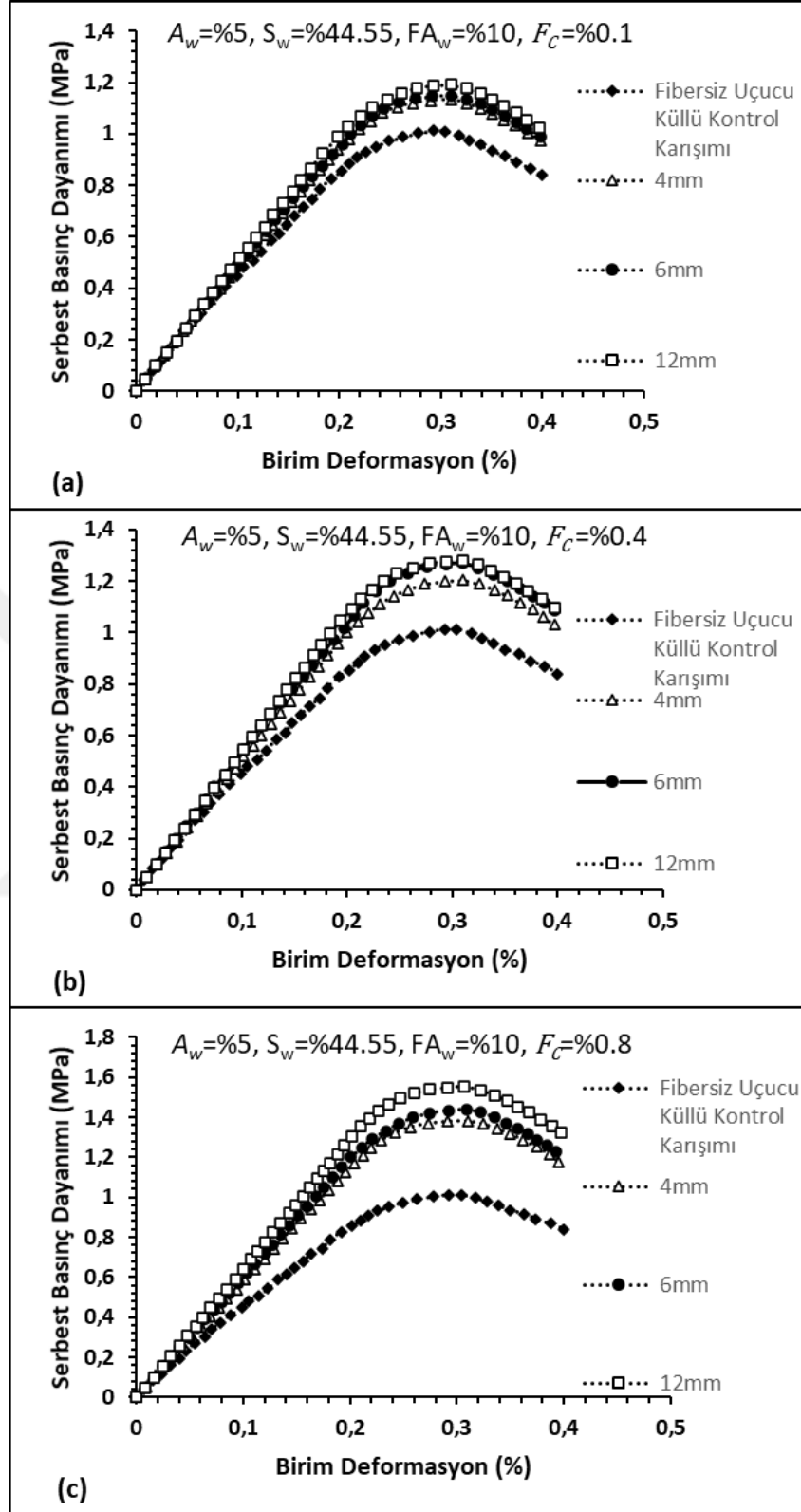


Şekil 4.7. SEM görüntüleri, (a-c) doğal zemin, (d-f) 28 günlük kürlemede sadece imento ile stabilizasyon, (g-i) 90 günlük kürlemede imento ve uçucu kül ile stabilizasyon

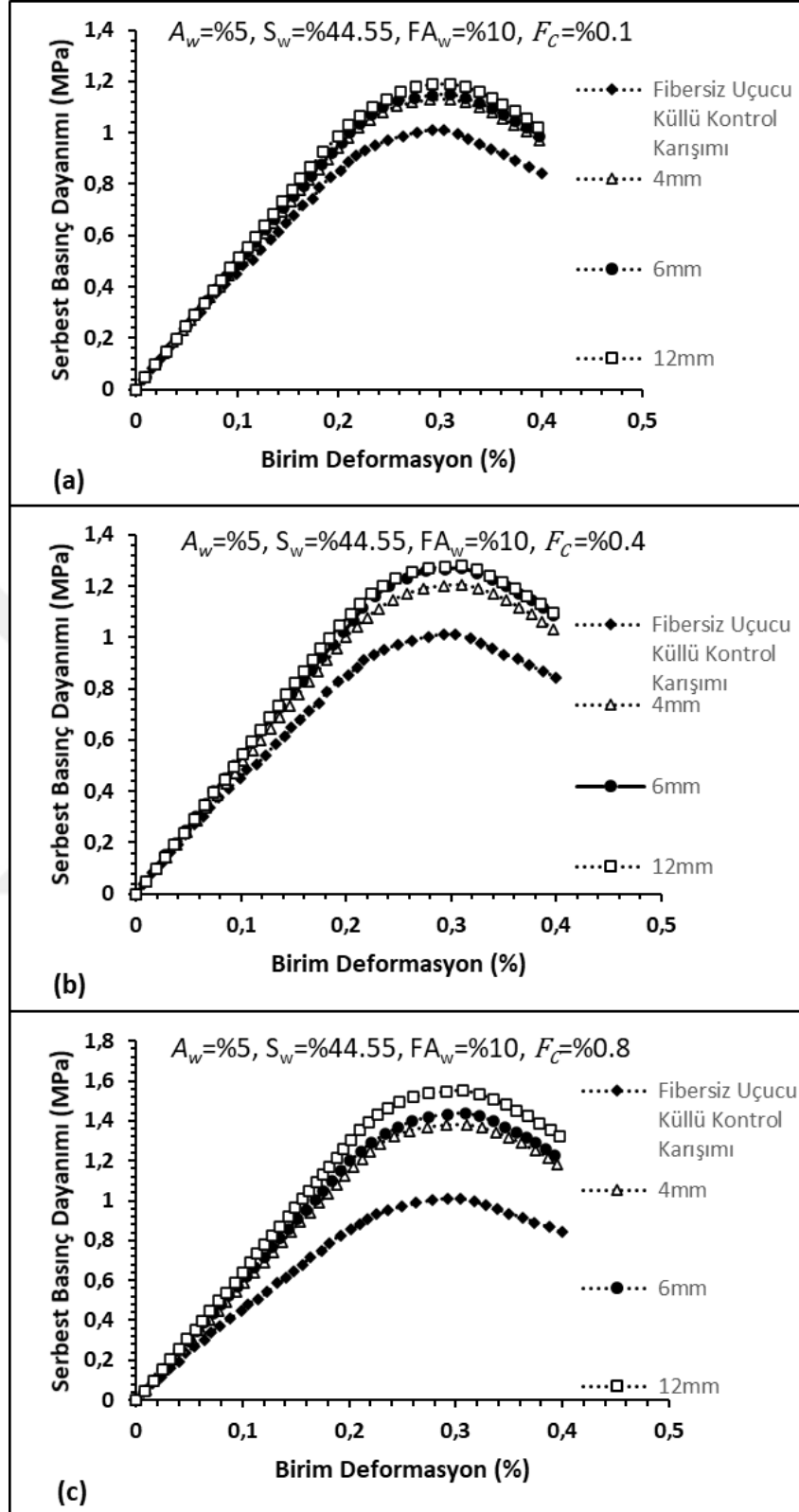
Şekil 4.7.'deki SEM görüntüleri, hidrasyon sonrası üretilen bileşikler, stabilizasyon nedeniyle oluşan yoğunlaşmayı, uçucu kül etkisini ve kürlenme süresinin zemin stabilizasyonu üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekilde ayrıca malzemelerdeki boşluklar, çimento ve uçucu külün reaksiyona girmiş ve reaksiyona girmemiş partikülleri, hidrasyon ile üretilen CSH jelleri ve çimentolu zemin partikülleri gösterilmiştir. Şekil 4.7. (d-f)' de, çimentonun bağlayıcı özelliğinden dolayı hidrasyon ürünlerinin yardımıyla daha kompakt bir yapının oluştuğu görülebilir. 90 gün kürlenmiş çimento ve uçucu kül katkısı ile stabilize edilen zeminin SEM görüntüleri, daha ileri yaşlarda daha yoğun bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Şekil 4.7. (g-i)'de uçucu külün pozolanik etkisi nedeniyle hidrasyon ürünlerini arttırdığı görülebilir. Buna göre, CSH ve CASH jellerinin daha yoğun bir yapı oluşturarak daha fazla boşluk doldurduğu söylenebilir. Şekil 4.7. ayrıca yüksek su içeriği nedeniyle karışımın yüksek boşluk oranının elde edildiğini ve bu numunelerde reaksiyona girmeyen uçucu kül parçacıklarının küresel şeklinin tespit edildiğini doğrulamaktadır.

4.3. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

28 gün kürlenmiş kontrol karışımı numuneleri ve elyaf katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç ve üç noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar, Şekil 4.8.-4.14.'te sunulmuştur. Serbest basınç ve üç noktalı eğilme gerilme-deformasyon eğrileri, uçucu kül katkılı ve katkısız olmak üzere 4 mm ,6 mm ve 12 mm boylarında (F_L) ve karışım hacmine göre %0.1, %0.4, %0.8 oranlarındaki (F_C) tüm varyasyonlar için elde edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli varyasyonlardan sadece çimento ile stabilize edilerek 28 gün kürlenmiş numuneler için serbest basınç gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4.8.'de gösterilmiştir. %10 uçucu kül ilavesiyle (çimentonun ağırlığınca) beraber çimento ile stabilize edilmiş karbon elyaf takviyeli zemin için serbest basınç gerilme-deformasyon eğrileri 28 günlük kür periyodu için Şekil 4.9.'da sunulmuştur.



Şekil 4.8. Sadece çimento ile stabilize edilmiş ($A_w=\%5.3, S_w=\%40$) elyaf takviyeli killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları



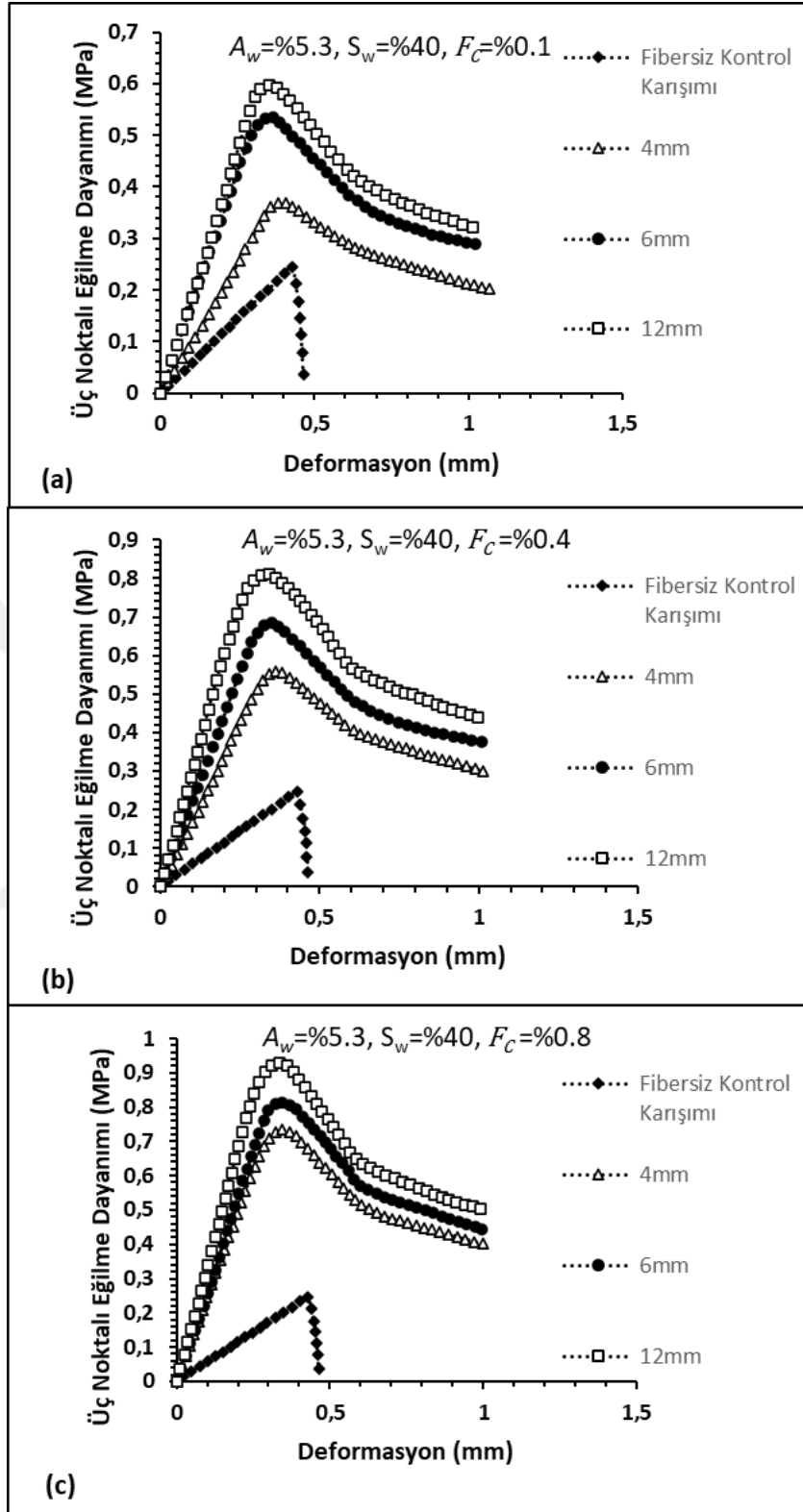
Şekil 4.9. Çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş ($A_w=\%5, S_w=\%44.55, FA_w=\%10$) elyaf takviyeli killi siltli kumun serbest basınç dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları

Karbon elyaf takviyeli varyasyonlardan sadece çimento ile stabilize edilip 28 gün kürlenmiş numuneler için üç noktalı eğilme deneyi gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. %10 uçucu kül ilavesiyle (çimentonun ağırlığınca) beraber çimento ile stabilize edilmiş karbon elyaf takviyeli zemin için üç noktalı eğilme deneyi gerilme-deformasyon eğrileri 28 günlük kür periyodu için Şekil 4.11.'de sunulmuştur.

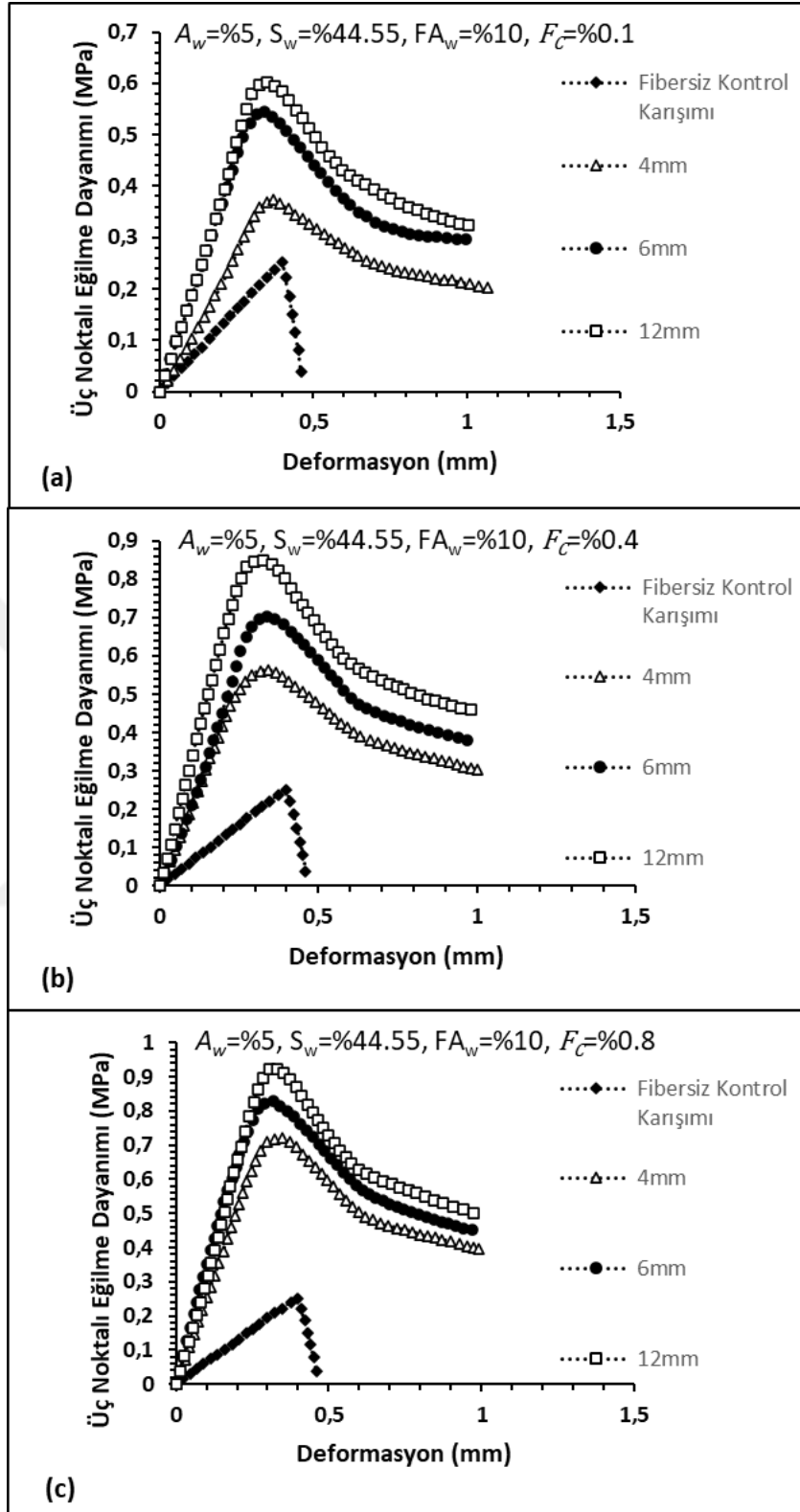
Tüm varyasyonların birbirleri ile kıyaslanabilmesi için Şekil 4.12. (a-b)'de serbest basınç ($q_{u(28)}$) ve Şekil 4.13. (a-b)'de üç noktalı eğilme dayanımları (f_{dmc}) uçucu kül ilaveli ve ilavesiz durumlar ayrılacak şekilde tek grafikte toplanmıştır. Şekil 4.14. (a-d)'de sırasıyla hacimce karbon elyaf takviye yüzdesindeki (F_C) artışın, 28 günlük serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) ve elastisite modülü ($E_{u(28)}$), şişme yüzdesi, üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}) ve statik segregasyon yüzdesi üzerine olan etkisi gösterilmiştir.

Şekil 4.8., 4.9. ve 4.12.'de, serbest basınç gerilme-deformasyon eğrilerinin hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf takviye hacminden (F_C) önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Hacimsel elyaf oranının % 0.1 F_L 'den % 0.8 F_L 'ye çıkarılması tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonları için serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) ve elastisite modülünde ($E_{u(28)}$) yaklaşık %22-%30 arasında artış sağlamıştır (Şekil 4.14. (a)). Aynı F_L değerleri için F_C değerlerinin artması ile serbest basınç dayanımının arttığı Şekil 4.14. (a)'da görülmektedir.

Şekil 4.8., 4.9. ve 4.12.'de yer alan serbest basınç gerilme-deformasyon eğrilerinin aynı zamanda hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf boyundan da etkilendiği görülmektedir. Elyaf boyunun $F_L = 4$ mm'den $F_C = 12$ mm'ye çıkarılması tüm elyaf hacim (F_C) varyasyonları için serbest basınç dayanımında yaklaşık %5-%13 arasında artış sağlamıştır ve aynı F_C değerleri için F_L değerlerinin artması ile serbest basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.14. (a)).



Şekil 4.10. Sadece çimento ile stabilize edilmiş ($A_w = \%5.3, S_w = \%40$) elyaf takviyeli killi siltli kumun üç noktali eğilme dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları

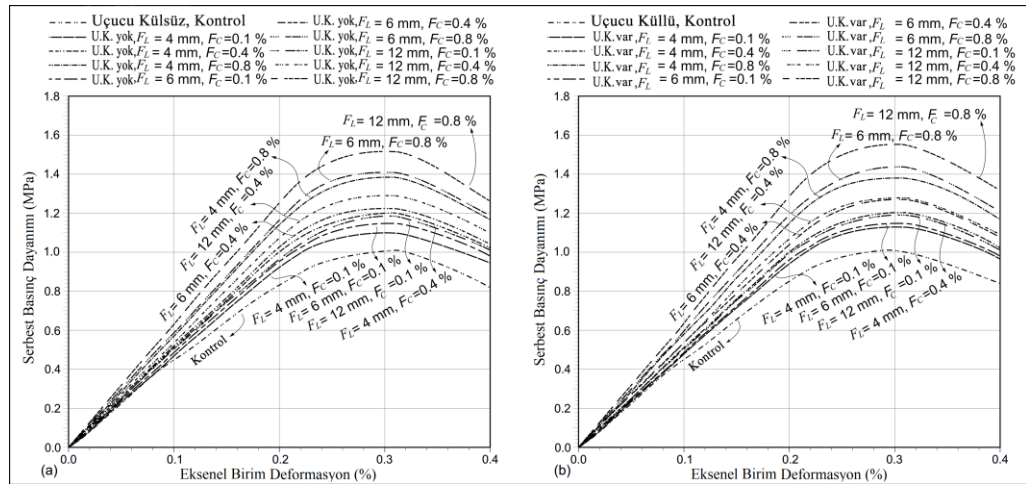


Şekil 4.11. Çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş ($A_w = 5\%$, $S_w = 44.55\%$, $FA_w = 10\%$) elyaf takviyeli killi siltli kumun üç noktali eğilme dayanımı sonuçları; (a) hacimce %0.1 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (b) hacimce %0.4 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları, (c) hacimce %0.8 elyaf katkısı için tüm elyaf boyu varyasyonları

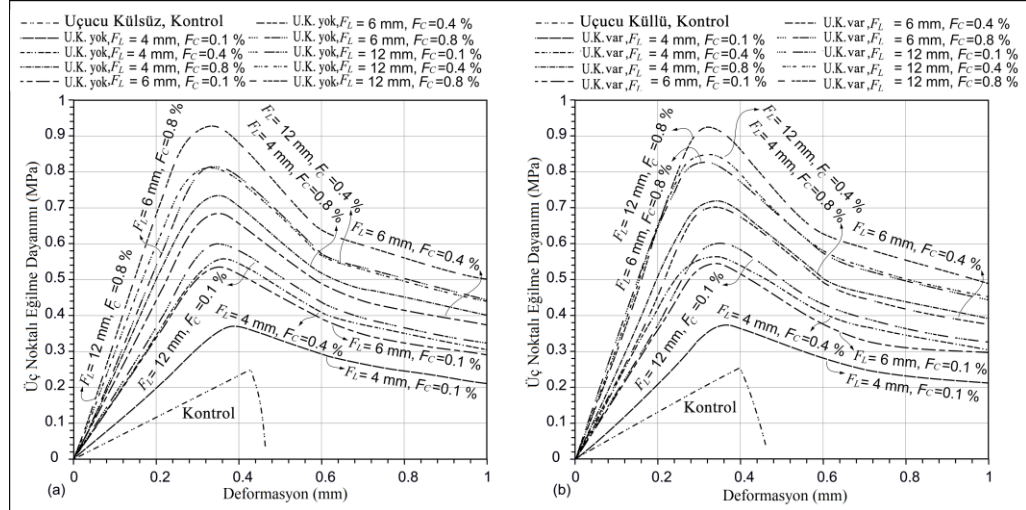
Elyaf takviyesiz kontrol karışımlarına kıyasla en yüksek serbest basınç dayanımını uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numuneler için $0.8 F_C$ ve $F_L = 12$ mm kombinasyonu sağlamıştır. Uçucu kül ilaveli numunenin serbest basınç dayanımı belirtilen elyaf takviyesi sayesinde 1 MPa serbest basınç dayanımındaki kontrol karışımına ($A_w = 5\%$, $S_w = 44.55\%$, $FA_w = 10\%$, $F_C = 0\%$) göre yaklaşık %54, uçucu kül ilavesiz numunenin serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) ise elyaf takviyesi ile 1 MPa serbest basınç dayanımındaki kontrol karışıma göre ($A_w = 5.3\%$, $S_w = 40\%$, $F_C = 0\%$) yaklaşık %50 oranında artmıştır (Şekil 4.8. (c) ve Şekil 4.9. (c)). Bu sonuçlar literatürdeki (Chen ve ark., 2018; Gao ve ark., 2017) karbon elyaf etkisinin araştırıldığı çalışmalar ile uyum içerisindedir. Elyaf takviyeli ve uçucu kül katkılı karışımlardan elde edilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının ($q_{u(28)}$), uçucu kül katkısız eşdeğer karışımlardan elde edilen tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonlarında üretilmiş numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.14. (a)). Tüm elyaf boyu (F_L) ve hacimce katkı (F_C) varyasyonları incelendiğinde belirtilen her iki parametrenin de artışının serbest basınç dayanımı açısından iyileştirme sağladığı ve elyaf hacmindeki (F_C) artışın elyaf boyu (F_L) artışına göre serbest basınç dayanımını ($q_{u(28)}$) iyileştirmede daha etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda bu çalışmada “Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi” başlıklı bölümde açıklanan istatistiksel varyans analizi kullanılarak belirlenen katkı yüzdesi ile doğrulanmıştır.

