TÜBİTAK

Uçucu Kül ve Akışkanlaştırıcı Katkılı Derin Karıştırma Kolonlarının Performansını Etkileyen Faktörlerin Model Deneylerle Araştırılması

Program Kodu: 3001

Proje No: 217M946

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Murat OLGUN

Bursiyer:
Arş. Gör. Dr. Yavuz YENGİNAR

MAYIS 2020
ANKARA

ÖNSÖZ

Proje kapsamında killi zeminde imal edilen uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkılı derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörler araştırılmıştır. Bu kapsamdaki hedeflere ulaşılabilmesi için hem DKK makinesi ile (büyük ölçekli) hem de mikser yardımıyla (küçük ölçekli) DKK imalatı yapılmıştır. DKK imalatından 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda numunelerin serbest basınç ve üç eksenli basınç dayanımları, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik özellikleri belirlenmiştir. Deneysel tasarımlar Taguchi yöntemine göre oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar S/N ve çok değişkenli varyans (ANOVA) analizleriyle değerlendirilmiş, sonrasında optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bazı tasarımlardan SEM görüntüleri alınarak, DKK nuunelerinin içyapısında oluşan çimentolanma ürünleri (C-S-H, C-S-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğneleri) ile performans özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu nedenle proje desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Murat OLGUN
KONYA-2020

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **iv**

İÇİNDEKİLER ..... **v**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**

TABLO LİSTESİ ..... **xxxiii**

ÖZET ..... **xxxviii**

ABSTRACT ..... **xxxix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1 Yüksek Plastisiteli Killer ve Özelliklerinin İyileştirilmesi 4
2.1.1 Mineraloji 4
2.1.2 Zeminlerin iyileştirilmesine genel bakış 5
2.1.3 Katkılı (kimyasal) stabilizasyon ve bağlayıcının rolü 7
2.1.3.1 Çimento 8
2.1.3.2 Uçucu kül 11
2.2 Derin Karıştırma Yöntemi 14
2.2.1 Uygulamanın genel hatları 14
2.2.1.1 Islak karıştırma yöntemleri 17
2.2.1.2 Kuru karıştırma yöntemleri 19
2.2.2 Uygulama alanları 22
2.2.3 Uygulamanın olumlu ve olumsuz tarafları 23
2.2.4 İmalat parametreleri 24
2.2.4.1 Enjeksiyon aktarım yöntemi 24
2.2.4.2 Batma/çekme ve dönme hızları 25
2.2.4.3 Karıştırıcı ekipmanların geometrisi 26
2.2.5 İyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri 27
2.2.5.1 Faz diyagramları 27
2.2.5.2 Dayanım 30
2.2.5.3 Elastisite modülü 32
2.2.5.4 Poisson oranı 32
2.2.5.5 Permeabilite katsayısı 32
2.3 Taguchi Yöntemi 33

3. MATERYAL VE YÖNTEM **35**

3.1 Malzemeler 35

3.1.1 İyileştirilmemiş zemin 35
3.1.1.1 Zemin hafriyatı 35
3.1.1.2 Örselenmiş zeminin geoteknik özellikleri 37
3.1.1.3 Örselenmemiş zeminin geoteknik özellikleri 40
3.1.2 Enjeksiyon malzemeleri 43
3.1.2.1 Çimento 43
3.1.2.2 Uçucu kül 44
3.1.2.3 Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi 47
3.2 Deney Düzenekleri ve Ekipmanları 47
3.2.1 Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi 47
3.2.2 Enjeksiyon pompası 49
3.2.3 Karıştırma bıçağının tasarımı 51
3.2.4 Deney tankları 52
3.2.5 Büyük ölçekli konsolidasyon aleti 52
3.2.6 Hidrolik yükleme sistemi 53
3.2.7 Karot makinesi 54
3.2.8 Elektrikli testere 55
3.2.9 Laboratuvar mikseri 56
3.2.10 PVC kalıplar 57
3.3 Deneysel Çalışmaların Yönetimi 57
3.3.1 İmalat (Sistem) parametrelerinin araştırılması 58
3.3.1.1 Yöntem 58
3.3.1.2 Parametrelerin ve sınırlarının belirlenmesi (ön deneyler) 58
3.3.1.3 Homojen zemin ortamının oluşturulması 63
3.3.1.4 Deney programı 68
3.3.1.5 Kolon imalatı 69
3.3.1.6 Karot alınması 75
3.3.1.7 Yapılan ölçümler ve deneyler 75
3.3.2 Uçucu kül katkılı DKK tasarımı 76
3.3.2.1 Parametrelerin ve sınırlarının belirlenmesi (ön deneyler) 76
3.3.2.2 Deney programı 81
3.3.2.3 DKK makinesi ile imalat (Büyük ölçekli DKK tasarımı) 82
3.3.2.4 Laboratuvar mikseri ile imalat (Küçük ölçekli DKK tasarımı) 92

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 97

4.1 Sistem (İmalat) Parametrelerinin Araştırılması 97
4.1.1 Gözlem sonuçları 98
4.1.1.1 Ara yüzey tabakasının oluşumu 101
4.1.2 Fiziksel özellikler 103
4.1.3 Serbest basınç dayanımı (UCS) 105
4.1.4 İstatistiksel analiz sonuçları 110
4.1.4.1 Optimum tasarım 117
4.2 Uçucu Kül Katkılı DKK Tasarımı 119
4.2.1 Büyük ölçekli DKK (derin karıştırma makinesi ile imalat) 122
4.2.1.1 Gözlem sonuçları 122
4.2.1.2 Fiziksel özellikler 124
4.2.1.3 Serbest basınç deneyi (UCS) 127

4.2.1.4 Üç eksenli basınç deneyi (UU) ... 141
4.2.1.5 Konsolidasyon deneyi ... 154
4.2.1.6 Permeabilite deneyi ... 161
4.2.2 Küçük ölçekli DKK (laboratuvar mikseri ile imalat) ... 169
4.2.2.1 Gözlem sonuçları ... 169
4.2.2.2 Fiziksel özellikler ... 171
4.2.2.3 Serbest basınç deneyi (UCS) ... 173
4.2.2.4 Üç eksenli basınç deneyi (UU) ... 187
4.2.2.5 Konsolidasyon deneyi ... 201
4.2.2.6 Permeabilite deneyi ... 208
4.3 Uçucu Kül Katkılı Optimum DKK Tasarımı ... 214
4.3.1 Büyük ölçekli optimum DKK tasarımı ... 217
4.3.1.1 Kolon imalatı ... 219
4.3.1.2 Doğrulama deneyleri ... 221
4.3.2 Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı ... 227
4.3.2.1 Numunelerin fiziksel özellikleri ... 230
4.3.2.1 Doğrulama deneyleri ... 230
4.4 Küçük ve Büyük Ölçekli DKK Tasarımlarının Karşılaştırılması ... 234
4.5 DKK Dayanımı: 7 Parametreli Faktöriyel Tasarım ... 241
4.5.1 Küçük ölçekli DKK ... 242
4.5.2 Büyük ölçekli DKK ... 249
4.6 DKK Tasarımlarının Mineralojik ve Morfolojik Yapısı ... 255
4.6.1 Küçük ölçekli DKK ... 260
4.6.2 Büyük ölçekli DKK ... 272

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ... 279

5.1 DKK İmalatı Sırasındaki Gözlemler ... 279
5.2 İmalat Parametrelerinin Belirlenmesi ... 281
5.3 Uçucu Kül Katkılı DKK Tasarımı ... 282
5.4 Öneriler ... 287

KAYNAKLAR ... 290

EKLER ... 304

EK-1: Sistem (İmalat) Parametrelerinin Araştırılması ... 304
EK-2: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları ... 313
EK-3: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları ... 345
EK-4: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Konsolidasyon Deneyi Sonuçları ... 356
EK-5: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları ... 367
EK-6: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları ... 383
EK-7: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Konsolidasyon Deneyi Sonuçları ... 400

TÜBİTAK

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Smektit grubu killerin mineral yapısı (Ino vd., 2011) 5
Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemlerinin dane boyutuna göre ayrımı (Mitchell, 1981) 7
Şekil 2.3. Hidratasyon reaksiyonu süreçleri (Kosmatka vd., 2006)..... 10
Şekil 2.4. DKK imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Bruce 2000a, b) 16
Şekil 2.5. DKK imalatında kullanılan beton santrali..... 17
Şekil 2.6. Kuru karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcı sevkiyat ünitesi (Hayward Baker A.Ş.)..... 20
Şekil 2.7. Kuru karıştırma yönteminde kullanılan tipik karıştırma bıçakları: a) normal ve b) turba zeminler için (Topolnicki, 2004) 21
Şekil 2.8. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları: a) yol dolgusu altındaki oturmaları kontrol etmek, duraylığı sağlamak, b) şev tabanının stabilitesinde, c) köprü ayağında farklı oturmalara karşı, d) yamaç eğiminin stabilitesini sağlamak, e) komşu yapılardan gelen etkileri azaltmak, f) destekli kazılarda taban kabarmasına karşı, g) kazıklı temellerin yanal direncini artırmak için, h) deniz tabanında taşıma gücünü artırmak amacıyla, ı) dalgakıran altında taşıma gücünün artırılması amacıyla..... 22
Şekil 2.9. Derin karıştırma kolon tipleri: a) blok tipi, b) duvar tipi, c) kafes tipi, d) kolon tipi, e) kesişen kolon tipi, f) kesişen duvar tipi, g) kesişen kafes tipi, h) kesişen blok tipi 23
Şekil 2.9. Farklı derin karıştırma yöntemleri için kullanılan karıştırma ekipmanları: a, b) WRS ekipmanı, c) WJE ekipmanı, d) CSM ekipmanı, e) TRD ekipmanı, f) WRE ekipmanı 27
Şekil 2.10. Kuru karıştırma yöntemi için kullanılan faz diyagramı..... 28
Şekil 2.11. Islak karıştırma yöntemi için kullanılan faz diyagramı..... 28
Şekil 2.12. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ile dayanım arasındaki ilişki (FHWA, 2013'den değiştirilerek)..... 31
Şekil 3.1. a) Sondaj makinesi ile ilave sondaj kuyularının açılması, b) burgulu delici 36
Şekil 3.2. a) İlave sondaj kuyularının yeri, b) yüzeyden 6 m derinlikten zemin hafriyatının yapılması..... 36
Şekil 3.3. a) Zeminin bina içerisine taşınması ve b) istiflenmesi..... 37
Şekil 3.4. Zeminin tane dağılımı 38
Şekil 3.5. Casagrande yöntemi ile likit limit tayini 38
Şekil 3.6. Düşen koni yöntemi ile likit limit tayini 38
Şekil 3.7. USCS'ye göre zemin sınıfının belirlenmesi 39
Şekil 3.8. Kompaksiyon deneyinden elde edilen su muhtevası-kuru yoğunluk grafiği..... 40
Şekil 3.9. a) Örselenmemiş zemin örneklerinin alınabilmesi için kullanılan kalıplar, b) kazı çukurunda kalıpların zemine çakılması ve numune alınması 41

Şekil 3.10. Killi zemin için serbest basınç deneyi sonuçları: a) Gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri 41
Şekil 3.11. Killi zemine ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları: a) Deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri 42
Şekil 3.12. Killi zemin için konsolidasyon deneyinden elde edilen gerilme-boşluk oranı grafikleri 43
Şekil 3.13. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (Türker vd., 2009) 45
Şekil 3.14. Seyitömer uçucu külünün morfolojik yapısına ait fotoğraflar: a) ve b) taneciklerin genel dağılımı (x500 ve x1500) (Türker vd., 2009) 46
Şekil 3.15. Seyitömer uçucu külünün mikroyapısı: (a) Magnezyoferrit küresi (x8100), (b) Demir oksit kaplı tanecik (x5000), (c) Alkali feldispatlar (x2500), (d) Mullit kristalleri (x10000) (Türker vd., 2009) 46
Şekil 3.16. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin teknik çizimi 48
Şekil 3.17. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin imal edilmiş hali 49
Şekil 3.18. Enjeksiyon pompasının genel görünüşü 50
Şekil 3.19. DKK imalatında kullanılan karıştırma bıçakları a) arazi tipi ve b, c) laboratuvar tipi 51
Şekil 3.20. Büyük ölçekli konsolidasyon aleti 53
Şekil 3.21. Tasarlanan yükleme çerçeveleri ve hidrolik yükleme pistonları 54
Şekil 3.22. Hidrolik pistonun çalışma basıncı-yük-gerilme ilişkisi (gerilme hesabı için 60 cm çapında yükleme başlığı dikkate alınmıştır) 54
Şekil 3.23. a) Karot makinesi, b) 60 mm çaplı karot ucu ve c) karot alınması 55
Şekil 3.24. Elektrikli testere ile karot numunelerinin kesilmesi 56
Şekil 3.25. a) Karıştırma kabı, b) çırpıcı ve c) laboratuvar mikseri 56
Şekil 3.26. İmal edilen ilk derin karıştırma kolonu (deneme kolonu) 60
Şekil 3.27. Kolondan karot alma denemesi (deneme kolonu) 60
Şekil 3.28. Homojen karışmayan kolon (deneme kolonu) 61
Şekil 3.29. Plastik kıvama yakın (%27) su muhtevasındaki a) zemin ortamı, b) boşluklu ve homojen karışmayan kolon 63
Şekil 3.30. Zeminin su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisinin 1/30 ölçekte araştırılması 64
Şekil 3.31. Zeminin yoğunluk-su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisi (w_{no} ve w_{ns} zeminin başlangıç ve son durumdaki su muhtevaları, ρ_{no} ve ρ_{ns} zeminin başlangıçtaki ve son durumdaki doğal yoğunluklarını göstermektedir) 64

Şekil 3.32. Zeminin hedef su muhtevasında karıştırılması: a) araziden hafriyatla getirilen topaklı zemin, b) zeminin %35 su muhtevasında çiğnenerek karıştırılması, c) zeminin %52 su muhtevasında çiğnenerek karıştırılması ve d) zeminin üzerinin poşetle örtülerek kür edilmesi 66
Şekil 3.33. Zeminin sabit yük uygulayan hidrolik piston altında konsolide edilmesi 67
Şekil 3.34. Homojen zemin ortamının elde edilmiş hali 67
Şekil 3.35. SP-1 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 70
Şekil 3.36. SP-2 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) alınan karot numuneleri (Sistem parametrelerinin araştırılması) 71
Şekil 3.37. SP-3 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) imalat sonrası görünüm, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 71
Şekil 3.38. SP-4 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi, e) imalat sonrası görünüm (Sistem parametrelerinin araştırılması) 72
Şekil 3.39. SP-5 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 72
Şekil 3.40. SP-6 numaralı DKK: a) kolon tanktan çıkarılırken, b) imal edilen kolon, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 73
Şekil 3.41. SP-7 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon tanktan çıkarılırken, c) imal edilen kolon, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 73
Şekil 3.42. SP-8 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) karot alma sonrası görünüm, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 74
Şekil 3.43. SP-9 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon tanktan çıkarılırken, c) imal edilen kolon, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması 74
Şekil 3.44. İmal edilen kolonlardan karot alınması 75
Şekil 3.45. Farklı katkılar ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1) 78
Şekil 3.46. Optima 100 katkısı ile farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip enjeksiyonların marsh hunisi deneyi sonuçları (UKO=%60) 79

Şekil 3.47. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=0.8) 79
Şekil 3.48. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=0.9) 80
Şekil 3.49. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1.2) 80
Şekil 3.50. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1.5) 80
Şekil 3.51. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=2) 81
Şekil 3.52. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 1: a) imalat sonrası görünüm, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) imal edilen kolon 84
Şekil 3.53. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 2: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 84
Şekil 3.54. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 3: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 85
Şekil 3.55. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 4: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 56 ve d) 28 günlük karot numuneleri, e) kayma yüzeyleri 85
Şekil 3.56. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 5: a) imalat sonrası görünüm, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) kayma yüzeyleri 86
Şekil 3.57. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 6: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri 86
Şekil 3.58. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 7: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 87
Şekil 3.59. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 8: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 87
Şekil 3.60. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 9: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 88
Şekil 3.61. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 10: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 88
Şekil 3.62. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 11: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 89
Şekil 3.63. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 12: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 89
Şekil 3.64. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 13: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri 90

Şekil 3.65. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 14: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 90
Şekil 3.66. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 15: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri 91
Şekil 3.67. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 16: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri 91
Şekil 3.68. Uçucu kül katkılı kolonlardan karot alınması: a) 28 gün sonra, b) 56 gün sonra .. 92
Şekil 3.69. Mikserle karıştırılan zemin-bağlayıcı numunelerinin kalıba yerleştirilmesi 96
Şekil 4.1. Çimento enjeksiyonun çökelme deneyi sonucu 98
Şekil 4.2. Kolon yüzeyi ile iyileştirilecek zemin arasında oluşan ara yüzey tabakası 102
Şekil 4.3. Ara yüzey tabakasının oluşum mekanizması 102
Şekil 4.4. Çimento faktörü ve karışımın likitlik indisi ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 107
Şekil 4.5. Çimento faktörü ve çimento içeriği ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 107
Şekil 4.6. Çimento faktörü ve karışımın toplam su/bağlayıcı ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 108
Şekil 4.7. Çimento faktörü ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 109
Şekil 4.8. $I_{L,mix}$ ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 109
Şekil 4.9. $I_{L,mix}$ ve W_T:W_b ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 110
Şekil 4.10. VR ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki 110
Şekil 4.11. a) Dayanım ve b) zemin iyileştirme oranı için normal olasılık grafikleri (Sistem parametrelerinin araştırılması) 111
Şekil 4.12. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Sistem parametrelerinin araştırılması) 112
Şekil 4.13. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Sistem parametrelerinin araştırılması) 113
Şekil 4.14. a) Homojen olmayan zemin-bağlayıcı karışımı (DH<60 devir/dk), b, c) Homojen karışmış kolon (Tasarım 4, DH=60 devir/dk) 117
Şekil 4.15. ANOVA sonuçlarına göre elde edilen optimizasyon sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması) 118
Şekil 4.16. Optimum durumda imal edilen DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) karot numunelerinin kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon ve d) alınan karot numuneleri (Sistem parametrelerinin araştırılması) 118
Şekil 4.17. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) mohr daireleri 119
Şekil 4.18. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 127

Tablo 4.17. Kolondan alınan karot numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (büyük ölçekli DKK, 28 gün) 128
Şekil 4.19. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 129
Şekil 4.20. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 129
Şekil 4.20. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 132
Şekil 4.21. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 134
Şekil 4.22. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 134
Şekil 4.23. Serbest basınç deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS) 138
Şekil 4.24. $I_{L,mix}$ ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün).. 139
Şekil 4.25. a_w ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 139
Şekil 4.26. W_T:W_b ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 140
Şekil 4.27. BRN ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 140
Şekil 4.28. W_T:W_b ile $I_{L,mix}$ a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 141
Şekil 4.29. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 143
Şekil 4.30. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) ... 143
Şekil 4.31. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 144
Şekil 4.32. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 148
Şekil 4.33. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 148
Şekil 4.34. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 149
Şekil 4.35. Üç eksenli basınç deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU) 152
Şekil 4.36. $I_{L,mix}$ ve α ile a) q_{uu} ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)... 152
Şekil 4.37. W_T:W_b ile $I_{L,mix}$ a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 153
Şekil 4.38. BRN ve $I_{L,mix}$ ile a) q_{uu} ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 153
Şekil 4.39. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün) 155

Şekil 4.40. Cc için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün) 158
Şekil 4.41. Konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK)..... 160
Şekil 4.42. Sıkışma indisinin a) W_T:W_b-$I_{L,mix}$ ve b) $I_{L,mix}$-α ile olan ilişkileri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 161
Şekil 4.43. Sıkışma indisinin a) a_w-α ve b) BRN-α ile olan ilişkileri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 161
Şekil 4.44. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 163
Şekil 4.45. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 165
Şekil 4.46. Permeabilite deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK)..... 167
Şekil 4.47. Permeabilite katsayısının a) W_T:W_b-$I_{L,mix}$ ve b) $I_{L,mix}$-α ile olan ilşkileri 168
Şekil 4.48. Permeabilite katsayısının a) a_w-α ve b) BRN-α ile olan ilşkileri 169
Şekil 4.49. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)..... 174
Şekil 4.50. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)..... 175
Şekil 4.51. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)..... 178
Şekil 4.52. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 178
Şekil 4.53. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)..... 182
Şekil 4.54. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 182
Şekil 4.55. Serbest basınç deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)..... 186
Şekil 4.56. Serbest basınç dayanımının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)..... 186
Şekil 4.57. Serbest basınç dayanımının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)..... 187
Şekil 4.58. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)..... 188
Şekil 4.59. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)..... 189
Şekil 4.60. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 192

Şekil 4.61. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)..... 192
Şekil 4.62. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 196
Şekil 4.63. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)..... 196
Şekil 4.64. Üç eksenli basınç deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)..... 200
Şekil 4.65. Üç eksenli basınç dayanımının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 200
Şekil 4.66. Üç eksenli basınç dayanımının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 200
Şekil 4.67. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün) 202
Şekil 4.68. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün) 205
Şekil 4.69. Konsolidasyon deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)..... 207
Şekil 4.70. Sıkışma indisinin a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 207
Şekil 4.71. Sıkışma indisinin a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 208
Şekil 4.72. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 209
Şekil 4.73. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 211
Şekil 4.74. Permeabilite deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)..... 213
Şekil 4.75. Permeabilite katsayısının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 214
Şekil 4.76. Permeabilite katsayısının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 214
Şekil 4.77. Optimizasyon grafiği (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır. 217
Şekil 4.78. Optimizasyon grafiği (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır. 218
Şekil 4.79. UKO=%40 için 28 günlük performans değerlerinin tahmini için optimizasyon grafiği (Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.)..... 219

Şekil 4.80. Büyük ölçekli DKK, optimum tasarım: a) imal edilen kolon, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) 28 ve e) 56 günlük kayma yüzeyleri 220
Şekil 4.81. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 222
Şekil 4.82. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 223
Şekil 4.83. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 224
Şekil 4.84. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 225
Şekil 4.85. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 226
Şekil 4.86. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 226
Şekil 4.87. Optimizasyon grafiği (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır. 227
Şekil 4.88. Optimizasyon grafiği (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır. 228
Şekil 4.89. UKO=%40 ve K=%3 için 28 günlük performans değerlerinin tahmini için optimizasyon grafiği (Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.) 229
Şekil 4.90. Optimum tasarıma ait a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 231
Şekil 4.91. Optimum tasarıma ait a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 231
Şekil 4.92. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 232
Şekil 4.93. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 232
Şekil 4.94. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 233
Şekil 4.95. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 233
Şekil 4.96. Serbest basınç dayanımının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün) 235

Şekil 4.97. Serbest basınç dayanımının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 236
Şekil 4.98. Üç eksenli basınç dayanımının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 236
Şekil 4.99. Üç eksenli basınç dayanımının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 236
Şekil 4.100. Sıkışma indisinin a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün) 237
Şekil 4.101. Sıkışma indisinin a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün) 238
Şekil 4.102. Permeabilite katsayısının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün) 238
Şekil 4.103. Permeabilite katsayısının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 239
Şekil 4.104. İmalat sırasındaki farklılıklar: a) büyük ve b) küçük ölçekli DKK tasarımları 240
Şekil 4.105. σ_1-σ_3 için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK)..... 243
Şekil 4.106. RI için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK)..... 243
Şekil 4.107. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Küçük ölçekli DKK) 245
Şekil 4.108. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Küçük ölçekli DKK)..... 246
Şekil 4.109. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Küçük ölçekli DKK)..... 248
Şekil 4.110. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Küçük ölçekli DKK)..... 248
Şekil 4.111. σ_1-σ_3 için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK)..... 249
Şekil 4.112. RI için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK)..... 249
Şekil 4.113. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK) 251
Şekil 4.114. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Büyük ölçekli DKK)..... 252
Şekil 4.115. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK)..... 254
Şekil 4.116. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Büyük ölçekli DKK)..... 254
Şekil 4.118. Yüksek plastisiteli kile ait EDX analiz sonucu 256

Şekil 4.117. Yüksek plastisiteli kile ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 257
Şekil 4.119. Uçucu küle ait SEM görüntüleri: a) x1000, b) x5000 258
Şekil 4.120. Uçucu küle ait EDX analiz sonucu 259
Şekil 4.121. CEM 1 42.5 R çimentosunun SEM görüntüsü 259
Şekil 4.122. CEM 1 42.5 R çimentosunun XRD analizi sonucu 260
Şekil 4.123. Tasarım 4'e ait SEM görüntüsü: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 262
Şekil 4.124. Tasarım 4'e ait SEM görüntüsü: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 263
Şekil 4.125. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 265
Şekil 4.126. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 266
Şekil 4.127. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 267
Şekil 4.128. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 268
Şekil 4.129. Tasarım 4'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 270
Şekil 4.130. Tasarım 4'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 270
Şekil 4.131. Tasarım 14'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 270
Şekil 4.132. Tasarım 14'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 271
Şekil 4.133. Optimum tasarıma ait EDX sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 271
Şekil 4.134. Optimum tasarıma ait EDX sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 271
Şekil 4.135. Tasarım 4'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 273
Şekil 4.136. Tasarım 4'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 274
Şekil 4.137. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x10000, b) x25000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 275
Şekil 4.138. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 276
Şekil 4.139. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 277
Şekil 4.140. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 278

Şekil Ek 1.1. SP-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 304
Şekil Ek 1.2. SP-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 305
Şekil Ek 1.3. SP-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 306
Şekil Ek 1.4. SP-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Not: UCS 1, UCS 6 ve UCS 9 deneyleri ortalamaya katılmamıştır)..... 307
(Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)..... 307
Şekil Ek 1.5. SP-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 308
Şekil Ek 1.6. SP-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 309
Şekil Ek 1.7. SP-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 310
Şekil Ek 1.8. SP-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği(Not: UCS 1 deneyi ortalamaya katılmamıştır) (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)..... 311
Şekil Ek 1.9. SP-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün) 312
Şekil Ek 2.1 BÖ-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)..... 313
Şekil Ek 2.2. BÖ-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)..... 314

Şekil Ek 2.3. BÖ-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği 315
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 315
Şekil Ek 2.4. BÖ-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği 316
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 316
Şekil Ek 2.5. BÖ-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği 317
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 317
Şekil Ek 2.6. BÖ-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 318
Şekil Ek 2.7. BÖ-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 319
Şekil Ek 2.8. BÖ-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 320
Şekil Ek 2.9. BÖ-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 321
Şekil Ek 2.10. BÖ-10 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 322
Şekil Ek 2.11. BÖ-11 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 323
Şekil Ek 2.12. BÖ-12 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 324
Şekil Ek 2.13. BÖ-13 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 325
Şekil Ek 2.14. BÖ-14 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 326

Şekil Ek 2.15. BÖ-15 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 327
Şekil Ek 2.16. BÖ-16 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 328
Şekil Ek 2.17. BÖ-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 329
Şekil Ek 2.18. BÖ-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 330
Şekil Ek 2.19. BÖ-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği 331
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 331
Şekil Ek 2.20. BÖ-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) Mohr daireleri, c) histogram grafiği, d) olasılık grafiği 332
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 332
Şekil Ek 2.21. BÖ-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği ... 333
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 333
Şekil Ek 2.22. BÖ-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 334
Şekil Ek 2.23. BÖ-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 335
Şekil Ek 2.24. BÖ-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği 336
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 336
Şekil Ek 2.25. BÖ-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 337
Şekil Ek 2.26. BÖ-10 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 338

Şekil Ek 2.27. BÖ-11 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 339
Şekil Ek 2.28. BÖ-12 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 340
Şekil Ek 2.29. BÖ-13 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 341
Şekil Ek 2.30. BÖ-14 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 342
Şekil Ek 2.31. BÖ-15 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 343
Şekil Ek 2.32. BÖ-16 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 344
Şekil Ek 3.1. BÖ-1 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 345
Şekil Ek 3.2. BÖ-2 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 345
Şekil Ek 3.3. BÖ-3 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 346
Şekil Ek 3.4. BÖ-4 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 346
Şekil Ek 3.5. BÖ-5 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 346
Şekil Ek 3.6. BÖ-6 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 347
Şekil Ek 3.7. BÖ-7 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 347
Şekil Ek 3.8. BÖ-8 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 347
Şekil Ek 3.9. BÖ-9 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 348

Şekil Ek 3.10. BÖ-10 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 348
Şekil Ek 3.11. BÖ-11 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 348
Şekil Ek 3.12. BÖ-12 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 349
Şekil Ek 3.13. BÖ-13 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 349
Şekil Ek 3.14. BÖ-14 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 349
Şekil Ek 3.15. BÖ-15 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 350
Şekil Ek 3.16. BÖ-16 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 350
Şekil Ek 3.17. BÖ-1 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 350
Şekil Ek 3.18. BÖ-2 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 351
Şekil Ek 3.19. BÖ-3 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 351
Şekil Ek 3.20. BÖ-4 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 351
Şekil Ek 3.21. BÖ-5 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 352
Şekil Ek 3.22. BÖ-6 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 352
Şekil Ek 3.23. BÖ-7 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 352
Şekil Ek 3.24. BÖ-8 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 353
Şekil Ek 3.25. BÖ-9 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 353
Şekil Ek 3.26. BÖ-10 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 353
Şekil Ek 3.27. BÖ-11 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 354

Şekil Ek 3.28. BÖ-12 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 354
Şekil Ek 3.29. BÖ-13 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 354
Şekil Ek 3.30. BÖ-14 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (büyük ölçekli DKK, 56 gün) 355
Şekil Ek 3.31. BÖ-15 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 355
Şekil Ek 3.32. BÖ-16 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 355
Şekil Ek 4.1. BÖ-1 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 356
Şekil Ek 4.2. BÖ-2 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 357
Şekil Ek 4.3. BÖ-3 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 357
Şekil Ek 4.4. BÖ-4 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 357
Şekil Ek 4.5. BÖ-5 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 357
Şekil Ek 4.6. BÖ-6 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 358
Şekil Ek 4.7. BÖ-7 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 358
Şekil Ek 4.8. BÖ-8 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 358
Şekil Ek 4.9. BÖ-9 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 359
Şekil Ek 4.10. BÖ-10 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 359
Şekil Ek 4.11. BÖ-11 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 359
Şekil Ek 4.12. BÖ-12 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 360
Şekil Ek 4.13. BÖ-13 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 360

Şekil Ek 4.14. BÖ-14 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 360
Şekil Ek 4.15. BÖ-15 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 361
Şekil Ek 4.16. BÖ-16 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 361
Şekil Ek 4.17. BÖ-1 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 361
Şekil Ek 4.18. BÖ-2 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 362
Şekil Ek 4.19. BÖ-3 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 362
Şekil Ek 4.20. BÖ-4 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 362
Şekil Ek 4.21. BÖ-5 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 363
Şekil Ek 4.22. BÖ-6 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 363
Şekil Ek 4.23. BÖ-7 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 363
Şekil Ek 4.24. BÖ-8 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 364
Şekil Ek 4.25. BÖ-9 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 364
Şekil Ek 4.26. BÖ-10 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 364
Şekil Ek 4.27. BÖ-11 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 365
Şekil Ek 4.28. BÖ-12 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 365
Şekil Ek 4.29. BÖ-13 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 365
Şekil Ek 4.30. BÖ-14 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 366
Şekil Ek 4.31. BÖ-15 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 366

Şekil Ek 4.32. BÖ-16 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 366
Şekil Ek 5.1. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 367
Şekil Ek 5.2. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 368
Şekil Ek 5.3. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 368
Şekil Ek 5.4. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 368
Şekil Ek 5.5. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 369
Şekil Ek 5.6. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 369
Şekil Ek 5.7. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 369
Şekil Ek 5.8. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 370
Şekil Ek 5.9. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 370
Şekil Ek 5.10. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK UCS, 7 gün) 370
Şekil Ek 5.11. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 371
Şekil Ek 5.12. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 371
Şekil Ek 5.13. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 371
Şekil Ek 5.14. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 372
Şekil Ek 5.15. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 372
Şekil Ek 5.16. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 372
Şekil Ek 5.17. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 373

Şekil Ek 5.18. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 373
Şekil Ek 5.19. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 373
Şekil Ek 5.20. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 374
Şekil Ek 5.21. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 374
Şekil Ek 5.22. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 374
Şekil Ek 5.23. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 375
Şekil Ek 5.24. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 375
Şekil Ek 5.25. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 375
Şekil Ek 5.26. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 376
Şekil Ek 5.27. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 376
Şekil Ek 5.28. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 376
Şekil Ek 5.29. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 377
Şekil Ek 5.30. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 377
Şekil Ek 5.31. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 377
Şekil Ek 5.32. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 378
Şekil Ek 5.33. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 378
Şekil Ek 5.34. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 378
Şekil Ek 5.35. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 379

Şekil Ek 5.36. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 379
Şekil Ek 5.37. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 379
Şekil Ek 5.38. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 380
Şekil Ek 5.39. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 380
Şekil Ek 5.40. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 380
Şekil Ek 5.41. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 381
Şekil Ek 5.42. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 381
Şekil Ek 5.43. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 381
Şekil Ek 5.44. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 382
Şekil Ek 5.45. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 382
Şekil Ek 5.46. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 382
Şekil Ek 5.47. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 383
Şekil Ek 5.48. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 383
Şekil Ek 6.1. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 384
Şekil Ek 6.2. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 384
Şekil Ek 6.3. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 384
Şekil Ek 6.4. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 385
Şekil Ek 6.5. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 385

Şekil Ek 6.6. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 385
Şekil Ek 6.7. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 386
Şekil Ek 6.8. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 386
Şekil Ek 6.9. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 386
Şekil Ek 6.10. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 387
Şekil Ek 6.11. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 387
Şekil Ek 6.12. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 387
Şekil Ek 6.13. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 388
Şekil Ek 6.14. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 388
Şekil Ek 6.15. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 388
Şekil Ek 6.16. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 389
Şekil Ek 6.17. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 389
Şekil Ek 6.18. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 389
Şekil Ek 6.19. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 390
Şekil Ek 6.20. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 390
Şekil Ek 6.21. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 390
Şekil Ek 6.22. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 391
Şekil Ek 6.23. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 391

Şekil Ek 6.24. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 391
Şekil Ek 6.25. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 392
Şekil Ek 6.26. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 392
Şekil Ek 6.27. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 392
Şekil Ek 6.28. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 393
Şekil Ek 6.29. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 393
Şekil Ek 6.30. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 393
Şekil Ek 6.31. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 394
Şekil Ek 6.32. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 394
Şekil Ek 6.33. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 394
Şekil Ek 6.34. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 395
Şekil Ek 6.35. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 395
Şekil Ek 6.36. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 395
Şekil Ek 6.37. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 396
Şekil Ek 6.38. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 396
Şekil Ek 6.39. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 396
Şekil Ek 6.40. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 397
Şekil Ek 6.41. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 397

Şekil Ek 6.42. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 397
Şekil Ek 6.43. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 398
Şekil Ek 6.44. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 398
Şekil Ek 6.45. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 398
Şekil Ek 6.46. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 399
Şekil Ek 6.47. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 399
Şekil Ek 6.48. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 399
Şekil Ek 7.1. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 1 ve b) Tasarım 2 400
Şekil Ek 7.2. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 3 ve b) Tasarım 4 400
Şekil Ek 7.3. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 5 ve b) Tasarım 6 401
Şekil Ek 7.4. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 7 ve b) Tasarım 8 401
Şekil Ek 7.5. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 9 ve b) Tasarım 10 401
Şekil Ek 7.6. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 11 ve b) Tasarım 12 402
Şekil Ek 7.7. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 13 ve b) Tasarım 14 402
Şekil Ek 7.8. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 15 ve b) Tasarım 16 402
Şekil Ek 7.9. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 1 ve b) Tasarım 2 403
Şekil Ek 7.10. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 3 ve b) Tasarım 4 403
Şekil Ek 7.11. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 5 ve b) Tasarım 6 403

Şekil Ek 7.12. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 7 ve b) Tasarım 8 404
Şekil Ek 7.13. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 9 ve b) Tasarım 10 404
Şekil Ek 7.14. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 11 ve b) Tasarım 12 404
Şekil Ek 7.15. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 13 ve b) Tasarım 14 405
Şekil Ek 7.16. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 15 ve b) Tasarım 16 405

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Chu vd., 2009) 6
Tablo 2.2. Çimento hidratasyonu sırasında oluşan C_3S ve C_2S bileşiklerinin hacim değişimi (Yamata, 1985) 10
Tablo 2.3. Islak karıştırma yönteminde dört genel sınıflandırma için kullanılan tipik araçlar ve yaygın uygulama şekli (FHWA, 2013) 18
Tablo 2.4. Islak karıştırma yöntemi için kapasite değerleri (TS EN 14679, 2006) 19
Tablo 2.5. Islak karıştırma yöntemi için uygulama değerleri (TS EN 14679, 2006) 26
Tablo 2.6. Dayanımı etkileyen faktörler (Terashi, 1997) 30
Tablo 3.1. CEM 1 42.5 R çimentosunun özellikleri 43
Tablo 3.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşimi ve standartlara uygunluğu 45
Tablo 3.3. Enjeksiyon pompasının özellikleri 50
Tablo 3.4. HN-300 karot makinesinin özellikleri 55
Tablo 3.5. Likit kıvamdaki (w=%52) zeminin deney tankındaki konsolidasyon davranışı 65
Tablo 3.6. L9 Taguchi deney tasarım tablosu 68
Tablo 3.7. Sistem parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan parametreler ve seviyeleri 68
Tablo 3.8. Farklı katkılar ile yapılan marsh hunisi deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1) 78
Tablo 3.9. L16 Taguchi deney tasarım tablosu 82
Tablo 3.10. Uçucu kük katkılı DKK tasarımlarında kullanılan parametreler ve seviyeleri 82
Tablo 3.11. Homojen zemin ortamı için uygulanan ön konsolidasyon basıncı 83
Tablo 4.1. Taguchi'nin L9 tasarım tablosu ile oluşturulan deney programı 97
Tablo 4.2. Kolon imalatı sırasındaki gözlemler ve yapılan ölçümler (Sistem parametrelerinin araştırılması) 100
Tablo 4.3. İmal edilen kolonların çapı 101
Tablo 4.4. Kolon imalatı sırasında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri 104
Tablo 4.5. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri 104
Tablo 4.6. Kolonların farklı bölgelerinden alınan karot dayanımları ve zemin iyileştirme derecesi (Sistem parametrelerinin araştırılması) 106
Tablo 4.7. Q testi için farklı güven seviyelerindeki kritik Q değerleri (Dean ve Dixon, 1951) 106
Tablo 4.8. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Sistem parametrelerinin araştırılması) 113
Tablo 4.9. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması) 114

Tablo 4.10. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen ANOVA sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması) 115
Tablo 4.12. Marsh hunisi deneyinden elde edilen akma zamanları 121
Tablo 4.13. Sedimentasyon deneylerinden elde edilen çökelme yüzdeleri 122
Tablo 4.14. Büyük ölçekli DKK imalatı sırasında yapılan gözlemler 123
Tablo 4.15. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri (Büyük ölçekli DKK) 125
Tablo 4.16. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri (Büyük ölçekli DKK) 126
Tablo 4.18. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)..... 130
Tablo 4.19. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)..... 130
Tablo 4.20. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 131
Tablo 4.22. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 135
Tablo 4.23. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)..... 136
Tablo 4.24. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 137
Tablo 4.26. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 144
Tablo 4.27. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün) 145
Tablo 4.28. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)..... 146
Tablo 4.30. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 149
Tablo 4.31. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün) 150
Tablo 4.32. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)..... 151
Tablo 4.33. Kolonlar için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)..... 154
Tablo 4.34. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)..... 155
Tablo 4.35. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün) 156
Tablo 4.36. Kolonlar için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 157
Tablo 4.37. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)..... 158

Tablo 4.38. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün) 159
Tablo 4.39. Permeabilite deneyi sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)..... 162
Tablo 4.40. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)..... 163
Tablo 4.41. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) 164
Tablo 4.42. Permeabilite deneyi sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 165
Tablo 4.43. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)..... 166
Tablo 4.44. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) 166
Tablo 4.45. Zemin-bağlayıcı karışımlarının kıvam ve kalıba yerleştirilme durumları..... 170
Tablo 4.46. Küçük ölçekli DKK tasarımında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri 172
Tablo 4.47. Küçük ölçekli DKK tasarımında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri 173
Tablo 4.48. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 7 gün)..... 174
Tablo 4.49. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün).. 175
Tablo 4.50. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 7 gün) 176
Tablo 4.51. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün) 177
Tablo 4.52. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)..... 178
Tablo 4.53. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 179
Tablo 4.54. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 179
Tablo 4.55. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün) 180
Tablo 4.56. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 181
Tablo 4.57. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 183
Tablo 4.58. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 183
Tablo 4.59. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün) 184
Tablo 4.60. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)..... 188
Tablo 4.61. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün) 189
Tablo 4.62. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 7 gün)..... 190

Tablo 4.63. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)..... 191
Tablo 4.64. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)..... 191
Tablo 4.65. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün) .. 193
Tablo 4.66. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)..... 193
Tablo 4.67. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)..... 194
Tablo 4.68. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)..... 195
Tablo 4.69. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün) .. 197
Tablo 4.70. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)..... 197
Tablo 4.71. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)..... 198
Tablo 4.72. Zemin-bağlayıcı karışımları için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)..... 201
Tablo 4.73. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)..... 202
Tablo 4.74. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün) 203
Tablo 4.75. Zemin-bağlayıcı karışımları için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 204
Tablo 4.76. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)..... 205
Tablo 4.77. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün) 206
Tablo 4.78. Permeabilite deneyi sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)..... 208
Tablo 4.79. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, permeabilite, 28 gün)..... 209
Tablo 4.80. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) 210
Tablo 4.81. Permeabilite deneyi sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)..... 211
Tablo 4.82. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, permeabilite,56 gün)..... 212
Tablo 4.83. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) 212
Tablo 4.86. Faktöriyel tasarımda kullanılan parametreler ve bunların seviyeleri 242

Tablo 4.87. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK)..... 243
Tablo 4.88. Dayanım değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK)..... 244
Tablo 4.89. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK) 247
Tablo 4.90. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK)..... 250
Tablo 4.91. Dayanım değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK)..... 250
Tablo 4.92. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK) 253
Tablo 4.93. Killi zemin ve uçucu külün element bileşimleri (EDX analizi sonucu)..... 256
Tablo 4.94. Küçük ölçekli DKK numunelerindeki elementlerin kütlece yüzdeleri 269

TÜBİTAK

ÖZET

Bu proje ile killi bir zeminde imal edilen uçucu kül katkılı derin karıştırma kolonlarının (DKK) performansını etkileyen parametreler araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, derin karıştırma makinesiyle imal edilen kolonlar (büyük ölçekli DKK) ve mikserle hazırlanan zemin-enjeksiyon karışımları (küçük ölçekli DKK) üzerinde yürütülmüştür.