Şekil 4.10., 4.11. ve 4.13.’te, üç noktalı eğilme deneyi gerilme-deformasyon eğrilerinin hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf takviye hacminden (F_C) önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Hacimsel elyaf oranının $0.1 F_C$ ’den $0.8 F_C$ ‘ye çıkarılması tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonları için üç noktalı eğilme dayanımında (f_{dmc}) yaklaşık %55-%98 arasında artış sağlamıştır (Şekil 4.14. (c)). Aynı F_L değerleri için F_C değerlerinin artması ile üç noktalı eğilme dayanımının arttığı Şekil 4.14. (c)’de görülmektedir. Şekil 4.10., 4.11. ve 4.13.’da yer alan üç noktalı eğilme gerilme-deformasyon eğrilerinin aynı zamanda hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf boyundan da etkilendiği görülmektedir. Elyaf boyunun $F_L = 4$ mm’den $F_L = 12$ mm’ye çıkarılması tüm elyaf hacim (F_C) varyasyonları için üç noktalı eğilme dayanımında yaklaşık %25-%60 arasında artış sağlamıştır ve

aynı F_C değerleri için F_L değerlerinin artması ile üç noktalı eğilme dayanımının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.14. (c)). Elyaf takviyesiz kontrol karışımlarına kıyasla en yüksek üç noktalı eğilme dayanımını uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numuneler için %0.8 F_C ve $F_L = 12$ mm kombinasyonu sağlamıştır. Uçucu kül ilaveli numunenin üç noktalı eğilme dayanımı belirtilen elyaf takviyesi sayesinde 0.25 MPa üç noktalı eğilme dayanımındaki kontrol karışımına ($A_w = \%5$, $S_w = \%44.55$, $FA_w = \%10$, $F_C = \%0$) göre yaklaşık %267, uçucu kül ilavesiz numunenin üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}) ise elyaf takviyesi ile 0.245 MPa üç noktalı eğilme dayanımındaki kontrol karışımına göre ($A_w = \%5.3$, $S_w = \%40$, $F_C = \%0$) yaklaşık %278 oranında artmıştır (Şekil 4.10. (c) ve Şekil 4.11. (d)). Bu sonuçlar Chen ve ark. (2018) tarafından karbon elyaf etkisinin araştırıldığı çalışma ile uyum içerisindedir. %0.4 F_C elyaf takviyeli ve uçucu kül katkılı karışımlardan elde edilen numunelerin üç noktalı eğilme dayanımlarının (f_{dmc}), uçucu kül katkısız eşdeğer karışımlardan elde edilen tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonlarında üretilmiş numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.14. (c)). Tüm elyaf boyu (F_L) ve elyaf hacim (F_C) varyasyonları incelendiğinde belirtilen her iki parametrenin de artışının üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}) açısından iyileştirme sağladığı ve elyaf hacmindeki (F_C) artışın elyaf boyu (F_L) artışına göre üç noktalı eğilme dayanımını (f_{dmc}) iyileştirmede daha etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda ilgili regresyon analizi bölümünde açıklanan istatistiksel varyans analizi kullanılarak belirlenen katkı yüzdesi ile doğrulanmıştır.



Şekil 4.12. Tüm varyasyonlar için serbest basınç dayanımları ($q_{u(28)}$); (a) uçucu kül katkısız varyasyonlar, (b) uçucu kül katkılı varyasyonlar



Şekil 4.13. Tüm varyasyonlar için üç noktalı eğilme dayanımları (f_{dmc}); (a) uçucu kül katkısız varyasyonlar, (b) uçucu kül katkılı varyasyonlar

Şekil 4.14. (b)'de şişme yüzdesinin hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf hacimsel takviye yüzdesinden (F_C) ve elyaf boyundan (F_L) etkilendiği görülmektedir. Uçucu kül ilavesiz kontrol karışımından elde edilen numune için şişme %2.1, uçucu kül ilaveli kontrol karışımı numunesi için ise şişme %2.02 olarak belirlenmiştir. Hacimsel elyaf oranının % 0.1 F_C 'den % 0.8 F_C 'ye çıkarılması tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonları için şişme yüzdesinde yaklaşık %18-%24 arasında azalış sağlamıştır (Şekil 4.14. (b)).

Aynı F_L değerleri için F_C değerlerinin artması ile şişme yüzdesinin azaldığı Şekil 4.14. (b)'de görülmektedir. Elyaf boyunun $F_L = 4$ mm'den $F_L = 12$ mm'ye çıkarılması tüm elyaf hacim (F_C) varyasyonları için şişme yüzdesinde yaklaşık %6-%9 arasında azalış sağlamıştır ve aynı F_C değerleri için F_L değerlerinin artması ile şişme yüzdesinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.14. (b)). Elyaf takviyesiz kontrol karışımlarına kıyasla en düşük şişme yüzdesini uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numuneler için %0.8 F_C ve $F_L = 12$ mm kombinasyonu sağlamıştır. Uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numunelerin şişme yüzdesi belirtilen elyaf takviyesi sayesinde kontrol karışımlarına göre ($A_w = \%5$, $S_w = \%44.55$, $FA_w = \%10$, $F_C = \%0$ ve $A_w = \%5.3$, $S_w = \%40$, $F_C = \%0$) yaklaşık %35 oranında azalmıştır. Elyaf takviyeli ve uçucu kül katkılı karışımlardan elde edilen şişme yüzdelерinin uçucu kül katkısız eşdeğer karışımlardan elde edilen tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonlarında üretilmiş numunelere göre daha düşük olduğu

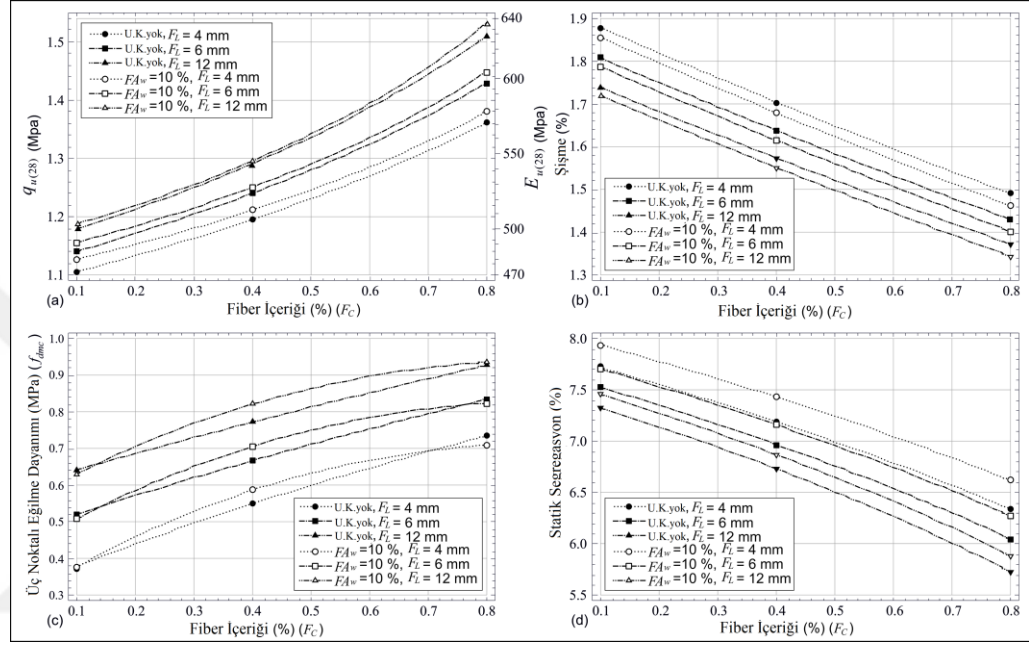
belirlenmiştir (Şekil 4.14. (b)). Uçucu kül katkısının sağladığı bu olumlu sonuç Ramadas ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışma ile uyum içerisinde. Tüm elyaf boyu (F_L) ve hacimce katkı (F_C) varyasyonları incelendiğinde belirtilen her iki parametrenin de artışının şişme yüzdesi açısından azalış sağladığı ve elyaf hacmindeki (F_C) artışın elyaf boyu (F_L) artışına göre şişme yüzdesini iyileştirmede daha etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda ilgili regresyon analizi bölümünde açıklanan istatistiksel varyans analizi kullanılarak belirlenen katkı yüzdesi ile doğrulanmıştır.

Şekil 4.14. (d)'de segregasyon yüzdesinin hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numunelerde elyaf hacimsel takviye yüzdesinden (F_C) ve elyaf boyundan (F_L) etkilendiği görülmektedir. Uçucu kül ilavesiz kontrol karışımından elde edilen numune için segregasyon %8.6, uçucu kül ilaveli kontrol karışımı numunesi için ise segregasyon %8.69 olarak belirlenmiştir. Hacimsel elyaf oranının % 0.1 F_C 'den % 0.8 F_C 'ye çıkarılması tüm elyaf boyu (F_L) varyasyonları için segregasyon yüzdesinde yaklaşık %16-%23 arasında azalış sağlamıştır (Şekil 4.14. (d)).

Aynı F_L değerleri için F_C değerlerinin artması ile segregasyon yüzdesinin azaldığı Şekil 4.14. (d)'de görülmektedir. Elyaf boyunun $F_L = 4$ mm'den $F_L = 12$ mm'ye çıkarılması tüm elyaf hacim (F_C) varyasyonları için segregasyon yüzdesinde yaklaşık %5-%13 arasında azalış sağlamıştır ve aynı F_C değerleri için F_L değerlerinin artması ile segregasyon yüzdesinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.14. (d)). Elyaf takviyesiz kontrol karışımlarına kıyasla en düşük segregasyon yüzdesini uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numuneler için % 0.8 F_C ve $F_L = 12$ mm kombinasyonu sağlamıştır. Uçucu kül ilaveli ve ilavesiz numunelerin segregasyon yüzdesi belirtilen elyaf takviyesi sayesinde kontrol karışımlarına göre ($A_w = \%5$, $S_w = \%44.55$, $FA_w = \%10$, $F_C = \%0$ ve $A_w = \%5.3$, $S_w = \%40$, $F_C = \%0$) göre yaklaşık %34 oranında azalmıştır. Tüm elyaf boyu (F_L) ve hacimce katkı (F_C) varyasyonları incelendiğinde belirtilen her iki parametrenin de artışının segregasyon yüzdesi açısından azalış sağladığı ve elyaf hacmindeki (F_C) artışın elyaf boyu (F_L) artışına göre segregasyon yüzdesini iyileştirmede daha etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda ilgili regresyon analizi

bölümünde açıklanan istatistiksel varyans analizi kullanılarak belirlenen katkı yüzdesi ile doğrulanmıştır.

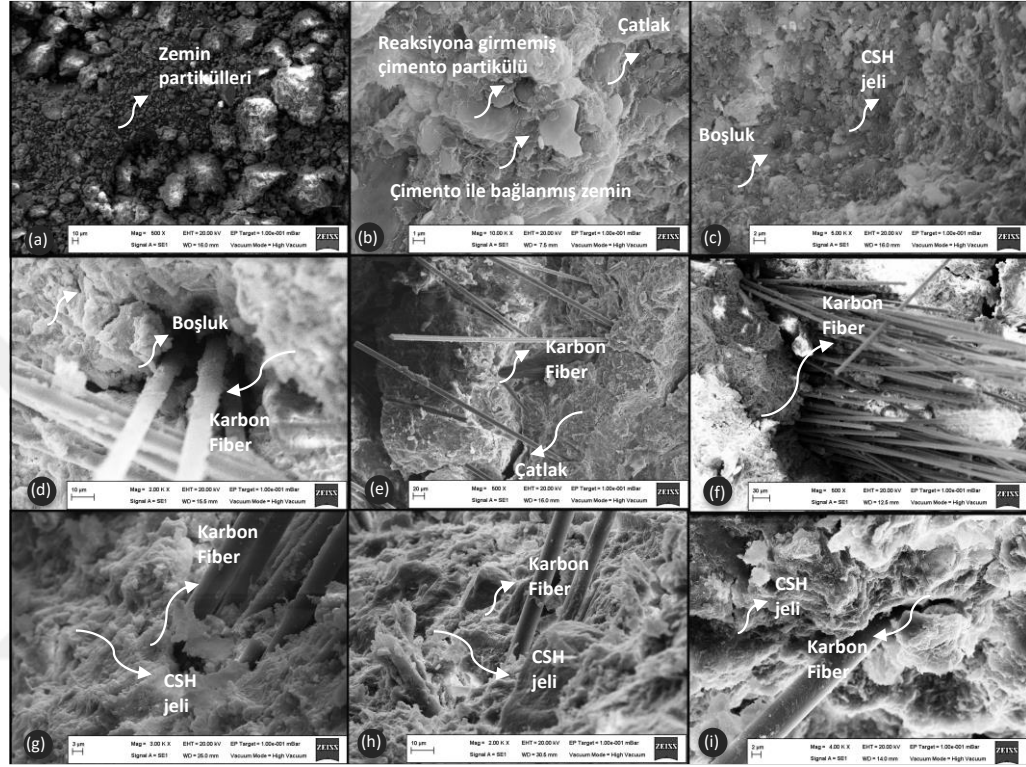
Karbon elyaf takviyesinin incelenen tüm parametreleri iyileştirdiği ve en büyük etkinin üç noktalı eğilme dayanımı üzerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Karbon elyaf takviye yüzdesindeki (F_C) artışın etkileri; (a) 28 günlük serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$) ve elastisite modülü ($E_{u(28)}$), (b) şişme yüzdesi, (c) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (d) statik segregasyon yüzdesi

Şekil 4.15. (a)'da, doğal zeminden elde edilen SEM görüntüsü, Şekil 4.15. (b)'de 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilavesiz kontrol numunesinin SEM görüntüsü, Şekil 4.15. (c)'de 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilaveli kontrol numunesinin SEM görüntüsü ve Şekil 4.15. (d-i)'de uçucu kül ilaveli ve ilavesiz çeşitli boy (F_L) ve oranlarda (F_C) karbon elyaf takviyeli numunelerin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.15.'teki SEM görüntüleri, hidrasyon sonrası üretilen bileşikleri, stabilizasyon nedeniyle oluşan yoğunlaşmayı ve karbon elyafların dağılımını göstermektedir. Şekilde ayrıca malzemelerdeki boşluklar, çimentonun reaksiyona girmiş ve reaksiyona girmemiş partikülleri, hidrasyon ile üretilen CSH jelleri ve çimentolu zemin partikülleri gösterilmiştir. Şekil 4.15. (d-i)'de, çimentonun bağlayıcı özelliğinden dolayı hidrasyon ürünlerinin yardımıyla karbon elyaf takviyelerinin zemin-çimento

karışımına iyi bir şekilde bağlandığı gözlemlenebilir. Şekil 4.15. (d-i)' de ayrıca karışıma katılan karbon elyaf takviyelerinin hacimsel katkı oranına (F_C) bağlı olarak karışım içinde dağılımının dengeli olduğu görülmüştür. Şekil 4.15. (g-i)'de puzolanik etkisi nedeniyle uçucu külün hidratasyon ürünlerini arttırdığı görülebilir.



Şekil 4.15. SEM görüntüleri, (a) doğal zemin, (b) 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilavesiz kontrol numunesi, (c) 28 gün kürlenmiş uçucu kül ilaveli kontrol numunesi, (d) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.1$ $F_L=4$ mm), (e) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.4$ $F_L=6$ mm), (f) uçucu kül ilavesiz karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.8$ $F_L=12$ mm), (g) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.8$ $F_L=4$ mm), (h) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.4$ $F_L=6$ mm), (i) uçucu kül ilaveli karbon elyaf takviyeli numune ($F_C=\%0.1$ $F_L=12$ mm)

4.4. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi

Bu parametrik çalışmada dikkate alınan faktörlerin (bağımsız değişkenler) derin karıştırma yöntemine dayalı olarak çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin dayanım ve rijitlik çıktıları (bağımlı değişkenler) üzerinde etkisi olup olmadığı genel doğrusal model varyans analizi (GLM-ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir.

GLM-ANOVA, çeşitli faktörlerin bağımsız değişkenler üzerindeki etkisini belirlemek için önemli bir istatistiksel analiz aracıdır. Faktörler arasındaki karşılıklı etkileşim ve bunların çıktılar üzerindeki etkisi de bu analiz kullanılarak değerlendirilmektedir. Çizelge 4.1., dayanım ve rijitlik değerleri için Şekil 4.6.'da sunulan verilere dayanan ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Analizler, bağımsız değişkenlerin çıktılar üzerindeki istatistiksel anlamlılığını göstermek üzere her bağımlı dayanım ve rijitlik parametresi için %95 güven düzeyinde gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Elyaf takviyesiz karışımlar için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Bağımlı Değişkenler	Varyasyon Kaynağı	İstatistiksel parametreler					Anlamlılık	Katkı (PC _s) (%)
		Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Top. (SS _s)	Ortalama Kare (MS _s)	F	P-değeri		
$q_{u(28)}$	S_w	4	11.17	2.79	13.16	<0.001	Evet	61.46
	A_w	3	4.46	1.49	7	<0.006	Evet	24.52
	Hata	12	2.55	0.21				14.02
$q_{u(28)}^{FA}$	S_w	4	30.13	7.53	60.8	<0.001	Evet	59.70
	A_w	3	13.34	4.45	35.9	<0.001	Evet	26.40
	FA_w	2	0.79	0.4	3.21	<0.045	Evet	1.60
	Hata	50	6.19	0.12				12.30
$q_{u(90)}^{FA}$	S_w	4	69.76	17.44	46.97	<0.001	Evet	51.72
	A_w	3	44.13	14.71	39.62	<0.001	Evet	32.72
	FA_w	2	2.42	1.21	3.26	<0.034	Evet	1.79
	Hata	50	18.56	0.37				13.76
$E_{u(28)}$	S_w	4	1.70E+06	4.25E+05	15.14	<0.001	Evet	63.23
	A_w	3	6.52E+05	2.17E+05	7.74	<0.004	Evet	24.24
	Hata	12	3.37E+05	28103.4				12.53
$E_{u(28)}^{FA}$	S_w	4	4.55E+06	1.14E+06	67.54	<0.001	Evet	60.60
	A_w	3	2.00E+06	6.66E+05	39.56	<0.001	Evet	26.60
	FA_w	2	1.17E+05	5.87E+04	3.49	<0.043	Evet	1.57
	Hata	50	8.41E+05	1.68E+04				11.22
$E_{u(90)}^{FA}$	S_w	4	4.55E+06	1.14E+06	67.54	<0.001	Evet	60.60
	A_w	3	2.00E+06	6.66E+05	39.56	<0.001	Evet	26.62
	FA_w	2	1.17E+05	5.87E+04	3.49	<0.031	Evet	1.57
	Hata	50	8.41E+05	1.68E+04				11.22

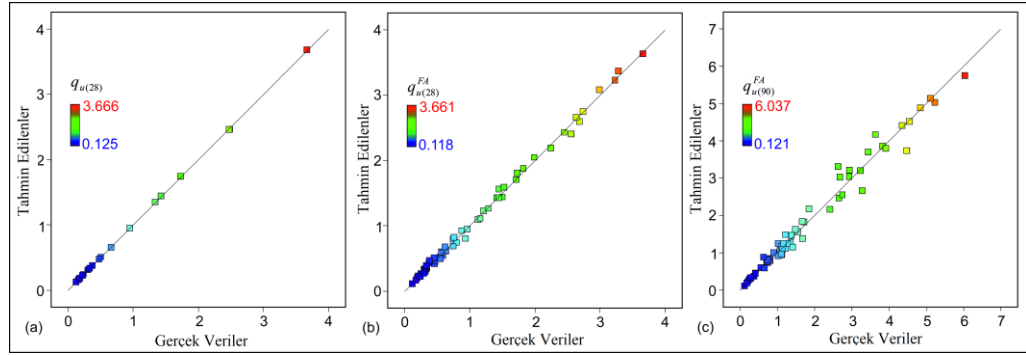
(*) "FA" üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.

Dayanım ve rijitlik parametreleri çıktılar olarak atanırken deneysel test parametreleri olan su içeriği, çimento ve uçucu kül ilaveleri bağımsız faktörler olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.1.'de gösterilen P-değerlerinin tümü, 0.05 değerinden küçük olduğundan tüm faktörlerin, çıktılar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Uçucu kül ilavesi uzun dönemde dayanım kazanımı sağladığı için, bu parametrenin dayanım ve rijitlik çıktıları üzerindeki etkisi kısa süreli

kürleme dönemlerinde minimum düzeyde kalmıştır. Buna göre, uçucu kül ilavesi (FA_w) için $q_{u(28)}^{FA}$ ve $E_{u(28)}^{FA}$ parametrelerinin P-değerleri, $q_{u(90)}^{FA}$ ve $E_{u(90)}^{FA}$ parametrelerinin değerlerine kıyasla daha yüksektir. Faktörlerin dayanım ve rijitlik çıktıları karşısında istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlendiğinden, bu çıktılar için tahmin modellerini geliştirmek üzere regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçları yorumlamak adına her bağımsız değişken için yüzde katkısı (PC_x), Taguchi yöntemi (örn. Ben-Gal, 2005; Algin, 2016) ile elde edilmiştir (Çizelge 4.1.). Çizelge 4.1.'deki PC_x değerleri, hata terimi de dahil olmak üzere tüm faktörlerin katkı yüzdesi toplamının %100 olduğunu göstermektedir. Daha yüksek PC_x değerleri, bağımsız değişkenlerin dikkate alınan çıktılar üzerinde daha büyük etkisi olduğunu gösterir. Çizelge 4.1.'de görülebileceği gibi, S_w bağımsız değişkeni çeşitli dayanım ve rijitlik çıktıları için en önemli faktördür. Bununla birlikte A_w faktörü, bu bağımlı parametrelerin varyasyonları üzerinde daha az etkiye sahiptir. FA_w 'nin ise çeşitli dayanım ve rijitlik çıktıları üzerindeki etkisinin, dikkate alınan faktörler arasında minimum düzeyde olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.1.).

Optimizasyon fonksiyonlarını elde etmek için Ferreira (2001) tarafından sunulan gen ekspresyon programlama (GEP), kullanılmıştır ve her çıktı dikkate alınarak toplam altı model geliştirilmiştir (Çizelge 4.1.). GEP ile yapılan regresyon analizinde, hesaplama iterasyonlarındaki tüm girdi parametreleri dikkate alınmış ve oluşturulan fonksiyon dosyaları modellere dahil edilmiştir. GEP tabanlı modellerin regresyon analizleri, elde edilen R^2 değerlerinin 0.97-0.99 aralığında olduğunu göstermiştir. Yüksek derecedeki bu R^2 değer aralığı, gerçek veriler ile tahmin edilen dayanım ve rijitlik çıktıları arasında iyi düzeyde bir korelasyon olduğu anlamına gelmektedir.

Regresyon analizleriyle tahmin edilen veriler ve gerçek değerler, Şekil 4.16.'daki grafikte sunulmuştur. Gerçek ve tahmin edilen değerlerin neredeyse tam düz bir hat üzerinde olduğu görülmektedir. Tahmin edilen ve düzeltilen R^2 değerleri de her çıktı modeli için belirlenmiş olup benzer bir aralığı göstermektedir.



Şekil 4.16. Regresyon ile tahmin edilen ve gerçek değerler; (a) çimento ile stabilizasyon, (b) çimento ve uçucu kül ile 28 günlük kürleme sonucu stabilizasyon, (c) çimento ve uçucu kül ile 90 günlük kürleme sonucu stabilizasyon

Tahmin edilenlerin ve gerçek verilerin R^2 değerleri arasındaki farkın 0.2'den az olduğu belirlenmiştir ve bu durum verilerin makul bir uyum içinde olduğu anlamına gelmektedir. Her bir model için tahmin edilen artık hataların kareler toplamı da hesaplanmıştır. 0.011-18 aralığındaki bu küçük değerler, modellerin yeni deneylerdeki çıktıları iyi derecede tahmin edebileceğini göstermektedir.

4.5. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zeminin Deney Sonuçları için Varyans ve Regresyon Analizi

Bu çalışmada dikkate alınan faktörlerin (F_C ve F_L bağımsız değişkenleri) derin karıştırma yöntemine dayalı olarak çimento ve uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, üç noktalı eğilme dayanımı, şişme ve segregasyon çıktıları (bağımlı değişkenler) üzerinde etkisi olup olmadığı genel doğrusal model varyans analizi (GLM-ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.2., serbest basınç dayanımı, üç noktalı eğilme dayanımı, şişme ve segregasyon değerleri için Şekil 4.14.'te sunulan verilere dayanan ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Analizler, bağımsız değişkenlerin çıktılar üzerindeki istatistiksel anlamlılığını göstermek üzere her bağımlı değişken için %95 güven düzeyinde gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.2.).

Serbest basınç dayanımı, üç noktalı eğilme dayanımı, şişme ve segregasyon parametreleri bağımlı değişkenler olarak atanırken deneysel test parametreleri olan elyaf takviye oranı ve boyu (F_C ve F_L) bağımsız faktörler olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.2.'de gösterilen P-değerlerinin tümü, 0.05 değerinden küçük olduğundan

tüm faktörlerin, çıktılar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Faktörlerin serbest basınç dayanımı, üç noktalı eğilme dayanımı, segregasyon ve şişme çıktıları karşısında istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlendiğinden, bu çıktılar için tahmin modellerini geliştirmek üzere regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçları yorumlamak için elyaf takviyesiz karışımlarda olduğu gibi her bağımsız değişken için yüzde katkısı (PC_x), Taguchi yöntemi (örn. Ben-Gal, 2005; Algin, 2016) ile belirlenmiştir. (Çizelge 4.2.). Çizelge 4.2.'deki PC_x değerleri, hata terimiyle birlikte tüm faktörlerin katkı yüzdesi toplamının %100 olduğunu göstermektedir. Daha yüksek PC_x değerleri, bağımsız değişkenlerin incelenen bağımlı değişkenler üzerindeki daha büyük etkisini ifade etmektedir.

Çizelge 4.2. Elyaf takviyeli karışımlar için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Bağımlı Değişkenler	Varyasyon Kaynağı	İstatistiksel parametreler					Anlamlılık	Katkı (PC_x) (%)
		Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Top. (SS _x)	Ortalama Kare (MS _x)	F	P-değeri		
$q_{u(28)}$	F_L	2	0.0168	0.0084	23.92	<0.006	Evet	11.04
	F_C	2	0.1338	0.0669	190.78	<0.001	Evet	88.04
	Hata	4	0.0014	0.0004				0.92
$q_{u(28)}^{FA}$	F_L	2	0.0172	0.0086	6.99	<0.05	Evet	10.56
	F_C	2	0.1413	0.0706	57.27	<0.002	Evet	86.42
	Hata	4	0.0049	0.0012				3.02
f_{dmc}	F_L	2	0.076	0.038	62.56	<0.001	Evet	32.02
	F_C	2	0.1589	0.0795	130.83	<0.001	Evet	66.96
	Hata	4	0.0024	0.0006				1.02
f_{dmc}^{FA}	F_L	2	0.0862	0.0431	54.96	<0.034	Evet	35.37
	F_C	2	0.1544	0.0772	98.44	<0.002	Evet	63.35
	Hata	4	0.0031	0.0008				1.28
Segregasyon	F_L	2	0.3713	0.1856	15.01	<0.02	Evet	9.65
	F_C	2	3.4251	1.7125	138.48	<0.001	Evet	89.06
	Hata	4	0.0495	0.0124				1.29
Segregasyon ^{FA}	F_L	2	0.5501	0.275	21.35	<0.008	Evet	14.46
	F_C	2	3.2018	1.6009	124.26	<0.001	Evet	84.18
	Hata	4	0.0515	0.0129				1.36
Şişme	F_L	2	0.0266	0.0133	14.25	<0.02	Evet	10.88
	F_C	2	0.2141	0.107	114.68	<0.001	Evet	87.59
	Hata	4	0.0037	0.0009				1.53
Şişme ^{FA}	F_L	2	0.0242	0.0121	23.63	<0.007	Evet	9.64
	F_C	2	0.2244	0.1122	219.48	<0.001	Evet	89.54
	Hata	4	0.002	0.0005				0.82

(*) "FA" üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.

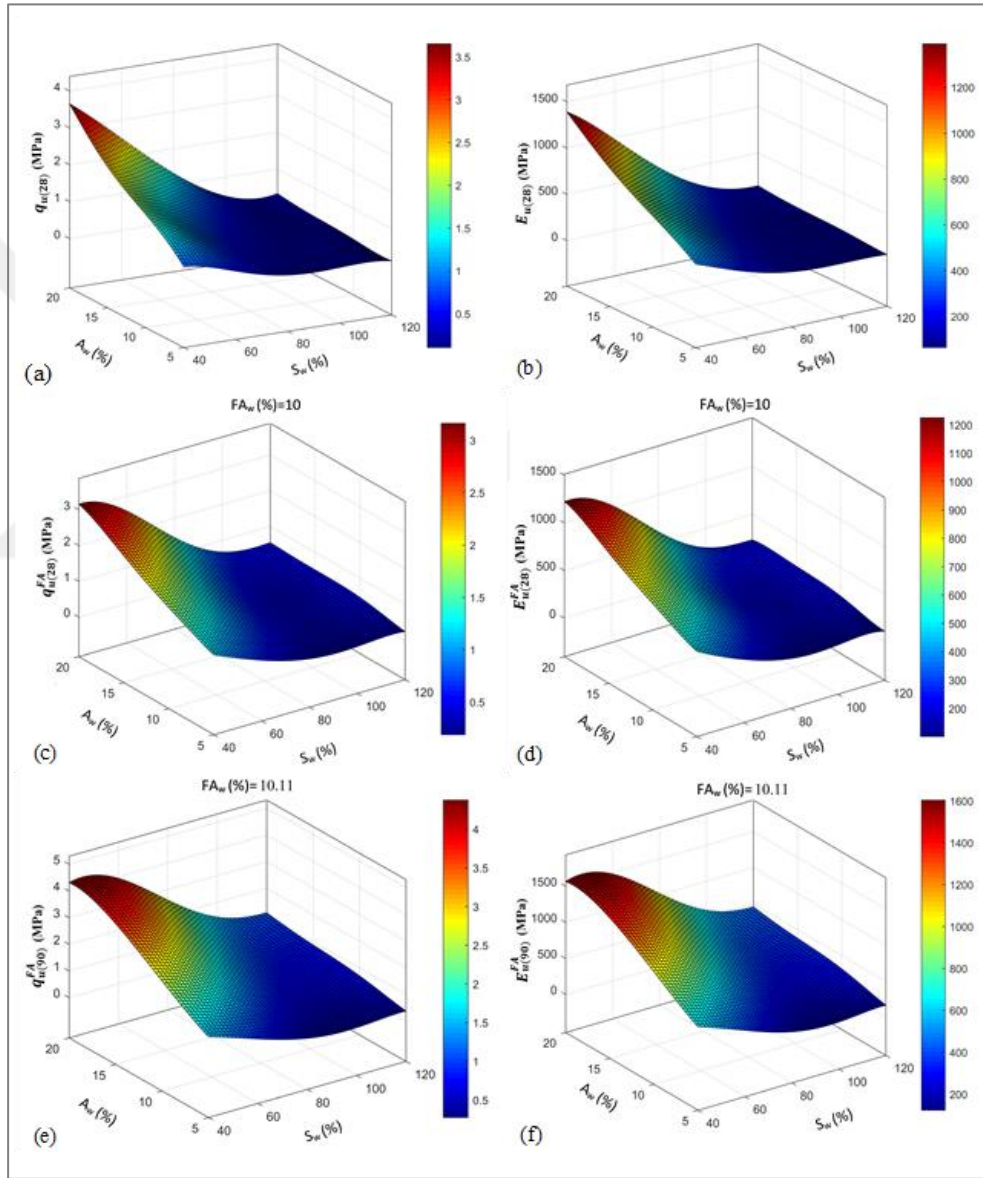
Çizelge 4.2.'de görülebileceği gibi, F_C bağımsız değişkeni tüm bağımlı değişkenler için en önemli faktördür. Bununla birlikte F_L faktörü, bu bağımlı parametrelerin varyasyonları üzerinde daha az etkiye sahiptir.

Elyaf takviyesiz uçucu kül katkılı numunelerde olduğu gibi optimizasyon fonksiyonlarını elde etmek için Ferreira (2001) tarafından sunulan gen ekspresyon programlama (GEP), kullanılmıştır ve her çıktı dikkate alınarak toplam sekiz model geliştirilmiştir (Çizelge 4.2.). Elyaf takviyeli uçucu kül katkılı numuneler için yüksek tahmin gücüne sahip doğrusal olmayan regresyon fonksiyonları oluşturulmuştur. GEP ile yapılan regresyon analizinde, hesaplama iterasyonlarındaki tüm girdi parametreleri dikkate alınmış ve oluşturulan fonksiyon dosyaları modellere dahil edilmiştir.

4.6. Elyaf Takviyesiz Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Optimizasyon Sonuçları

GAM kullanılarak gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon analizleri için bağımsız ve bağımlı değişkenler Çizelge 4.3.'te gösterilmiştir. Sunulan optimizasyonda, tüm çıktılar için eşit ağırlıklar kullanılmış ve eşit öncelikler tanımlanmıştır. Denklem 3.3'te tanımlanan arzu edilebilirliğin kompozit tekil değeri, elastisite modülüyle beraber Çizelge 4.3.'te verilen parametre aralığı boyunca maksimize edilmiştir. FHWA kılavuzu (Bruce ve ark., 2013) derin karıştırma örneklerinin 28 ve 56 günlük kürlenmesi sonucu elde edilen serbest basınç dayanımı tasarım değerini 0.7 ila 2.1 MPa aralığında önermiştir. Benzer şekilde, diğer uluslararası tasarım gücü değerleri yaklaşık 1 MPa'dır, örneğin Japonya'daki bazı uygulamalar ıslak yöntemler için 1 MPa ve kuru yöntemler için 0.5 MPa değerlerini hedefler, yatay kuvvet uygulanması durumunda bu değer 1 MPa olur (Terashi, 2005). FHWA aynı zamanda tipik tasarım gücünü zemin iyileştirme projeleri için 1 MPa, sıvılaştırma azaltma projeleri için 4 MPa olarak ifade etmektedir. Bu tasarım gücü değeri Tayland'daki araştırmalar tarafından da benimsenmiştir (Lorenzo ve Bergado, 2006). Buna göre, bu çalışmada optimizasyonlar, derin karıştırma örneklerinin her kürlenme periyodu için serbest basınç dayanımı değerlerinin iki hedefli tasarımı kullanılarak 1 MPa ve 2.1 MPa olarak gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon

problemde, dayanım çıktısı 1 MPa ve 2.1 MPa tasarım kısıtlamalarına (Çizelge 4.4.’teki sırasıyla Çözüm 1 ve Çözüm 2 setleri) ayrı ayrı hedeflenecek şekilde ayarlanmıştır. Bu kapsamda altı ayrı optimizasyon analizi yapılmıştır. Bu optimizasyon analizlerinden elde edilen en iyi sonuçlar Çizelge 4.4.’te sunulmuştur. Şekil 4.17.’de faktörlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini gösteren optimizasyon analizinden elde edilen 3B regresyon grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Faktörlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini gösteren 3B regresyon grafikleri; 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkısız numuneler (a-b), 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler (c-d), 90 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler (e-f)

Şekil 4.17. (a-b)'de 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkısız numuneler için faktörlerin sırasıyla serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkisi, Şekil 4.17. (c-d)'de 28 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler için faktörlerin sırasıyla serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkisi ve Şekil 4.17. (e-f)'de 90 gün kürlenmiş uçucu kül katkılı numuneler için faktörlerin sırasıyla serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerindeki etkisi sunulmuştur. Şekil 4.18., optimizasyon analizlerinden elde edilen kompozit arzu edilebilirlik varyasyonunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. Elyaf takviyesiz karışımlar için çok amaçlı optimizasyon problemi değişken tanımları

	Parametreler	Hedef	Alt Limit*	Üst Limit*
Faktörler	S_w	Serbest	40	120
	A_w	Serbest	5	20
	FA_w	Serbest	10	30
Çıktılar	$q_{u(28)}$	Hedefe odaklı	0.125	3.67
	$E_{u(28)}$	Maksimize	63.5	1402.5
	$q_{u(28)}^{FA}$	Hedefe odaklı	0.118	3.66
	$E_{u(28)}^{FA}$	Maksimize	61.09	1400.9
	$q_{u(90)}^{FA}$	Hedefe odaklı	0.121	6.22
	$E_{u(90)}^{FA}$	Maksimize	6.04	2048.27
	(*) Birimler faktörler için % çıktılar için MPa'dır.			

Çizelge 4.4.'te sunulan optimum çözümler, Çizelge 4.3.'te verilen üst ve alt sınırlar dahilindedir. Bu çözümler, Çizelge 4.4.'te gösterilen yaklaşık 0.9-0.95 arasında değişen yüksek arzu edilebilirlik değerlerine sahiptir. Elde edilen değerler, 1 MPa ve 2.1 MPa dayanım değerlerine uygun olarak Çizelge 4.3.'te sunulan hedeflere oldukça iyi bir biçimde ulaşıldığını göstermektedir. Şekil 4.18.'de, arzu edilebilirliğin dikkate alınan değişken aralıklarına uygun olarak Çizelge 4.4.'de verilen en iyi çözümleri de içeren bir biçimde çeşitlenmesi durumu, 3B bir grafik olarak sunulmuştur. Şekil 4.18. (a-c) ve Şekil 4.18. (d - e) sırasıyla, hedeflenen 1 MPa ve 2.1 MPa dayanım değerleri için üretilen çözümleri göstermektedir. Çizelge 4.4., bu çalışmada kullanılan tüm faktörler göz önünde bulundurularak, 1 MPa ve 2.1 MPa'lık hedeflenen basınç dayanımı değerleri için optimum sekant elastisite modüllerinin sırasıyla 425-435 MPa ve 846-863 MPa aralığında değiştiğini belirtmektedir. Ayrıca,

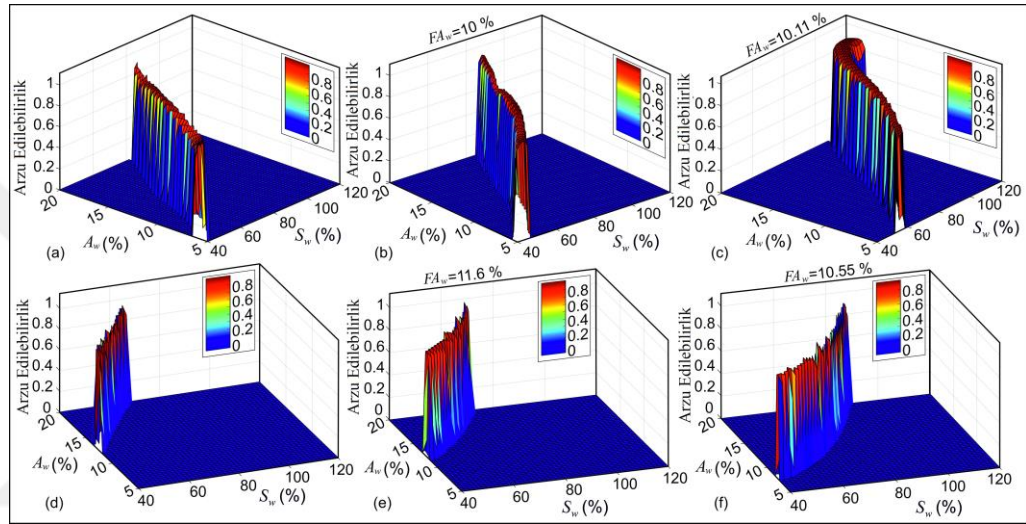
dikkate alınan parametre aralıklarında, 1 MPa ve 2.1 MPa olarak hedeflenen dayanım değerlerinde toplam su içeriği, çimento ve uçucu kül için yaklaşık optimum değerlerin sırasıyla (%45, %5 ve %10) ve (%40, %12 ve %12) olarak belirlendiği Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir. 90 gün boyunca kürlenmiş uçucu kül katkılı DKK malzemeleri dikkate alınarak yapılan optimizasyon çalışmasında, 1 MPa ve 2.1 MPa olarak hedeflenen dayanım değerlerinde toplam su içeriği, çimento ve uçucu kül için yaklaşık optimum değerlerin sırasıyla (%58, %5 ve %10) ve (% 40, %8 ve % 11) olduğu Çizelge 4.4.'te sunulmuştur. 28 gün boyunca kürlenmiş ve sadece çimento ile stabilize edilmiş doğal zeminin optimizasyon çalışması değerlendirildiğinde, hedeflenen 1 MPa ve 2.1 MPa dayanım değerlerinde toplam su içeriği ve çimento için yaklaşık optimum değerlerin sırasıyla (%40 ve %5) ve (%40 ve %13) olduğu görülebilir (Çizelge 4.4.).

Çizelge 4.4. Elyaf takviyesiz karışımlar için optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları

	Çıktılar	S_w	A_w	FA_w	Arzu Ed.	Priz Süresi (dk) başlangıç–bitiş	LL (%)	PL (%)	PI
Çözüm 1*	$q_{u(28)}$ 1.0	40.0	5.3	-	0.927	144–223	47.7	40.6	7.1
	$E_{u(28)}$ 435.0								
	$q_{u(28)}^{FA}$ 1.0	44.54	5.0	10.0	0.921	182–264	46.9	40.7	6.2
	$E_{u(28)}^{FA}$ 432.8								
	$q_{u(90)}^{FA}$ 1.0	58.28	5.22	10.11	0.896	277–357	46.8	40.9	5.9
	$E_{u(90)}^{FA}$ 425.0								
Çözüm 2*	$q_{u(28)}$ 2.1	40.0	12.7	-	0.954	123–198	46.6	40.8	5.8
	$E_{u(28)}$ 862.5								
	$q_{u(28)}^{FA}$ 2.1	40.0	12.1	11.6	0.936	134–207	46.4	40.6	5.8
	$E_{u(28)}^{FA}$ 851.9								
	$q_{u(90)}^{FA}$ 2.1	40.0	7.68	10.55	0.925	141–215	46.7	40.8	5.9
	$E_{u(90)}^{FA}$ 845.8								
(*) Birimler faktörler için % çıktılar için MPa'dır Çözüm 1 için hedef dayanım değeri $q_u=1$ MPa'dır. Çözüm 1 için hedef dayanım değeri $q_u=2.1$ MPa'dır.									

Bu çalışmada kullanılan optimizasyon algoritması Çizelge 4.3.'te verilen hedeflere 1 ve 2.1 MPa'lık dayanım değerlerini dikkate alarak ulaşmaya odaklanmıştır. Çizelge 4.4., bu optimizasyon analizlerinden elde edilen çözümleri göstermektedir. Hedef dayanımın 1 MPa olduğu durumda, sadece çimento katılan karışım için optimum su içeriği ve çimento oranı sırasıyla %40 ve %5.3 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.4.). Çimento ile birlikte, %10 uçucu kül içeren karışım için optimum su içeriği ve çimento oranı sırasıyla %44.54 ve %5 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül

ilavesi olan ve olmayan çözümler optimizasyon algoritması tarafından karşılaştırılarak aynı hedefe (1 MPa dayanım) ulaşmak için uçucu kül içeren karışımın optimum çimento oranı %5.3'ten %5'e düşürülmüş ve su içeriği %40'tan %44.54'e yükseltilmiştir. Her iki çözüm de farklı su içeriği değerleriyle aynı dayanıma sahiptir. Optimizasyon analizlerinden elde edilen bu alternatif çözümler, çimento ve uçucu kül içeren numunelerin dayanımının, aynı su muhtevasına sahip sadece çimento içeren numunelerin dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun çimento ve toplam su içeriği bakımından değişimi; hedeflenen serbest basınç dayanımı $q_u=1$ MPa için (a) çimentolu karışım (b) 28 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım (c) 90 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım. Hedeflenen serbest basınç dayanımı $q_u=2.1$ MPa için (d) çimentolu karışım (e) 28 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım, (f) 90 gün kürlenmiş çimento ve uçucu küllü karışım.

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının grafiksel sonuçlarının gösterildiği Şekil 4.18.'de aynı sonucu veren alternatif durumlar için çeşitli çözüm aralıkları sunulmuştur. Arzu edilebilirlik fonksiyonu bu kabul edilebilir aralıkları tanımlamak için kullanılmaktadır. Neredeyse eşdeğer arzu edilebilirlik değerlerine sahip ve her biri 0.85'ten yüksek olan bir dizi kabul edilebilir karışım oranı aralığı Şekil 4.18.'de gösterilmiştir. Arzu edilebilirlik düzeyi en yüksek olan ekonomik çözümler Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Uygulamada daha esnek çözümlerin kullanılmasına imkan sağlamak için, maliyet bu optimizasyon probleminde doğrudan bir çıktı olarak değerlendirilmemiştir. Maliyetin en etkili parametresi olan çimento dikkate alınarak

en iyi çözüm, maliyet-fayda değerlendirmesi yapılarak Şekil 4.18.'de verilen seçenekler arasından seçilebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Optimizasyon çözüm aralıkları, mevsimsel değişiklikler nedeniyle yeraltı suyu seviyesindeki artış, zeminin su içeriğindeki değişim gibi problemleri de dikkate alarak sunulmuştur. Örneğin, yeraltı suyu seviyesi nedeniyle yüksek su muhtevalarında çalışılması gereken durumlarda hedeflenen dayanım değerinin 1 MPa olması halinde, uçucu kül ilavesiz karışımlar için optimum su içeriği ve çimento oranı sırasıyla %80 ve %19 olarak hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, aynı durumda %10 uçucu kül içeren karışım için, optimum su içeriği ve çimento oranının sırasıyla %80 ve %15 olduğu Şekil 4.18.'de görülebilir. Böylece yüksek su içeriğine sahip durumlarda uçucu kül katkısının daha anlamlı bir hale geldiği anlaşılmaktadır.

Optimum karışımların akışkanlığını belirlemek için işlenebilirlik ve priz süresi deneyleri, bu çalışmadaki optimum karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Szymkiewicz ve ark. (2013) işlenebilirlik limitinin derin karıştırma malzemesinde likit limite eşit olduğunu ve derin karıştırma malzemesinin optimum su içeriğinin likit limit ve plastisite indisi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Optimum su içeriği, Szymkiewicz ve ark. (2013) tarafından sunulan aşağıdaki Denklem 4.1 kullanılarak elde edilebilir.

$$\text{Optimum } w/LL = 0.0464(PI) + 0.5621 \quad (4.1)$$

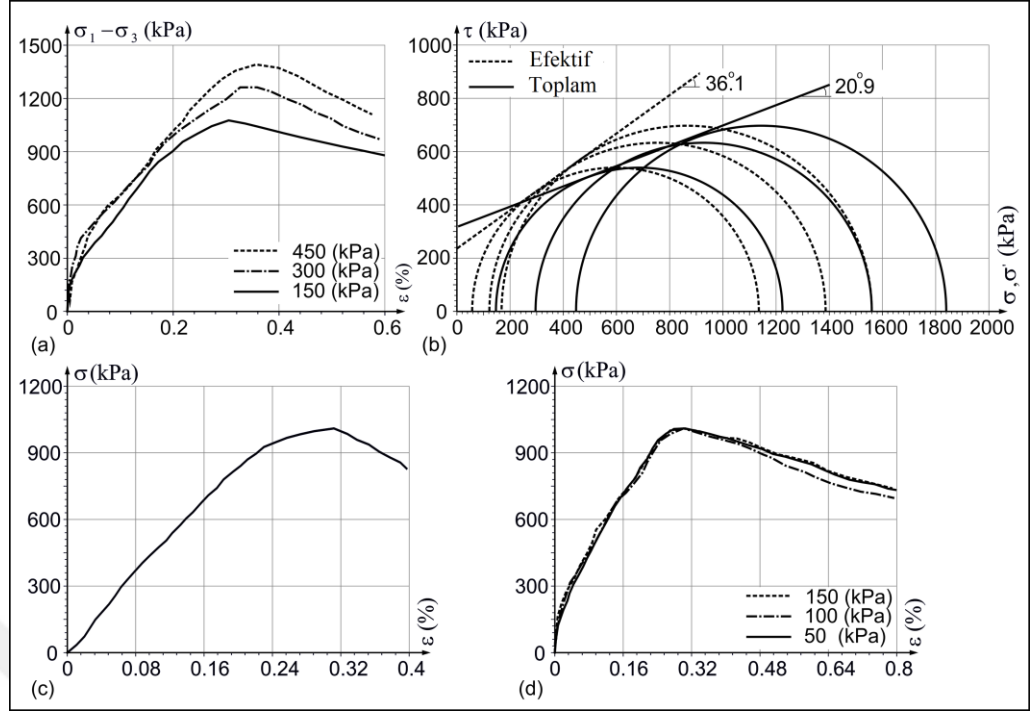
Bu çalışmada elde edilen optimum karışımlar için likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri belirlenmiş ve Çizelge 4.4.'te sunulmuştur. Teorik su içeriği değerleri, Denklem 4.1 ve Çizelge 4.4.'te verilen likit limit ve plastisite indisi değerlerinin göz önünde bulundurulması ile hesaplanmıştır. Optimum karışımların su içeriği ile hesaplanan teorik su içeriği arasındaki karşılaştırma uçucu kül katkısının işlenebilirliği arttırdığını ve tüm optimum karışımların işlenebilirlik için uygun olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.4.'te verilen optimum karışımların priz alma süresini belirlemek için ASTM C191-04b'ye göre Vicat testi yapılmıştır. Optimum karışımlar için elde edilmiş Çizelge 4.4.'te sunulan başlangıç ve bitiş priz süresi değerlerinin Güllü ve ark. (2017) tarafından yapılan araştırmanın sonuçları ile uyum sağladığı belirlenmiştir. Yapılan çalışma, uçucu kül ilavesinin başlangıç-bitiş priz süresi değerlerini arttırdığını ve tüm optimum karışımların priz süresi anlamında uygun olduğunu göstermiştir.

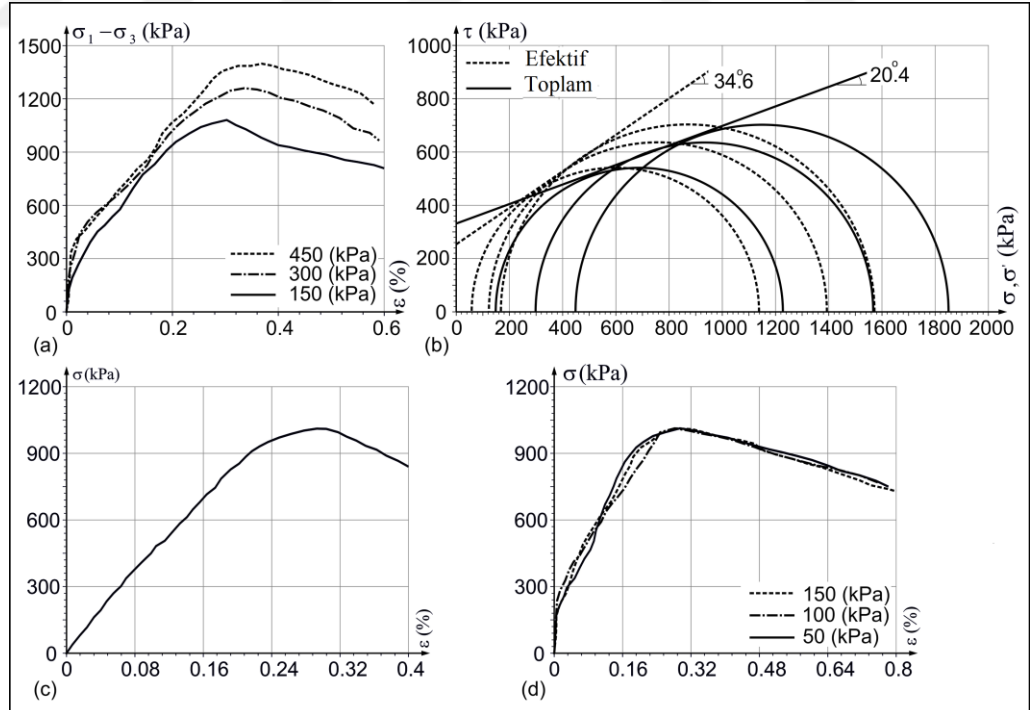
İşlenebilirlik ve priz süresi parametreleri bu doktora tez çalışmasındaki DKK karışımları için en az %40'luk toplam su içeriğinin (S_w) uygulanabilir olduğunu göstermiş olup Şekil 4.18.'de yer alan %40'tan yüksek su içeriğindeki çözümler, mevsimsel değişiklikler nedeniyle zeminin doğal su içeriğindeki artış ve yeraltı suyu seviyesinin yükselmesi gibi bazı özel durumlar için sunulmuştur.

Optimizasyon analizinde RSM'deki polinom modelinin kullanımı, daha önceki bazı çalışmalarda (örn. Aydar, 2018) vurgulandığı gibi, yüksek eğrilik derecesine sahip bazı sistemler için uyumsuz olabileceğinden bu çalışmada GAM için kullanıcı tanımlı fonksiyon modeli kullanılmıştır.

1 MPa dayanımın hedeflendiği $q_{u(28)}$ ve $q_{u(28)}^{FA}$ parametreleri için teorik olarak elde edilen ve Çizelge 4.4.'te sunulmuş optimum çözümler, gerçek durumda hedeflenen dayanımın ve maksimum rijitliğin sağlanıp sağlanmadığını belirlemek için yapılan bir dizi deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Aynı zemin için $S_w = \%40$ ve $A_w = \%5.3$ (Çizelge 4.4.'teki çözüm 1'de yer alan $q_{u(28)}$ için optimum çözüm) değerleri kullanılarak, örnekler aynı prosedürlerde ve deney koşullarında hazırlanmıştır. Yeterli sayıdaki numune 28 gün kürlendikten sonra aynı koşullarda test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Benzer şekilde $S_w = \%44.54$, $A_w = \%5$ ve $FA_w = \%10$ (Çizelge 4.4.'teki çözüm 1'de yer alan $q_{u(28)}^{FA}$ için optimum çözüm) değerleri kullanılarak örnekler hazırlanmış ve deneyler yapılmıştır. Bu optimum çözüm seçeneğinin sonuçları Şekil 4.20.'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar (Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.), optimizasyon algoritması tarafından önerilen su, çimento ve uçucu kül oranlarının hedeflenen 1 MPa dayanım ve maksimum elastisite modülü parametrelerini karşıladığını, böylece optimizasyonun doğrulandığını göstermektedir.



Şekil 4.19. Çizelge 4.4.'te sunulan çözümlerdeki oranlar dikkate alınarak sadece çimento ile iyileştirilmiş killi siltli kum ($S_w = \%40$ ve $A_w = \%5.3$) için 28 günlük kürlenme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi



Şekil 4.20. Çizelge 4.4.'te sunulan çözümlerdeki oranlar dikkate alınarak çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş killi siltli kum ($S_w = \%44.55$, $A_w = \%5$ ve $FA_w = \%10$) için 28 günlük kürlenme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi

4.7. Elyaf Takviyeli Uçucu Kül Katkılı İyileştirilmiş Zemin için Optimizasyon Sonuçları

Çizelge 4.4'te yer alan 1 MPa dayanımın hedeflendiği deneysel olarak doğrulanmış uçucu kül katkılı ve katkısız karışım oranları, arazi şartlarında üretilecek DKK'ların durumu gözetilerek kontrol karışımı olarak belirlenmiştir. Kontrol karışımlarına Bölüm 4.3.'te detaylıca anlatılan çeşitli boy ve oranlarda karbon elyaf takviyesi yapılmıştır. GAM kullanılarak Bölüm 4.3.'te sunulan karbon elyaf takviyeli deney sonuçlarının kullanılması ile gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon analizleri için bağımsız ve bağımlı değişkenler Çizelge 4.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Elyaf takviyeli karışımlar için çok amaçlı optimizasyon problemi değişken tanımları

	Parametreler	Hedef	Alt Limit*	Üst Limit*
Faktörler	F_L (mm)	Serbest	4	12
	F_C (%)	Minimize	0.1	0.8
	$q_{u(28)}$ (MPa)	Serbest	1.1	1.52
	$q_{u(28)}^{FA}$ (MPa)	Serbest	1.13	1.56
Çıktılar	f_{dmc} (MPa)	Maksimize	0.37	0.93
	f_{dmc}^{FA} (MPa)	Maksimize	0.37	0.93
	Segregasyon (%)	Minimize	5.65	7.68
	Segregasyon ^{FA} (%)	Minimize	5.81	7.95
	Şişme (%)	Minimize	1.36	1.9
	Şişme ^{FA} (%)	Minimize	1.33	1.86
	(*) "FA" üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.			