Deneysel çalışmaların tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Her bir araştırma alanında ve ilgili kür süreleri sonunda DKK'nın performans değerleri belirlenerek elde edilen sonuçlar S/N ve çok değişkenli varyans analizleri (ANOVA) ile değerlendirilmiş, regresyon analizleri ile matematiksel modeller kurulmuş, sonrasında optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Büyük ölçekli DKK imalatlarının yapılabilmesi için öncesinde homojen ve sürekli DKK oluşumu için gerekli imalat parametreleri araştırılmıştır. Optimum imalat parametreleri olarak; çimento dozajı 325 kg/m^3, karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk, enjeksiyon deliklerinin çapı 3 mm ve zeminin likitlik indisi 1 şeklinde belirlenmiştir.

Uçucu kül katkılı DKK tasarımlarında 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda DKK'nın serbest basınç (q_u) ve üç eksenli basınç dayanımları (q_{uu}), zemin iyileştirme derecesi (RI), sıkışma indisi (Cc) ve permeabilite katsayısı (k) değerleri belirlenmiştir. DKK performansının en iyi olduğu durum için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %40, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir. DKK uygulamalarında %40 uçucu kül kullanılması ile çimento kullanımı ve enjeksiyon maliyeti %40 oranında azalmış olacaktır. Küçük ölçekli DKK'nın dayanım performansı büyük ölçekli DKK'nın performansına göre q_u ve q_{uu} değerleri bakımından sırasıyla %40 ve %30 daha fazla iken, konsolidasyon ve permeabilite özelliklerini temsil eden Cc ve k değerlerine göre sırasıyla %20 ve %45 daha az elde edilmiştir. Küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarında; kür süresi (t), bağlayıcı faktörü (α) ve içeriği (a_w) arttığında q_u, q_{uu} ve RI artarken, Cc ve k azalmaktadır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) ve/veya likitlik indisi ($I_{L,mix}$) arttıkça q_u ve q_{uu} azalırken, Cc ve k artmaktadır. DKK performansının en iyi olduğu durum $I_{L,mix}$=(1.2-1.3)I_L olduğunda elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile DKK içyapısındaki boşlukların durumu, C-S-H, C-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluşumu gözlenerek DKK performansı ile ilişkilendirilmiştir. Deneysel ve istatistiki çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olmuştur.

Anahtar Kelimeler: derin karıştırma kolonu, kil, optimizasyon, Taguchi yöntemi, uçucu kül

ABSTRACT

In the scope of this project, parameters affecting the performance of fly ash additive deep mixing columns (DMC) manufactured in a clay soil were investigated. Experimental studies were carried out on columns manufactured with a deep mixing machine (large scale DMC) and soil-slurry mixtures prepared with mixer (small scale DMC).

Designs of experiments were organized using the Taguchi method. The results obtained by determining the DMC performance values at each research area and at the end of the relevant curing periods were evaluated with S/N and multivariate variance analysis (ANOVA), and mathematical models were established with regression analysis and then optimization studies were carried out.

In order to construct large scale DMC, the manufacturing parameters required for homogeneous and continuous DMC formation were investigated first. Optimum construction parameters were determined as cement dosage is 325 kg/m^3, the rotation speed of the mixing blades is 80 rpm, the diameter of the grout nozzles is 3 mm and the liquidity index of the soil is 1.

The unconfined compression (q_u) and triaxial compressive strengths (q_{uu}), soil improvement ratio (RI), consolidation index (Cc) and permeability coefficient (k) values of fly ash additive DMC designs were determined at 7, 28 and 56 days of curing times. Optimum construction parameters for the best performance were determined as the binder dosage is 425 kg/m^3, the fly ash ratio is 40%, the superplasticizer ratio is 3%, the water/binder ratio is 0.8 and the liquidity index of the soil is 1. The use of cement and slurry cost will be reduced by 40% by using 40% fly ash in DMC applications. While the strength performance of small scale DMC is 40% and 30% higher in q_u and q_{uu} values, respectively, compared to the performance of large scale DMC, it is obtained 20% and 45% less in Cc and k values representing consolidation and permeability properties, respectively. In small and large scale DMC designs; when curing time (t), binder factor (α) and content (a_w) increase, q_u, q_{uu} and RI increase, Cc and k decrease. As the total water/binder ratio (W_T:W_b) and/or the liquidity index ($I_{L,\ mix}$) of the soil-slurry mixture increases, q_u and q_{uu} decrease, while Cc and k increase. The best condition for DMC performance was obtained when $I_{L,mix}$ was (1.2-1.3)I_L. With the SEM images, the condition of the voids and the formation of C-S-H, C-A-H gels, CH plates and etrenjit needles in the microstructure of DMC samples have been investigated and associated with DMC performance. The results obtained from experimental and statistical studies have been compatible with the literature.

Keywords: clay, deep mixing column, fly ash, optimization, Taguchi method

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamaları açısından sorunlu zemin yapısına sahip alanlarda zemin taşıma gücünün sağlanmaması ve oturma limitlerinin aşılması önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür alanlarda zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin uygun yöntemlerle iyileştirilmesi gerekmektedir. Derin karıştırma yöntemi (DKY) zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemde çimentolanmayı sağlayan maddeler (çimento, kireç vb.) zeminle mekanik olarak karıştırılmaktadır. DKY özellikle killi zeminlerde uygulanmakla birlikte, tasarım koşullarını sağladığı takdirde, her türlü zeminde uygulanabilmesi, hızlı ve ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

DKY ile ıslak ve kuru karıştırma teknikleri kullanılarak kolon imalatı yapılabilmektedir. Kuru karıştırma yöteminde bağlayıcı olarak kireç veya kireç+çimento kullanılırken, ıslak karıştırma yönteminde genellikle çimento kullanılmaktadır. Literatüre bakıldığında derin karıştırma ile stabilizasyon çalışmalarında çimento katkılı zemin-bağlayıcı karışımlarının mühendislik özellikleri hem sahada hem de laboratuvar ortamında araştırılmıştır (Porbaha vd., 2000; Tan vd., 2002; Matsuo vd., 1996; Miura vd., 2002; Horpibulsuk vd., 2003; Lorenzo ve Bergado, 2004, 2006). Çimento, beton teknolojisinde ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan en önemli bağlayıcı maddedir. Fakat toplam CO_2 gaz salınımının %5-8'i sadece çimento üretimi sırasında açığa çıkmakta ve doğa kirlenmektedir (Sharp vd., 2010). Bu nedenle son zamanlarda çimentoya alternatif bir bağlayıcı olan uçucu külün zemin-bağlayıcı karışımının performansına olan etkileri araştırılmıştır (Çetiner, 2004; Horpibulsuk vd., 2009; Bushra ve Robbinson, 2013). Bu çalışmalarda çimentoya belirli oranlarda uçucu kül ilave edildiğinde performasın arttığı belirlenmiştir.

Uçucu kül termik santrallerde kömürün yakılması sonucu açığa çıkan atık bir üründür. Bu nedenle çimentoya göre maliyeti çok düşüktür. Uçucu külün inşaat sektöründeki kullanımı artırıldığında atık malzemeler değerlendirilecek ve aynı zamanda çevre sağlığı açısından önemli bir atıktan kurtulunmuş olacaktır.

Uçucu külün zeminlerin iyileştirilmesi çalışmalarında kullanılması ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalarda; çoğunlukla zemin-uçucu kül-su karışımı numunelerinin mikser ile hazırlandığı, kür sonunda bu numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Mikser yardımıyla hazırlanan zemin-bağlayıcı numuneleri ile derin karıştırma makinesiyle imal edilen DKK'nın performansı arasında %20-100 arasında farklılıklar olabilmektedir (CDIT, 2002). Ayrıca, şimdiye kadar yapılan laboratuar çalışmalarında arazi ölçeğini temsil edecek şekilde uçucu kül katkılı derin karıştırma kolon imalatının yapılmadığı belirlenmiştir.

Derin karıştırma kolonlarının (DKK) performansı hem enjeksiyon parametrelerine hem de zemin-enjeksiyon karışımının homojenliğine bağlı olmaktadır. Homojen karışmış DKK oluşturulmasında etkili olan en önemli iki parametre; karıştırma bıçaklarının dönme hızı ve BRN sayısıdır. BRN sayısı, karıştırma bıçaklarının 1 m derinlik boyunca toplam dönme sayısını ifade etmektedir. DKK imalatı sırasında FHWA (2013), minimum BRN değerinin 360 devir/m, Topolnicki (2009) ise 430 devir/m olması gerektiğini söylerken, uygulamada 1000 devir/m'ye kadar imalat yapılmaktadır. Karıştırma bıçaklarının dönme hızı için TS EN 14679 (2006) 20-60 devir/dk arasında bir değerin seçilmesini önermektedir. Fakat uygulamada karıştırma bıçaklarının dönme hızı 14.6 devir/dk (Chen vd., 2013) veya 50-160 devir/dk (Mullins ve Gunaratne, 2015; Larsson vd., 2005) olduğu durumlarda DKK imalatı yapılmıştır. İmalat parametrelerindeki bu değişkenlikler zemin özelliklerine, bağlayıcı dozajına ve su/bağlayıcı oranına göre değişmektedir ve bu alanlarda ilave çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Proje kapsamında, derin karıştırma uygulamalarında yukarıda bahsedilen bilgi eksikliklerini gidermek amacıyla deneysel ve istatistiki çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda yüksek plastisiteli killi bir zemin içerisinde ve laboratuvarda imal edilen uçucu kül katkılı DKK'nın performansını (dayanım, konsolidasyon ve geçirimlilik özellikleri bakımından) etkileyen parametreler araştırılmıştır. DKK performansını etkileyen değişkenler üç ana grup altında incelenebilir. Bunlar; iyileştirilecek zeminin özellikleri (doğal su muhtevası veya kıvamı, mukavemet özellikleri vb.), makine-teçhizattan kaynaklı sistemsel özellikler (delgi gövdesinin çekme ve batma hızları, karıştırma bıçaklarının dönme hızı ile bunlar üzerinde bulunan enjeksiyon deliklerinin sayısı ve çapı) ile bağlayıcı özelliklerinden (bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı) kaynaklanmaktadır. DKK'nın performansı ile ilgili olarak tasarlanan bu projenin amaç ve hedefleri aşağıda özetlenmiştir:

- Homojen karışmış ve sürekli bir DKK imal edebilmek amacıyla makine-teçhizattan kaynaklı sistemsel parametrelerin (delgi gövdesinin batma/çekme ve dönme hızları, karıştırıcı bıçaklar üzerindeki delik çapları) optimum değerlerinin belirlenmesi,
- Maksimum dayanıma, minimum geçirimliliğe ve sıkışabilirliğe sahip DKK imal edebilmek amacıyla enjeksiyon karışımında kullanılacak maddelerin (çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarları ve su/bağlayıcı oranı) optimum değerlerinin belirlenmesi,
- Küçük ölçekli olarak hazırlanan derin karıştırma numuneleri (mikser karışımı) ile arazideki derin karıştırma yöntemini modelleyen ve derin karıştırma makinesiyle imal edilen DKK'nın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılıkların belirlenmesi,

- Zemin-enjeksiyon karışımının fiziksel özellikleri (bağlayıcı dozajı, içeriği, karışımın toplam su/bağlayıcı oranı, likitlik indisi vb.) ile DKK performansı arasındaki ilişkilerin kurulması,
- Kür süresinin DKK performansına etkisinin araştırılması,
- DKK numunelerinin mineralojik ve morfolojik yapısı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Yukarıda bahsedilen hedeflere ulaşılabilmesi için hem DKK makinesi ile (büyük ölçekli) hem de mikser yardımıyla (küçük ölçekli) DKK imalatı yapılmıştır. DKK imalatından 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda numunelerin serbest basınç ve üç eksenli basınç dayanımları, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik özellikleri belirlenmiştir. Deneysel tasarımlar Taguchi yöntemine göre oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar S/N ve çok değişkenli varyans (ANOVA) analizleriyle değerlendirilmiş, sonrasında optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bazı tasarımlardan SEM görüntüleri alınarak, DKK nuunelerinin içyapısında oluşan çimentolanma ürünleri (C-S-H, C-S-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğneleri) ile performans özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

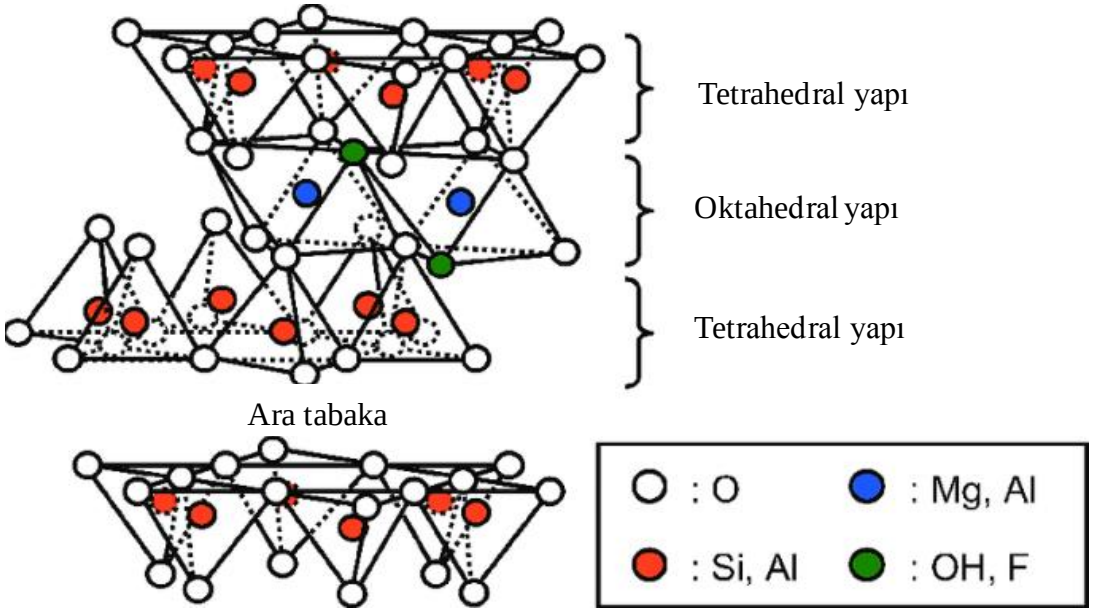
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Proje kapsamında yüksek plastisiteli killi bir zemin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiştir. Bu kapsamda yürütülen deneysel ve istatistiki çalışmalar Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle yüksek plastisiteli killi zeminler, derin karıştırma yöntemi ve Taguchi yöntemi ile ilgili kuramsal bilgiler ve literatür araştırması aşağıda verilmiştir.

2.1 Yüksek Plastisiteli Killer ve Özelliklerinin İyileştirilmesi

2.1.1 Mineraloji

Yüksek plastisiteli killer, kayaçların sedimentasyon ve kalıcı çökel biçimlenmesi sonucu oluşmuşlardır (Mitchell, 1993). Şişen killer, önemli ölçüde elastik enerji depolayan parçacıklara sahiptirler ve önemli miktarda adsorbe su ve çift katmanlı su tutarlar (Mesri vd., 1994). Bu tür zeminlerin şişme kabiliyeti boşluk suyunun kimyasal yapısına ve zemin tanelerinin mineralojisine bağlıdır. Kil mineralleri, silikon tetrahedral (Si) ve alüminyum oktahedral (Al) yapıların farklı dizilimlerine sahiptirler (genellikle 1:1 ve 2:1 tabakalanması mevcuttur). 2 tabaka silika katmanı arasına 1 tabaka alüminyum tabakasının gelmesiyle (2:1 dizilimine sahip mineraller) “simektit” grubu kil mineralleri oluşur (Şekil 2.1). Bu mineraller suyla temas ettiklerinde düzensiz bir yapıya geçerler ve yüksek plastiklik özelliği gösterirler (Little, 1995; Mitchell ve Soga 2005). Bu minerallerin izomorf yapıda olmasından dolayı mineral yüzeyinde yüksek oranda negatif yükler bulunmaktadır. Bundan dolayı boşluk suyundaki katyonlar kil yüzeyinde absorbe edilerek diffuz çift tabaka suyu oluşturmaktadırlar. Si ve Al tabakaları birbirine zayıf Van der Waal’s kuvvetleriyle bağlıdır. Bu nedenle tabakalar veya kil parçaları arasındaki zayıf kuvvetler suyla temas ettiklerinde kolayca kırılabilmektedir. Bu olay sonucunda, kil mineralleri bünyelerinde kuru ağırlıklarının yedi katına kadar su barındırabilmektedirler (Little, 1995; Mitchell ve Soga 2005).



Şekil 2.1. Smektit grubu killerin mineral yapısı (Ino vd., 2011)

2.1.2 Zeminlerin iyileştirilmesine genel bakış

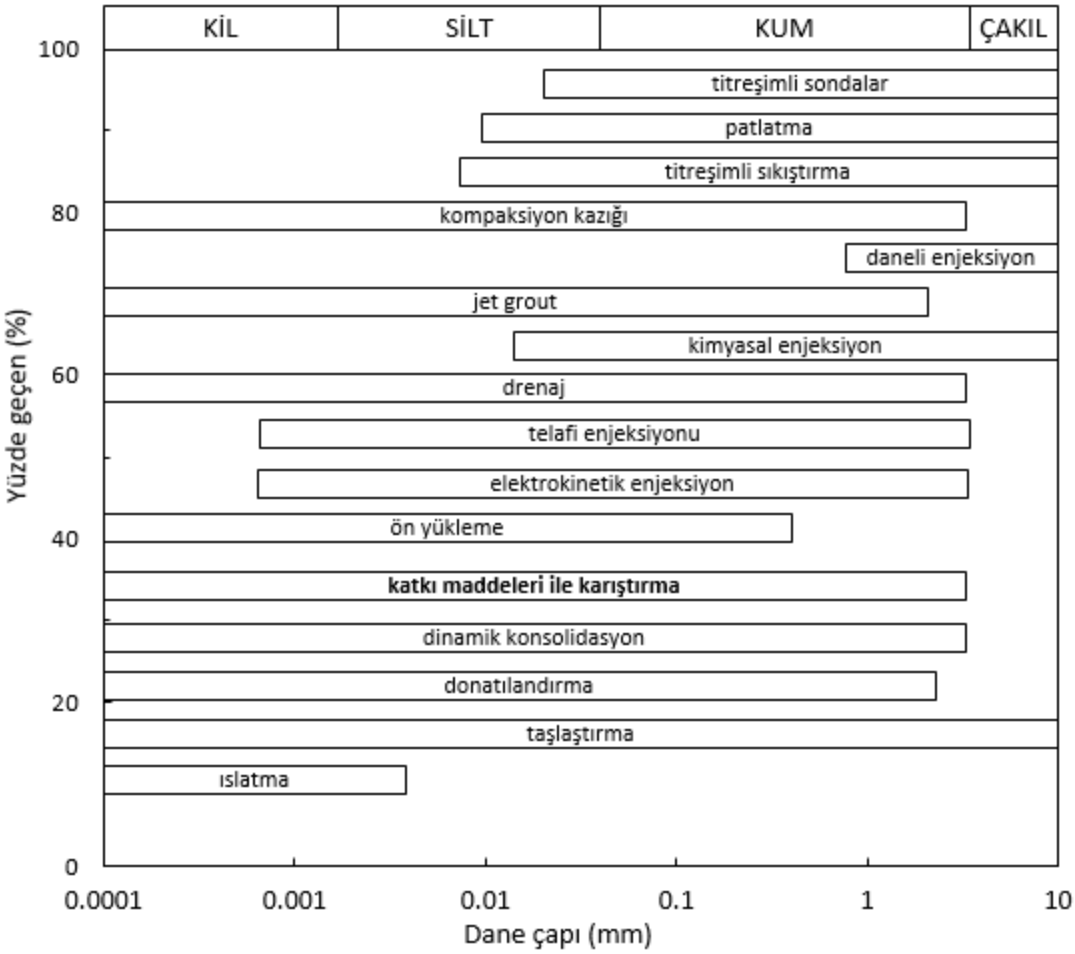
Günümüzde, nüfus artışı ile birlikte hızla gelişen şehirleşme sonucunda inşaat alanları gittikçe azalmaktadır. Yapıları inşa edecek sağlam zemin bulmanın zorluğu ve/veya herhangi bir arazide yapılması düşünülen yapıdan vazgeçilememesi nedenlerinden dolayı zeminlerin iyileştirilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Yapı temellerinin taşıma gücü, oturma, stabilite ve sıvılaşma koşullarından bir veya birkaçını sağlayamadığı durumlarda zemin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yüzeysel ve derin iyileştirme tekniği olarak birçok zemin iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. İnşa edilecek yapının özellikleri ve yapıdan zemine aktarılan gerilmelerin etkisine göre iyileştirmenin yüzeysel mi yoksa derin mi yapılacağına karar verilmektedir. Daha sonra yapı yüküne karşı koyabilecek şekilde zeminin yeterli dayanıma getirilmesi (kompaksiyon veya katkılı stabilizasyon) veya zeminin içerisinde zemine göre rijitliği daha yüksek olan kolonlar (kazıklı temel, jet grout, derin karıştırma, taş kolonları) imal edilmesiyle zemin iyileştirme çalışması yapılabilmektedir. İyileştirilecek zeminin özellikleri ve iyileştirme yönteminin maliyeti, süresi ve hangi amaca yönelik yapılması gerektiği dikkate alınarak en uygun yöntemin seçilmesi gerekmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri farklı değerlendirmelere göre sınıflandırılabilir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Chu vd., 2009)

Yöntemin Özelliği				
İri daneli zemin ve dolguda (katkısız)	İnce daneli zeminde (katkısız)	Katkılı ve cisim eklemeli	İçitim tipi katkılı	Donatılandırma
Dinamik kompaksiyon	Drenajlı dinamik konsolidasyon	Titreşimli ittirmeyle	Daneli içitim	Mekanik stabilizasyon
Titreşimli kompaksiyon	Önceden yüklemeli	Dinamik ittirmeyle	Kimyasal enjeksiyon	Geosentetikler
Patlatmalı sıkıştırma	Emme ile önceden yüklemeli	Kum kompaksiyon kazığı	**Karıştırma yöntemleri**	Zemin ankrajları
Elektrik uygulamalı sıkıştırma	Yerine başka zemin koyarak	Geotekstil kolonları	Jet grout	Çivileme
Yüzeyden sıkıştırma	Elektro kinetik konsolidasyon	Rijit cisim yerleştirme	Sıkıştırma enjeksiyonu	Biyolojik yöntemler
	Isıl işlemlerle	Kazıklı dolgular	Telafi enjeksiyonu	
	Suda patlatma ile sıkıştırma	Bakteriyel yöntemler		

Projenin araştırma alanı derin karıştırma yöntemi ile zeminlerin iyileştirilmesi şeklindedir. Derin karıştırma yöntemi, içitim tipi katkılı stabilizasyon sınıfına girmektedir (Tablo 2.1) ve çakıllı zeminler haricindeki tüm zeminlerde (kil, silt, kum) uygulama alanı bulmaktadır (Şekil 2.2).