Sunulan optimizasyonun standart çözümünde tüm çıktılar için eşit ağırlıklar kullanılmış ve eşit öncelikler tanımlanmıştır. Arazi şartlarında üretilecek DKK'lar için karbon elyafın getirdiği maliyet nedeniyle yeni bir optimizasyon analizi yapmadan Çizelge 4.6.'da yer alan standart çözümdeki karbon elyafın minimizasyon ağırlığı artırılarak kullanılan optimizasyon algoritması aracılığıyla ekonomik çözüm alternatifi oluşturulmuştur. Ekonomik çözüm alternatifinde Çizelge 4.5.'te belirtilen hedef ve limit değerleri aynı şekilde kullanılmış olup standart çözümde yer alan su muhtevası, çimento ve uçucu kül oranları değiştirilmemiş, sadece kullanılan elyaf boy

ve oranında maliyeti düşürecek sınırlamalara gidilmiştir. Yalnızca elyaf takviyesi sınırlandırıldığından bu çalışmada arazi şartlarındaki DKK'lar için belirlenmiş 1 MPa'lık serbest basınç dayanım değerinin altına düşülmemiş ve işlenebilirlik, priz süresi gibi özelliklerde Çizelge 4.7.'de görüldüğü gibi karışımlar için bir probleme rastlanmamıştır. Optimizasyon algoritmasında ağırlık katsayısı değiştirilerek tek bir alternatif oluşturulduğu için ekonomik çözüm alternatifinde arzu edilebilirlik grafiği oluşturulmayıp çözüme özgü arzu edilebilirlik katsayıları Çizelge 4.7.'de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 4.21. ve 4.22.'de gösterilen optimizasyon çalışması sonucu oluşturulmuş üç boyutlu regresyon grafikleri hem standart hem de ekonomik çözüm verilerini kapsamaktadır. Denklem 3.3'te tanımlanan arzu edilebilirliğin kompozit tekil değeri, eğilme dayanımıyla beraber Çizelge 4.5.'te verilen parametre aralığı boyunca maksimize edilmiştir. Bu optimizasyon probleminde belirlenen hedefler ve sınırlar Çizelge 4.5.'te sunulmuştur. Standart çözüm için optimizasyon analizlerinden elde edilen en iyi sonuçlar Çizelge 4.6.'da, alternatif ekonomik çözüm için sonuçlar Çizelge 4.7.'de sunulmuştur. Şekil 4.23., standart optimizasyon analizlerinden elde edilen kompozit arzu edilebilirlik varyasyonunu göstermektedir ve Çizelge 4.6.'da verilen çözümleri içeren arzu edilebilirlik değerlerinin grafiklerini içermektedir. Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de sunulan optimum çözümler, Çizelge 4.5.'te verilen üst ve alt sınırlar dahilindedir.

Çizelge 4.6. Elyaf takviyeli karışımlar için standart optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları

Çıktılar	F_L (mm)	F_C (%)	Arzu Edilebilirlik	Priz Süresi (dk) Başlangıç–Bitiş	LL (%)	PL (%)	PI
$q_{u(28)}$ (MPa)	1.3	12	0.4	0.78	149–231	48.2	40.4
f_{dmc} (MPa)	0.8						
Segregasyon (%)	6.73						
Şişme (%)	1.57						
$q_{u(28)}^{FA}$ (MPa)	1.3	12	0.4	0.82	188–273	47.3	40.5
f_{dmc}^{FA} (MPa)	0.83						
Segregasyon ^{FA} (%)	6.78						
Şişme ^{FA} (%)	1.55						
(*) “FA” üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.							

(*) "FA" üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.

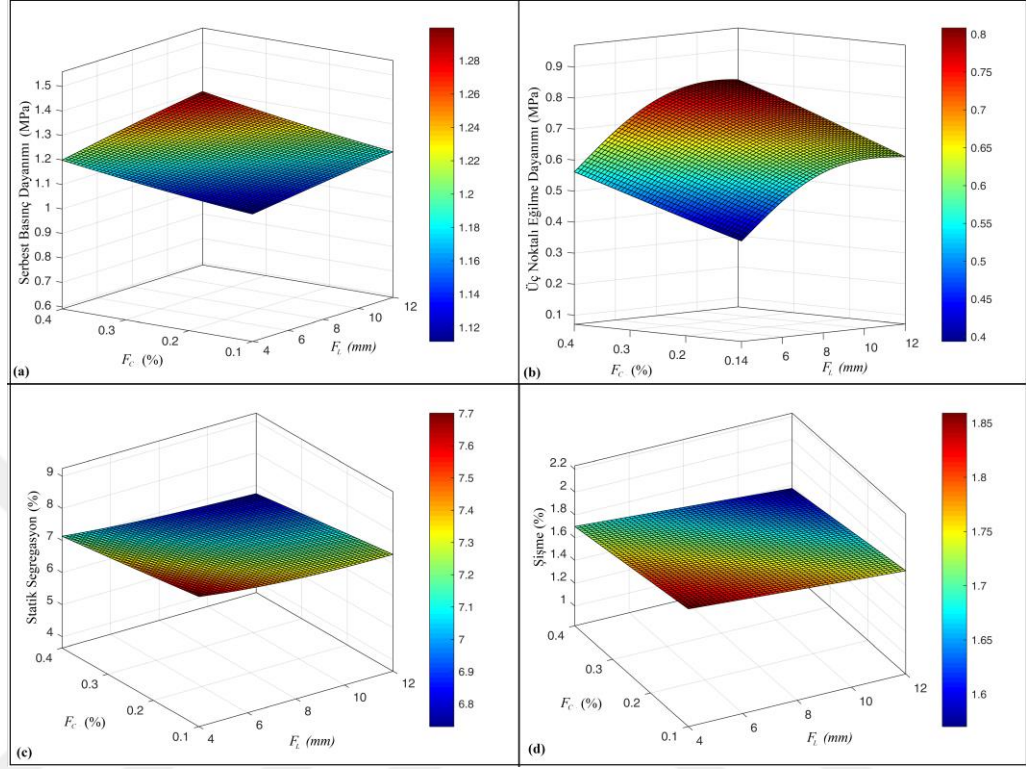
Çizelge 4.7. Elyaf takviyeli karışımlar için ekonomik optimizasyon analizi, işlenebilirlik ve priz süresi sonuçları

Çıktılar	F_L (mm)	F_C (%)	Arzu Edilebilirlik	Priz Süresi (dk) Başlangıç–Bitiş	LL (%)	PL (%)	PI
$q_{u(28)}$ (MPa)	1.1						
f_{dmc} (MPa)	0.38						
Segregasyon (%)	7.66	4	0.1	147–230	48	40.5	7.5
Şişme (%)	1.89						
$q_{u(28)}^{FA}$ (MPa)	1.13						
f_{dmc}^{FA} (MPa)	0.382						
Segregasyon ^{FA} (%)	7.93	4	0.1	185–271	47.1	40.6	6.5
Şişme ^{FA} (%)	1.85						

(*) "FA" üst simgesi ilgili numunelerin uçucu kül katkılı olduğunu ifade etmektedir.
(**) Bu optimizasyon analizinde elyaf kullanımı, ağırlık katsayılarıyla standart duruma göre düşürülmüştür.
(***) Arzu edilebilirlik değerleri ağırlık katsayısına göre optimizasyon algoritması tarafından revize edilmiştir.

Çizelge 4.6. ve 4.7.'de gösterilen arzu edilebilirlik değerleri, Çizelge 4.5.'te sunulan hedeflere iyi bir biçimde ulaşıldığını göstermektedir. Ekonomik çözümde arzu edilebilirlik değerlerinin standart çözüme göre daha düşük olmasının sebebi elyaf kullanımı için minimizasyon ağırlık katsayısının artırılmasıdır. Sunulan standart çözüm ekonomiklik ile araştırılan parametreleri iyi derecede iyileştirme dengesini sağlamaktayken alternatif ekonomik çözüm maliyeti azaltmayı ön planda tutarak araştırılan parametreleri bu çalışma için yeterli derecede iyileştirmiştir. Dolayısı ile standart çözüm genel projeler için iyi bir öneri sunarken maliyetin ağırlıklı olarak sınırlandırılması gereken durumlarda ekonomik çözüm uygulanabilir. Bu çalışmada Çizelge 4.7.'de sunulan ekonomik çözüm alternatifi DKK üretimi için uygun bulunduğundan arazi şartlarında elyaf takviyeli olarak üretilen iki DKK için de uygulanmıştır. Tüm çözümlerde uçucu kül ilaveli karışımların arzu edilebilirlik değerlerinin uçucu kül ilavesiz karışımlara göre daha yüksek olması, istenilen çözüme uçucu kül katkılı karışımlarda daha çok yaklaşıldığını göstermiştir. Şekil 4.21. (a-d)'de, uçucu kül içermeyen numuneler için faktörlerin (F_C ve F_L), çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri sunulmuştur. Şekil 4.22. (a-d)'de ise uçucu kül katkılı numuneler için faktörlerin (F_C ve F_L), çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri gösterilmiştir. Dikkate alınan bağımlı değişkenlere göre, optimum faktör değerlerinin hem uçucu kül ilaveli hem de uçucu kül ilavesiz numuneler için standart çözümde F_C =%0.4 ve F_L =12 mm, ekonomik çözümde F_C =%0.1 ve F_L =4 mm olarak belirlendiği sırasıyla Çizelge 4.6. ve Çizelge

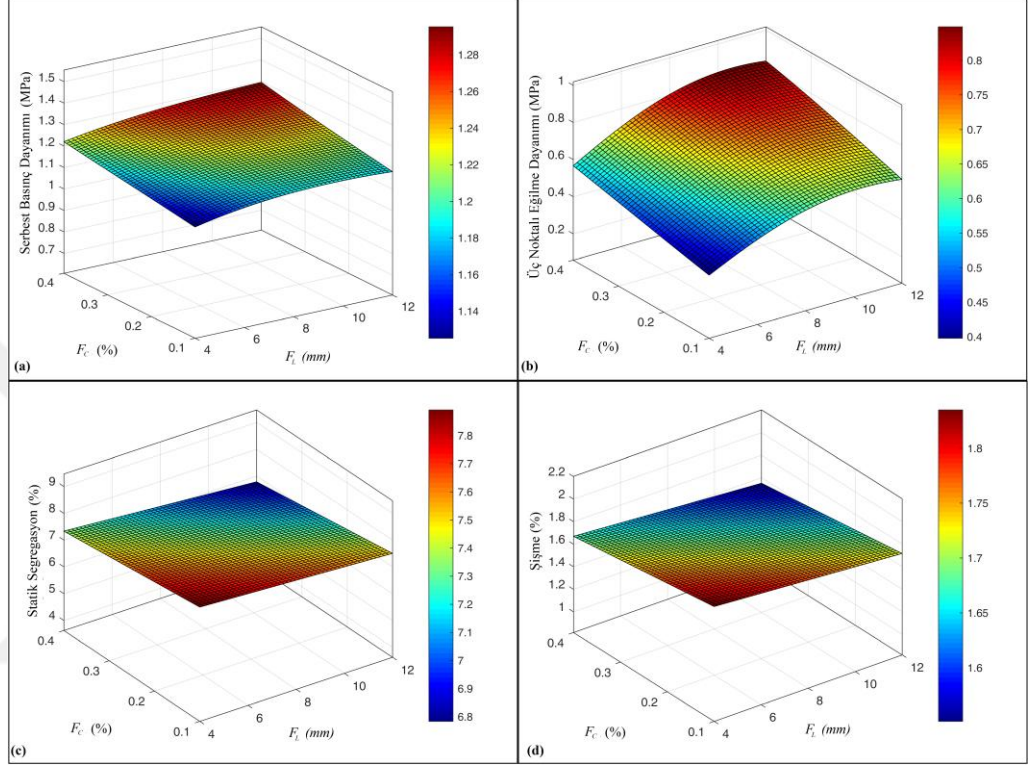
4.7.'de gösterilmiştir. Bu faktör değerlerine karşılık gelen bağımlı değişken ve arzu edilebilirlik değerleri de Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de sunulmuştur.



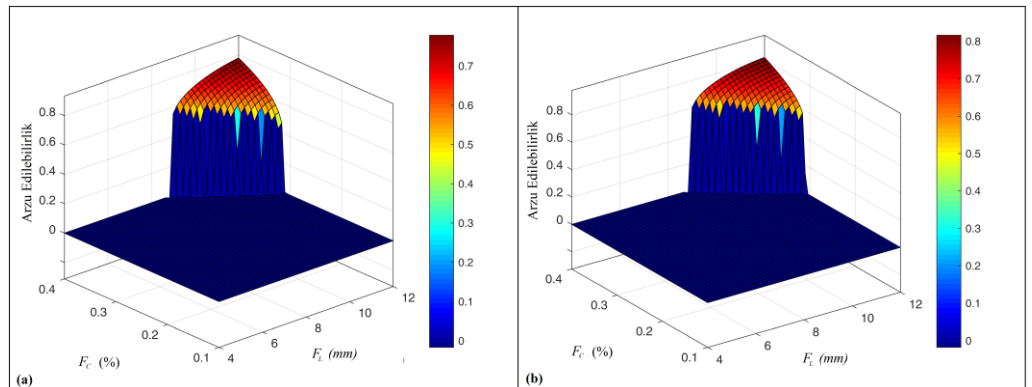
Şekil 4.21. Uçucu kül içermeyen elyaf takviyeli numuneler için faktörlerin (F_C ve F_L) çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri; (a) serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$), (b) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (c) statik segregasyon yüzdesi, (d) şişme yüzdesi

Kontrol karışımına ekonomik çözümdeki F_C =%0.1 oranında ve F_L =4 mm boyundaki karbon elyaf eklenerek üretilen numunelere elyaf takviyesiz kontrol numunelerinde olduğu gibi serbest basınç ve üç eksenli deneyleri uygulanmıştır. Böylece arazi şartlarında üretilecek tüm DKK'ların laboratuvar numunelerine, üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde veri girişi için ihtiyaç duyulacak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.24. ve 4.25.'te gösterilmiştir. Optimizasyon algoritmasının F_C ve F_L faktörlerine karşılık olarak belirlediği Çizelge 4.6.'da sunulan serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$), üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), şişme yüzdesi ve segregasyon yüzdesi sonuçları Şekil 4.14.'te gösterilen deneysel veriler ile oldukça uyumludur. Bu durum optimizasyon uygulamasının kullandığı veri tahmin fonksiyonunu doğrulamaktadır.

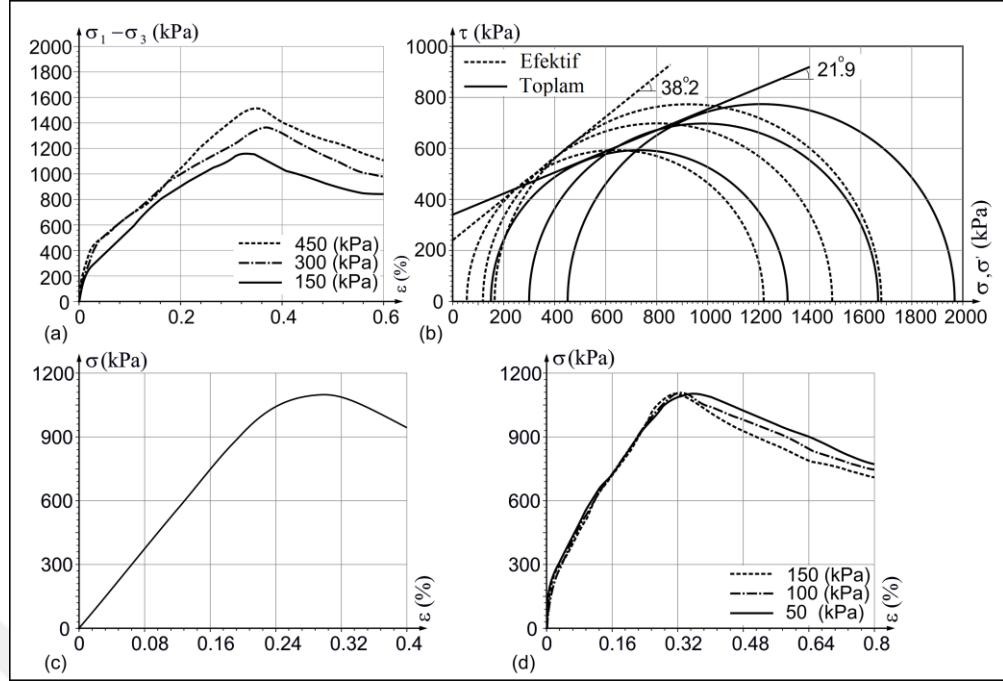
Optimizasyon sonuçları elde edildikten sonra optimum karışımların akışkanlığını belirlemek için işlenebilirlik ve priz süresi deneyleri, bu çalışmadaki optimum karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.6. ve 4.7.'de verilmiştir.



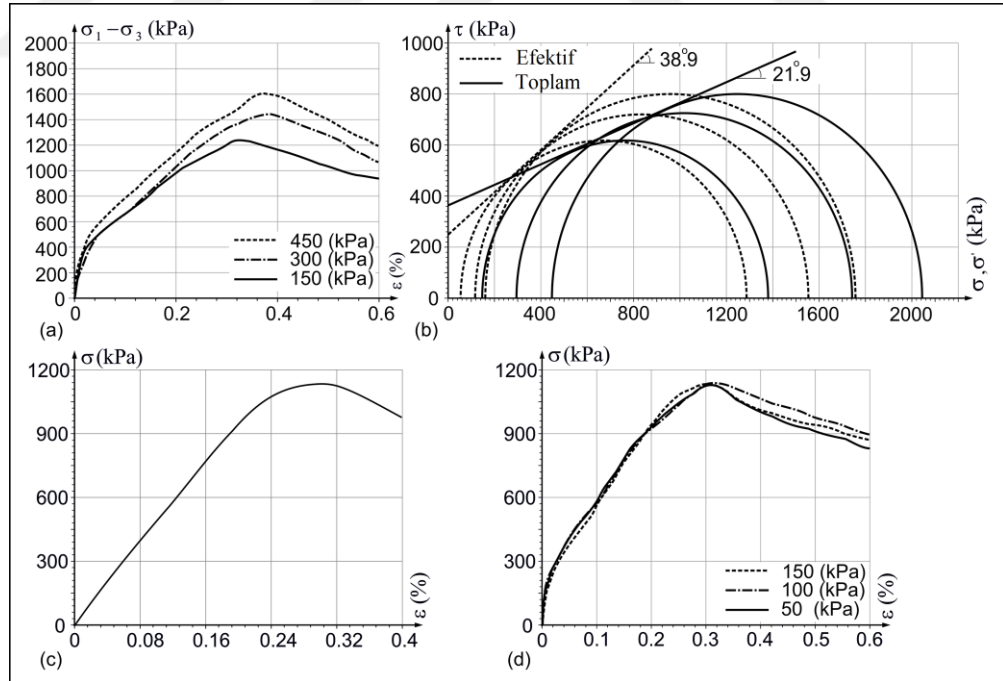
Şekil 4.22. Uçucu kül katkılı elyaf takviyeli numuneler için faktörlerin (F_c ve F_L) çıktılar üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu regresyon grafikleri; (a) serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$), (b) üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), (c) statik segregasyon yüzdesi, (d) şişme yüzdesi



Şekil 4.23. Standart çözüm için optimizasyon analizlerinden faktörlere bağlı olarak elde edilen kompozit arzu edilebilirlik grafikleri; (a) uçucu kül katkısız numuneler (b) uçucu kül katkılı numuneler



Şekil 4.24. Çizelge 4.7.'de sunulan ekonomik çözümdeki oranlar dikkate alınarak çimento ile iyileştirilmiş ($S_w = \%40$ ve $A_w = \%5.3$) elyaf takviyeli ($F_c = \%0.1$ ve $F_L = 4$ mm) killi siltli kum için 28 günlük kürlenme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi



Şekil 4.25. Çizelge 4.7.'de sunulan ekonomik çözümdeki oranlar dikkate alınarak çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmiş ($S_w = \%44.55$, $A_w = \%5$ ve $FA_w = \%10$) elyaf takviyeli ($F_c = \%0.1$ ve $F_L = 4$ mm) killi siltli kum için 28 günlük kürlenme sonrası elde edilen deney sonuçları; (a, b) CIU üç eksenli deneyi; (c) serbest basınç deneyi; (d) UU üç eksenli deneyi

İşlenebilirlik ve priz süresi deneyleri, elyaf takviyesiz karışımlarda dikkate alınan prosedür takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Optimum su içeriği, Denklem 4.1 kullanılarak elde edilmiştir. Sunulan çalışmada, uçucu kül ilavesinin elyaf takviyesiyle birlikte kullanımının başlangıç-bitiş priz süresi değerlerini arttırdığı ve tüm optimum karışımların işlenebilirlik ve priz süresi anlamında uygun olduğu belirlenmiştir.

4.8. Arazi Testleri ve DKK Yükleme Testi Sonuçları

Zemini modellemek için gereken arazi testlerinden elde edilen verilere ve DKK yükleme test sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. Bölüm 3.2.4.'te detaylıca anlatılan ve Şekil 3.15.'teki arazi plan görünümünde konumları gösterilen SK1-SK3 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları Çizelge 4.8.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. SK1-SK3 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları

Kuyu No	Y	X	YASS (m)	Derinlik	N ₆₀
SK-1	488567,87	4114710,22	3,85	1.50	30.00
				3.00	28.00
				4.50	33.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-2	488577,87	4114710,22	3,80	1.50	26.00
				3.00	40.00
				4.50	33.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-3	488587,87	4114710,22	3,80	1.50	32.00
				3.00	33.00
				4.50	33.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00

SK4-SK6 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları Çizelge 4.9.'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. SK4-SK6 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları

Kuyu No	Y	X	YASS (m)	Derinlik	N ₆₀
SK-4	488567,87	4114700,22	3,70	1.50	29.00
				3.00	32.00
				4.50	53.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-5	488577,87	4114700,22	3,70	1.50	30.00
				3.00	23.00
				4.50	33.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-6	488587,87	4114700,22	3,70	1.50	30.00
				3.00	27.00
				4.50	33.00
				6.00	33.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00

Yer altı suyu seviyesi belirlenirken çok sayıda ölçüm yapılarak stabil durumun oluşması beklenmiştir. Tüm sondaj noktalarında bu uygulama yapılmıştır. Böylece her sondaj noktasında stabil durumdaki yer altı suyu seviyesi belirlenmiştir.

Koordinatlar hassas GPS cihazı ile belirlenmiştir. Bu çalışmada kodlanan yazılım, üç boyutlu litolojik model oluştururken evrensel enlem merkatörü (UTM) sistemini dikkate aldığından elde edilen koordinatlar evrensel enlem merkatörü (UTM) sisteminde kaydedilmiştir ve koordinatlar birbirinden çıkarıldığında metre cinsinden uzaklık elde edilmektedir. SK7-SK9 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları Çizelge 4.10.'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. SK7-SK9 sondaj noktalarındaki SPT sonuçları

Kuyu No	Y	X	YASS (m)	Derinlik	N ₆₀
SK-7	488567,87	4114690,22	3,50	1.50	40.00
				3.00	37.00
				4.50	42.00
				6.00	23.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-8	488577,87	4114690,22	3,50	1.50	30.00
				3.00	32.00
				4.50	44.00
				6.00	51.00
				7.50	33.00
				9.00	33.00
				10.50	33.00
				12.00	33.00
				13.50	33.00
				15.00	33.00
SK-9	488587,87	4114690,22	3,60	1.50	33.00
				3.00	32.00
				4.50	32.00
				6.00	32.00
				7.50	32.00
				9.00	32.00
				10.50	32.00
				12.00	32.00
				13.50	32.00
				15.00	32.00

Açılan sondaj kuyularından 2 ile 5 metre arasında uygun noktalardan alınan örselenmemiş numuneler laboratuvara götürülerek çeşitli deneylere (elek analizi, ıslak analiz, plastik ve likit limit, su muhtevası, birim hacim ağırlık, özgül yoğunluk, serbest basınç dayanımı, üç eksenli UU ve CU deneyleri, konsolidasyon ve şişme deneyi) tabi tutulmuştur. Bu deneylerden elde edilen veriler SPT sonuçlarıyla beraber değerlendirilerek üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Çizelge 4.11.'de tüm sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numunelerin Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde (USCS) zemini kategorize etmek için gerekli olan elek analizi ve ıslak analiz deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.11. Elek analizi ve ıslak analiz sonuçları

Kuyu	4 nolu elekten geçen (%)	200 nolu elekten geçen (%)	200 nolu elek altı zeminin kil oranı (%)	200 nolu elek altı zeminin silt oranı (%)
SK1	100	37,14	44,24	55,76
SK2	87	27,15	39,71	60,29
SK3	100	34,25	38,75	61,25
SK4	100	36,55	51,14	48,86
SK5	100	36,29	44,89	55,11
SK6	100	53,24	51,48	48,52
SK7	100	35,48	40,17	59,83
SK8	100	34,79	41,19	58,81
SK9	100	36,57	50,49	49,51

Çizelge 4.12.'de tüm sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numuneler için likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI) ve USCS zemin sınıfı değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI) ve USCS zemin sınıfı değerleri

Kuyu	LL (%)	PL (%)	PI (%)	USCS Zemin Sınıfı
SK1	56,73	32,98	23,75	SM
SK2	57,28	33,84	23,44	SM
SK3	56,23	32,78	23,45	SM
SK4	55,84	27,73	28,11	SC
SK5	57,82	33,99	23,83	SM
SK6	54,89	25,07	29,82	CH
SK7	57,19	33,71	23,48	SM
SK8	57,77	33,93	23,84	SM
SK9	55,33	27,23	28,1	SC

Çizelge 4.13.'te tüm sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numuneler için doğal su muhtevası (w_n) (Numunelerin araziden laboratuvar ortamına götürülmesi sürecinde mevcut su içeriğini kaybetmemesi için gerekli önlemler alınmıştır.), birim hacim ağırlık (γ_n) ve özgül yoğunluk (GS) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.13. Doğal su muhtevası, birim hacim ağırlık ve özgül yoğunluk değerleri

Kuyu	w_n (%)	γ_n (kN/m ³)	GS
SK1	23,45	18,19	2,69
SK2	14,24	18,21	2,69
SK3	21,95	18,24	2,69
SK4	18,22	18,02	2,67
SK5	16,18	18,18	2,69
SK6	19,87	18,12	2,68
SK7	17,92	18,24	2,69
SK8	25,84	18,24	2,69
SK9	20,83	18,02	2,67

Çizelge 4.14.'te tüm sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numuneler için serbest basınç dayanımı (q_u), drenajsız kayma mukavemeti (s_u), üç eksenli CU deneyi sonucunda elde edilen efektif kayma mukavemeti (c_u) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.14. Serbest basınç ve üç eksenli CU deney sonuçları

Kuyu	q_u (kPa)	s_u (kPa)	c_u (kPa)	ϕ°
SK1	146,34	73,17	24,4	30,98
SK2	165,13	82,565	24,58	32,87
SK3	162,62	81,31	24,29	32,89
SK4	153,05	76,525	18,35	30,21
SK5	143,81	71,905	23,99	32,25
SK6	160,9	80,45	26,87	24,58
SK7	190,16	95,08	25,11	33,76
SK8	155,38	77,69	24,48	31,11
SK9	161,37	80,685	18,41	31,69

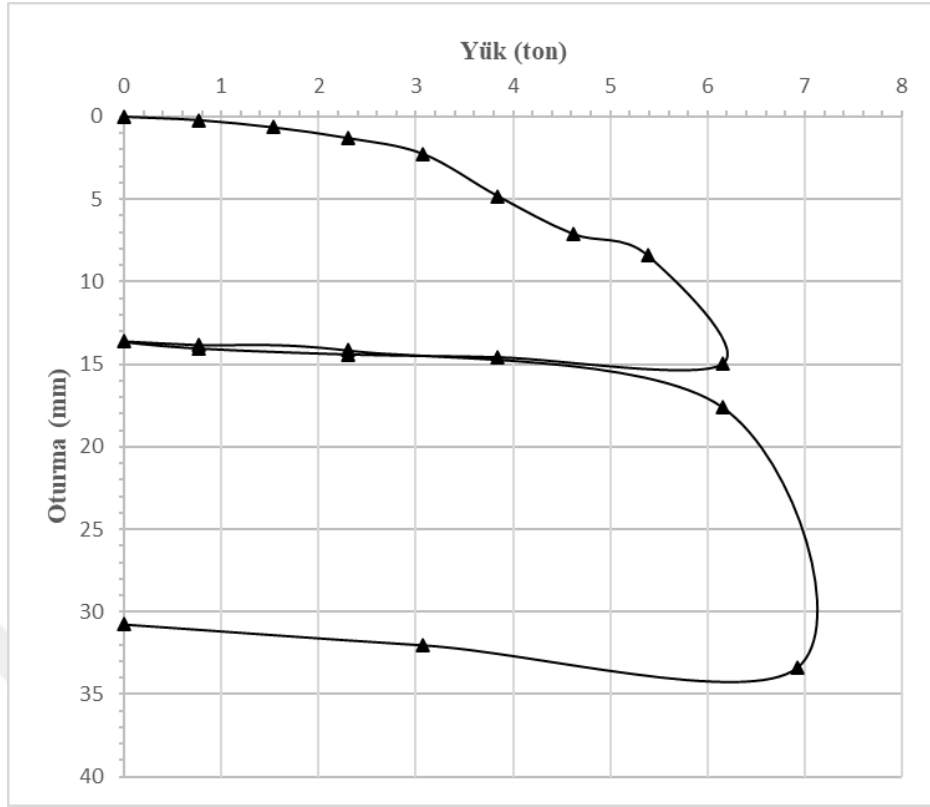
Çizelge 4.15.'te tüm sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numuneler için konsolidasyon deneyinden elde edilen sıkışma indisi (C_c), kabarma indisi (C_s), ön konsolidasyon basıncı (σ_p) parametreleri ve şişme deneyi sonucu bulunan zeminin şişme yüzdesi değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.15. Konsolidasyon ve şişme deneyinin sonuçları

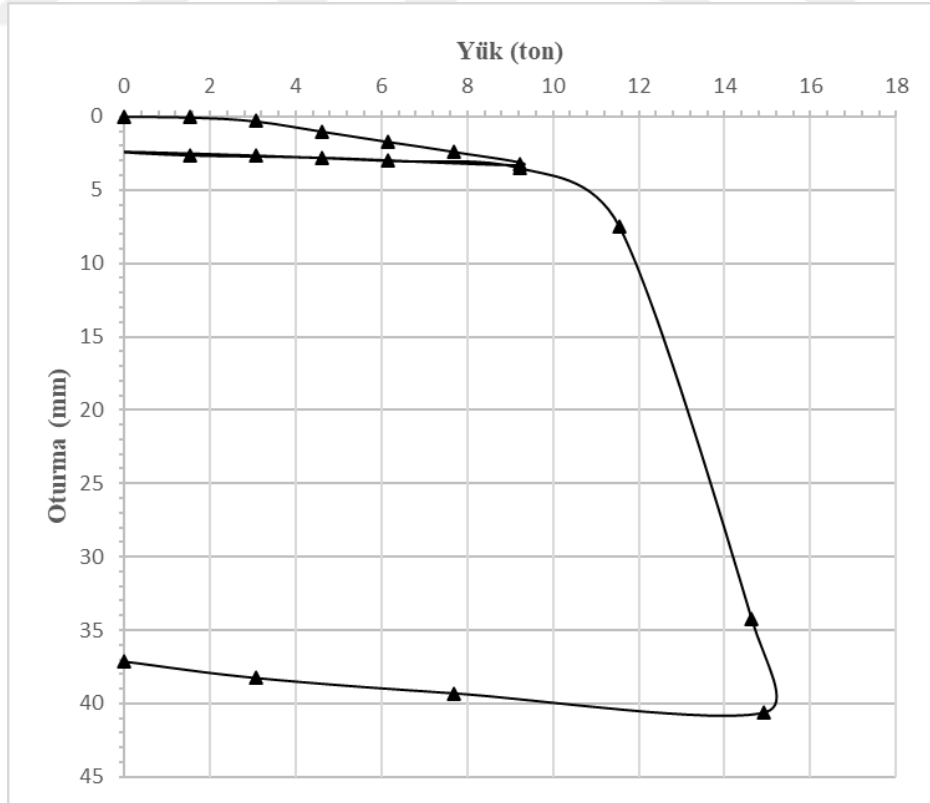
Kuyu	C_c	C_s	σ_p (kPa)	Şişme (%)
SK1	0,0469	0,0091	77,949	3,6
SK2	0,0467	0,0104	79,974	3,7
SK3	0,0462	0,0082	76,611	3,4
SK4	0,0481	0,0063	79,717	3,1
SK5	0,0529	0,0104	80,125	3,7
SK6	0,0489	0,0083	82,013	3,4
SK7	0,0499	0,0082	80,324	3,4
SK8	0,0477	0,0065	82,113	3,1
SK9	0,0449	0,0063	79,841	3,1

Çizelge 4.11.-4.15.'te sunulan tüm deney sonuçları standart penetrasyon testi (SPT) sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirilen deneyler ile arazi şartlarında yapılan standart penetrasyon testinden (SPT) elde edilen verilerin dikkate alınmasıyla üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modeli için yazılıma tanıtılması gereken girdi parametrelerinin arazi durumunu gerçekçi şekilde yansıtmaları sağlanmıştır.

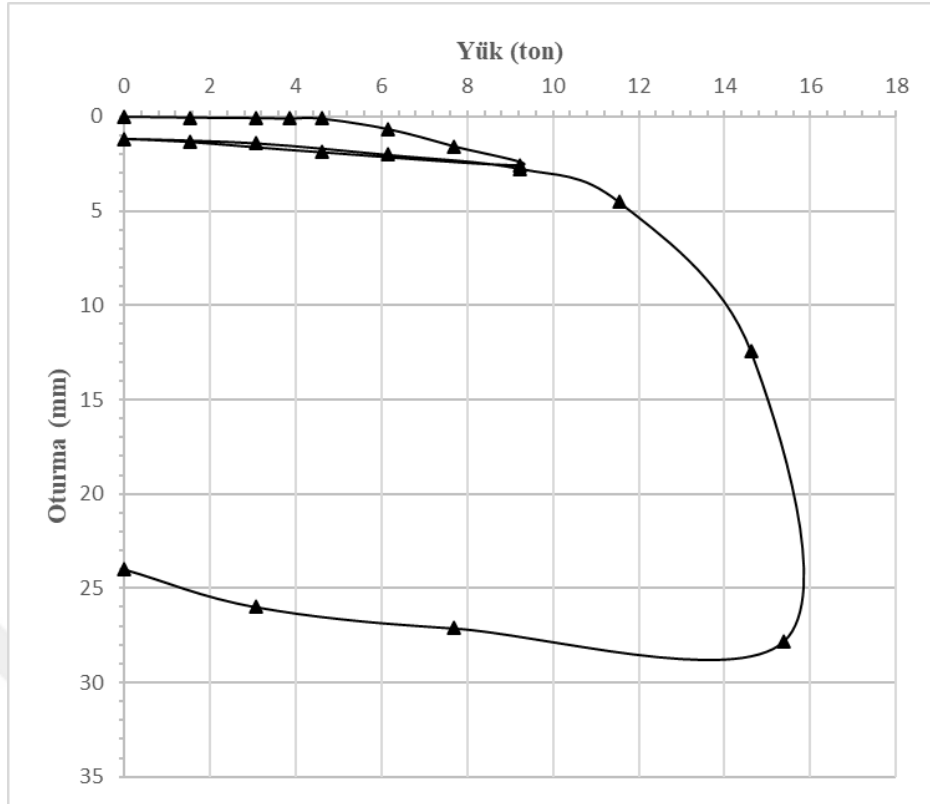
Bölüm 3.2.5. te anlatılan şekilde üretimi tamamlanan DKK'lar üzerinde Bölüm 3.2.6.'da detayları sunulan yükleme testleri ASTM D 1143 standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.5.'te belirtilen DKK üretim şekillerinde yalnızca DKK1 için optimizasyon fonksiyonuna göre belirlenen dinamik karışım yöntemi uygulanmamış olup tek karışım hesabıyla üretim yapılmıştır. Bu yöntem ile üretim şeklinin DKK'nın taşıyabileceği yük üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Çizelge 3.5.'te belirtilen harç içerikleri Şekil 4.19.-4.20. ve Şekil 4.24.-4 25.'te gösterilen tüm laboratuvar deneyleri tamamlanmış numunelere göre belirlenmiştir. Böylece arazi şartlarında üretilecek DKK'ların hem laboratuvar şartlarında simülasyonu yapılmış hem de sonlu elemanlar modelinde ihtiyaç duyulacak parametreleri elde edilmiştir. Şekil 4.26.-4.29.'da DKK1-DKK4 için sırasıyla yükleme testi sonuçları sunulmuştur.



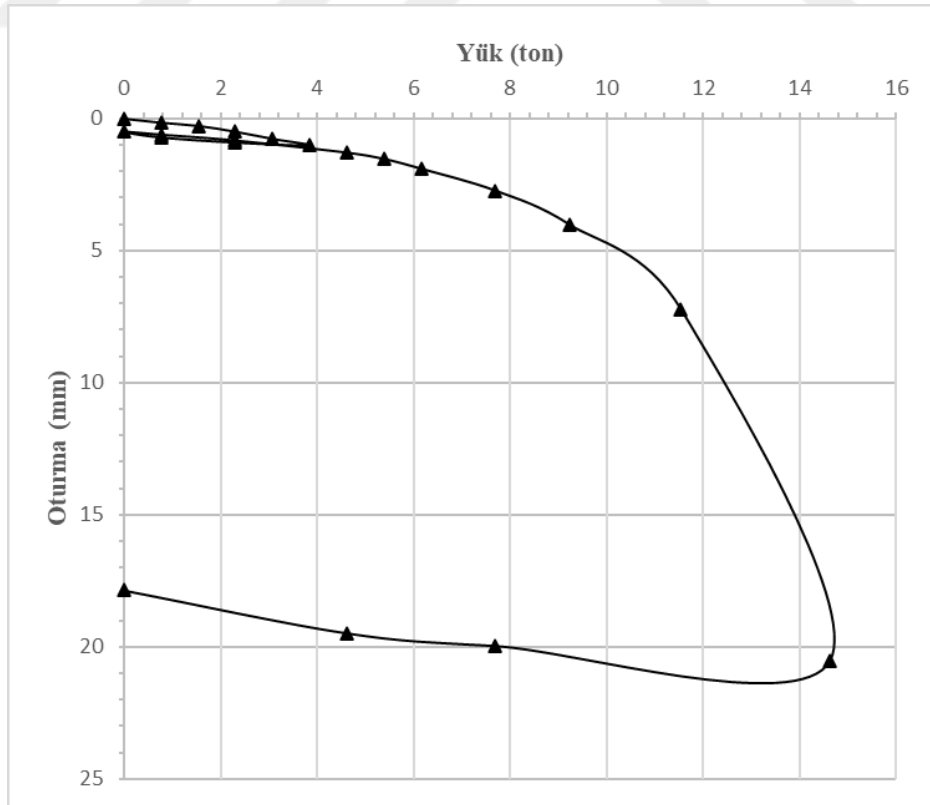
Şekil 4.26. DKK1 yükleme testi sonucu



Şekil 4.27. DKK2 yükleme testi sonucu



Şekil 4.28. DKK3 yükleme testi sonucu



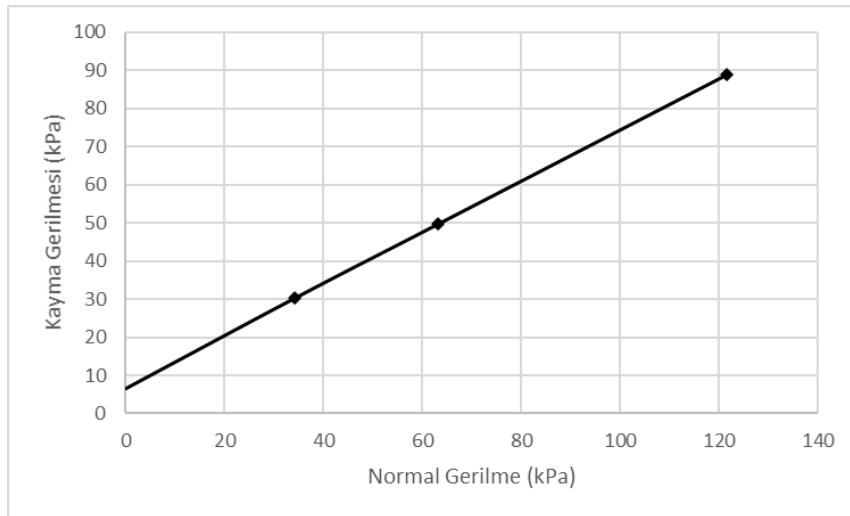
Şekil 4.29. DKK4 yükleme testi sonucu

Şekil 4.26.-4.29.'da görüldüğü üzere belirlenen noktalarda yükleme-boşaltma işlemleri gerçekleştirilerek yükleme testleri tamamlanmıştır. En yüksek dayanımı yaklaşık 15.4 ton taşıyan uçucu kül katkılı elyaf takviyeli DKK3 sağlamıştır (Şekil 4.28.). DKK3'ün ardından büyükten küçüğe yük taşıma kapasitesi sırasıyla DKK2, DKK4 ve DKK1 şeklinde olmuştur. Bu sıralama Şekil 4.19.-4.20. ve Şekil 4.24.-4.25.'te sunulan laboratuvar deney sonuçları ile uyumuştur.

DKK1 aynı harç içeriği ile aynı oranlarda dinamik karışım yöntemiyle hazırlanan DKK4'e göre oldukça az yük taşımıştır. Bunun sebebi Çizelge 3.5.'te belirtilen DKK üretim şekillerinde DKK1 için optimizasyon fonksiyonuna göre belirlenen dinamik karışım yönteminin uygulanmamış olmasıdır. Optimizasyon fonksiyonu dikkate alınarak dinamik karışım oranıyla DKK üretiminin yaklaşık %53 daha fazla dayanım sağladığı belirlenmiştir. Böylece optimizasyon fonksiyonuna göre dinamik karışım uygulayarak DKK üretiminin önemi görülmüştür.

4.9. DKK-Zemin Arayüz Sürtünme Katsayısı Deney Sonuçları

Bölüm 3.2.7.'de detaylıca anlatılan yöntem ile ASTM D3080/D3080M-11 standardına uygun olarak deneyler tamamlanmış ve sonlu elemanlar modelinde ihtiyaç duyulacak DKK-zemin arayüz sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.30.'da kesme kutusu testinden elde edilen gerilmeler sunulmuştur.



Şekil 4.30. Kesme kutusu testinden elde edilen gerilmeler

Şekil 4.30.'da sunulan grafikten yararlanarak DKK-zemin arası arayüz sürtünme açısı yaklaşık 34.04° olarak elde edilmiştir. Bu açının tanjantı olan 0.6755 değeri DKK-zemin arayüz sürtünme katsayısı olarak belirlenmiştir. Arazi şartlarında üretilen dört farklı DKK için de laboratuvarında bu test gerçekleştirilmiş ve her test için bu katsayı yaklaşık 0.6755 civarında elde edildiğinden tüm DKK-zemin arayüz gerilmelerini ifade eden Şekil 4.30.'da sunulan grafik oluşturulmuştur. Bu çalışmadaki DKK'ların malzeme içeriğindeki farklılığın arayüz sürtünme katsayısı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlendiğinden 0.6755 değeri bu çalışmanın sonlu elemanlar modelinde tüm DKK'lar ile zemin arasındaki arayüz sürtünme katsayısı olarak kullanılmıştır.

4.10. Üç Boyutlu Litolojik Hassas Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Bölüm 3.2.8.'de detaylıca anlatıldığı gibi bu tez çalışmasında geliştirilen yazılım sayesinde literatürde ilk defa üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilmiştir. Çizelge 4.16.'da üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin parametreleri

Zemin	RGB	SPT	c_u (kPa)	ϕ°	E (MPa)	ν
Z1	78-91	18	23,14	26,15	15,79	0,3
Z2	91-104	20	24,2	26,22	17,53	0,3
Z3	104-117	23	24	28,74	19,12	0,3
Z4	117-130	26	24,1	30,78	21,33	0,3
Z5	130-143	28	24,5	31,14	23,77	0,3
Z6	143-156	31	24,58	31,25	26,54	0,3
Z7	156-169	34	18,55	31,91	27,96	0,3
Z8	169-182	36	20,37	32,14	29,58	0,3
Z9	182-195	39	26,17	33,36	31,76	0,3
Z10	195-208	42	21,55	33,89	36,04	0,3
Z11	208-221	45	26,15	35,62	41,56	0,3
Z12	221-234	47	24,51	38,41	46,85	0,3
Z13	234-247	50	24,75	42,55	53,22	0,3
Z14	247-255	52	22,11	44,17	57,48	0,3

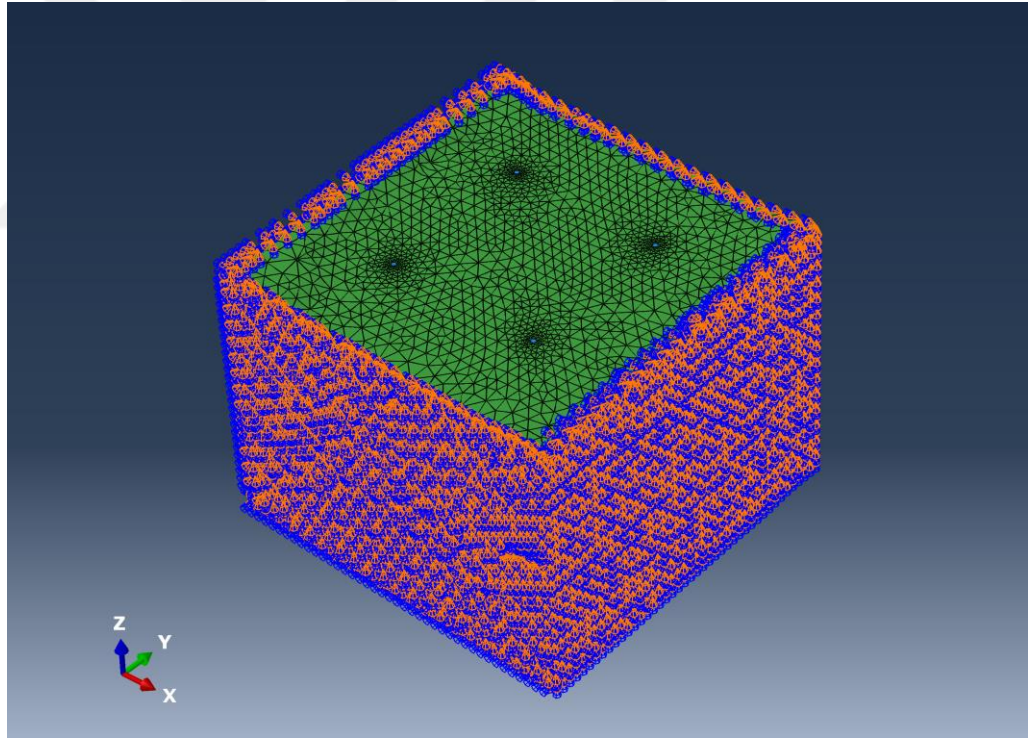
Üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde zemin malzeme parametrelerini tanımlamak için, Bölüm 4.8.'de sunulan SPT sonuçları ve araziden alınan örselenmemiş numunelerin laboratuvardaki deney sonuçları dikkate alınmıştır. SPT değerlerinin kullanılmasıyla elde edilen görüntüleri oluşturan sayısal değerlerin (RGB) aralıklarına göre 14 farklı özelliğe sahip zemin belirlenmiştir. Çizelge 4.16.'da sunulan SPT değerleri, aynı çizelgede yer alan RGB aralıklarının yazılım tarafından hesaplanan SPT karşılıklarını ifade etmektedir. Araziden alınan numunelerin Çizelge 4.8.-4.15.'te yer alan SPT, kohezyon (c_u), içsel sürtünme açısı (ϕ°), konuma bağlı zemin sınıfı vb. verilerinden yararlanarak sonlu elemanlar modelinde kullanılacak parametreler, geliştirilen yazılımın oluşturduğu fonksiyonlar ile belirlenmiştir. Yapılan tahminler için yazılıma girdi olarak SPT sonuçları, araziden alınan zemin numunelerinin laboratuvar deney sonuçları ve materyalin arazide yoğunlaştığı konumu verilmiştir. Gerekli parametreleri belirlemek için, RGB değerlerinin SPT karşılıkları ve materyallerin arazide yoğunlaştıkları konumlara bağlı olarak yazılım tarafından tanımlama sayıları üretilmiştir. Arazideki SPT değerleri, laboratuvarda belirlenmiş zemin parametreleri ve materyallerin gerçek konumundaki USCS zemin sınıfı değerlerinden faydalanılarak bu tanımlama sayılarına karşılık gelen kohezyon (c_u), içsel sürtünme açısı (ϕ°), elastisite modülü (E) vb. üç boyutlu sonlu elemanlar modeli için gerekli zemin parametreleri, bu tez kapsamında kodlanan yazılımın oluşturduğu veri tahmin fonksiyonları ile elde edilmiştir.

DKK'ların malzeme özellikleri için Şekil 4.19.-4.20. ve Şekil 4.24.-4.25.'te sunulan DKK numuneleri için gerçekleştirilmiş laboratuvar deneylerinden yararlanılmıştır. Çizelge 4.17.'de üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan DKK parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılan DKK parametreleri

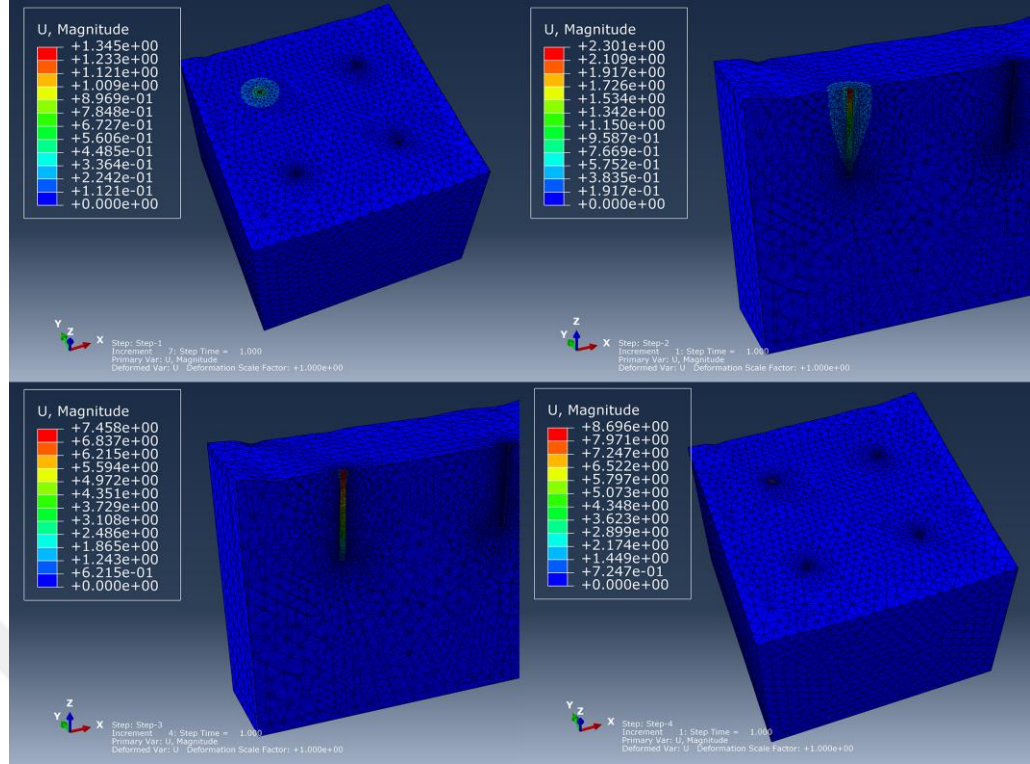
DKK	c_u (kPa)	ϕ°	E (MPa)	ν
DKK1-A	274,22	37,55	522,41	0,2
DKK1-B	57,78	30,28	113,15	0,2
DKK2	238,1	38,2	467,71	0,2
DKK3	252,15	38,85	480,02	0,2
DKK4	232,4	36,07	435,36	0,2

DKK1 optimizasyon fonksiyonu dikkate alınmadan dinamik karışım oranı yerine tek bir karışım oranı kullanılarak imal edildiğinden diğer DKK'lar gibi izotrop bir malzeme özelliği göstermemiştir ve iki farklı parçadan oluşmuştur. Arazi şartlarına uygun bir analiz yapmak için bu durum üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar modeline yansıtılmıştır. DKK1'in yer altı suyu üstündeki 3.85 metrelik bölümü DKK1-A, 1.15 metrelik su altında üretilen kısmı ise DKK1-B parametresi ile sonlu elemanlar modelinde temsil edilmiştir. DKK ve zemin parametreleri modele tanıtıldıktan sonra Bölüm 3.2.8.'de detaylıca anlatılan model oluşturma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu hassas litolojik modelin analizi dört farklı DKK için iki ayrı yüksek işlemci ve bellek kapasiteli iş istasyonu kullanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.31.'de sınır şartları gösterilmiş ve analiz için hazırlanmış modelin görüntüsü sunulmuştur.