Zemin iyileştirmesindeki temel amaç; zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilerek istenilen seviyeye getirilmesidir. Zeminin yapısal ve/veya jeolojik yüklerden dolayı oluşan kayma gerilmelerine karşı yeterli kayma dayanımına sahip olması gerekmektedir. İyileştirme sonrasında zemin elastik davranış gösterebilmeli ve kalıcı deformasyonların minimum olması için yeterli rijitliğe (elastiklik modülü) sahip olmalıdır. Zeminin suyla temas etmesi durumunda su emmeye karşı koyabilmesi sağlanmalıdır. Böylelikle hacimsel şişme ve büzülme olayları sınırlandırılmış olmaktadır. İyileştirilmiş zeminin yüklemeye veya su etkilerine maruz kaldığında kendi hacmini ve kütlesini muhafaza edebilecek stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Ayrıca zemin su etkilerine (ıslanma-kuruma), sıcaklık değişimlerine (donma-çözünme) ve yüklemeye karşı uzun dönem perforansını koruyacak sağlamlığa (durabilite) sahip olmalıdır.



Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemlerinin dane boyutuna göre ayrımı (Mitchell, 1981)

2.1.3 Katkılı (kimyasal) stabilizasyon ve bağlayıcının rolü

Kimyasal katkılar zayıf ve/veya şişen zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal katkı ilave edilmesiyle zemin taneleri birbirine güçlü bağlarla bağlanmaktadırlar. Ayrıca yeterli dayanımın sağlandığı durumda zeminin su muhtevası düşük seviyelerde tutulmuş olmaktadır (Chittori, 2008). Zemine katkı maddesi ilave edilince zemin-katkı-su etkileşimiyle yeni bileşikler ortaya çıkmaktadır. Katkı maddesinin ne kadar hızlı ve ne kadar işe yaradığı, muamele edilen malzemenin bileşimine ve katkı maddesine dayanmaktadır (Chittoori, 2008). Katkı maddeleri üç ana kategoriye ayrılabilir: Geleneksel, geleneksel olmayan ve yan ürün stabilizatörleri. Geleneksel katkı maddeleri arasında sönmüş kireç, Portland çimentosu, uçucu kül gibi maddeler bulunmaktadır. Geleneksel olmayan stabilizatörler sülfonatlanmış yağlar, amonyum klorür, enzimler, polimerler gibi maddelerdir. Yan ürün stabilizatörleri çimento fırını tozu, kireç fırını tozu gibi maddelerdir.

Katkılı stabilizasyonda geleneksel stabilizatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel stabilizatörler ile zeminin modifiye ve stabilize edilmesi puzolanik reaksiyonlara ve katyon değişimine bağlıdır. Pozzolanik reaksiyonlar, silisli ve alüminli malzemelerin düzenli sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit (CH) ile kimyasal reaksiyona girdiğinde oluşmaktadır ve bu reaksiyonlarla çimentolu bileşikler meydana gelmektedir (Mamlouk ve Zanjewski, 2011). Öte yandan, zeminin mineral yapısındaki katyon değişim yerlerinde bulunan serbest katyonlar değiştirilebildiği zaman bir katyon değişimi meydana gelmektedir (Chittoori, 2008).

Deneysel çalışmalar sırasında derin karıştırma kolonu imal edilirken enjeksiyon içerisinde bağlayıcı madde olarak çimento ve uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı maddeler ile ilgili genel bilgiler ve puzzolanik reaksiyonlar aşağıda anlatılmıştır.

2.1.3.1 Çimento

Çimento, esas olarak, doğal kalker taşları (kireç taşı, kalker) ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta (1400-1650 °C) ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Kalker taşları kalsiyum oksit, kil ise silika ve alüminyum yönünden zengin maddelerdir. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyonu sonucu sert bir kütle oluşturduktan sonra su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve mukavemetini muhafaza eden veya artıran bağlayıcı maddelerdir.

Çimentolar CaO, MgO gibi alkalin öğeler ve SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi hidrolik öğelerden oluşur. Alkalin ve hidrolik öğelerin oranları da bağlayıcı maddenin niteliğini belirlemektedir.

Çimentolar TS EN 197-1'de "CEM Çimentosu" olarak adlandırılırlar. CEM çimentosu, hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO_2 toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardır. Standarda göre CEM çimentoları, 27 alt çeşidi kapsayan 5 ana tiptir. Bunlar CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V çimentosudur. Bunlar dışında, sülfatlara dayanıklı çimentolar, beyaz portland çimentosu, harç çimentosu, yüksek fırın cürufu katkılı ve çok düşük hidratasyon ısılı özel çimentolar bulunmaktadır.

Çimentolar, ASTM C150/C150M-17 standardına göre ise 5 gruba ayrılmaktadır. Bunlar; Tip 1 (normal portland çimentosu), Tip 2 (sülfata dayanıklı çimento), Tip 3 (yüksek erken dayanım veren çimento), Tip 4 (düşük hidratasyon ısısı veren çimento) ve Tip 5 (sülfat direnci yüksek çimento) olarak sınıflandırılmıştır.

2.1.3.1.1 Çimentonun hidratasyonu

Zemin iyileştirmesindeki davranışı anlayabilmek için çimento hidratasyonu ile ilgili birtakım bilgilerin bilinmesinde fayda vardır.

Çimento üretimi sırasında klinker yapısında bulunan silikatlar ve aluminatlar ile sonradan ilave edilen alçı (sülfat) hidratasyon sürecini doğrudan etkilemektedir. Çimentonun ana bileşenlerini kalsiyum silikatlar (C_3S-C_2S), kalsiyum aluminatlar (C_3A-C_4AF) ve kalsiyum sülfatlar ($C\bar{S}.2H$) oluşturur. Çimentonun yaklaşık %20'si silisyum dioksit (SiO_2) ve %60-65'i kalsiyum oksitten (CaO) oluşur. Bu iki oksitin birleşmesiyle silikatlar oluşur. Çimento hacminin yaklaşık %55'ini trikalsiyum silikat (C_3S) oluşturur ve erken dayanım üzerinde etkilidir. Dikalsiyum silikatın (C_2S) geç dayanıma etkisi vardır ve çimento hacminin yaklaşık %20'sini oluşturur. Alümina, kalsiyum oksitle birleşerek trikalsiyum alüminat (C_3A) ve demir oksitle birleşerek tetrakalsiyum aluminoferrite (C_4AF) oluşturur. Alüminatlar yaklaşık olarak çimentonun %20'sini oluşturur. Hidratasyon sırasında C_3A çok hızlı tepkimeye girer ve bu durum alçı (sülfat) ile kontrol edilir. Çimento içeriğinde K_2O, Na_2O, SO_3, MgO, Cl, MnO ve TiO_2 gibi bileşenler de vardır fakat bunlar hidratasyon sürecinde çok etkili değildir.

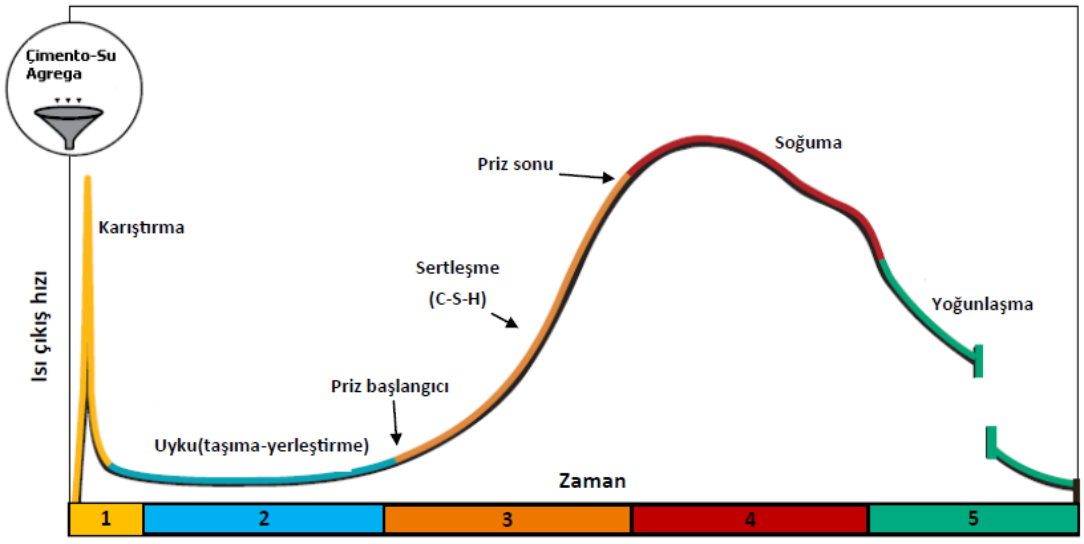
Yamata (1985) çimento hidratasyonu sırasında oluşan C_3S ve C_2S bileşiklerinin hacim değişimini Tablo 2.2'deki gibi açıklamıştır. Buna göre reaksiyon sonucunda toplam katı hacmi artmaktadır. Örneğin, C_3S reaksiyonunda katıların hacmi 145 cm^3'ten 226.1 cm^3'e artmaktadır. Bununla birlikte reaksiyona giren ürünlerin toplam hacminin reaksiyon sonunda azaldığı görülmektedir. Bu durum hidratasyon sırasında büzülmenin olduğunu göstermektedir ve ortaya çıkan ürünlerin boşluk oranının azaldığı söylenebilir.

Çimento hidratasyonu süreçleri kalorimetre-zaman eğrisi (Şekil 2.3) ile tarif edilmiştir (Kosmatka vd., 2006). Birinci aşama karıştırma aşamasıdır (10-15 dk) ve hızlı tepkime sonucu oluşan bileşikler yüksek ısı çıkışına neden olmaktadırlar. Çimento içerisindeki alçı çok hızlı çözünmekte ve aluminatlar ile su tepkimeye girerek çimento tanelerinin etrafında jelimsi bir tabaka oluşturmaktadır. Bunun sonucunda aluminatların tepkimeye girmesi gecikmekte ve sıcaklıkta ani bir düşüş meydana gelmektedir. İkinci aşama uyku sürecidir ve çimento 2-4 saat süresince plastikliğini korumakta ve işlenebilme özelliğine sahiptir. Bu aşamada ısı çıkış hızı sabit olmakla birlikte Ca ve OH^- iyonları çözünmeye devam etmektedir (Kosmatka vd., 2006). Üçüncü aşama sertleşme sürecidir ve 2-4 saat içerisinde bitmektedir. Bu aşamada yeni hidratasyon ürünleri oluşarak ısı yükselir, çimento priz almaya başlar. Belirli süre sonunda çimento sertleşerek katılaşır ve priz süresi sona ermektedir. Dördüncü aşama olan soğuma sürecinde C_3S yüzeyinde hidratasyon başlar ve kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CH) jelleri oluşur. Bunun neticesinde çimento katkılı ürünler

dayanım kazanmaya başlar. Son aşama olan yoğunlaşma sürecinde hidrate olmamış çimento tanecikleri ve suyun uzun yıllar boyunca reaksiyonu devam etmektedir. Bunun sonucunda hidratasyon ürünleri artmaya devam eder ve çimento katkılı ürünler zamanla dayanım kazanmaya devam ederler.

Tablo 2.2. Çimento hidratasyonu sırasında oluşan C_3S ve C_2S bileşiklerinin hacim değişimi (Yamata, 1985)

Reaksiyon	$2C_3S$	+	$6H_2O$	→	$C_3S_2H_3$	+	$3Ca(OH)_2$
Kütle (g)	456.6		108.1		342.5		222.3
Yoğunluk (g/cm3)	3.15		1		2.71		2.23
Hacim (cm3)	145		108.1		126.4		99.7
Toplam hacim (cm3)		253.1				226.1	
Reaksiyon	$2C_2S$	+	$4H_2O$	→	$C_3S_2H_3$	+	$Ca(OH)_2$
Kütle (g)	344.6		72.1		342.5		74.1
Yoğunluk (g/cm3)	3.15		1		2.71		2.23
Hacim (cm3)	105.1		72.1		126.4		33.2
Toplam hacim (cm3)		177.2				159.6	



Şekil 2.3. Hidratasyon reaksiyonu süreçleri (Kosmatka vd., 2006)

Çimentonun hidratasyon reaksiyonu süreçleri incelendiğinde zemin-çimento karışımında kür sıcaklığı ve kür süresinin iyileştirilmiş zeminin mühendislik özelliklerini etkilediği söylenebilir. Bu nedenle stabilizasyon işlemi 1-3 saat içerisinde tamamlanmalı ve kür şartlarına dikkat edilmelidir.

2.1.3.1.2 Kil-çimento reaksiyonu

Kil mineralleri dışındaki zemin bileşenleri (özellikle küçük boyutlardaki amorf silika ve alümina) kimyasal saldırılara karşı daha az dirençlidir ve çimentolu madde için potansiyel bir kaynağı temsil eder. Bu tür bileşenler kil-kimyasal madde katkısında çok önemli bir rol oynamaktadır. Kilin katyon değişim kapasitesi (CEC) ne kadar yüksek olursa, katkı maddesi ile kil arasında daha fazla kimyasal reaksiyon meydana gelir. Aynı zemin türü için katyon değişim kapasitesinin arttırılması, katkı maddesi ile zemin arasındaki reaksiyon hızını ve/veya kimyasal reaksiyon miktarını artırmaktadır (Herzog ve Mitchell, 1963).

Kil-çimento karışımının hidratasyonu sırasındaki birincil reaksiyonlar ile çimentolanma ürünleri oluşurken, ortamın pH değeri artmakta ve kireç serbest kalmaktadır (Herzog ve Mitchell, 1963). Birincil reaksiyonlar şöyle özetlenebilir:

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow \underbrace{C_3S_2H_3}_{\text{(Tobermorit jeli)}} + \underbrace{Ca(OH)_2}_{\text{(Portlandit)}} \quad (2.2)$$

Yüksek pH ve $Ca(OH)_2$ konsantrasyonu kil parçacıklarına saldırıyı başlatmaktadır. Daha sonra ikincil çimentolanma ürününü oluşturmak için kalsiyum ile birleşebilen amorf silika ve alümina parçalanmaktadır (Herzog ve Mitchell, 1963).

Kil-çimento karışımında, ortamda bulunan $Ca(OH)_2$ miktarı çimento-kil etkileşimi olmadan sadece çimentonun normal hidratasyonu sırasında ortaya çıkan $Ca(OH)_2$'den daha fazla olmaktadır. Fazla olan $Ca(OH)_2$, kil ile puzolanik bir reaksiyona girmektedir. Bu nedenle kil-çimento karışımı, kil parçacıklarını birbirine bağlayan hidratlı çimento partiküllerinin basit bir karışımı olarak görülemez, ancak hem kil hem de çimentonun ikincil reaksiyonlarla birleştiği bir sistem olarak düşünülmelidir (Herzog ve Mitchell, 1963). Bu ikincil reaksiyon bir tür puzzolanik reaksiyon olarak düşünülebilir.

2.1.3.2 Uçucu kül

Uçucu kül, termik elektrik santrallerinde kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan atık bir üründür. Kömürün yakılmasıyla üç farklı kül ortaya çıkmaktadır. Bunlar; göreceli olarak biraz daha iri taneli olup baca gazlarıyla taşınamayan ve kazan tabanına düşen “taban külü”, yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen “ham kül” ve çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan “uçucu küldür”.

Uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya salınmasının engellenmesi gerekmektedir. Aksi halde birçok çevresel probleme neden olurlar. Bu nedenle, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak uygun bir yerde depolanırlar.

Bugün itibariyle ortaya çıkan uçucu kül miktarı dünyada 800 milyon ton, Türkiye'de ise 15 milyon ton civarındadır. Ortaya çıkan bu atık ürünün depolanması için depolama alanına ihtiyaç vardır. Bu işlem taşıma ve personel ihtiyacından dolayı maliyetli olmakta ve sonuç olarak çevreyi kirletmektedir. Bu nedenle uçucu külün değerlendirilmesi gerekmektedir. Günümüzde uçucu kül farklı alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin; çimento ve betonda katkı maddesi olarak, hafif agrega üretiminde, çimento hammaddesi olarak, dolgu malzemesi olarak, zemin iyileştirme çalışmalarında, seramik ve boya üretiminde kullanılmaktadır.

Termik santralde yakılan kömürün özelliğine ve yakılma yöntemine göre uçucu külün özelliği değişmektedir. Bünyesinde bulunan silis ve alüminyumdan dolayı puzzolanik özellik göstermektedirler ve çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılırlar. Uçucu kül; düşük su ihtiyacından dolayı bağlayıcı işlenebilirliğini artırmakta (Thomas ve ark, 1999; Dhir ve ark, 2002; Türker vd., 2009), hidratasyon ısısını düşürmekte (Paine vd., 2005), hidratasyon reaksiyonlarını geciktirmekte (Bilodeau ve Malhotra 2000), betonun erken yaş performansını düşürmekte (Hassan vd., 2000; McCarthy ve Dhir, 2005), poroziteyi azaltmakta, alkali silika oluşumunu önlemekte, sülfat saldırılarına karşı ise dayanıklı bir malze olmaktadır (Vargas, 2007).

Uçucu küllerin tane boyutu 0.5-150 mikron arasında değişmektedir. İçerisinde SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO bileşenleri bulunur ve bu bileşenlerin miktarı uçucu kül tipine göre değişiklik gösterir. Ayrıca içerisinde az miktarda MgO, SO_3 ve alkali oksitler bulunmaktadır.

Uçucu küller ASTM C618-19 standardına göre F ve C sınıfına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küllerde, $SiO_2+Al_2O_3+FE_2O_3$ miktarının %70'den büyük ve CaO miktarının %10'dan az olması gerekmektedir. F sınıfı uçucu küller puzzolanik özellik gösterirler. C sınıfı uçucu küllerde, $SiO_2+Al_2O_3+FE_2O_3$ miktarının %50'den büyük ve CaO miktarının %10'dan fazla olması gerekmektedir. C sınıfı uçucu küller hem puzzolanik hem de bağlayıcı özellik gösterirler.

Uçucu küller TS EN 197-1 standardına göre silisli (V) ve kalkerli (W) olmak üzere ikiye ayrılırlar. V sınıfı uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

2.1.3.2.1 Kil-çimento-uçucu kül reaksiyonu

Uçucu küller pozzolanik maddelerdir. Pozzolan; normal sıcaklıklarda ve suyun varlığında, çimentolu bileşikler oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona giren silisli veya silisli/alüminli bir malzeme olarak tanımlanır (ASTM C219-19a).

Çimento, uçucu kül ve kil arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir (Medhani, 1982).

- Ortamda alçı bulunması halinde reaksiyonlar sırasında oluşan ilk hidratasyon ürünü etrenjit olmaktadır. Etrenjit iğne şeklinde ve kristaller biçiminde olup, kimyasal formülü $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ veya $C_3A\cdot 3C\bar{S}\cdot H_{32}$ şeklindedir (Young, 1981).
- Çimento, uçucu kül ve kil arasındaki ana (birincil) reaksiyon çimentonun hidratasyonudur. Bu sırada, büyük prizmatik kristaller halinde portlandit (CH) ve ipliksi-gözenekli yapıdaki kristaller halinde tobermorit jeli (C-S-H) oluşur. C-S-H jeli bağlayıcılık özelliği olan ve dayanım üzerinde etkili olan ana üründür. Reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir. (Not: C=CaO, S=SiO_2, H=H_2O, A=Al_2O_3, F=Fe_2O_3)

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (2.3)$$

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow \underbrace{C_3S_2H_3}_{\text{(Tobermorit jeli)}} + \underbrace{Ca(OH)_2}_{\text{(Portlandit)}} \quad (2.4)$$

$$C_3A + CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow \underbrace{C_3A.3CaSO_4.32H_2O}_{\text{(Etrenjit)}} \quad (2.5)$$

$$C_4AF + CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow C_3(AF).3CaSO_4.32H_2O \quad (2.6)$$

Kalsiyum oksit (CaO) ve su arasında oluşan reaksiyon aşağıda verilmiştir. CaO, kireç, çimento veya kil yapısından gelebilmektedir.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.6\ Kcal/mol \quad (2.7)$$

Çimento, kireç, uçucu kül ve kil arasındaki ikincil (puzzolanik) reaksiyonlar aşağıda verilmiştir. Birincil reaksiyonlar sonucunda oluşan $Ca(OH)_2$, Al_2O_3 veya SiO_2 ile tepkimeye girmektedir. Al_2O_3 veya SiO_2 kil mineralinden, çimentodan veya uçucu külden gelmektedir. İkincil reaksiyonlar sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum aluminat hidrat (C-

A-H) jelleri oluşmaktadır. Uçucu kül, zemin ve çimentonun reaksiyonu sonucunda yeni jeller oluşmaya devam etmektedir.