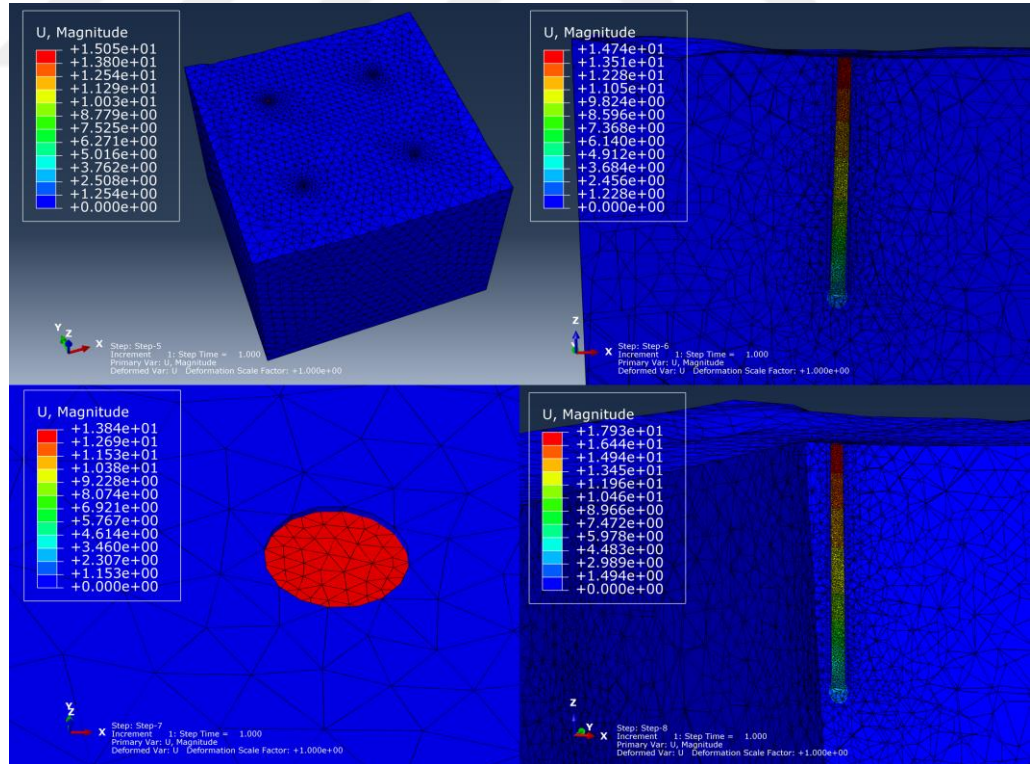


Şekil 4.31. Sınır şartları gösterilmiş ve analiz için hazırlanmış model

DKK1 için gerçekleştirilen analizde arazide yapılan yükleme testi dikkate alınarak 11 analiz adımı kullanılmıştır. Şekil 4.32. ve 4.33.'te DKK1 için gerçekleştirilen analizin sırasıyla 1-4. ve 5-8. yükleme adımındaki sonuçları sunulmuştur.

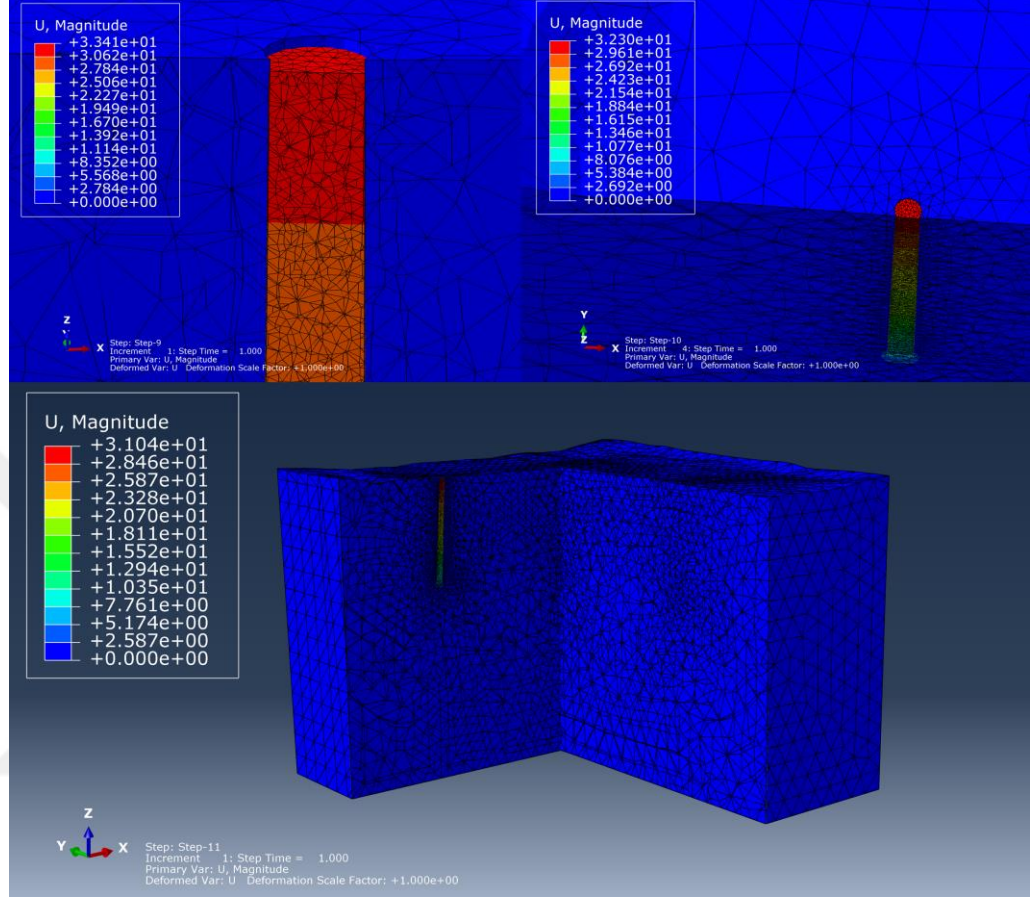


Şekil 4.32. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımındaki sonuçları



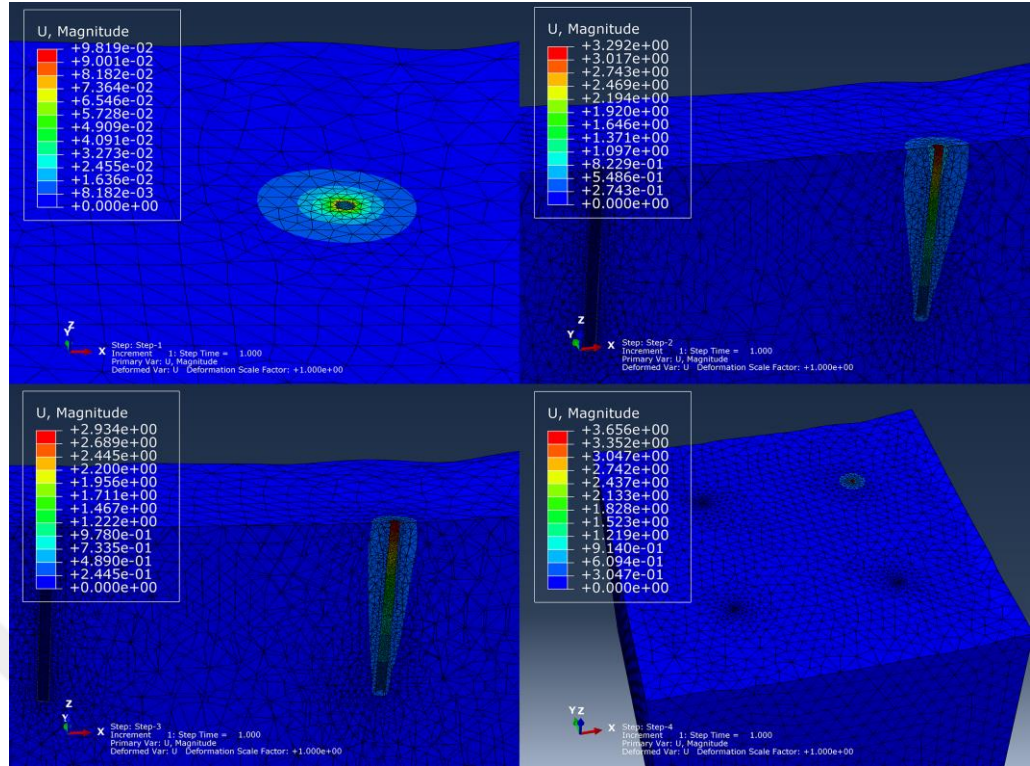
Şekil 4.33. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımındaki sonuçları

Şekil 4.34.'te DKK1 için gerçekleştirilen analizin 9-11. yükleme adımındaki sonuçları sunulmuştur.

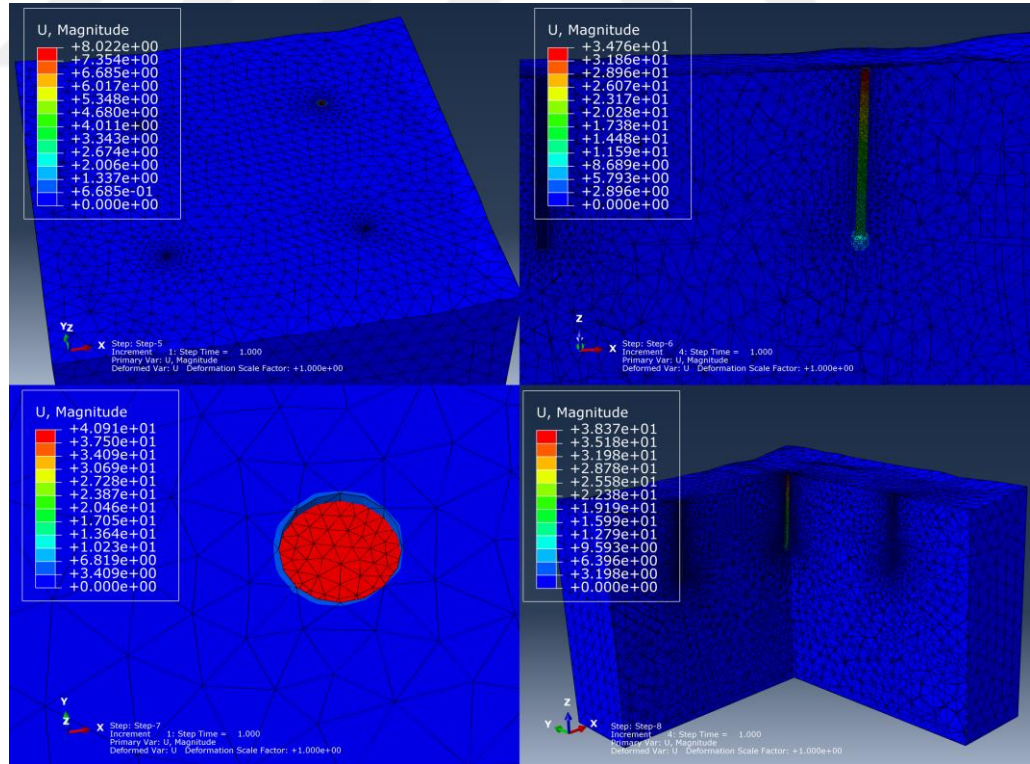


Şekil 4.34. DKK1 için gerçekleştirilen analizin 9-11. yükleme adımındaki sonuçları

DKK2 için gerçekleştirilen analizde arazide yapılan yükleme testi dikkate alınarak 8 analiz adımı kullanılmıştır. Şekil 4.35. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 1-4. ve Şekil 4.36. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımındaki sonuçları göstermektedir.

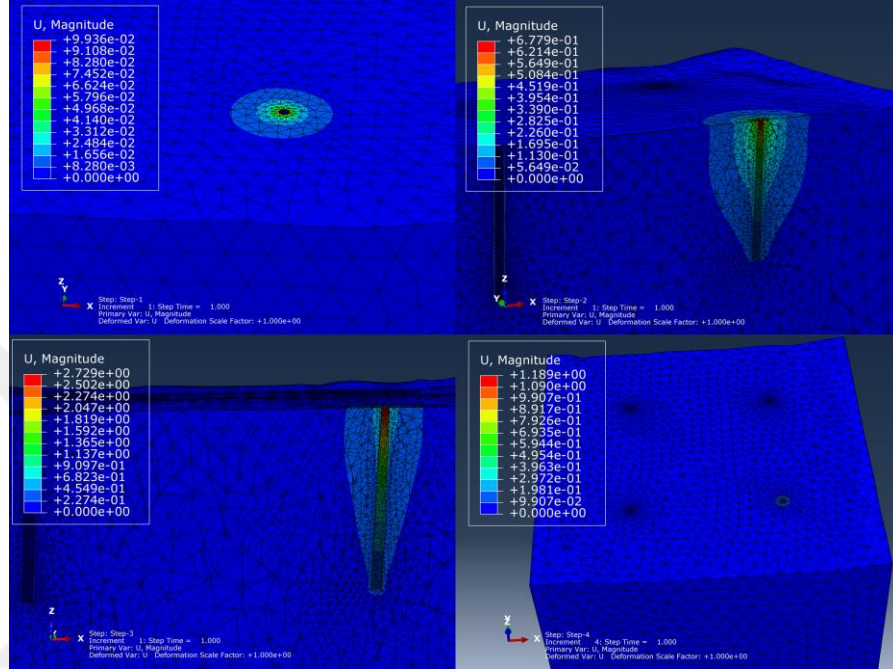


Şekil 4.35. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımındaki sonuçları

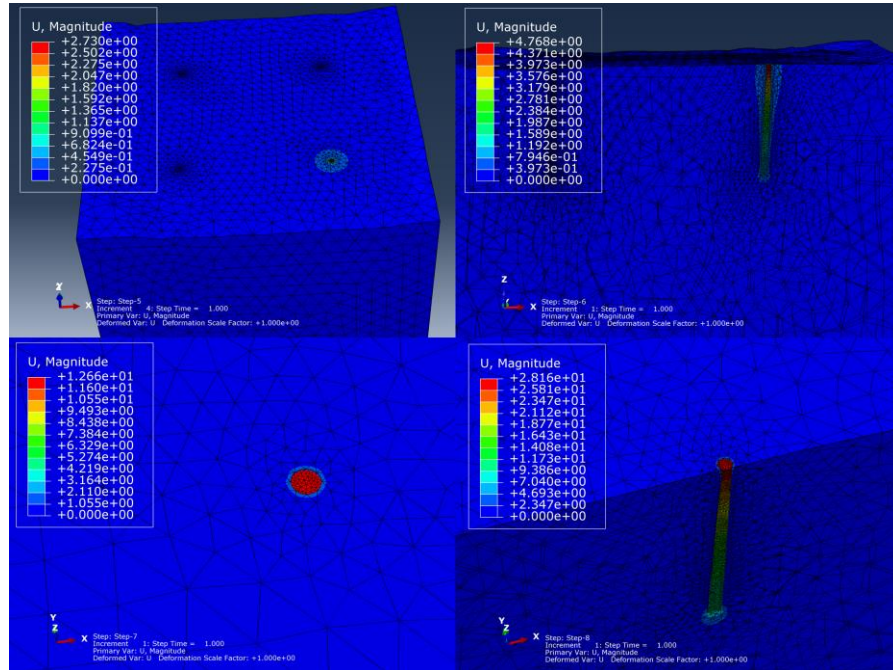


Şekil 4.36. DKK2 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımındaki sonuçları

DKK3 için gerçekleştirilen analizde arazide yapılan yükleme testi dikkate alınarak 9 analiz adımı kullanılmıştır. şekil 4.37. ve 4.38.'de DKK3 için gerçekleştirilen analizin sırasıyla 1-4. ve 5-8. yükleme adımındaki sonuçları sunulmuştur.

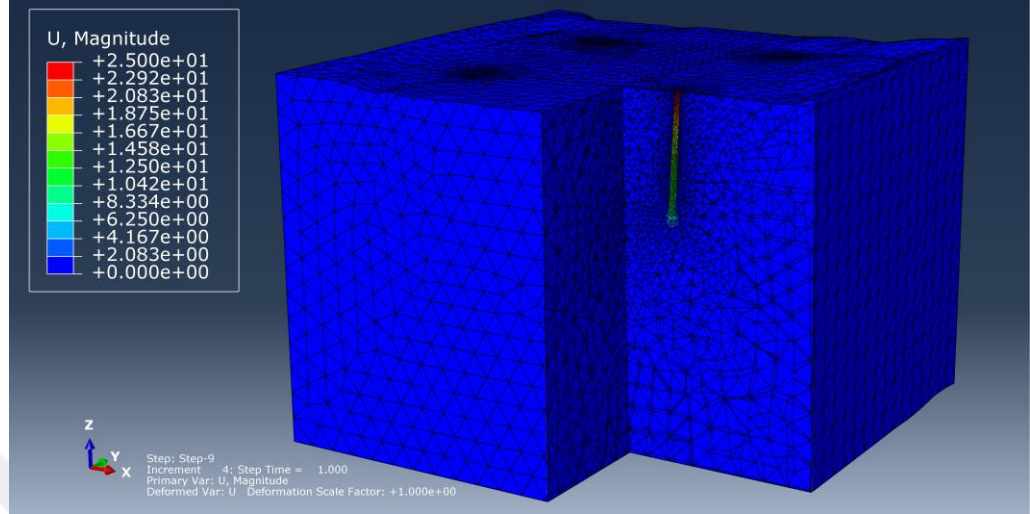


şekil 4.37. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımındaki sonuçları



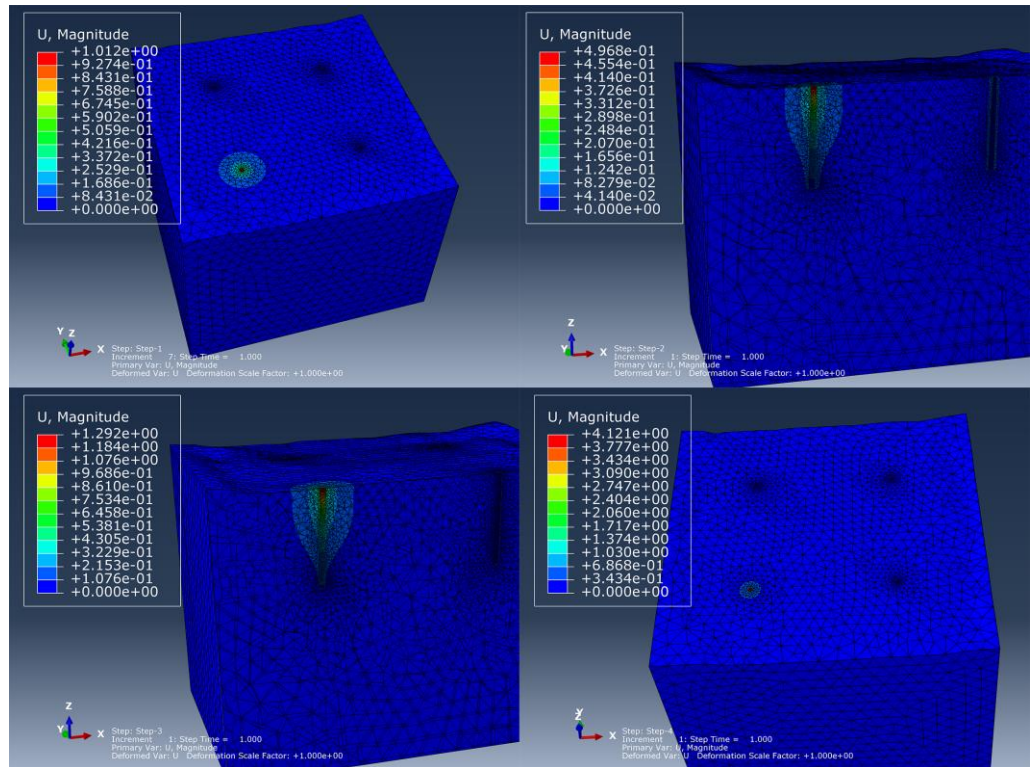
şekil 4.38. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımındaki sonuçları

Şekil 4.39.'da DKK3 için gerçekleştirilen analizin 9. yükleme adımındaki sonuçları sunulmuştur.



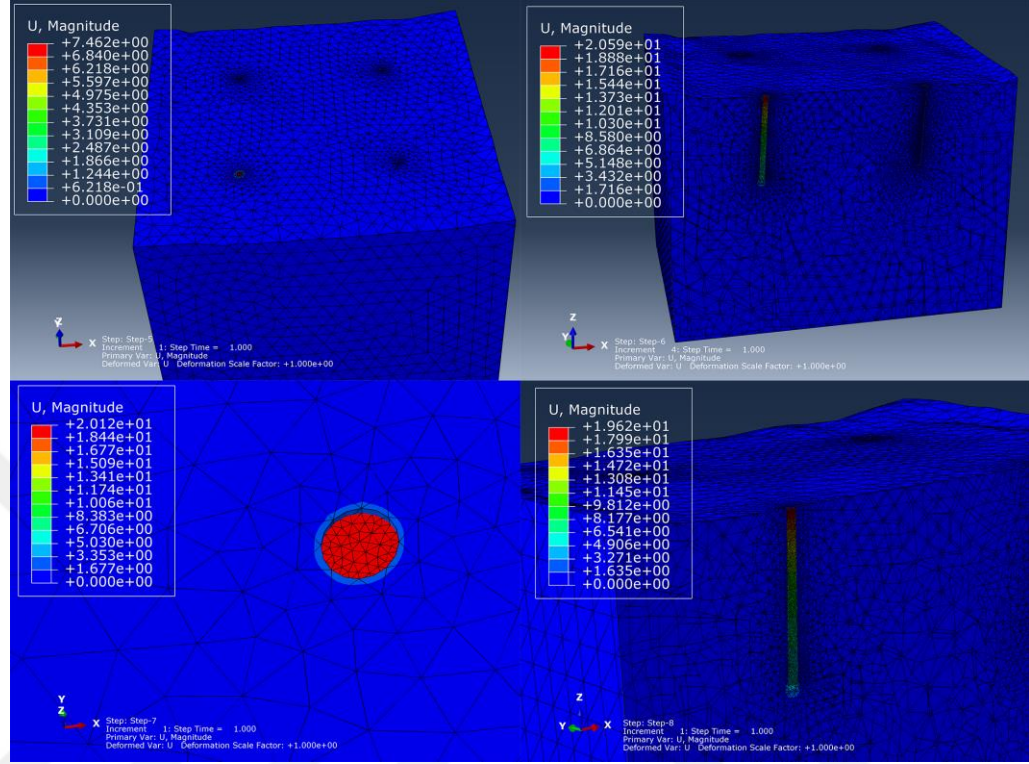
Şekil 4.39. DKK3 için gerçekleştirilen analizin 9. yükleme adımındaki sonuçları

DKK4 için gerçekleştirilen analizde arazide yapılan yükleme testi dikkate alınarak 9 analiz adımı kullanılmıştır.

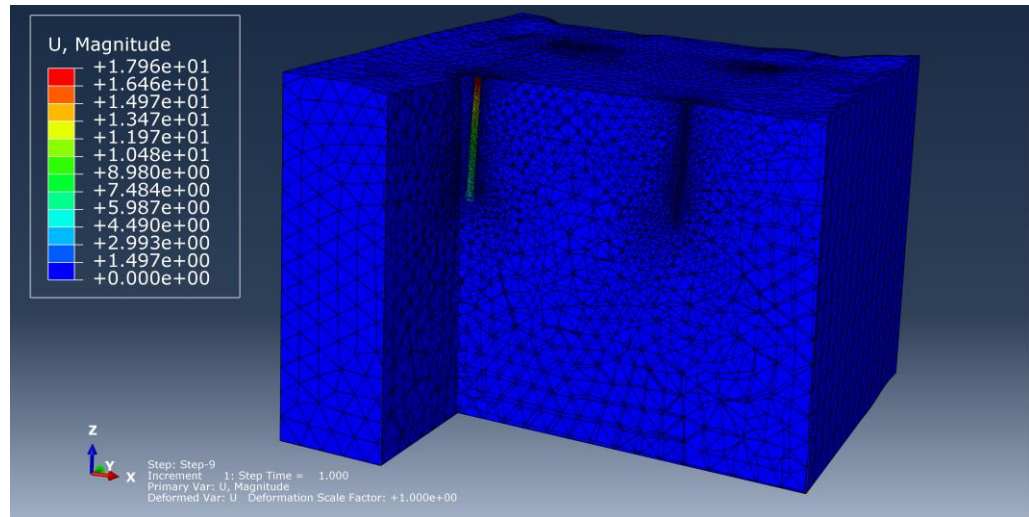


Şekil 4.40. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 1-4. yükleme adımındaki sonuçları

Şekil 4.40., Şekil 4.41. ve Şekil 4.42.'de DKK4 için gerçekleştirilen analizin sırasıyla 1-4., 5-8. ve 9. yükleme adımındaki sonuçları sunulmuştur.

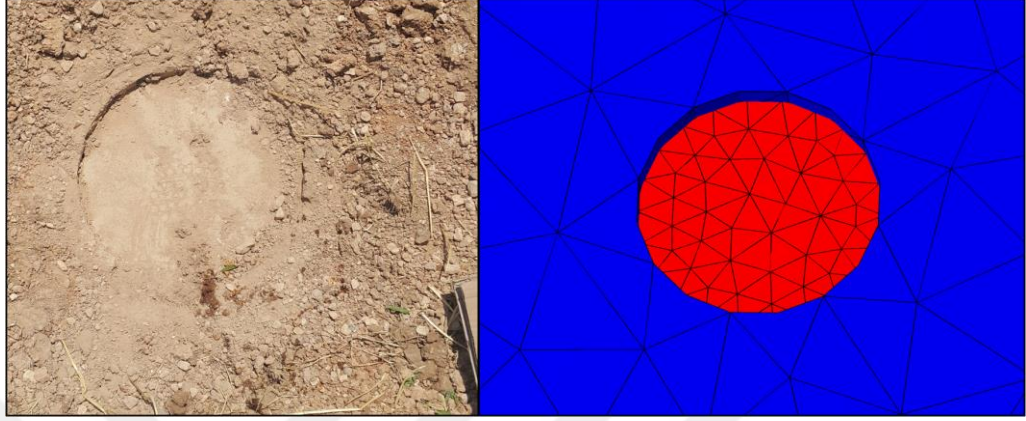


Şekil 4.41. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 5-8. yükleme adımındaki sonuçları



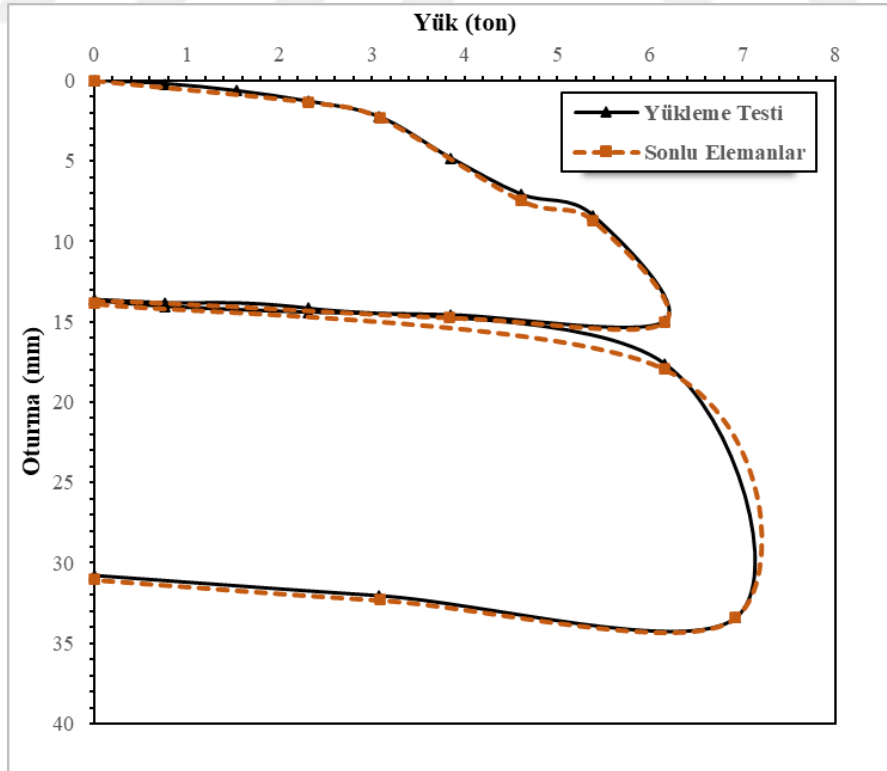
Şekil 4.42. DKK4 için gerçekleştirilen analizin 9. yükleme adımındaki sonuçları

Şekil 4.43.'te yükleme testi sonrası DKK'lar için arazi şartlarında oluşan genel oturma biçimi ile sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen oturma biçimi gösterilmiştir. Görsel olarak oldukça yakın biçimler elde edilmiştir.