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \text{ veya } SiO_2 \rightarrow \begin{matrix} 4CaO.Al_2O_3.13H_2O \\ 2CaO.SiO_2.Al_2O_3.8H_2O \\ 3CaO.Al_2O_3.CaCO_3.11H_2O \\ CaO.SiO_2.nH_2O \\ (C\text{-}S\text{-}H, C\text{-}A\text{-}H) \end{matrix} \quad (2.8)$$

2.2 Derin Karıştırma Yöntemi

Zemin iyileştirme yöntemi olarak derin karıştırma yönteminin ilk kez uygulanması 1954 yılında tekli burgu sistemle Amerika'da yapılmıştır. 1960 ve 1970'li yıllarda ise Japonya'da çok fazla uygulaması bulunmaktadır. 1967 yılından itibaren ise ilk kez İsveç'te yumuşak killerde kireç kolanları olarak başlayan uygulama daha sonra diğer Avrupa ülkelerine yayılmaya başlamıştır. 1960'ların sonunda Çin'de ilk kez denenen derin karıştırma yöntemi daha sonraları yaygın bir iyileştirme metodu olmuştur. 1990'lı yıllarda ise şu anki şekline benzer uygulamalar başlamış, çeşitli ülke ve firmalar tarafından farklı yöntemler ile derin karıştırma yöntemi uygulanmıştır.

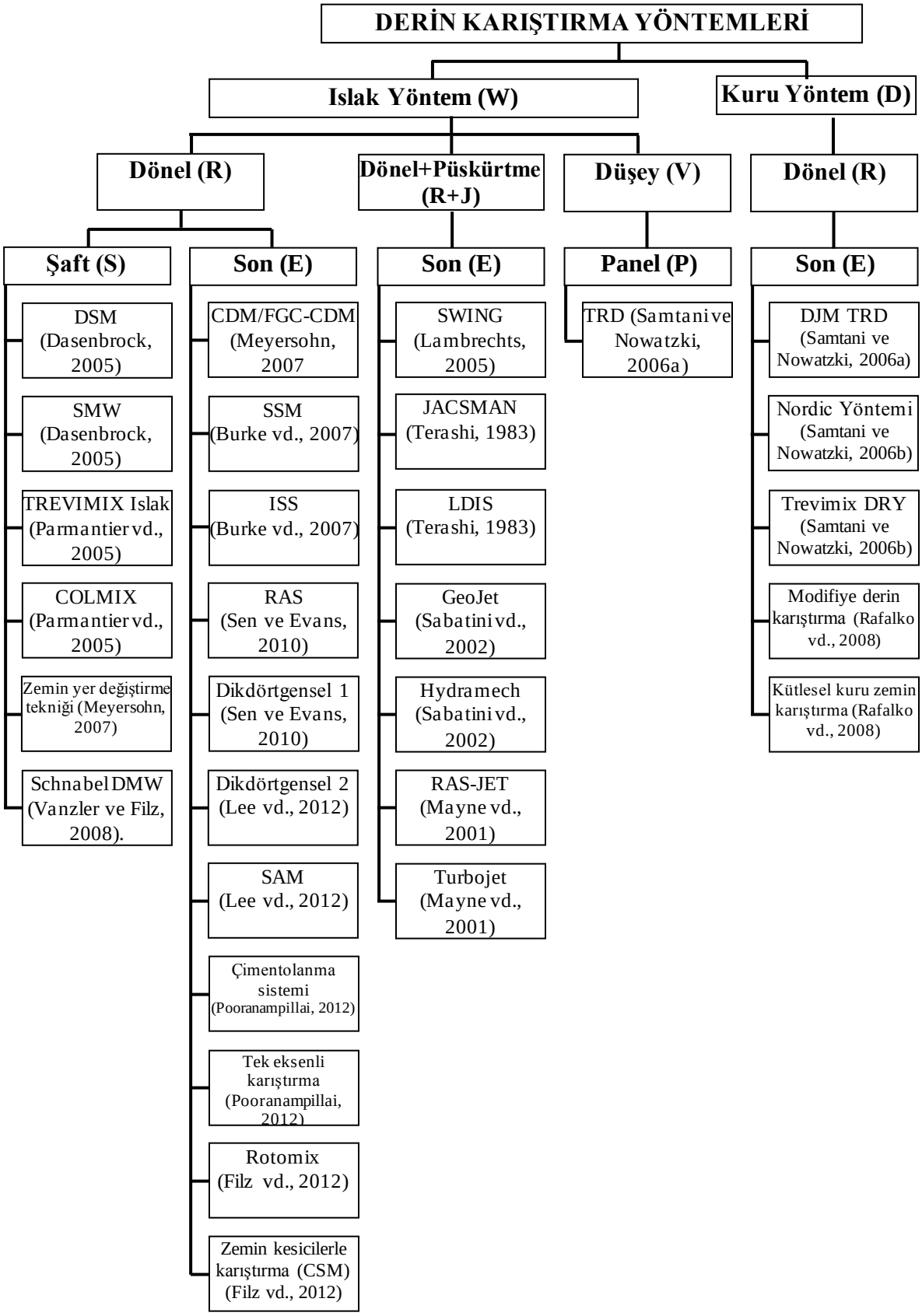
2.2.1 Uygulamanın genel hatları

Derin karıştırma kolonlarının (DKK) imalatında öncelikli amaç bağlayıcı madde ile zeminin oluşturulacak kolon boyunca homojen bir şekilde karıştırılmasıdır. Karıştırma işlemi yapılırken bağlayıcı malzemeler kolon boyunca hem eşit dağıtılmalı hem de zemin ile aynı su muhtevasında karıştırılmalıdır. Karıştırma işlemi bittiğinde kolon boyunca zemin ve/veya bağlayıcının karışmayan hiçbir bölümü kalmamalıdır. Bu amacın gerçekleşebilmesi için birçok imalat yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler en genel haliyle kuru ve ıslak derin karıştırma yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. İmalat yöntemleri arasında birtakım farklılıklar bulunmaktadır. Birçok sistem bölgesel pazarların (yerel piyasanın talebi) ihtiyaçlarına ve sınırlamalarına cevap vermek amacıyla ve hâkim olan zemin koşullarında uygulanabilirliği dikkate alınarak geliştirilmiştir (Topolnicki, 2004).

DKK imalat yöntemlerinin sınıflandırılması yapılırken bağlayıcı türü, karıştırma sistemi ve karıştırma araçlarının yeri dikkate alınmıştır (Bruce, 2000a, b):

- **Bağlayıcının zemin içerisine uygulanma şekli yönünden:** Islak (Wet: bağlayıcının su ile karıştırılarak bulamaç halinde pompalanması) ve kuru (Dry: bağlayıcının kuru halde basınçlı hava ile zemine iletilmesi). Uluslararası sınıflandırma isimleri W ve D şeklindedir.
- **Karıştırma bıçağının zemine itilmesi ve/veya bağlayıcıyı karıştırması yönünden:** Dönel (Rotary: bağlayıcının dönel burgu sistemiyle ve düşük basınç ile zemine iletilmesi), püskürtme (Jet: dönel sistemde bağlayıcının yüksek basınçlarla zemine püskürtülmesi) ve düşey (Vertical: duvar veya panel oluşturmak için düşey yönde dönen motorlu testereye benzer bir sistemle). Uluslararası sınıflandırma isimleri R, J ve V şeklindedir.
- **Bağlayıcının delgi gövdesinden çıkış yeri:** Son (End: karıştırma bıçağı delgi gövdesinin en alt kısmında veya alttan bir kolon çapı mesafesinde bulunmaktadır), delgi gövdesi (Shaft: delgi gövdesinin bir kısmında veya gövde boyunca bulunan deliklerden) ve panel (Panel: panel veya duvar imal eden araçların uzunluğu boyunca). Uluslararası sınıflandırma isimleri E, S ve P şeklindedir.

DKK imalatında kullanılan yöntemler 30 farklı uygulama tekniğine göre daha detaylı bir şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 2.4). Fakat en belirgin uygulama farklılığı göz önüne alındığında, derin karıştırma yöntemi kuru ve ıslak yöntem olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır.



Şekil 2.4. DKK imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Bruce 2000a, b)

2.2.1.1 Islak karıştırma yöntemleri

Islak karıştırma yöntemi genel olarak, çimento esaslı bulamacın bir veya birden çok delgi gövdesinden zemine verilerek karıştırılması, bunun sonucunda da münferit elemanlar, sürekli duvarlar ve büyük kütle elemanların imal edilmesidir. Bu yöntemle zemin iyileştirmek için yüzeysel karıştırma da yapılabilir. Islak karıştırma yönteminde kullanılan araçlar beton santrali ve üzerinde karıştırma bıçakları olan delgi gövdesidir. Beton santralinde uygun oranlarda karıştırılarak hazırlanan çimento ve su bulamacı delgi gövdesinden zemine gönderilir ve karıştırıcı bıçaklar yardımıyla zemin ve bağlayıcı madde karıştırılarak imalat yapılır. Islak karıştırma yöntemi hem açık denizde hem de karada yapılan imalatlarda kullanılabilir.

DKK imalatında kullanılan beton santrali

Beton santrali; silindir biçimli depolardan, su tankından, harmanlama sisteminden, geçici depolama tankından, debi ölçen bulamaç pompasından ve güç kaynak ünitesinden oluşur. Tipik bir beton santralinin görünüşü Şekil 2.5'de verilmiştir. Beton santralini oluşturan bileşenler projenin gereksinimlerine göre basit veya karmaşık olabilir, el ile veya bilgisayarla kontrol edilebilir. Depolama tankında bekletilen bulamaç paletli karıştırıcılarla sürekli karıştırılarak çimentonun dibe çökmesi önlenir. Pompa olarak ileri geri hareket eden ikili veya üçlü pistonlu pompalar veya değişken debili pompalar (genellikle 0.08-0.25 m^3/dk veya yüksek debili pompa gerektiğinde 1 m^3/dk kapasiteli) kullanılır.

Şekil 2.5. DKK imalatında kullanılan beton santrali

Bağlayıcı maddenin harmanlanma ve içitim süreci üç seviyede kontrol edilir:

Seviye 1: Bulamaç sıvısının yoğunluk, çamur dengesi ve Marsh konisi gibi fiziksel özellikleri kontrol edilir. Bu özellikler sahada çalışan personelin görebilmesi için basit aletlerle izlenir ve dijital veya analog sayaçlarla görüntülenir.

Seviye 2: Bu aşamada bulamacın istenilen özelliklerde hazırlanmasını sağlamak amacıyla bilgisayar kontrollü sistemler kullanılır. Önceden seçilen bağlayıcı oranlarının istenilen miktarlarda karıştırılıp karıştırılmadığını kontrol etmek için veriler otomatik olarak kaydedilir ve operatör tarafından sürekli gözlenir. Gerektiğinde elle düzeltmeler yapılır. İmal edilen tüm kolonlar için delme ve enjeksiyonlama parametreleri elektronik olarak kaydedilir. Delgi makinesinden alınan bilgiler de sürekli kayıt edilir. Bulamaç özellikleri 1. seviyede olduğu gibi belirlenir.

Seviye 3: Yüksek seviyeli bilgisayar kontrolü ve görüntülemenin yapıldığı aşamadır. Bu aşamada delgi gövdesinin dakikadaki dönme sayısı, delme hızı, döndürme kuvveti, itme kuvveti, bağlayıcı yoğunluğu, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı kontrol edilir. Her zemin tabakasında iyileştirilmiş zemin özelliklerinin elde edilebilmesi için enjeksiyon parametreleri bilgisayarlar ile ayarlanır. Enjeksiyon ve delgi ile ilgili tüm parametreler imalat boyunca kayıt altına alınır.

Islak karıştırma yöntemleri genel olarak 4 gruba ayrılabilir (Tablo 2.3). Bu yöntem için kapasite değerleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Islak karıştırma yönteminde dört genel sınıflandırma için kullanılan tipik araçlar ve yaygın uygulama şekli (FHWA, 2013)

Sınıflandırma	Genel araçlar ve işlem	Yaygın uygulama şekli
WRS (Wet Rotary Shaft)	Bir veya birden fazla delgi gövdesi üzerinde bulunan karıştırma bıçakları çevre zeminine verilen bağlayıcıyı karıştırır.	30 m derinliğe kadar kolon, panel veya blok kütle halinde oluşturulan elemanlar
WRE (Wet Rotary End)	Bir adet delgi gövdesi ve bir adet karıştırma bıçağı	40 m derinliğe kadar kolon, panel ve blok kütle veya 15 m derinliğe kadar büyük hacimli zemin kütlesinin iyileştirilmesi
WJE (Wet Jet End)	Bir adet (yaygın değil) veya çoklu delgi gövdesine bağlı karıştırma bıçaklarına yüksek basınçlı enjeksiyon püskürten delikler ilave edilmiştir.	25 m derinliğe kadar kolon, panel veya blok kütle halinde oluşturulan elemanlar
WVP (Wet Vertical Panel)	Merkez kesici direklere testere tipi düşey karıştırma bıçakları monte edilmiştir.	50 m derinliğe kadar perde duvar

Tablo 2.4. Islak karıştırma yöntemi için kapasite değerleri (TS EN 14679, 2006)

Ekipman	Detay	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma makinesi	Karıştırma mili sayısı	1-3	1-4	2-8
	Karıştırıcı çapı	0.4 - 0.9 m	1.0 - 1.6 m	1.0 - 1.6 m
	Maksimum iyileştirme derinliği	25 m	48 m	70 m
	Enjeksiyon deliklerinin yeri	Delgi gövdesi üzerinde	Delgi gövdesi ve karıştırma bıçağı üzerinde	Delgi gövdesi ve karıştırma bıçağı üzerinde
	Enjeksiyon basıncı	500 - 1000 kPa	300 - 600 kPa	300 - 800 kPa
Enjeksiyon tesisi	Depolanan karışım miktarı	3 - 6 m^3	3 m^3	3 - 20 m^3
	Üretim kapasitesi	0.08 – 0.25 m^3/dk	0.25 – 1 m^3/dk	0.5 – 2 m^3/dk
Bağlayıcı depolama tankı	Maksimum kapasite	-	30 ton	50 ton – 160 ton

2.2.1.2 Kuru karıştırma yöntemleri

Kuru yöntem, zeminlerin suya doygun veya yeraltı su seviyesi altında olduğu durumlarda katkı maddesinin karıştırıcının ucundan kompresörler yardımıyla kuru olarak enjekte edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu yöntem ilk olarak 1978'de Japonya'da arazi uygulamasında bağlayıcı pnomatik besleme sistemi ile uygulanmış ve kuru jet karıştırma (DJM-dry jet mixing) adı verilmiştir. Kuru karıştırma yöntemlerinde genellikle tekli burgu (delgi) gövdesi kullanılarak zemine kireç, çimento veya cüruf gibi katkı malzemeleri karıştırılarak kolon, duvar veya blok kütle oluşturulmaktadır. Bu yöntemde kullanılan araçlar bağlayıcıyı karıştırma ve hazırlama sistemi ile karıştırma makinesidir. Japon kuru jet karıştırma (dry jet mixing, DJM) ve Nordik (İskandinav) yöntemleri en çok kullanılan kuru karıştırma yöntemleridir.

Bağlayıcı enjeksiyon araçları

DJM bağlayıcı enjeksiyon sistemi, sabit veya hareketli bağlayıcı depolama/ön karıştırma ve ikmal ünitelerinden oluşur. Diğer teçhizatlar şunlardır: Bağlayıcı madde silosu, bağlayıcı besleme sistemine bağlı bir basınçlı tank, yüksek kapasiteli hava kompresörü, hava

kurutucu, filtre ünitesi, jeneratör, kontrol ünitesi ve bağlantı hortumları (Topolnicki, 2004). Tipik bir kuru bağlayıcı dağıtım sistemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Şekil 2.6. Kuru karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcı sevkiyat ünitesi (Hayward Baker A.Ş.)

Ulusal Nordik sisteminde, kireç ve çimento farklı tanklardan temin edilir ve tozumayı önlemek için kapalı sistem bir tankın içerisinde karıştırılır. Kompresörün üzerinde bağlayıcının hidratlanmasını (su ile temas) önlemek için kurutucu ve elek/filtre bulunmaktadır. Enjekte edilecek bağlayıcı miktarlarını belirleyebilmek/kontrol edebilmek için tanklar yük hücreleri ile donatılmıştır. Bu sistemin daha gelişmiş olan sürümlerinde birer adet yükleyici ve taşıyıcı bulunmaktadır. Taşıyıcı, tanklardan ve kompresörden oluşur ve yükleyici ile radyo sinyalleri ile iletişim kurabilmektedir. Taşıyıcı, yükleyici tarafından kumanda edilebilir ve her ikisi de paletlerle monte edilmiştir.

Kuru karıştırma araçları ve işlemler

Islak karıştırma yönteminde karıştırma bıçakları delgi gövdesi boyunca yerleştirilebilirken, kuru yöntemde karıştırma bıçakları delgi gövdesinin sonuna yerleştirilmiştir. Bu yüzden, kuru karıştırmada tüm yöntemler DRE (dry-rotary-end) olarak sınıflandırılmaktadır. DJM karıştırma makinelerinde genellikle iki adet karıştırma gövdesi bulunmaktadır. Makinenin temel parçası, isteğe göre imal edilmiş paletli ve kızaklı vinçtir. Karıştırma sistemi, tahrik ünitesi, tahrik mili, kesici ve karıştırıcı bıçaklar ve enjeksiyon deliklerinden oluşur. Döndürme motorları ve şanzıman tırın altına kalıcı olarak yerleştirilmiştir.

Karıştırma ünitesi, iki veya üç çift, aralarında 90° açı bulunan bıçaklardan oluşur (Şekil 2.7). Standart bıçağın çapı 1 m, maksimum uzunluğu 33 m'dir. İmalat parametreleri

(derinlik, dakikadaki dönme sayısı, batma hızı, çekme hızı ve püskürtülen bağlayıcı hacmi) sürekli ve otomatik olarak izlenir.

Şekil 2.7. Kuru karıştırma yönteminde kullanılan tipik karıştırma bıçakları: a) normal ve b) turba zeminler için (Topolnicki, 2004)

Bağlayıcı maddeler enjeksiyon deliklerinin tıkanmaması için basınçlı hava ile püskürtülmektedir. Zemin içerisinde oluşturulacak elemanın alt kısmına bağlayıcıyı tam manasıyla enjekte edebilmek için delgi gövdesi dönerken ve yukarı doğru çekilme sırasında üst bıçaklardan kuru madde püskürtülür. Bağlayıcı maddenin bir kısmı delgi gövdesinin yukarıdan aşağı doğru hareketi sırasında verilebilir fakat genel uygulama aşağıdan yukarıya doğru imalattır. Delgi gövdesinin dönmesi sırasında karıştırma bıçaklarının şeklinden dolayı bıçakların altında boşluklar oluşabilir. Enjeksiyon malzemesi kuru olduğu için imalat sırasında zemin yüzeyindeki bozulmalar en az seviyededir.

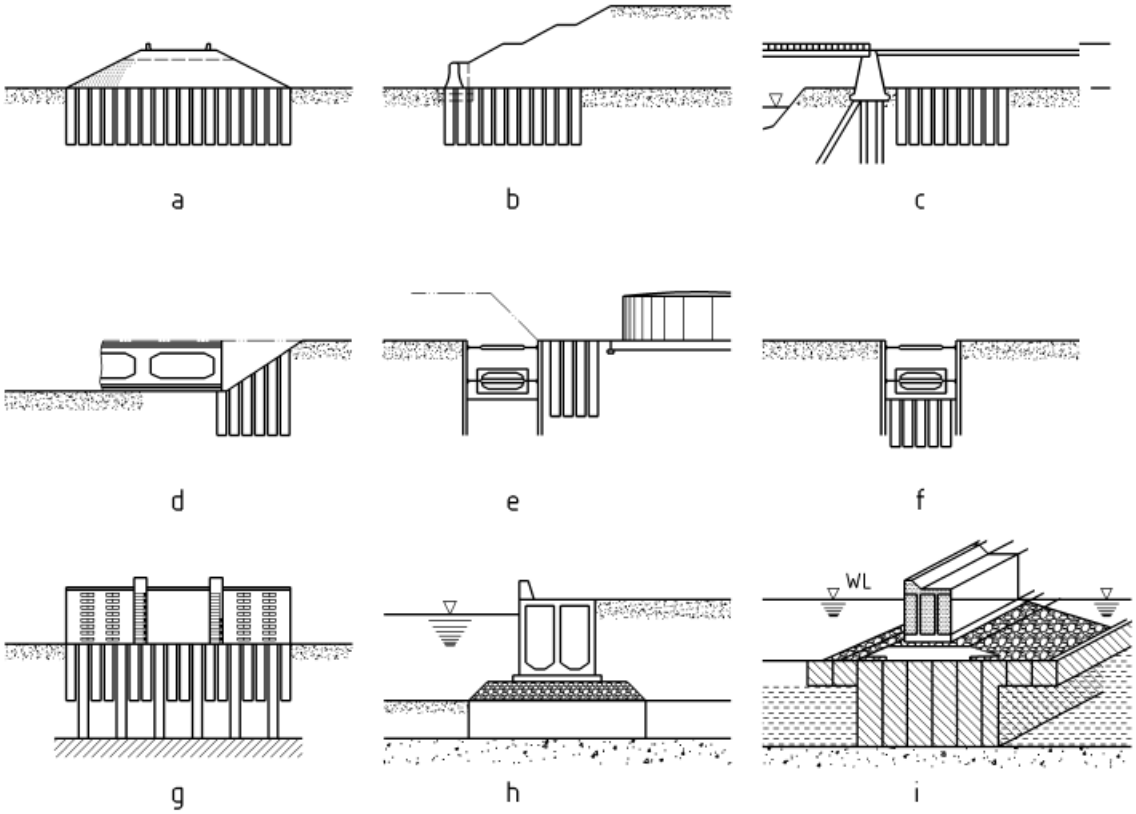
Nordik yönteminde temel araç müstakil olarak paletli araca monte edilmiş, 25 m'ye kadar imalat yapabilen aletlerdir. 0.5-1.2 m çaplarında kolonlar üretilebilir fakat genellikle 0.6 m veya 0.8 m çaplarında kolon oluşturabilecek bıçaklar kullanılır.

Nordik yönteminde hem zemini parçalayabilmek hem de enjeksiyon deliklerinin tıkanmasını önlemek amacıyla kuru bağlayıcı basınçlı hava yardımıyla püskürtülür. Yüzeye yakın yerlerde hava basıncı düşürülür. Bilgisayarlı sistemle; püskürtülen bağlayıcı miktarı ve hızı, enjeksiyonlama hızı, dönme hızı, çekme hızı, hava basıncı, bağlayıcı malzemelerin karışım oranı ve derinlik imalatın her aşamasında kontrol ve kayıt edilir. Ayrıca delgi gövdesinin düşeyliği de ±0.25° hassaslıkta kontrol edilir.

Zemin özelliklerine göre değişmekle birlikte, delgi gövdesinin hareket hızı batma durumu için yaklaşık olarak 150 mm/dönme, çekme durumu için ise 15 mm/dönme kadardır. Bu hızlarla 15 m uzunluğundaki bir kolon 5 dk içerisinde imal edilebilir. 0.6 m çapında ve 400-1000 m uzunluğunda oluşturulacak kolonlar 8 saat içerisinde tamamlanabilir.

2.2.2 Uygulama alanları

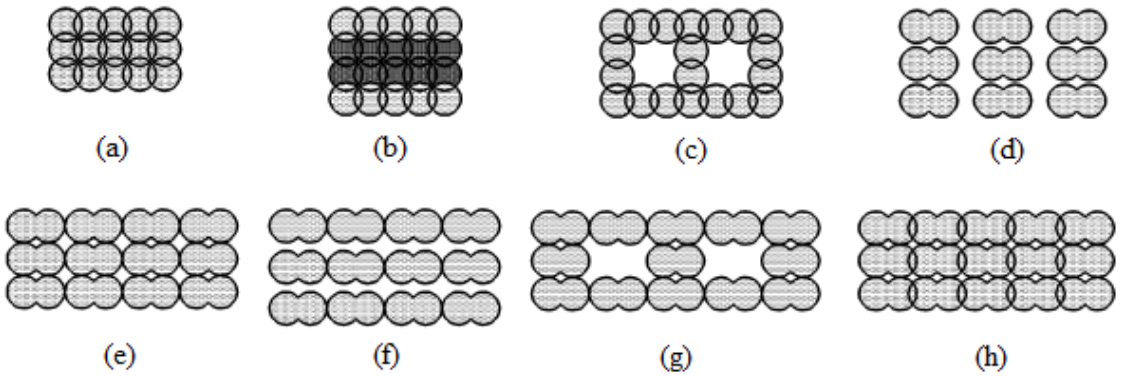
Derin karıştırma yöntemi zeminlerin mukavemetini artırmakta, sıkışabilirliğini azaltmakta ve stabilitesini artırmaktadır. Bunun yanı sıra metro, tünel gibi yeraltı inşaatları içinde zemin hareketlerini kontrol altında tutmaktadır. Ayrıca kaba daneli zeminlerde sızdırmaz perde duvar oluşturmak, kazı destek duvarları inşa etmek, sıvılaşabilir zeminleri stabilize etmek, tünel zeminini desteklemek ve temel takviyesi için kullanılmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları: a) yol dolgusu altındaki oturmaları kontrol etmek, duraylığı sağlamak, b) şev tabanının stabilitesinde, c) köprü ayağında farklı oturmalara karşı, d) yamaç eğiminin stabilitesini sağlamak, e) komşu yapılardan gelen etkileri azaltmak, f) destekli kazılarda taban kabarmasına karşı, g) kazıklı temellerin yanal direncini artırmak için, h) deniz tabanında taşıma gücünü artırmak amacıyla, ı) dalgakıran altında taşıma gücünün artırılması amacıyla

Sıvılaşmaya karşı uygulanan derin karıştırma yöntemi ise sıvılaşmanın engellenmesi, zeminin güçlendirilmesi ve boşluk suyu basıncının azaltılması amaçları dâhilinde uygulanmaktadır. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde boşluk suyu basıncının izole edilmesi ve sıvılaşmanın önlenmesi amacıyla, bina temellerinde uygulanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen amaçlara ulaşılabilmesi için derin karıştırma kolonları farklı geometrilerde imal edilebilirler (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Derin karıştırma kolon tipleri: a) blok tipi, b) duvar tipi, c) kafes tipi, d) kolon tipi, e) kesişen kolon tipi, f) kesişen duvar tipi, g) kesişen kafes tipi, h) kesişen blok tipi

2.2.3 Uygulamanın olumlu ve olumsuz tarafları

Derin karıştırma yönteminin olumlu tarafları şu şekilde sıralanabilir:

- 40 m derinliğe kadar imalat maliyeti düşüktür.
- İyileştirilmiş zemin dayanımı 0.5-4 MPa arasında değişmektedir.
- Kolon yerleşim planı kolon çapına ve kolonlar arasındaki mesafeye bağlı olarak ayarlanabilir.
- Kuru karıştırma yönteminde zemin yüzeyinde çok fazla bozulmuş zemin oluşmaz.
- Islak karıştırma yönteminde zemin yüzeyinde oluşan bozulmuş zemin arazide dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.
- İmalat sırasında çok az titreşim oluşur ve gürültü azdır.
- Bazı durumlarda imalat kapasitesi oldukça yüksektir.
- Kolon performansı yerinde hızlıca belirlenebilir.
- Deniz içinde yapılan projelerde uygulanabilir.
- Hem düşey hem de yatay yönde zemin iyileştirmesi yapılabilir.
- Çoğu tür zeminlerde ve dolgularda uygulanabilir.
- Tasarımı destekleyecek teorik, laboratuvar ve arazi çalışmalarının yaygın oluşu kolaylık sağlar.
- Yumuşak ve sıkışabilir zeminlerde yapılacak büyük projelerde çok ekonomiktir.
- Zemin iyileştirme projelerinde tasarım dayanımı genellikle 1 MPa yeterli olmaktadır.

Derin karıştırma yönteminin olumsuz tarafları şu şekilde sıralanabilir:

- Pratikte 40 m derinliğe kadar uygulanabilir.
- Büyük ve güçlü ekipmanlar için geniş çalışma alanına ihtiyaç olmaktadır.
- Çok sıkı veya çok sert zeminlerde uygulanamaz.
- Sadece düşey yönde zemine uygulanabilir.
- Islak karıştırma yönteminde zemin yüzeyinde önemli miktarda bozulmuş zemin ortaya çıkar.
- Kurulum maliyeti yüksektir (makine, teçhizat).
- Ekipmanın ağırlığı çok zayıf zeminler için sorunlu olabilir.
- İyileştirilmiş zemin mukavemetinde önemli değişkenlikler olabilir ve bu bazı uygulamalarda önemli olabilir.
- Mevcut yapıların yakınına kurulamaz.

2.2.4 İmalat parametreleri

Derin karıştırma kolonu imalatında zemin-bağlayıcı karışımının niteliği enjeksiyonun aktarılma yöntemine, delgi gövdesinin batma ve çekme hızlarına, karıştırma bıçaklarının dönme hızına ve geometrisine bağlıdır. İmalat parametrelerinin zemin-bağlayıcı karışımının niteliğine olan etkisi CDIT (2002) tarafından detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.2.4.1 Enjeksiyon aktarım yöntemi

Derin karıştırma yönteminde enjeksiyon delgi gövdesinin batması (penetrasyon enjeksiyonu, yukarıdan aşağıya imalat) veya geri çekilmesi (aşağıdan yukarıya imalat) sırasında zemine aktarılabilir. Penetrasyon enjeksiyonuyla mekanik karıştırma, enjeksiyon veya basınçlı havanın enjekte edilmesine yardımcı olur. Hedef derinlikte, kolon ve taşıyıcı zemin tabakası arasındaki temas yerinde karışmayı arttırmak için birkaç dakika boyunca karıştırmaya devam edilebilir. Bu işlem “taban karıştırması” olarak bilinir. Özellikle tabakalı zeminlerde karıştırma verimliliğini artırmak için döner takımların yükseltilmesi ve indirilmesi ile kolonun devamlılığı sağlanmış olur. Delgi gövdesi daha sonra ters yönde döndürülür ve geri çekilme sırasında yüzey bozulmalarını en aza indirmek için genellikle daha küçük miktarlarda ilave bulamaç veya bağlayıcı enjekte edilir.

Geri çekme sırasında yapılan enjeksiyon kuru yöntemlerde yaygın olarak kullanılır, ancak DKK’nın tasarım dayanımını karşılamak için gereken bağlayıcı miktarı sadece geri çekme sırasında verildiğinde yeterli gelmezse hem penetrasyon hem de geri çekme sırasında enjeksiyon verilebilir.

2.2.4.2 Batma/çekme ve dönme hızları

Karıştırma bıçaklarının dönme hızı ve delgi gövdesinin batma/çekme hızları imal edilen kolon dayanımını etkilemektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, daha yüksek dönme hızları ve daha düşük penetrasyon hızları ile üretilen kolonlarda iyileştirilen zemin mukavemetinin daha yüksek ölçüldüğünü göstermektedir (CDIT, 2002). Farklı karıştırma teknikleriyle ve farklı zemin koşullarında imal edilen DKK için oluşturulan karışımın niteliği farklı olacağından dolayı hangi karıştırma tekniğinin daha iyi sonuç verdiğini söylemek yanıltıcı olabilir. Basitleştirilmiş bir indeks olan BRN, karıştırma bıçaklarının dönme sayısının iyileştirilen zeminin kalitesi üzerindeki etkisini ölçmek için önerilmiştir (CDIT, 2002). BRN, enjeksiyonun zemine aktarılmasından sonra karıştırma bıçaklarının batma veya geri çekme sırasındaki (1 m uzunluk için) toplam dönme sayısı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 2.9 ile hesaplanabilir (Mizuno vd., 1988).

$$BRN = \sum M \cdot \left(\frac{N_P}{V_P} + \frac{N_W}{V_W} \right) \tag{2.9}$$

burada;

ΣM = karıştırma bıçaklarının toplam sayısı,

N_p, N_w = karıştırma bıçaklarının batma ve çekme sırasındaki dönme hızı (devir/dk)

V_p, V_w = sırasıyla delgi gövdesinin batma ve çekme hızları (m/dk)

Bu alanda yapılan araştırmaların sonucunda, ıslak karıştırma yöntemi için BRN'nin 360 devir/m'den yüksek olması durumunda daha küçük bir varyasyon katsayısının elde edildiği ifade edilmektedir. Topolnicki (2009) homojen karışım elde edebilmek için minimum BRN değerinin 430 devir/m olması gerektiğini ifade etmiştir. BRN formulü sadece geleneksel DMM için geliştirilmiştir. CSM, TRD veya kütle stabilizasyon yöntemleri için geçerli değildir. Islak yöntem için uygulama değerleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Islak karıştırma yöntemi için uygulama değerleri (TS EN 14679, 2006)

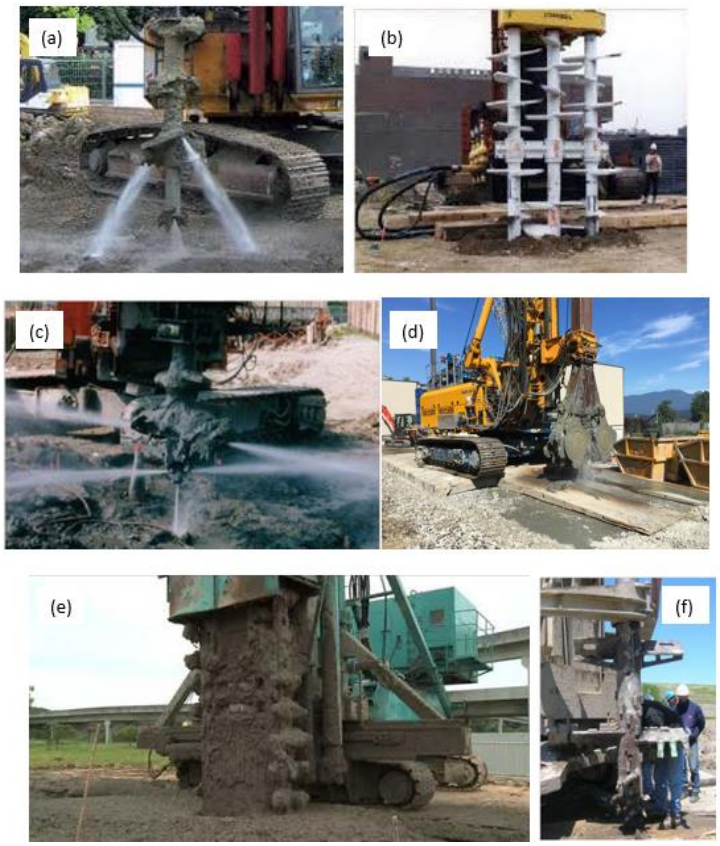
Karıştırma makinesi	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Delgi gövdesinin batma hızı	0.5 – 1.5 m/dk	1 m/dk	1 m/dk
Delgi gövdesinin geri çekme hızı	3.0 – 5.0 m/dk	0.7 – 1.0 m/dk	1 m/dk
Karıştırıcı bıçakların dönme hızı	25 – 50 devir/dk	20 – 40 devir/dk	20 – 60 devir/dk
Karıştırıcı bıçakların dönme sayısı	Delgi gövdesi ile birlikte	Metrede 350	Metrede 350
Bağlayıcı enjeksiyon miktarı	80 – 450 kg/m^3	70 – 300 kg/m^3	70 – 300 kg/m^3
Enjeksiyon aşaması	Batma ve/veya geri çekme sırasında	Batma ve/veya geri çekme sırasında	Batma ve/veya geri çekme sırasında

2.2.4.3 Karıştırıcı ekipmanların geometrisi

Delgi gövdesinin sayısı, karıştırma bıçaklarının şekli, yönü ve enjeksiyon deliklerinin konumu zemin-bağlayıcı karışımının kalitesini etkilemektedir. Sahada yapılan gözlemler sonucunda çok şaftlı makinelerle, bir yönde dönen sabit karıştırma bıçaklarına sahip tek şaftlı makinelere göre daha homojen karışımlar elde edildiği belirtilmiştir (CDIT, 2002). Bitişik şaftlar, karıştırmanın verimini ve makinenin dengesini artırmak için tipik olarak zıt yönlerde döndürülür.

Farklı bölgelerdeki zeminlerde homojen karıştırma işleminin yapılabilmesi için karıştırma aletleri çeşitli geometrilerde geliştirilmiştir. Genellikle, aletler penetrasyon sırasında zemini parçalamak ve dönme sırasında zemin ile bağlayıcının karıştırma derecesini arttırmak üzere şekillendirilir. Örneğin turba ve plastik killi zeminler, dönme sırasında güçlü bir kesme hareketi sağlamak için şekillendirilmiş ekipmanla karıştırılmalıdır.

Enjeksiyon çıkış delikleri, enjeksiyonlama yönteminin tipini kolaylaştırmak için konumlandırılmıştır. Penetrasyon enjeksiyonu için nozullar karıştırma bıçağını yağlamak ve penetrasyona yardımcı olmak için bıçağın tabanına yerleştirilir. Jet yöntemlerinde, nozullar kolon çapını büyütmek için karıştırma bıçaklarının kenarlarına yerleştirilir. Dikey olarak aşağıya doğru yönlendirilmiş nozullar, penetrasyon hızını arttırmak için kullanılır. Bıçakların dış kenarlarından dışarı doğru yönlendirilmiş nozullar, kolonun karıştırma etkisini veya çapını arttırmak için kullanılır. Farklı derin karıştırma yöntemleri için kullanılan karıştırma ekipmanları Şekil 2.9'da verilmiştir.



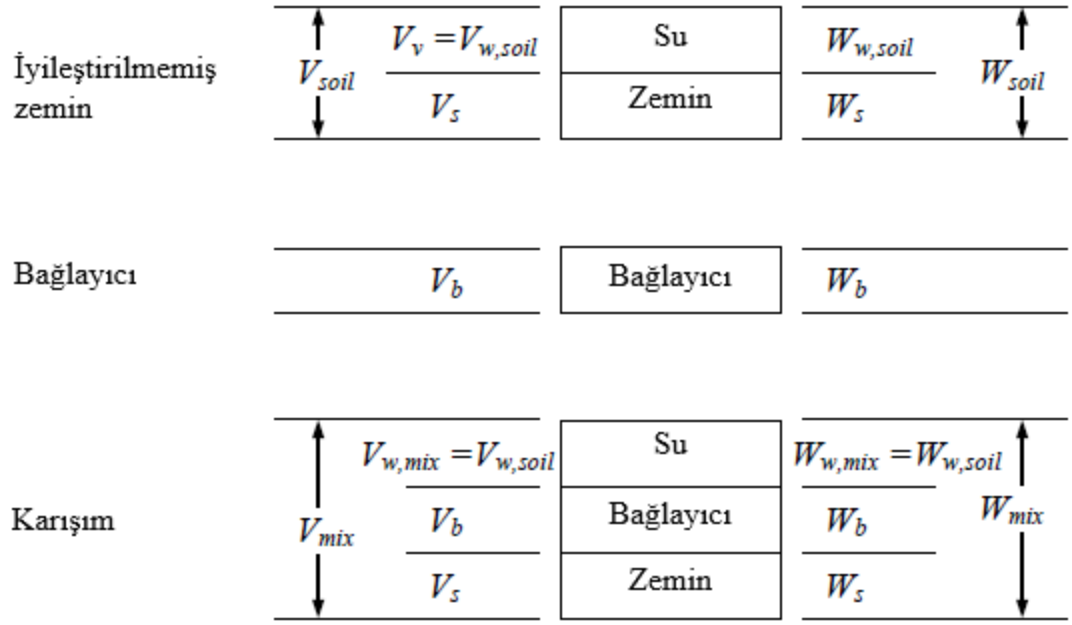
Şekil 2.9. Farklı derin karıştırma yöntemleri için kullanılan karıştırma ekipmanları: a, b) WRS ekipmanı, c) WJE ekipmanı, d) CSM ekipmanı, e) TRD ekipmanı, f) WRE ekipmanı

2.2.5 İyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri

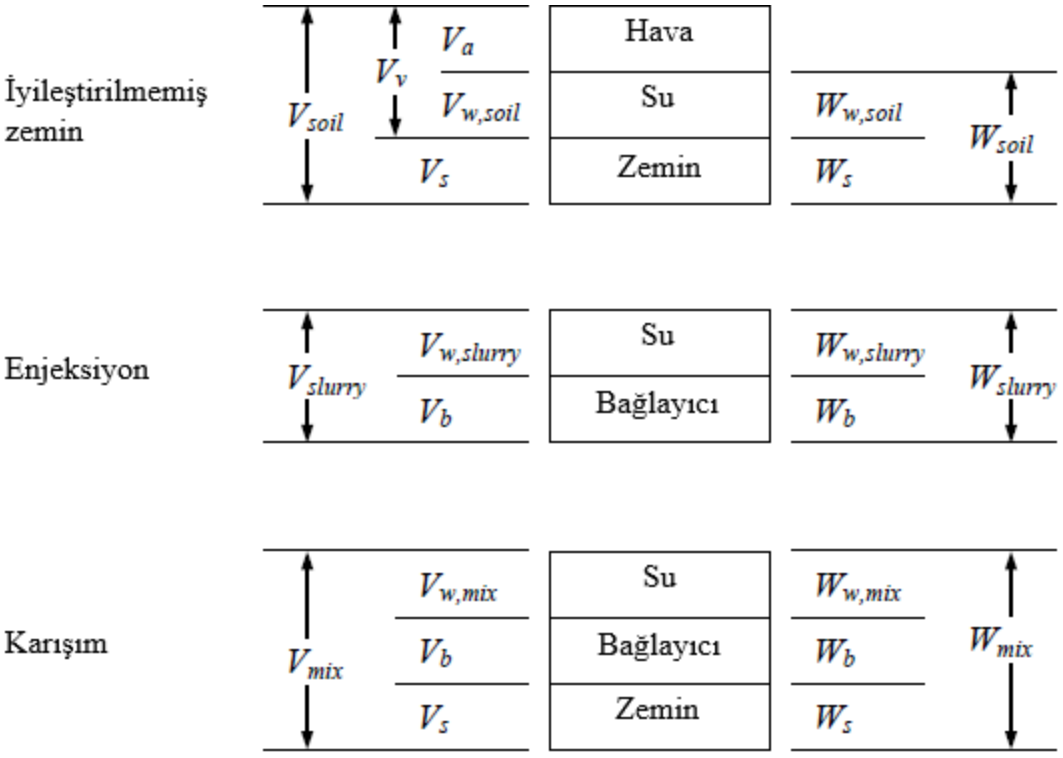
Derin karıştırma kolonların mühendislik özellikleri olarak dayanım, elastisite modülü, Poisson oranı, permeabilite katsayısı ve birim hacim ağırlık gibi özellikleri sayılabilir. Bu özelliklere geçmeden önce zemin-bağlayıcı karışımları için kullanılan faz diyagramları ve gerekli tanımlamalar verilmiştir.