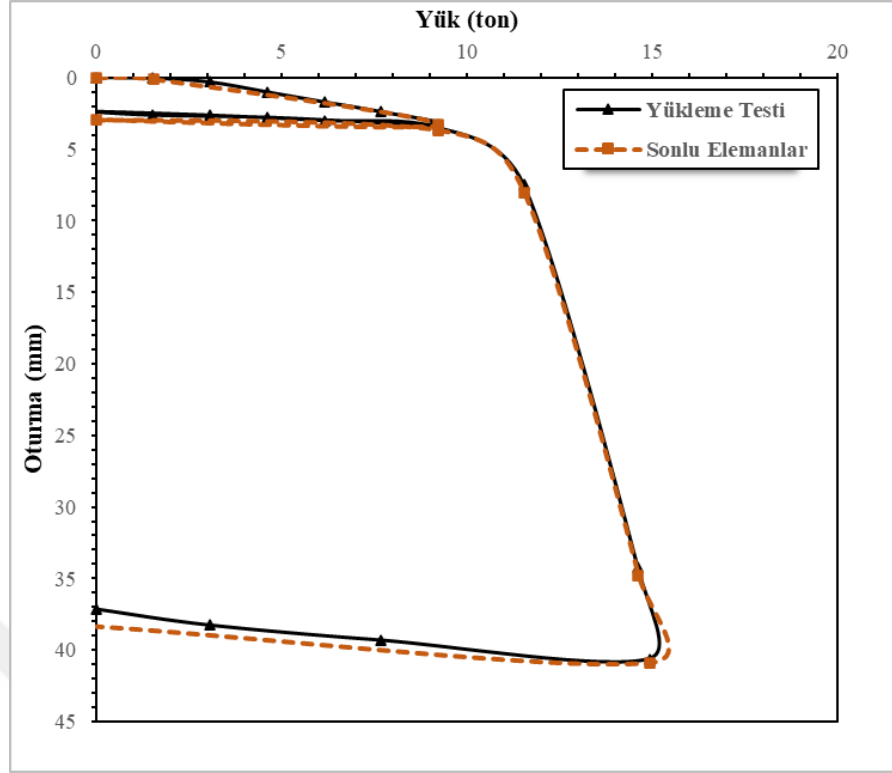


Şekil 4.43. DKK'ların arazi şartlarındaki ve sonlu elemanlar modelindeki genel oturma biçimi

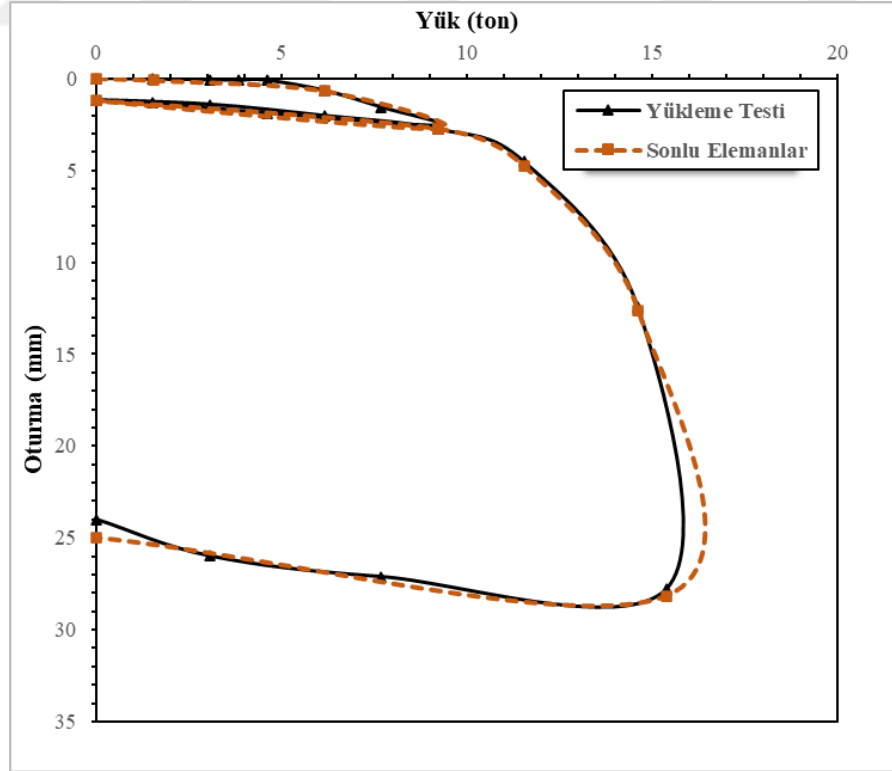
Şekil 4.44.-4.47.'de DKK1-4 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



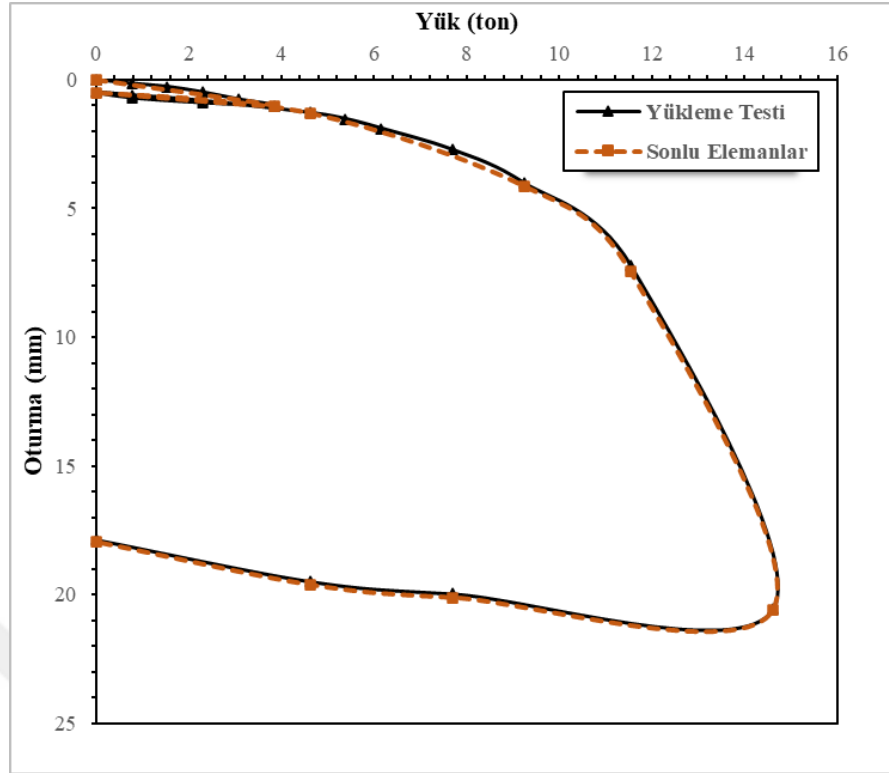
Şekil 4.44. DKK1 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.45. DKK2 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.46. DKK3 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.47. DKK4 için arazide yapılmış yükleme testi ile üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Detaylı laboratuvar ve arazi testleri bu tez çalışmasında üretilen yazılımlar aracılığıyla sonlu elemanlar modeline hassas bir şekilde aktarılmıştır. Şekil 4.44.-4.47.'de üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen oturma değerlerinin arazi şartlarında DKK'lar üzerinde gerçekleştirilen yükleme testleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Böylece bu çalışmada kullanılan modelleme ve analiz tekniğinin arazi şartlarındaki durumu oldukça iyi derecede simüle ettiği belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modeli için tanımlanan analiz adım sayısının artırılmasına paralel olarak elde edilen sonuçların hassasiyeti artmakta ancak adım sayısının artırılması analizin çözüm süresini uzatmaktadır. Bu çalışmada kullanılan yüksek işlemci ve bellek kapasiteli iş istasyonlarının çözüm süresi ve analiz hassasiyeti dikkate alınarak her model için optimum analiz adım sayısı belirlenmiştir. Bu şekilde, makul analiz sürelerinde arazi şartlarındaki yükleme test sonuçlarına oldukça yakın yük-oturma eğrileri elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine, arazi uygulamalarına ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerine dayanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Elyaf takviyesiz tüm DKK numunelerinde (uçucu kül katkılı ve katkısız) optimum sekant elastisite modülleri, 1 MPa ve 2.1 MPa'lık hedeflenen serbest basınç dayanımı değerleri için sırasıyla yaklaşık 425-435 MPa ve 846-863 MPa aralığında değişkenlik göstermiştir.

28 gün kürlenmiş, sadece çimento ile iyileştirilmiş DKK malzemelerini temel alan optimizasyon çalışmasına göre, 1 MPa ve 2.1 MPa olarak hedeflenen dayanım değerleri için toplam su içeriğinin ve çimentonun optimum değerleri sırasıyla yaklaşık (%40 ve %5) ve (%40 ve %13) olarak belirlenmiştir.

28 gün kürlenmiş elyaf takviyesiz uçucu kül katkılı DKK malzemelerini temel alan optimizasyon çalışmasında 1 MPa ve 2.1 MPa olarak hedeflenen dayanım değerleri için, toplam su içeriği, çimento ve uçucu kül optimum oranları sırasıyla yaklaşık (%45, %5 ve %10) ve (%40, %12 ve %12) olarak belirlenmiştir.

90 gün kürlenmiş elyaf takviyesiz uçucu kül katkılı DKK malzemeleri dikkate alınarak yapılan optimizasyon çalışmasına göre, 1 MPa ve 2.1 MPa olarak hedeflenen dayanım değerleri için toplam su içeriği, çimento ve uçucu kül optimum değerleri sırasıyla yaklaşık (%58, %5 ve %10) ve (%40, %8 ve %11) olarak elde edilmiştir.

Karbon elyaf takviyesinin bu çalışma kapsamında incelenen tüm bağımlı değişkenler üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Araştırılan bağımlı değişkenler üzerinde etkili parametrenin hacimce elyaf katkısı (F_C) olduğu ve elyaf boyunun (F_L), elyaf

katkısı (F_C) kadar olmasa da tüm bağımlı değişkenler üzerinde anlamlı iyileştirme sağladığı belirlenmiştir. Hacimce elyaf katkısı (F_C) ve elyaf boyunun (F_L) artışına paralel olarak tüm bağımlı değişkenlerde iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. Bu sonuç karbon elyaf katkısının DKK'ların mekanik özelliklerini iyileştirmede oldukça etkili olduğunu göstermiştir. F_C ve F_L faktörlerinin değişiminden en çok üç noktalı eğilme dayanımının (f_{dmc}) etkilendiği belirlenmiştir.

Karbon elyaf takviyeli numunelerde standart çözüm için optimum serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$), üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), segregasyon yüzdesi ve şişme yüzdesi, uçucu kül katkısız numuneler için sırasıyla yaklaşık 1.3 MPa, 0.8 MPa, %6.73 ve % 1.57 olarak elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı numuneler için aynı parametreler 1.3 MPa, 0.83 MPa, %6.78 ve %1.55 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimizasyon limitleri ve hedefleri doğrultusunda optimum faktörler olan elyaf katkı yüzdesi, F_C =%0.4 ve elyaf boyu F_L =12 mm olarak elde edilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli numunelerde maliyetin sınırlandırıldığı çözüm için optimum serbest basınç dayanımı ($q_{u(28)}$), üç noktalı eğilme dayanımı (f_{dmc}), segregasyon yüzdesi ve şişme yüzdesi, uçucu kül katkısız numuneler için sırasıyla yaklaşık 1.1 MPa, 0.38 MPa, %7.66 ve % 1.89 olarak elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı numuneler için aynı parametreler 1.13 MPa, 0.382 MPa, %7.93 ve %1.85 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimizasyon limitleri ve hedefleri doğrultusunda optimum faktörler olan elyaf katkı yüzdesi, F_C =%0.1 ve elyaf boyu F_L =4 mm olarak elde edilmiştir.

GAM ile çözülen standart optimizasyon probleminde maliyeti arttıran etmenler ihtiyaç duyulan iyileştirmeyi sağlayacak şekilde minimize edilerek dengeli bir optimizasyon çözümü sunulmuştur. Optimum karışımların uygulanabilirliğini ölçmek amacıyla yapılan işlenebilirlik ve priz süresi deneyleri sonucunda tüm optimum karışımların priz süresi ve işlenebilirlik açısından uygun olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül ilaveli ve ilavesiz olmak üzere sunulan optimizasyon çözümlerinden uçucu kül ilaveli olan çözümün arzu edilebilirlik durumu daha yüksek bir düzeyde elde edilmiştir. Bu durum uçucu kül ilaveli karışımın istenilen durumu daha iyi sağladığını

göstermiştir. Uçucu kül katkılı optimum karışımın priz süresi ve işlenebilirlik düzeyi de uçucu kül ilavesiz karışıma göre DKK üretimi için daha uygun bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan GAM optimizasyon algoritması, RSM’de yer alan arzu edilebilirlik kavramını da içerecek şekilde geliştirilerek doğrusal olmayan programlama ile etkili bir optimizasyon analizi sağlamıştır. Deneysel verileri temsil eden kullanıcı tanımlı üst düzey modellerin optimizasyon probleminin çözümüne dahil edilebilmesiyle GAM ile yapılan optimizasyon çözümlerinin daha da geliştirilebileceği gösterilmiştir.

Arazi şartlarında DKK’lar üzerinde gerçekleştirilen yükleme testlerinde en yüksek dayanımı yaklaşık 15.4 ton taşıyan uçucu kül katkılı elyaf takviyeli DKK3 sağlamıştır. DKK3’ün ardından büyükten küçüğe yük taşıma kapasitesi sırasıyla DKK2, DKK4 ve DKK1 şeklinde olmuştur. Bu sıralama laboratuvar deney sonuçları ile uyumludur. DKK1 aynı harç içeriği ile aynı oranlarda dinamik karışım yöntemiyle hazırlanan DKK4’e göre oldukça daha az yük taşımıştır. Bunun sebebi DKK1 için optimizasyon fonksiyonuna göre belirlenen dinamik karışım yönteminin DKK üretim aşamalarında uygulanmamış olmasıdır. Optimizasyon fonksiyonu dikkate alınarak dinamik karışım oranıyla DKK üretiminin yaklaşık %53 daha fazla dayanım sağladığı belirlenmiştir. Bu şekilde optimizasyon fonksiyonuna göre dinamik karışım uygulayarak DKK üretiminin hedef dayanıma ulaşmada önemli bir faktör olduğu görülmüştür. DKK-zemin arayüz sürtünme katsayısı 0.6755 olarak elde edilmiştir. Bu değer tüm DKK’lar için üç boyutlu litolojik sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır.

Üretilen DKK’lar üzerinde yapılan yükleme testleri, geliştirilen yazılım sayesinde görüntü işleme tekniği kullanılarak üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar modellemesiyle oldukça başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Bu modellemelerde zeminin hem litolojik hem de topolojik değişimleri arazi testleri ile uyumlu olacak şekilde dikkate alınmıştır. Böylece üç boyutlu litolojik hassas sonlu elemanlar analizi sonuçları ile arazi şartlarında DKK’lar üzerinde gerçekleştirilen yükleme testleri iyi derecede uyumuştur. Bu tezde geliştirilen yazılımlar sayesinde literatürde ilk kez üç boyutlu hassas litolojik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilebilmiştir. Arazi test verilerinin bulunduğu her projeye uygulanabilecek

bu kapsamlı modelleme tekniği ile gerçek zemin ortamına oldukça yakın simülasyonlar yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Böylece, zemindeki belirsizlikler nedeniyle geoteknik mühendisliğinde yüksek güvenlik katsayısı kullanma problemine ışık tutulmuştur.

5.2. Öneriler

Kompozit arzu edilebilirlik değeri ve hedeflerin entegrasyonu göz önünde bulundurularak bu çalışma kapsamında RSM'de kullanılan arzu edilebilirlik kavramı ile birleştirilen GAM optimizasyon algoritması, deneysel verileri temsil eden kullanıcı tanımlı modelleri optimizasyon probleminin çözümüne dahil edebilecek esnekliktedir. Bu esneklik, polinom modelinin kullanıldığı RSM'deki dezavantajlardan birini gidermektedir. Doğrusal olmayan veri setlerinin olduğu optimizasyon problemlerinde daha iyi sonuçlar elde edebilmek için bu tez kapsamında geliştirilen ilgili metodoloji kullanılabilir.

Bu çalışma kapsamında DKK karışımları için sunulan optimum değer aralıkları saha uygulamalarında duyulabilecek ihtiyaçlara göre değerlendirilebilir. Uygulamacı tarafından ilgili projedeki problem tipine göre sunulan grafiklerden yararlanılarak en uygun çözüm seçilebilir.

Arazi şartlarındaki zeminler heterojen bir şekilde dağılan litolojik değişimler gösterdiklerinden çok kısa mesafelerde zemin profillerinin değişmesi mümkün olabilmektedir. Zeminlerin gerçek arazi şartlarındaki bu litolojik değişimini yapılan analizlere yansıtmak homojen katman kabulü ile yapılan analizlere göre daha gerçekçi bir durumu göz önünde bulundurmak anlamına gelmektedir. Bu tezde geliştirilen yöntem, arazi testlerinin görüntü işleme tekniği ile üç boyutlu nümerik modellere yansıtılarak gerçeğe yakın modellemeler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede hem ekonomik hem de güvenli tasarım açısından gerçekçi modellemelere ihtiyaç duyulan uygulama projelerinde bu çalışmadaki metodoloji proje uygulayıcısının gereksinimlerine göre kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- ALGIN, H.M., 2013. Jet-Grout Kolon-Zemin Etkileşiminin Realistik Modellemesi ve Arayüz Geometrisinin Geoyapısal Sistemin Davranışına Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, 5-7 Aralık 2013, Adana, s.40-47.
- ALGIN, H.M., 2016. Optimised Design of Jet-Grouted Raft Using Response Surface Method. *Computers and Geotechnics*, 74: 56-73.
- ALGIN, H.M., ve EKMEN, A.B., 2016. DKTK Grupları Üzerindeki Radyelerin Tepki Yüzey Metodu ile Optimizasyonu. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- ALGIN, H.M., EKMEN A.B., ARSLAN M.C., ULUKAVAK M., ve ERDOĞAN S., 2018. İha Fotogrametrisi Kullanılarak Modellenen Şevlerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Metoduyla Duraylılık Analizi. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi*, 26-28 Eylül 2018, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- ALGIN, H.M., EKMEN, A.B., ve KAYA, E., 2018. Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 102-111.
- ALGIN, H.M., EKMEN, A.B., ve YENMEZ, L., 2019. Baret Kazıklı Radye Temellerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi. *Teknik Dergi*, 30(5):9443-9458.
- ANGGRAINI, V., ASADI, A., SYAMSIR, A., ve HUAT, B. B., 2017. Three Point Bending Flexural Strength of Cement Treated Tropical Marine Soil Reinforced by Lime Treated Natural Fiber. *Measurement*, 111: 158-166.
- ASTM D 4767-88., 1993. Standard Test Method for Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, PA, 04.08, 1071-1081.
- ASTM C191-04b., 2004. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080 / D3080M-11, 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1143/D 1143M – 07. 2013. Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4546-14., 2014. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166 / D2166M-16., 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1610 / C1610M-17., 2017. Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1609 / C1609M-19., 2019. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA.

- AYDAR, A. Y., 2018. Utilization of Response Surface Methodology in Optimization of Extraction of Plant Materials. Statistical Approaches with Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes. InTech, 157-169.
- BEN-GAL, I., 2005. On the Use of Data Compression Measures to Analyze Robust Designs. IEEE Transactions on Reliability, 54(3): 381-388.
- BERGADO, D. T., RUENKRAIRERGA, T., TAESIRI, Y., ve BALASUBRAMANIAM, A. S., 1999. Deep Soil Mixing Used to Reduce Embankment Settlement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 3(4): 145-162.
- BOEHM, D. W., 2004. The Utilization of Jet Grouting and Soil Mixing Methods to Repair and Support Bulkhead Structures. Ports 2004 Port Development in the Changing World: 1-10.
- BROMS, B. B., 1984. Stabilization of Soft Clay with Lime Columns. Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground, Nanyang Technological Institute, Proc., Singapore.
- BRUCE, M. E. C., BERG, R. R., COLLIN, J. G., FILZ, G. M., TERASHI, M., ve YANG, D. S., 2013. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. United States. Federal Highway Administration. Offices of Research & Development, Washington, p.248.
- CHEN, F., 2016. Experiment Research on Tensile Strength of Basalt Fiber Cement-Soil. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 33(2):88-193.
- CHEN, J., LEE, F. H., ve NG, C. C., 2011. Statistical Analysis for Strength Variation of Deep Mixing Columns in Singapore. In Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, 2011, p. 576-584.
- CHEN, Z. S., ZHOU, X., WANG, X., ve GUO, P., 2018. Mechanical Behavior of Multilayer GO Carbon-Fiber Cement Composites. Construction and Building Materials, 159: 205-212.
- CHRISTOPHER, R., ve JASPERSE, B.H., 1989. Deep Soil Mixing at the Jackson Lake Dam. In ASCE Geotechnical and Construction Divisions Special Conference, 5: 25-29.
- CROCE, P., FLORA, A., ve MODONI, G., 2014. Jet Grouting: Technology, Design and Control. CRC Press.
- DANSO, H., MARTINSON, D. B., ALI, M., ve WILLIAMS, J. B., 2015. Physical, Mechanical and Durability Properties of Soil Building Blocks Reinforced with Natural Fibres. Construction and Building Materials, 101: 797-809.
- DUAN, X. L., ve ZHANG, J. S., 2019. Mechanical Properties, Failure Mode, and Microstructure of Soil-Cement Modified with Fly Ash and Polypropylene Fiber. Advances in Materials Science and Engineering, 2019: 1-13.
- EKMEN, A.B., ve ALGIN, H.M., 2016. Jet Grout Kolonlarla Desteklenmiş Radye Temellerin Tasarım Prensipleri. 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 12 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- EKMEN, A.B., ALGIN, H.M., ve ÖZEN, M., 2020. Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand. Transportation Geotechnics, 24: 1-16.

- ELKHEBU, A., ZAINORABIDIN, A., ASADI, A., BAKAR, I. H., HUAT, B. B., ABDELDOUAD, L., ve DHEYAB, W., 2020. Effect of Incorporating Multifilament Polypropylene Fibers into Alkaline Activated Fly Ash Soil Mixtures. *Soils and Foundations*, 59(6): 2144-2154.
- ELLIS, E.A., DURRANI I.K., ve REDDISH, D.J., 2010. Numerical Modelling of Discrete Pile Rows for Slope Stability and Generic Guidance for Design, *Geotechnique*, 60(3): 185-195.
- ESMEALI, M., KAJEHEI, H., ve NIK, G. M., 2013. The Effectiveness of Deep Soil Mixing on Enhanced Bearing Capacity and Reduction of Settlement on Loose Sandy Soils. 3rd International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE-2013), 30 April-1 May 2013, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- FERREIRA, C., 2001. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13(2): 87-129
- FLORA, A., MODONI, G., LIRER, S., ve CROCE, P., 2013. The Diameter of Single, Double and Triple Fluid Jet Grouting Columns: Prediction Method and Field Trial Results. *Géotechnique*, 63(11): 934-945.
- GAO, L., ZHOU, Q., YU, X., WU, K., ve MAHFOUZ, A. H., 2017. Experimental Study on the Unconfined Compressive Strength of Carbon Fiber Reinforced Clay Soil. *Marine Georesources and Geotechnology*, 35(1): 143-148.
- GEMBICKI, F. W., 1974. Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices. Case Western Reserve Univ, Ph. D. thesis, Cleveland.
- GULLU, H., 2015. On the Viscous Behavior of Cement Mixtures with Clay, Sand, Lime and Bottom Ash for Jet Grouting. *Construction and Building Materials*, 93: 891-910.
- GULLU, H., CANAKCI, H., ve AL ZANGANA, I. F., 2017. Use of Cement Based Grout with Glass Powder for Deep Mixing. *Construction and Building Materials*, 137: 12-20.
- HAN, J., J. HUANG, ve A. PORBAHA., 2005. 2D Numerical Modeling of A Constructed Geosynthetic-Reinforced Embankment Over Deep Mixed Columns. *Contemporary Issues in Foundation Engineering*, 2005, 1-11.
- HEGDE, A., ve SITHARAM, T.G., 2017. Experiment and 3D-Numerical Studies on Soft Clay Bed Reinforced with Different Types of Cellular Confinement Systems. *Transportation Geotechnics*, 10: 73-84.
- JAMSAWANG, P., YOOBANPOT, N., THANASISATHIT, N., VOOTTIPRUEX, P., ve JONGPRADIST, P., 2016. Three-Dimensional Numerical Analysis of a DCM Column-Supported Highway Embankment, *Computers and Geotechnics*, 72: 42-56.
- KAFODYA, I., ve OKONTA, F., 2018. Effects of Natural Fiber Inclusions and Pre-Compression on the Strength Properties of Lime-Fly Ash Stabilised Soil. *Construction and Building Materials*, 170: 737-746.
- KAMON, M., 1996. Effects of Grouting and DMM on Big Construction Projects in Japan and the 1995 Hyogoken-Nambu Earth Quake. In *Proc. 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 14-17 May 1996, Tokyo, Japan, p.807-823.

- KARINAJ, R.S., ve HAVANAGI G.V., 2001. Behavior of Cement-Stabilized Fiber Reinforced Fly Ash-Soil Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7): 574-584.
- KITAZUME, M., ve TERASHI, M. 2013. *The Deep Mixing Method*. CRC press, Japan, 410.
- KOLIAS, S., RIGOPOLIOLU, V. K., ve KARAHALIOS A., 2005. Stabilisation of Clayey Soils with High Calcium Fly Ash and Cement. *Cement & Concrete Composites*, 27(2): 301-313.
- LAI, Y. P., BERGADO, D. T., LORENZO, G. A., ve DUANGCHAN, T., 2006. Full-Scale Reinforced Embankment on Deep Jet Mixing Improved Ground. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 10(4): 153-164.
- LIN, K.Q., ve WONG, I.H., 1999. Use of Deep Cement Mixing to Reduce Settlements at Bridge Approaches. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4): 309-320.
- LIU, G. P., YANG, J. B., ve WHIDBORNE, J. F., 2003. *Multiobjective Optimisation and Control*. Research Studies Press.
- LIU, Y., LEE, F. H., QUEK, S. T., CHEN, E. J., ve YI, J. T., 2015. Effect of Spatial Variation of Strength and Modulus on the Lateral Compression Response of Cement-Admixed Clay Slab. *Géotechnique*, 65(10): 851-865.
- LIU, Y., HE, L. Q., JIANG, Y. J., SUN, M. M., CHEN, E. J., ve LEE, F. H., 2019. Effect of In Situ Water Content Variation on the Spatial Variation of Strength of Deep Cement-Mixed Clay. *Géotechnique*, 69(5): 391-405.
- LORENZO, G. A., ve BERGADO, D. T., 2004. Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay—New Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10): 1042-1050.
- LORENZO, G. A., ve BERGADO, D. T., 2006. Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2): 161-174.
- MATLAB, 2017. *Matlab*, Version R2017a, The MathWorks Inc.
- MIURA, N., HORPIBULSUK, S., ve NAGARAJ, T. S., 2001. Engineering Behavior of Cement Stabilized Clay at High Water Content. *Soils and Foundations*, 41(5): 33-45.
- MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., D'AMICO, A., ve HORPIBULSUK, S., 2018. Alkali-Activation of Fly Ash and Cement Kiln Dust Mixtures for Stabilization of Demolition Aggregates. *Construction and Building Materials*, 186: 71-78.
- MOHAMMADINA, A., DISFANI, M., CONOMY, D., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S., ve DARMAWAN, S., 2019. Utilization of Alkali-Activated Fly Ash for Construction of Deep Mixed Columns in Loose Sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10): 04019233
- MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S., ve SHOURIJEH, P. T., 2019. Impact of Potassium Cations on the Light Chemical Stabilization of Construction and Demolition Wastes. *Construction and Building Materials*, 203: 69-74.