2.2.5.1 Faz diyagramları

Zeminlerin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri kurabilmek için kullanılan faz diyagramları zemin-bağlayıcı karışımları için de kullanılabilir. Kuru karıştırma yönteminde iyileştirilecek zemin yumuşak, suya doygun veya doygunluğa yakındır. Islak karıştırma yönteminde ise iyileştirilecek zeminin doygunluk derecesi herhangi bir değer olabilir, fakat zemin enjeksiyon ile karıştıktan sonra ortam suya doygun veya doygunluğa çok yakın olmaktadır. Bu düşünceden hareketle, kuru ve ıslak karıştırma için faz diyagramları sırasıyla Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.10. Kuru karıştırma yöntemi için kullanılan faz diyagramı



Şekil 2.11. Islak karıştırma yöntemi için kullanılan faz diyagramı

Yukarıdaki faz diyagramlarında kullanılan sembollerin açıklaması aşağıda verilmiştir. Terimler arasında karışıklığa neden olmamak için İngilizce alt indisler kullanılmıştır.

V_{soil} = iyileştirilmemiş zeminin hacmi

W_{soil} = iyileştirilmemiş zeminin ağırlığı

V_a =hava hacmi

$V_{w,soil}$ = karışım öncesinde zemindeki su hacmi

$W_{w,soil}$ = karışım öncesinde zemindeki su ağırlığı

V_s = zemin tanelerinin hacmi

W_s = zemin tanelerinin ağırlığı

V_b = kuru bağlayıcının hacmi

W_b = kuru bağlayıcının ağırlığı

$V_{w,slurry}$ = enjeksiyon içindeki su hacmi (ıslak karıştırma için)

$W_{w,slurry}$ = enjeksiyon içindeki su ağırlığı (ıslak karıştırma için)

$V_{w,mix}$ = karışım içindeki su hacmi

$W_{w,mix}$ = karışım içindeki su ağırlığı

Derin karıştırma uygulamalarının kontrol edilebilmesi ve raporlanabilmesi için laboratuvarda veya arazide imal edilen zemin-bağlayıcı karışımlarına ait tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

Bağlayıcı faktörü, $\alpha = \frac{W_b}{V_{soil}}$ (2.10)

Bağlayıcı dozajı, $\alpha_{in-place} = \frac{W_b}{V_{mix}}$ (2.11)

Bağlayıcı içeriği, $a_w = \frac{W_b}{W_s} \cdot 100$ (2.12)

Toplam su/bağlayıcı oranı, $W_T : W_b = \frac{W_{w,mix}}{W_b}$ (2.13)

Karışımın toplam su muhtevası, $w_T = \frac{W_{w,mix}}{W_b + W_s}$ (2.14)

Hacim oranı, $VR(\%) = \frac{V_{slurry}}{V_{soil}} \cdot 100$ (2.15)

Kuru karıştırma yönteminde uygulayıcı, karıştırma sırasında kuru bağlayıcı maddenin iletim hızını kontrol eder, bu da yüklenicinin doğrudan bağlayıcı faktörünü (α) kontrol ettiği anlamına gelir. Islak karıştırma yönteminde ise yüklenici, enjeksiyonun su/bağlayıcı oranını

(w/b) ve hacim oranını (VR) kontrol eder. Her iki yöntemde de kontrol edilen parametreler faz diyagramları kullanılarak α, $\alpha_{in\text{-}place}$, a_w ve W_T:W_b cinsinden ifade edilebilir.

2.2.5.2 Dayanım

Laboratuvarda hazırlanan ve derin karıştırma kolonunu temsil eden numunelerin serbest basınç dayanımı; kuru karıştırma yöntemi için 0.01-2.8 MPa, ıslak karıştırma yöntemi için 0.1-28 MPa arasında değişebilmektedir (FHWA, 2013). Dayanımdaki bu farklılıkların nedeni iyileştirilen zemin özelliklerine, bağlayıcı tipi ve miktarına bağlıdır (Jacobson vd., 2005; Japonya Geoteknik Birliği, 2000; Baker, 2000).

Derin karıştırma kolonunun dayanımı stabilite analizi için gereklidir. Aşağıdaki bölümlerde kolon dayanımını etkileyen faktörler incelenmiştir.

2.2.5.2.1 Dayanımı etkileyen faktörler

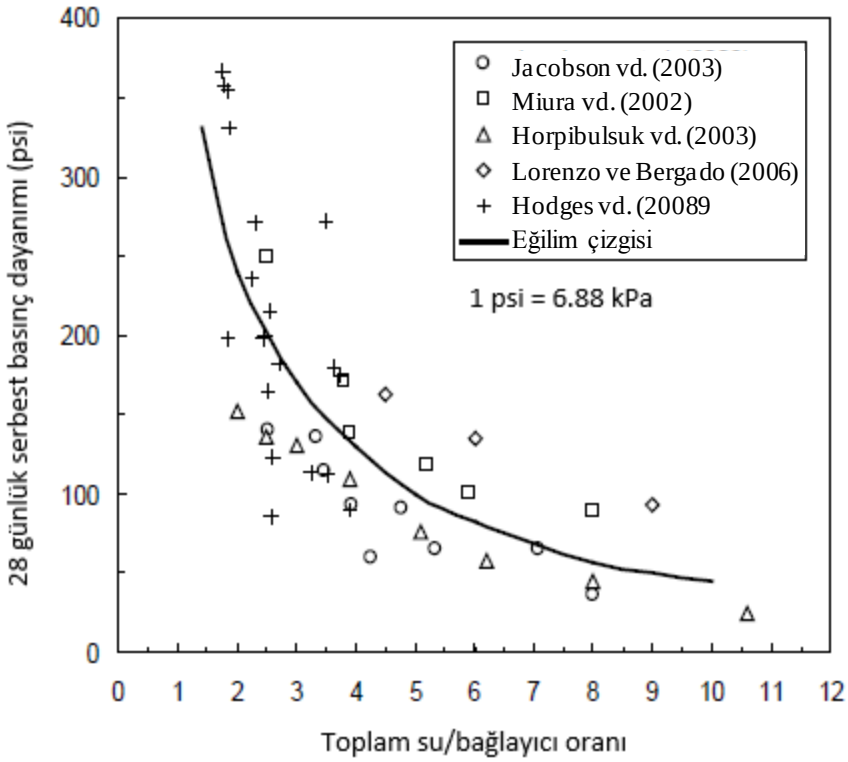
İyileştirilmiş zeminin dayanımı; bağlayıcı maddenin özelliklerine ve miktarına, zemin özelliklerine, karıştırma işleminin niteliğine, kür koşullarına ve yükleme şartlarına bağlıdır (Dong vd., 1996; FHWA, 2000a, 2000b, 2001; Kitazume, 2005; Matsuo, 2002; Miura vd., 2002; Hayashi vd., 2003; Shiells vd., 2003; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2003, 2005). Dayanımı etkileyen faktörler Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Dayanımı etkileyen faktörler (Terashi, 1997)

Kategori	Faktörler
Bağlayıcı özellikleri	• Bağlayıcı tipi • Kalitesi • Karışım suyu ve katkı maddeleri
Zemin koşulları	• Zeminin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri • Organik madde içeriği • Yeraltı suyunun pH değeri • Su muhtevası
Karıştırma şartları	• Bağlayıcı dozajı • Karışımın verimliliği • Karıştırma süresi
Kür koşulları	• Sıcaklık • Kür süresi • Nem • Islanma-kuruma, donma-çözünme vb. etkiler
Yükleme koşulları	• Yükleme hızı • Çevre basıncı • Gerilme izi

2.2.5.2.1.1 Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı

Farklı araştırmacılar tarafından laboratuvarda yapılan çalışmalar sonucunda karışımın toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) arttığında dayanımın düştüğü sonucuna varılmıştır (Şekil 2.12). Bu çalışmalar, inorganik zeminlerde ve bağlayıcı olarak çimento kullanılarak yapılmıştır. Numuneler hem ıslak hem de kuru karıştırma yöntemlerine göre hazırlanmıştır.



Şekil 2.12. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ile dayanım arasındaki ilişki (FHWA, 2013'den değiştirilerek)

2.2.5.2.1.2 Kür süresi

Zemin-bağlayıcı karışımlarının dayanımı kür süresiyle artmaktadır. Denklem 2.16 (FHWA, 2013) ile zamanla dayanımın ne kadar değiştiği yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$f_c = 0.187 \cdot \ln(t) + 0.375 \tag{2.16}$$

burada;

f_c= kür süresi faktörü (t zamanındaki dayanımın 28 günlük dayanıma oranı)

t = kür süresi (gün)

2.2.5.3 Elastisite modülü

İyileştirilmiş zeminin Young modülü, derin karıştırma kolonunun sıkışmasını hesaplamak için kullanılmaktadır. Elastisite modülü (E_{50}), dayanım deneylerinde elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiklerinde, en büyük dayanımın %50'sine karşılık gelen noktaya çizilen teğetin eğimidir. Kuru karıştırma yönteminde E_{50} değeri serbest basınç mukavemetinin 50-250 katı olmaktadır (Jacobson vd., 2005; Baker, 2000; Broms, 2003). Islak karıştırma yönteminde ise E_{50} değeri serbest basınç mukavemetinin 75-1000 katı olmaktadır (Our vd., 1996). Navin ve Filz (2006), ıslak karıştırma yöntemine göre hazırlanan 2672 adet numune için E_{50} değerinin yaklaşık olarak serbest basınç mukavemetinin 300 katı olduğunu belirlemişlerdir.

Derin karıştırma kolonları, yüksek rijitliğe ve düşük birim deformasyon yeteneğine sahip olmakla birlikte, lineer olmayan gerilme-birim deformasyon ilişkisine sahiptir (Tatsuoka vd., 1996; McGinn ve O'Rourke, 2003).

2.2.5.4 Poisson oranı

Derin karıştırma kolonu tasarımında Poisson oranının kullanılmasına gerek yoktur, fakat numerik analiz yapılacaksa gerekli olabilir. CDIT (2002) ve Terashi (2003) Poisson oranı için 0.25-0.5 arasında bir değerin alınabileceğini ifade etmişlerdir. Porbaha vd. (2005) sismik yöntemlerle Poisson oranını belirlemişler ve 0.3-0.4 arasında değiştiğini bulmuşlardır.

2.2.5.5 Permeabilite katsayısı

EuroSoilStab (2002) kuru karıştırma yönteminde kireç ve çimento ile yapılan iyileştirme sonucunda permeabilite katsayısının doğal zemine göre 200-600 kat büyük olduğunu belirtmektedir. Baker (2000) kuru karıştırma yöntemiyle arazide imal edilen kolonlardan alınan örnekler üzerinde permeabilite deneyi yapmış ve numunelerin permeabilite katsayısını doğal zeminden 10-100 kat büyük bulmuştur. Sonuç olarak kuru karıştırma yöntemiyle imal edilen kolonlar düşey dren olarak hizmet edebilirler.

Kumlu zeminlerde ve ıslak karıştırma yöntemiyle imal edilen derin karıştırma kolonlarının permeabilite katsayısı 10^{-5}-10^{-6} cm/s olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı faktörü artırıldığı zaman elde edilen bu değerler daha da düşebilmektedir. Sonuç olarak ıslak karıştırma yöntemiyle imal edilen kolonlar düşey dren olarak hizmet edemezler (Broms, 1999).

2.3 Taguchi Yöntemi

Proje kapsamında bahsedilen deney programlarını oluşturabilmek, araştırılan parametrelerin optimizasyonunu yapabilmek ve bu parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki yüzdelerini belirleyebilmek için "Taguchi Yöntemi" kullanılmıştır.

Taguchi deneysel tasarım yönteminde izlenecek adımlar şu şekilde sayılabilir: İyileştirilecek problemin belirlenmesi, performans karakteristiklerini etkileyen faktörlerin seçimi ve seviyelerinin belirlenmesi, uygun ortogonal dizi seçimi, faktörlerin ve etkileşimlerin sütunlara atanması, kalite kayıp fonksiyonları ve performans istatistiklerinin seçilmesi, deneylerin yapılması ve sonuçlarının kaydedilmesi, veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin en iyi değerlerinin belirlenmesi, doğrulama deneyinin yapılması.

Öncelikle 3. Bölümde verilen her aşama için deney programları oluşturulmuştur. Daha sonra ulaşılmak istenen hedef için değerlendirme, analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Örneğin, alt başlık 3.4'de yapılacak olan çalışmaların amacı en iyi performansa sahip DKK oluşturabilmektir. Bunun için DKK imalatında hem en uygun bağlayıcı içeriğinin (çimento, uçucu kül, katkı ve su miktarları) kullanılması hem de imalat sırasındaki makine-teçhizattan kaynaklı sistemsel parametrelerin (çekme ve dönme hızları, enjeksiyon deliklerinin çapı) optimum olması gerekmektedir. Yüksek performanslı kolon imal edebilmenin ölçüsü ise kolonun her noktasında dayanımın maksimum, geçirimlilik ve sıkışabilirliğin minimum olmasını sağlamaktır. Amaç, araştırılacak parametreler, parametrelerin seviyeleri ve ulaşılmak istenen hedef belirlendikten sonra, uygun ortogonal dizin tablosunun seçilmesi gerekmektedir. Alt başlık 3.4.2'de 4 seviyeli 5 parametrenin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kısımda her parametrenin serbestlik derecesi 3 (seviye sayısı-1) olduğundan sistemin serbestlik derecesi 15 (serbestlik derecesi x parametre sayısı) olmaktadır. Bu nedenle bu bölümlerde, 16 tasarıma sahip ortogonal dizin tablosu (L16) seçilmiştir (sistemin serbestlik derecesinden büyük olan en küçük tablo). Alt başlık 3.4.1'de 3 seviyeli 4 parametrenin sonuçlar üzerindeki etkisi araştırıldığı için L9 tasarım tablosu seçilmiştir. Tasarım tabloları oluşturulduktan sonra her bir tasarım için ulaşılmak istenen hedefe yönelik gerekli deneyler yapılarak performans istatistiklerinin belirlenmesi gerekir. Performans istatistiği, kontrol edilebilen faktörlerin farklı seviyelerinin karşılaştırılıp en uygun faktör-seviye kombinasyonunun seçilmesini sağlayan bir değerlendirme metodudur. Taguchi yönteminde verilerin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak ve toplanabilirliğini sağlamak için genellikle performans istatistiği olarak, ortalama yerine S/N oranı (Signal/Noise-İşaret/Gürültü) kullanılmaktadır (Sharma vd., 2005; Mousavi vd., 2007; Yıldız, 2011). Böylece, ortalama ile standart sapma, aynı analiz tekniği ile analiz edilmiş olur. S/N oranı en basit ifade ile ortalamanın standart sapmaya oranı olarak kabul edilir. Bu oranın kullanılması,

performans karakteristiğinin ölçülmesinde ortalama veya standart sapmanın tek tek kullanılmasına göre daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar (Yıldız, 2011). Taguchi yöntemi kullanılarak DKK'nın performansını etkileyen parametreler S/N analizleri ile belirlenmiştir. Analizlerinde kullanılan S/N oranı aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$S/N = -10\log_{10}(MSD) \tag{2.17}$$

MSD değeri (ortalama karesel sapma), hedef değerin en büyük, en küçük ve belirli bir değer olması durumları için belirlenebilmektedir. Hedef değerin en büyük (mukavemeti en büyük DKK için) ve en küçük olması (geçirimliliği ve sıkışabilirliği en küçük DKK için) durumları için MSD değerleri sırasıyla Denklem 2.10 ve Denklem 2.11 kullanılarak hesaplanabilir. Taguchi Yöntemi ile beklenen (hedef) değer ise Denklem 2.12 ile belirlenmektedir.

$$MSD\max = \left(\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + ... + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n \tag{2.18}$$

$$MSD\min = \left(Y_1^2 + Y_2^2 + ... + Y_n^2 \right) / n \tag{2.19}$$

$$Y_{beklenen} = \sqrt{\frac{1}{MSD_{ort}}} \tag{2.20}$$

burada; Y_1 ... Y_n değerleri deney (analiz) sonuçları, n ise bir deneydeki tekrar sayısıdır.

Projenin amacı uçucu kül katkılı DKK tasarımında maksimum dayanıma, minimum geçirimliliğe ve sıkışabilirliğe sahip DKK imal edebilmek için optimum imalat parametrelerin belirlenmesidir. Bu kapsamda Taguchi yöntemi kullanılarak deney programları oluşturulmuş ve elde dilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

Proje kapsamında yüksek plastisiteli killi bir zeminde imal edilen derin karıştırma kolonlarının performansları belirlenmiştir. Deneylerin yürütülebilmesi için gerekli olan killi zemin, derin karıştırma makinesi, enjeksiyon pompası, deney tankları, karot makinesi, laboratuvar mikseri, çimento, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi gibi malzemelerin/ekipmanların teknik özellikleri bu bölümde verilmiştir.

3.1.1 İyileştirilmemiş zemin

Konya ili, Selçuklu ilçesi, 2. Organize Sanayi Bölgesindeki bir alanda yapılan zemin incelemesi çalışmaları sonucunda mevcut arazide hem düşük plastisiteli kil (CL) hem de yüksek plastisiteli kil (CH) bantlarının farklı derinlikler boyunca devam ettiği belirlenmiştir (Tan vd., 2018). Sonuç olarak bu araziden CH tipi killi zemin temin edilmesine karar verilmiştir.

3.1.1.1 Zemin hafriyatı

Arazide daha önce başka araştırmacılar tarafından yapılan zemin incelemeleri sırasında 20 m derinliğinde 21 adet sondaj kuyusu açılarak her 1.5 m derinlikten zemin örnekleri alınmıştır (Tan vd., 2018). Bu zemin örnekleri üzerinde hem fiziksel hem de mekanik birtakım deneyler yapılarak zeminin özellikleri belirlenmiştir. Zemin incelemesi sonucunda 3 sondaj kuyusunda (SK 10, SK 17 ve SK 20) yüzeye yakın yerlerde CH tipi killi zemin olduğu tespit edilmiştir. Killi zemin temin edilmeden önce SK 10 ve SK 17 kuyularının olduğu yerlerde 8-10 m derinliğe kadar ilave sondajlar yapılarak zemin özellikleri tekrar belirlenmiştir (Şekil 3.1). 10 numaralı kuyunun olduğu yerde, zeminin likit limiti %49-51, plastik limiti %20-25 olarak belirlenmiştir. 17 numaralı kuyunun olduğu yerde ise zeminin likit limiti %50-52, plastik limiti %21-24 olarak belirlenmiştir. SK 17 kuyusundan alınan zeminin kıvam limiti değerleri daha yüksek olduğu için zemin hafriyatı bu kuyunun olduğu yerden yapılmıştır (Şekil 3.2).

Şekil 3.1. a) Sondaj makinesi ile ilave sondaj kuyularının açılması, b) burgulu delici

Şekil 3.2. a) İlave sondaj kuyularının yeri, b) yüzeyden 6 m derinlikten zemin hafriyatının yapılması

SK 17 kuyusunun olduğu yerde ve yüzeyden 6-7 m derinlikten zemin hafriyatı yapılarak yaklaşık 14 m^3 (25-27 ton) kadar killi zemin kamyona yüklenerek Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Geoteknik Laboratuvarına nakledilmiştir. Fakülte bahçesine kadar getirilen zemin ilk önce mini yükleyiciyle bina içerisine alınmış (Şekil 3.3a), daha sonra insan gücüyle bir köşeye istiflenmiştir (Şekil 3.3b). Hafriyat işlemleri 2 gün, zeminin laboratuvara istiflenmesi 5 gün sürmüştür.

Şekil 3.3. a) Zeminin bina içerisine taşınması ve b) istiflenmesi

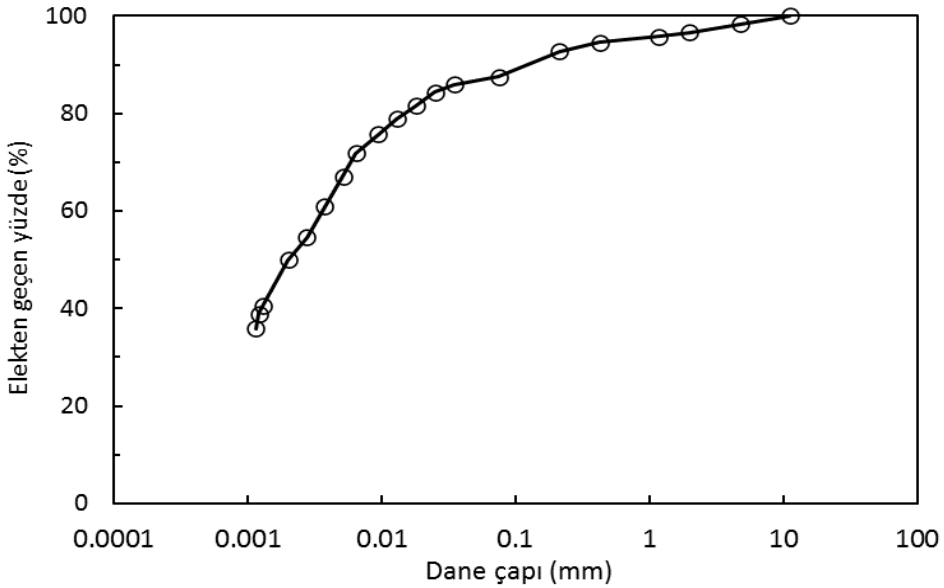
3.1.1.2 Örselenmiş zeminin geoteknik özellikleri

Araziden hafriyatla getirilen örselenmiş zemin numuneleri üzerinde elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitlerinin tayini, tane yoğunluğu deneyi ve su muhtevası tayini yapılmıştır.