- MOHAMMADINIA, A., DISFANI, M. M., CONOMY, D., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S., ve DARMAWAN, S., 2019. Utilization of Alkali-Activated Fly Ash for Construction of Deep Mixed Columns in Loose Sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10): 04019233.
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., ve ANDERSON-COOK, C.M., 2009. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* Hoboken, New Jersey, USA, Wiley.
- OLGUN, M., 2013. Effects of Polypropylene Fiber Inclusion on the Strength and Volume Change Characteristics of Cement-Fly Ash Stabilized Clay Soil. *Geosynthetics International*, 20(4): 263-275.
- OLIVEIRA, V.J.P., PINHEIRO, P.R.J., ve CORREIA S.A.A., 2011. Numerical Analysis of an Embankment Built on Soft Soil Reinforced with Deep Mixing Columns. *Computers and Geotechnics*, 38(4): 566-576.
- PETCHGATE, K., JONGPRADIST, P., ve PANMANAJAREONPHOL, S., 2003. Field Pile Load Test of Soil-Cement Column in Soft Clay. In *Proceedings of the International Symposium, Asian Institute of Technology, Thailand*, 175–184.
- PORBAHA, A., 1998. State of the Art in Deep Mixing Technology: Part I. Basic Concepts and Overview. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2(2): 81-92.
- PORBAHA, A., SHIBUYA, S., ve KISHIDA, T., 2000. State of the Art in Deep Mixing Technology. Part III: Geomaterial Characterization. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 4(3): 91-110.
- PRADEEP, G., 2008. *Response Surface Method*, VDM Verlag Publishing, Saarbrücken, Germany.
- RAMADAS, T. L., KUMAR, N. D., ve APARNA, G., 2010. Swelling and Strength Characteristics of Expansive Soil Treated with Stone Dust and Fly Ash. In *Indian Geotechnical Conference*, 16-18 December 2010, Mumbai, India, p.557-560.
- RUJIKIATKAMJORN, C., INDRARATNA B., ve CHU, J., Numerical Modelling of Soft Soil Stabilized by Vertical Drains, Combining Surcharge and Vacuum Preloading for a Storage Yard. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3): 326-342.
- SAITOH, S., KAWASAKI, T., NIINA, S., BABASKI, R., ve MIYATA, T., 1980. Research on DMM Using Cementitious Agents. Part 10: Engineering Properties of Treated Soils. In *Proceedings of 15th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, 717-720.
- SHAHIN, M. A., ve CARGEEG, A., 2011. Experimental Investigation into Multistage Versus Conventional Triaxial Compression Tests for A C-Phi Soil. *Applied Mechanics and Materials*, 90(93): 28-32.
- SHARMA, V., VINAYAK, H. K., ve MARWAHA, B. M., 2015. Enhancing Compressive Strength of Soil Using Natural Fibers. *Construction and Building Materials*, 93: 943-949.
- SHEN, S. L., ve MIURA, N., 1999. Soil Fracturing of the Surrounding Clay During Deep Mixing Column Installation. *Soils and Foundations*, 39(5): 13-22.
- SHEN, S. L., MIURA, N., HAN, J., ve KOGA, H., 2003. Evaluation of Property Changes in Surrounding Clays Due to Installation of Deep Mixing Columns. In *Grouting and Ground Treatment*, 120: 634-645.
- SHEN, S. L., WANG, Z. F., YANG, J., ve HO, C. E., 2013. Generalized Approach for Prediction of Jet Grout Column Diameter. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12): 2060-2069.

- SINHA, A., ve HANNA, A.M., 2017. 3D Numerical Model for Piled Raft Foundation. *International Journal of Geomechanics*, 17(2): 1-9.
- SORANZO, M., 1988. Results and Interpretation of Multistage Triaxial Compression Tests. In: Donaghe, R.T., Chaney, R.C., Silver, M.L. (Eds.), *ASTM Special Technical Publication*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, p. 353–362.
- SUKONTASUKKUL, P., ve JAMSAWANG, P., 2012. Use of Steel and Polypropylene Fibers to Improve Flexural Performance of Deep Soil–Cement Column. *Construction and Building Materials*, 29: 201-205.
- SYSTEMES, D., 2014. Abaqus, version 6.14, USA.
- SZYMKIEWICZ, F., TAMGA, F. S., KOUBY, A. L., ve REIFFSTECK, P., 2013. Optimization of Strength and Homogeneity of Deep Mixing Material by the Determination of Workability Limit and Optimum Water Content. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(10): 1034-1043.
- TERASHI, M., 2005. Keynote Lecture: Design of Deep Mixing in Infrastructure Applications. In *Proc. Int'l Conf on Deep Mixing-Best Practice and Recent Advances*.
- TRAN, K. Q., SATOMI, T., ve TAKAHASHI, H., 2018. Improvement of Mechanical Behavior of Cemented Soil Reinforced with Waste Cornsilk Fibers. *Construction and Building Materials*, 178: 204-210.
- WANG, D., TAWK, M., INDRARATNA, B., HEITOR, A., ve RUJIKIATKAMJORN, C., 2019. A Mixture of Coal Wash and Fly Ash as a Pavement Substructure Material. *Transportation Geotechnics*, 21: 100265.
- WANG, D., WANG, H., LARSSON, S., BENZERZOUR, M., MAHERZI, W., ve AMAR, M., 2020. Effect of Basalt Fiber Inclusion on the Mechanical Properties and Microstructure of Cement-Solidified Kaolinite. *Construction and Building Materials*, 241: 118085.
- WATABE, Y., TSUCHIDA, T., FURUNO, T., ve YUASA, H. (2000). Mechanical Characteristics of a Cement Treated Dredge Soil Utilized for Waste Reclamation Landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 13(10): 739–745.
- WU, M., ZHAO, X., ve DOU, Y. M., 2005. Application of Stiffened Deep Cement Mixed Column in Ground Improvement. In *Proceedings International Conference on Deep Mixing Best Practices and Recent Advances*, 2005, Stockholm, Sweden, pp.463-468.
- YIN, J. H., 2001. Stress-Strain-Strength Characteristics of Soft Hong Kong Marine Deposits without or with Cement Treatment. *Lowland Technology International*, 3(1): 1-13.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Arda Burak EKMEN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Merkez / Siirt 24.11.1988
Telefon : 0414 318 30 00 - 1115
E-mail : ardaburakekmen@harran.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe / İl	Bitirme Yılı
Lise	: Siirt Atatürk Anadolu Lisesi	Merkez / Siirt	2006
Üniversite	: Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	İskenderun / Hatay	2013
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Haliliye / Şanlıurfa	2016
Doktora	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Haliliye / Şanlıurfa	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	Harran Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Geoteknik mühendisliği, Temel mühendisliği, Zemin mekaniği, Geoteknik Deprem Mühendisliği.

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerdeki Yayınlar (SCI/SCI E.)

Ekmen, A.B., Algin, H.M., Özen, M. (2020). "Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand". Transportation Geotechnics, 24, 100364. (Doktora tezinden yapılmıştır)

Algin H.M. , Ekmen A.B. , Yenmez L . " Baret Kazıklı Radye Temellerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi". Teknik Dergi, 30(5):9443-9458.

Hakemli Dergilerdeki Yayınlar (Diğer İndeksler)

Algın, H. M., Ekmen, A. B., Kaya, E. (2018) Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3(3), 102-111.

Algın H.M.,Ekmen A.B.(2017). "Üniform Olmayan Düşey Yüklemeler Altındaki Jet-Grout Destekli Radye Temellerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi" – Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2(3): 10-16.

Algın H.M.,Algın Z.,Ekmen A.B.(2016). "Ahşap Köprü ve İnşaat İskele Performansına Ahşap Kusurlarının Etkisi" - Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 1(2): 27-34.

Algın H.M.,Can S.,Ekmen A.B.(2016). "Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarında Geogrid Uzunluğunun Tahmini" - Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 1(2): 35-44

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

Algın H.M., Ekmen A.B., Kaya E. “Three Dimensional Seismic Analysis of Marmaray Immersed Tunnel Model Simulated Based On Soil-Structure Interaction”, 8. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 13-15 November (2019)

Algın H.M., Ekmen A.B., Kaya E. “Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Analysis of High Rise Buildings Supported with Barrette Piles”, 8. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 13-15 November (2019)

Algın H.M., Ekmen A.B., Kaya E. “Seismic Performance off Raft Foundation-Building System on the Fault Zone During The Natm Tunnel Construction Process”, 8. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 13-15 November (2019)

Algın H.M., Ekmen A.B., Kaya E. “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavation Systems Considering Excavation Stages”, 6th International GAP Engineering Conference, Şanlıurfa, 08-10 November (2018)

Kalpıkcı, V., Öztürk, Ş., Algin, H. M., Ekmen, A. B. (2018) "3D Settlement Analysis of Underpinning Piles Under Raft Foundation Subjected to Nonuniform Vertical Loading", Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering (pp. 973-977). Springer, Cham.

Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L., Saraç İ.H. "Settlement Analysis of Shallow Foundations Underpinned by Jet Grout Columns", 7. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 22-24 November (2017)

Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L. "3D Finite Elements Analysis of Barrette Piled Raft Foundations", 7. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 22-24 November (2017)

Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L., Gümüş V. "Three Dimensional Deformation Analysis of Aescher (Zurich, Switzerland) Canopy Tunnel's Excavation Supported by Jet Grouting", 7. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 22-24 November (2017)

Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L., Gümüş V., Yılmaz H. "Deformation Analysis for The Internally Supported Diaphragm Wall Systems with Jet Grout Group Columns Used To Increase The Passive Resistance In Deep Excavation", 7. Geotechnical Symposium with International Participation, Istanbul, 22-24 November (2017)

Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L. and Saraç İ.H., "The Shallow Foundation Underpinning with Jet Grouting, First Morris Bank, Morristown, New Jersey", ICOCEE, Cappadocia, Nevsehir, Turkey, May 8 - 10 (2017)

Algin H.M., Yenmez L., Ekmen A.B. and Gümüş V., "The Settlement Analyses of the Piled Raft Foundation Systems used for Donau City Towers in Vienna", ICOCEE, Cappadocia, Nevsehir, Turkey, May 8 - 10 (2017)

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

Algın H.M, Ekmen A.B., Arslan M.C, Ulukavak M., Erdoğan S., “İHA Fotogrametrisi Kullanılarak Modellenen Şevlerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Metoduyla Duraylılık Analizi”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi 26-28 Eylül 2018, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, (2018)

Algın H.M ve Ekmen A.B., “DKTK Grupları Üzerindeki Radyelerin Tepki Yüzey Metodu ile Optimizasyonu”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (2016)

Ekmen A.B. ve Algın H.M, “Jet Grout Kolonlarla Desteklenmiş Radye Temellerin Tasarım Prensipleri”, 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu 12 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (2016) (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır)

Algın H.M ve Ekmen A.B., “NATM Tüneli İle Köprü Temel Etkileşiminin Üç Boyutlu Sayısal Analizi”, 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana, 26-27 Kasım 2015, 20-27 (2015)

Projeler

Algin, H.M (Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) 2020, “Arazi Test Sonuçları Kullanılarak Zeminlerin Üç Boyutlu Litolojik Modellenmesi ve Geliştirilen Metodun Derin Karıştırma Kolonlarının Nümerik Analizinde Kullanımı” HÜBAP Doktora Tezi Bilimsel Araştırma Projesi, No: 18253

Algin, H.M (Yürütücü), Yoluk Ş.(Yrd. Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü), Kaya E. (Yrd. Yürütücü) 2020, “Jet Grout Kullanılan Tünel Kazılarına Yakın Yüzeysel Temellerin Taşıma Kapasitesindeki Değişim” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 19106

Algin, H.M (Yürütücü), Suleiman K.(Yrd. Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) ,Kaya E. (Yrd. Yürütücü) 2020, “Derin Karıştırma Kolon Malzemeleri İle Killi Zeminler Arasındaki Sürtünme Karakteristikleri” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 19105

Algin, H.M (Yürütücü), Kafaf C.(Yrd. Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) ,Kaya E. (Yrd. Yürütücü) 2020, “Tünel Açma Makinesi Uygulama Güzergahına Yakın Kazık Temellerin Deformasyon Risk Analizi” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 19107

Algin, H.M (Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) ,Kaya E. (Yrd. Yürütücü) 2020, “Üretilen Derin Karıştırma Kolonlarının Yükleme Testi ve Arazi Test Sonuçları Kullanılarak Oluşturulan Üç Boyutlu Litolojik Zemin Modelinde Nümerik Analizi” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 18247

Algin H.M. (Yürütücü), Çelik A. (Yrd. Yürütücü), Deniz M.(Yrd. Yürütücü), Avcil F (Yrd. Yürütücü),Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) , Durgun M.(Yrd. Yürütücü), 2018, “Lisansüstü Öğrenci Otomasyon Sisteminin Geliştirilmesine Yönelik Teknik Altyapı Entegre Projesi” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 18145

Algin H.M (Yürütücü), Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) ,Gümüş V. (Yrd. Yürütücü) 2018, “Derin Karıştırma Kolonlarında Su Muhtevası, Çimento ve Uçucu Kül Miktarlarının Optimizasyonu ile Elyafla Güçlendirilmiş Derin Karıştırma Kolonlarının Dayanım Testleri ve Bilgisayar Tomografik Modellemelerle Karşılaştırılması” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 17156

Algin H.M (Yürütücü) ve Ekmen A.B (Yrd. Yürütücü) ,2016, “Jet Grout Kolon-Zemin Etkileşiminin Gerçekçi Modellemesi ve Arayüz Geometrisinin Geoyapısal Sistemin Davranışına Etkisi” , HÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi, No: 15169

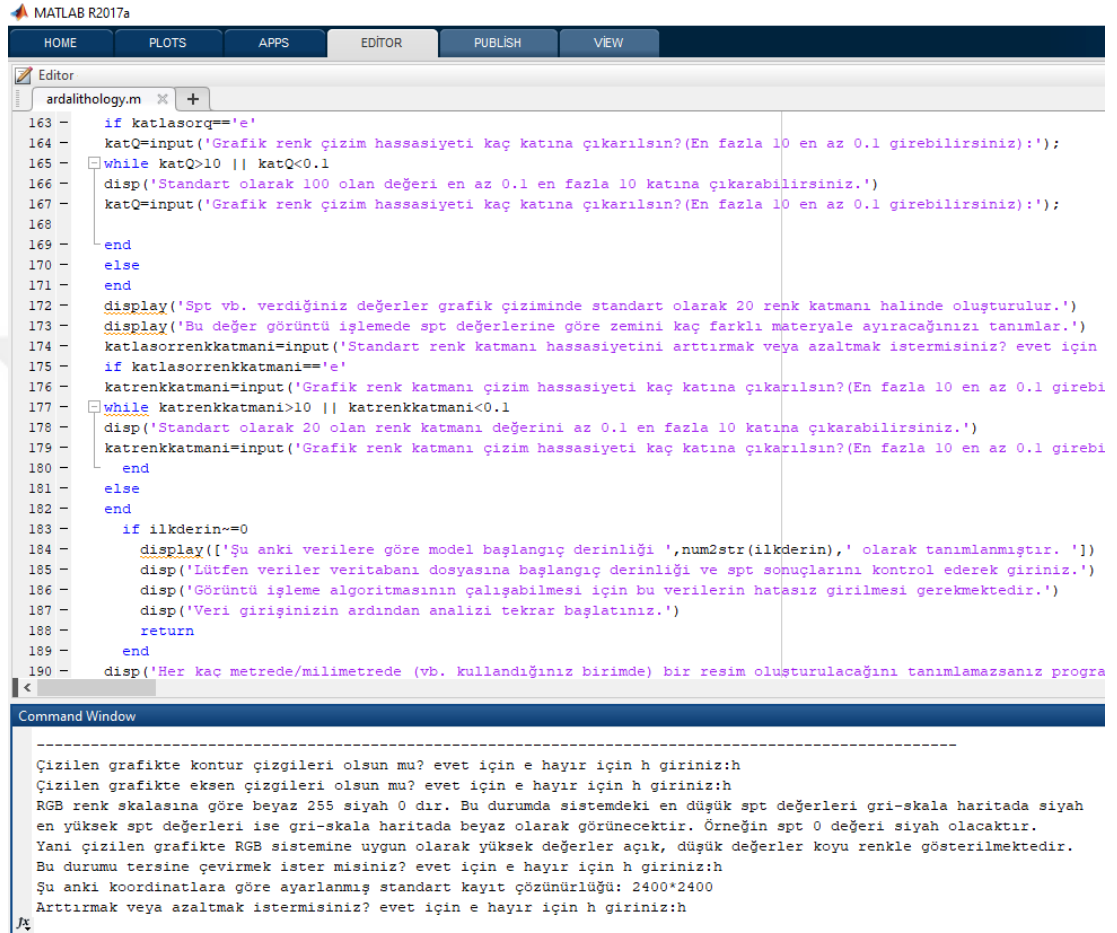
Ödüller

Arda Burak Ekmen (Takım Danışmanı), 2015, "Depreme Dayanıklı Bina Tasarımı Yarışması", Türkiye 3.lüğü, Doğal Afet ve Sigortalar Kurumu (DASK), İstanbul.



EKLER

EK 1 Bu tez kapsamında kodlanan üç boyutlu modelleme için görüntü katmanları üreten yazılım ve kullanıcı arayüzü



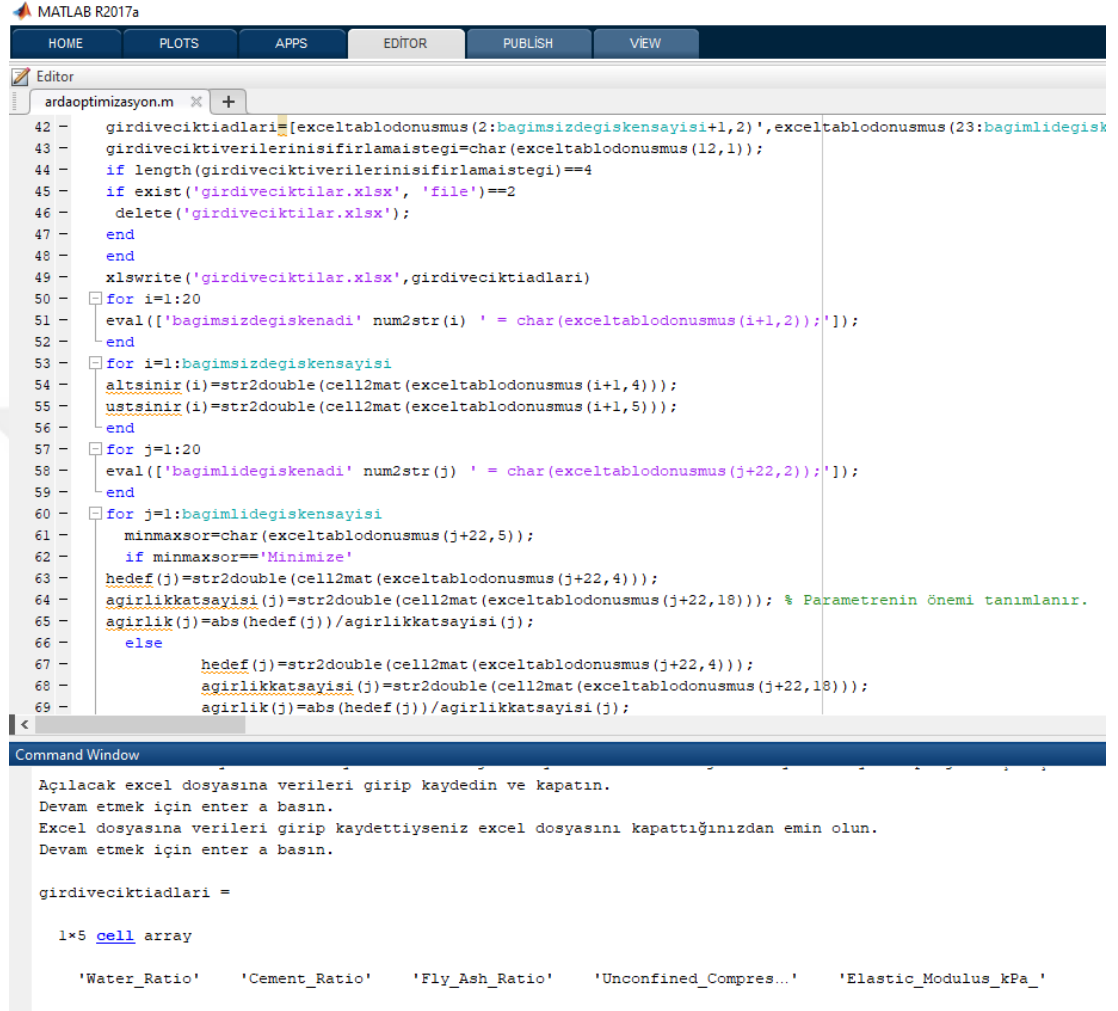
The image shows the MATLAB R2017a environment. The Editor window displays the code for 'ardalithology.m'. The Command Window shows the output of the script.

```
163 - if katlasorq=='e'
164 - katQ=input('Grafik renk çizim hassasiyeti kaç katına çıkarılsın?(En fazla 10 en az 0.1 girebilirsiniz):');
165 - while katQ>10 || katQ<0.1
166 - disp('Standart olarak 100 olan değeri en az 0.1 en fazla 10 katına çıkarabilirsiniz.')
167 - katQ=input('Grafik renk çizim hassasiyeti kaç katına çıkarılsın?(En fazla 10 en az 0.1 girebilirsiniz):');
168 - end
169 - else
170 - end
171 - end
172 - display('Spt vb. verdiğiniz değerler grafik çiziminde standart olarak 20 renk katmanı halinde oluşturulur.')
173 - display('Bu değer görüntü işlemede spt değerlerine göre zemini kaç farklı materyale ayıracağınızı tanımlar.')
174 - katlasorrenkkatmani=input('Standart renk katmanı hassasiyetini arttırmak veya azaltmak istermisiniz? evet için
175 - if katlasorrenkkatmani=='e'
176 - katrenkkatmani=input('Grafik renk katmanı çizim hassasiyeti kaç katına çıkarılsın?(En fazla 10 en az 0.1 girebi
177 - while katrenkkatmani>10 || katrenkkatmani<0.1
178 - disp('Standart olarak 20 olan renk katmanı değerini az 0.1 en fazla 10 katına çıkarabilirsiniz.')
179 - katrenkkatmani=input('Grafik renk katmanı çizim hassasiyeti kaç katına çıkarılsın?(En fazla 10 en az 0.1 girebi
180 - end
181 - else
182 - end
183 - if ilkderin~=0
184 - display(['Şu anki verilere göre model başlangıç derinliği ',num2str(ilkderin),' olarak tanımlanmıştır.'])
185 - disp('Lütfen veriler veritabanı dosyasına başlangıç derinliği ve spt sonuçlarını kontrol ederek giriniz.')
186 - disp('Görüntü işleme algoritmasının çalışabilmesi için bu verilerin hatasız girilmesi gerekmektedir.')
187 - disp('Veri girişinizin ardından analizi tekrar başlatınız.')
188 - return
189 - end
190 - disp('Her kaç metrede/milimetrede (vb. kullandığınız birimde) bir resim oluşturulacağını tanımlamazsanız progra
```

Command Window

```
-----
Çizilen grafikte kontur çizgileri olsun mu? evet için e hayır için h giriniz:h
Çizilen grafikte eksen çizgileri olsun mu? evet için e hayır için h giriniz:h
RGB renk skalasına göre beyaz 255 siyah 0 dır. Bu durumda sistemdeki en düşük spt değerleri gri-skala haritada siyah
en yüksek spt değerleri ise gri-skala haritada beyaz olarak görünecektir. Örneğin spt 0 değeri siyah olacaktır.
Yani çizilen grafikte RGB sistemine uygun olarak yüksek değerler açık, düşük değerler koyu renkle gösterilmektedir.
Bu durumu tersine çevirmek ister misiniz? evet için e hayır için h giriniz:h
Şu anki koordinatlara göre ayarlanmış standart kayıt çözünürlüğü: 2400*2400
Arttırmak veya azaltmak istermisiniz? evet için e hayır için h giriniz:h
```

EK 2 Bu tez kapsamında geliştirilen GAM tabanlı optimizasyon yazılımı ve kullanıcı arayüzü



The image shows the MATLAB R2017a environment. The Editor window displays the script 'ardaoptimizasyon.m' with the following code:

```
42 - girdiveciktiaclari=[exceltablodonusmus(2:bagimsizdegiskensayisi+1,2)',exceltablodonusmus(23:bagimlidegisk
43 - girdiveciktiverilerinisifirlamaistegi=char(exceltablodonusmus(12,1));
44 - if length(girdiveciktiverilerinisifirlamaistegi)==4
45 - if exist('girdiveciktilar.xlsx','file')==2
46 - delete('girdiveciktilar.xlsx');
47 - end
48 - end
49 - xlswrite('girdiveciktilar.xlsx',girdiveciktiaclari)
50 - for i=1:20
51 - eval(['bagimsizdegiskenadi' num2str(i) ' = char(exceltablodonusmus(i+1,2));']);
52 - end
53 - for i=1:bagimsizdegiskensayisi
54 - altsinir(i)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(i+1,4)));
55 - ustsinir(i)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(i+1,5)));
56 - end
57 - for j=1:20
58 - eval(['bagimlidegiskenadi' num2str(j) ' = char(exceltablodonusmus(j+22,2));']);
59 - end
60 - for j=1:bagimlidegiskensayisi
61 - minmaxsor=char(exceltablodonusmus(j+22,5));
62 - if minmaxsor=='Minimize'
63 - hedef(j)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(j+22,4)));
64 - agirlikkatsayisi(j)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(j+22,18))); % Parametrenin önemi tanımlanır.
65 - agirlik(j)=abs(hedef(j))/agirlikkatsayisi(j);
66 - else
67 - hedef(j)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(j+22,4)));
68 - agirlikkatsayisi(j)=str2double(cell2mat(exceltablodonusmus(j+22,18)));
69 - agirlik(j)=abs(hedef(j))/agirlikkatsayisi(j);
```

The Command Window shows the following output:

```
Açılacak excel dosyasına verileri girip kaydedin ve kapatın.
Devam etmek için enter a basın.
Excel dosyasına verileri girip kaydettiyseniz excel dosyasını kapattığınızdan emin olun.
Devam etmek için enter a basın.

girdiveciktiaclari =

1x5 cell array

    'Water_Ratio'    'Cement_Ratio'    'Fly_Ash_Ratio'    'Unconfined_Compres...'    'Elastic_Modulus_kPa_'
```