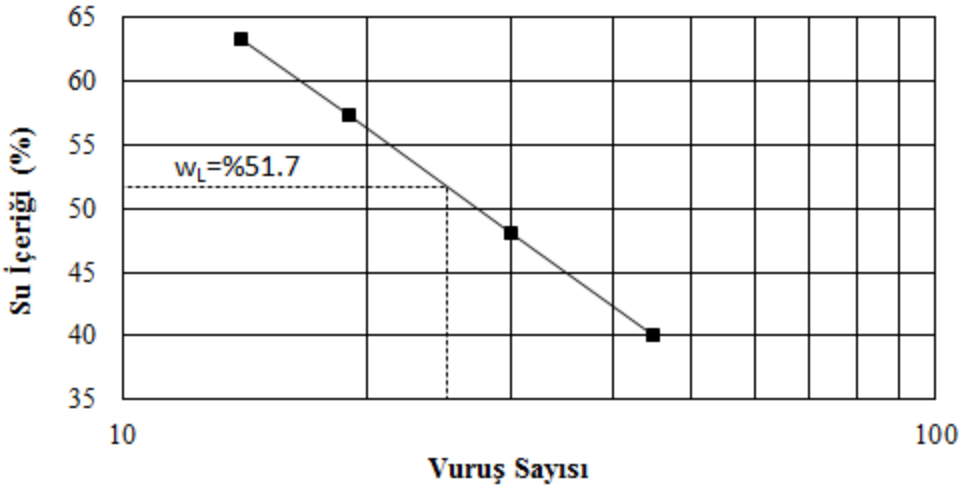
3.1.1.2.1 Zemin sınıfı

Zeminin ince tane içeriği ASTM D1140-17 standardına göre yıkamalı elek analizi ile belirlenmiştir. Kaba malzemenin tane dağılımı ASTM D6913/D6913M-17 standardına göre elek analizi yapılarak, ince malzemenin tane dağılımı ise ASTM D7928-17 standardına göre hidrometre deneyi yapılarak belirlenmiştir (Şekil 3.4). Yapılan deney sonuçlarına göre zemin içerisinde %1.6 oranında çakıl, %10.8 kum, %37.7 silt ve %49.9 oranında kil bulunmaktadır.

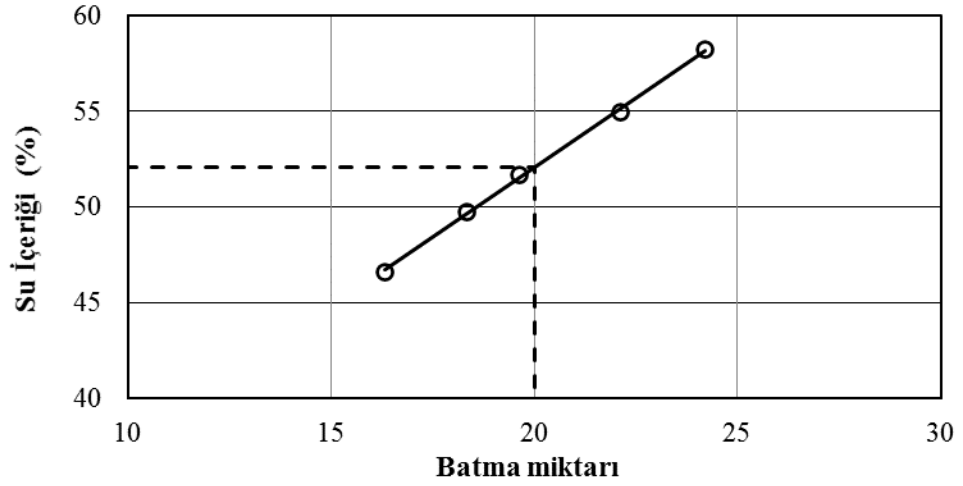
Zemin içerisindeki ince tane oranı %50'den büyük olduğu için zemin sınıflandırması Atterberg limitleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu nedenle; zeminin likit limit değeri ASTM D4318-17e1 standardına göre yapılan Casagrande yöntemi ile w_L=%51.7 (Şekil 3.5), Wasti (1987)'de belirtilen düşen koni yöntemine göre ise w_L=%52.1 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6). Her iki yöntem arasındaki küçük farklılıktan dolayı, zeminin likit limiti ortalama %52 olarak kabul edilmiştir. Zeminin plastik limit değeri ASTM D4318-17e1 standardına göre w_P=%22.7 olarak belirlenmiştir. Zeminin plastisite indisi değeri ise PI=%29.3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Zeminin tane dağılımı

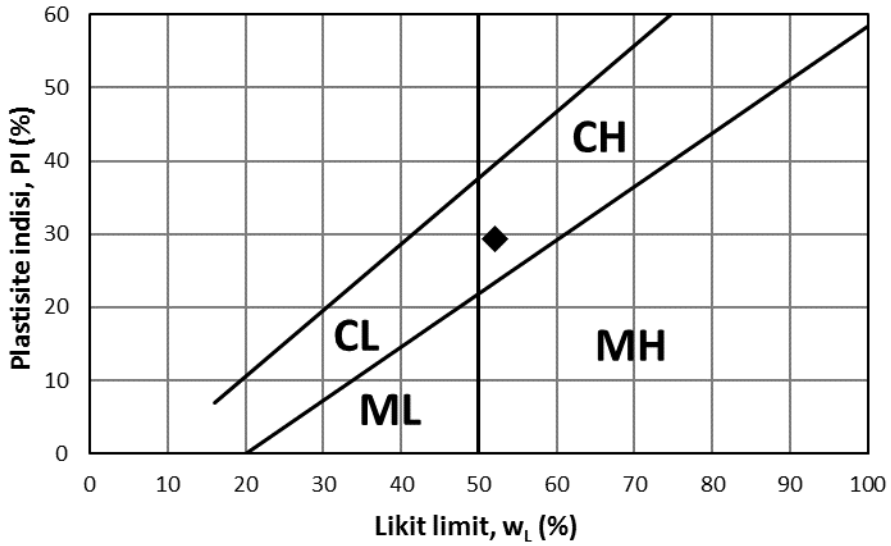


Şekil 3.5. Casagrande yöntemi ile likit limit tayini



Şekil 3.6. Düşen koni yöntemi ile likit limit tayini

Zeminin tane dağılımı ve kıvam limitleri göz önüne alındığında, çalışmada kullanılan zemin ASTM D2487-11 standardına göre (USCS sınıflandırma sistemi) CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfı bir zemindir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. USCS'ye göre zemin sınıfının belirlenmesi

3.1.1.2.2 Tane yoğunluğu

Zeminin tane yoğunluğu ASTM C128-15 standardına göre yapılan piknometre deneyi ile 2.65 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

3.1.1.2.3 Su muhtevası

Araziden alınan örselenmiş zemin örnekleri ile zeminin doğal su muhtevası değeri ASTM D2216-19 standardına göre %29.4 olarak belirlenmiştir. Zeminin likit limiti %52, plastik limiti %22.7 olarak belirlenmiştir. Buna göre iyileştirilmemiş zeminin kıvam indisi I_c=0.77, likitlik indisi I_L=0.23 olarak hesaplandığında arazideki zemin plastik kıvamdadır.

3.1.1.2.4 Aktivite

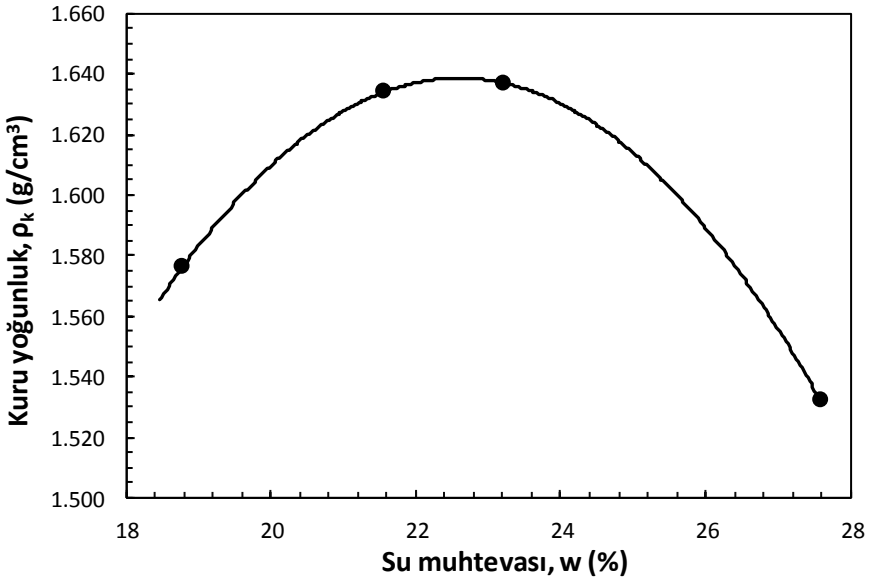
Zemin içerisinde %49.9 oranında kil minerali bulunmaktadır. Zeminin plastisite indisi değeri %29.3'tür. Bu bilgilere göre zeminin aktivite değeri Skempton (1948, 1953) tarafından verilen aşağıdaki bağıntı ile hesaplandığında A=0.59 olmaktadır. A<0.75 olduğundan dolayı çalışmada kullanılan killi zemin aktif olmayan bir kildir.

$$A = \frac{\mathrm{PI}}{C} \tag{3.1}$$

burada, PI zeminin plastisite indisi ve C kil yüzdesini göstermektedir.

3.1.1.2.5 Kompaksiyon davranışı

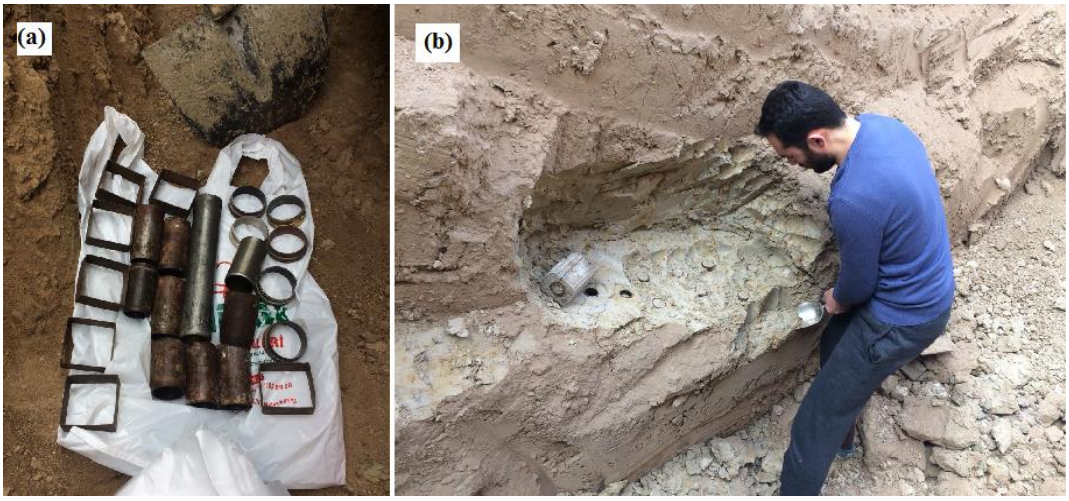
Zeminin kompaksiyon davranışı ASTM D698-12e2 standardına göre yapılan standart kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Buna göre zeminin optimum su muhtevası, w_{opt}=%22.6 ve maksimum kuru yoğunluğu $\rho_{k,max}$=1.639 g/cm^3 olmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Kompaksiyon deneyinden elde edilen su muhtevası-kuru yoğunluk grafiği

3.1.1.3 Örselenmemiş zeminin geoteknik özellikleri

Örselenmemiş zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenebilmesi için arazide hafriyat yapılan yerdeki kazı çukurundan numuneler alınmıştır. Zeminin serbest basınç ve konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç dayanımlarını belirleyebilmek için zemine 50 mm çapında ve 100 mm boyundaki tüpler çakılarak örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır. Zeminin konsolidasyon özelliklerinin belirlenebilmesi için ise çapı 50 mm ve boyu 20 mm olan konsolidasyon halkaları zemine çakılarak numune alınmıştır (Şekil 3.9).



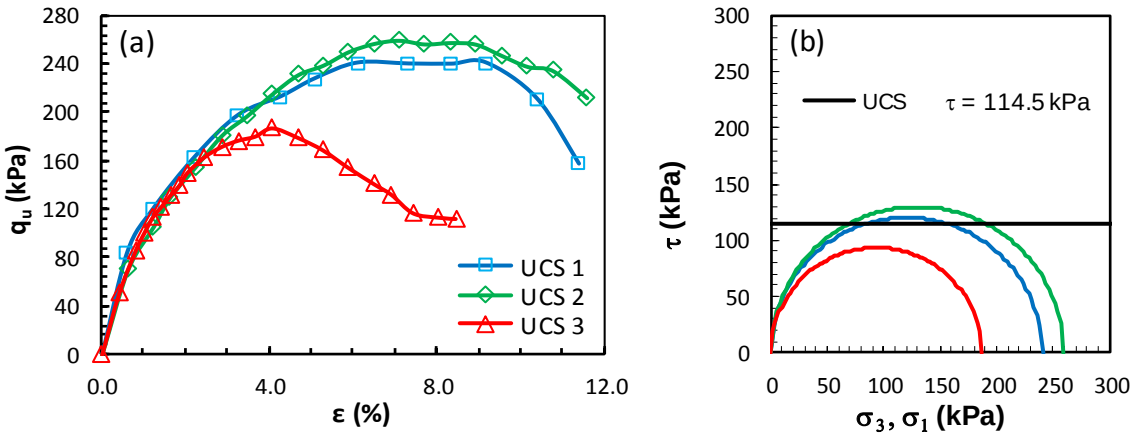
Şekil 3.9. a) Örselenmemiş zemin örneklerinin alınabilmesi için kullanılan kalıplar, b) kazı çukurunda kalıpların zemine çakılması ve numune alınması

3.1.1.3.1 Birim hacim ağırlık

Araziden alınan örselenmemiş numunelerin yaş ağırlık, çap ve boy bilgileri kullanılarak zeminin doğal birim hacim ağırlığı, γ_n=19.3 kN/m^3 olarak belirlenmiştir.

3.1.1.3.2 Serbest basınç dayanımı

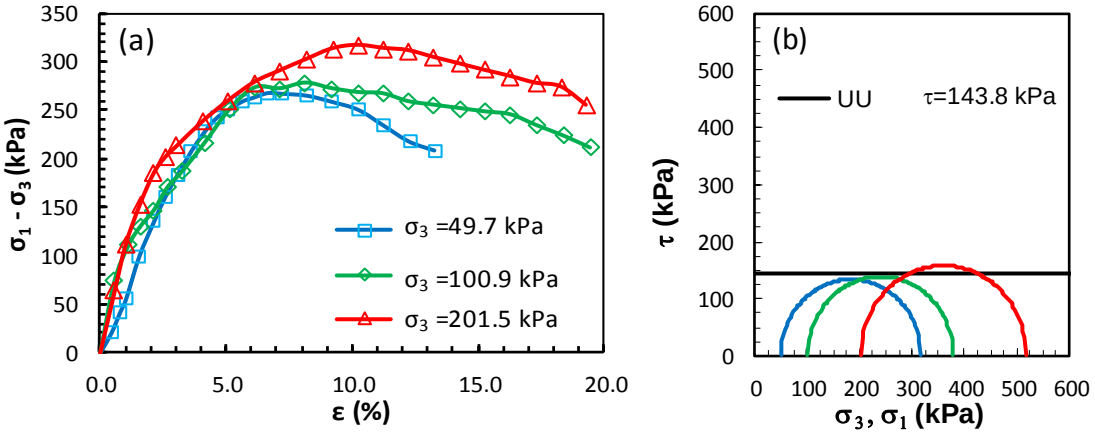
Kazı çukurundan alınan numuneler üzerinde ASTM D2166/D2166M-16 standardına göre 3 adet serbest basınç deneyi (UCS) yapılmıştır. Deneylerden elde edilen gerilme-birim deformasyon grafikleri Şekil 3.10a'da, mohr daireleri ve ortalama dayanımı temsil eden kırılma zarfı Şekil 3.10b'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre zeminin ortalama serbest basınç dayanımı 229 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10. Killi zemin için serbest basınç deneyi sonuçları: a) Gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri

3.1.1.3.3 Üç eksenli basınç dayanımı

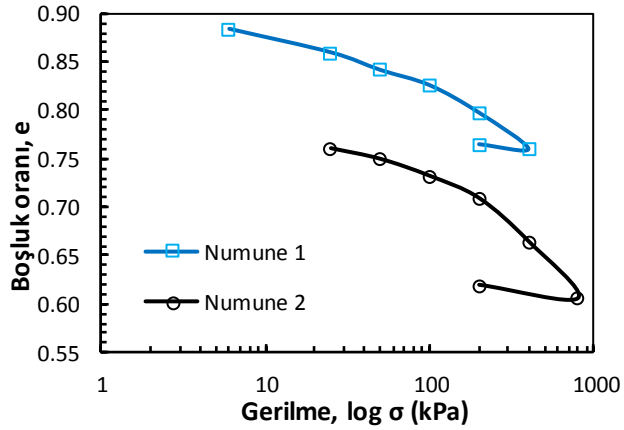
Kazı çukurundan alınan numuneler üzerinde ASTM D2850-15 standardına göre 3 adet konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU) yapılmıştır. Deneylerde hücre basıncı 49.7, 100.9 ve 201.5 kPa olarak seçilmiştir. Deneylerden elde edilen deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri Şekil 3.11a'da, mohr daireleri ve ortalama dayanımı temsil eden kırılma zarfı Şekil 3.11b'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre zeminin ortalama drenajsız üç eksenli basınç dayanımı 287.6 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Killi zemine ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları: a) Deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri

3.1.1.3.4 Konsolidasyon özellikleri

Araziden alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde ASTM D2435/D2435M-11 standardına göre 2 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen gerilme-boşluk oranı grafikleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre birinci numunenin sıkışma indisi C_c=0.124 ve kabarma indisi C_s=0.016 olarak belirlenmiştir. İkinci numunenin sıkışma indisi C_c=0.196 ve kabarma indisi C_s=0.023 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında zeminin sıkışma indisi C_c=0.160 ve kabarma indisi C_s=0.019 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.12. Killi zemin için konsolidasyon deneyinden elde edilen gerilme-boşluk oranı grafikleri

3.1.2 Enjeksiyon malzemeleri

3.1.2.1 Çimento

Derin karıştırma kolon imalatında bağlayıcı madde olarak CEM-I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bu tip çimento seçilmesinin nedeni, bağlayıcı içerisine çimento ile birlikte katılacak uçucu külün erken dayanım problemi oluşturmasıdır. Çünkü uçucu kül katılarak imal edilen betonların erken dayanımı düşük olmaktadır (Hassan vd., 2000; McCarthy ve Dhir, 2005). CEM-I 42.5 R çimentosunun içerisinde %64.37 CaO (C), %20.11 SiO_2 (S), %4.9 Al_2O_3 (A) ve %2.83 Fe_2O_3 (F) bulunmaktadır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. CEM 1 42.5 R çimentosunun özellikleri

Çimentonun özellikleri	Değer	Standart (ASTM C150/C150M-17)
Kimyasal özellikleri		
SO_3 (%)	2.48	C_3A≤%8, maks. %3.5 C_3A>%8, maks. %4.5
MgO (%)	0.85	Maks. %6.0
Kızdırma kaybı (%)	2.00	Maks. %3.0
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.40	Maks. %1.5
CL^- (%)	0.0092	Maks. %0.1
Fiziksel özellikleri		
Priz başlangıcı (dk)	200	Min. 45 dk
Priz sonu (dk)	240	Maks. 375 dk
Özgül ağırlık (g/cm^3)	3.2	-
Hacim genleşmesi (mm)	1.3	Maks. %0.8
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3880	-
3 günlük dayanım (MPa)	28.1	24 MPa
28 günlük dayanım (MPa)	54.5	Min. 42.5 Mpa Maks. 62.5 MPa

CEM-I 42.5 R çimentosu içerisindeki C_3S miktarı %61.41, C_2S miktarı %11.33 ve C_3A miktarı %8.2'dir. Çimento içerisindeki C_3S ve C_2S erken dayanımda etken iken, C_3S ve C_3A nihai dayanım üzerinde etkilidir. C_3S ve C_2S miktarının fazla olmasından dolayı CEM-I 42.5 R çimentosu erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Deneysel çalışmalara geçilmeden önce çimento ile ilgili kıvam, priz başlama ve bitiş sürelerini tayin etmek için vicat (ASTM C191–13) ve marsh hunisi (ASTM D6910/D6910M–09) deneyleri yapılmıştır.

3.1.2.2 Uçucu kül

Uçucu kül betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzzolandır ve çoğunlukla kendi başına bağlayıcı olmadığı halde, sulu ortamda sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşir. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir. Bu sayede bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da sağlanmış olur. Zemin iyileştirme çalışmalarında ise çimento ile birlikte kullanılarak çimento kullanımını azaltıp, yüksek dayanım ve düşük geçirimlilik elde etmek için mantıklı bir seçenek olmaktadır. Proje kapsamında DKK imalatı yapılırken bağlayıcı madde olarak çimento ile birlikte uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiş olup, uçucu külün kimyasal bileşimi ve standartlara uygunluğu Tablo 3.2'de verilmiştir.

Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'nun altında (%2.49) ve reaktif silis miktarının %25'in üzerinde (%39.01) olması nedenlerinden dolayı, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı uçucu kül (silisli uçucu kül) için istenilen koşullara tamamen uymaktadır. ASTM C 618'e göre $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı %84.34 (S+A+F>%70) ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarının %70'in üzerinde olması nedeniyle TS 639'da istenen şarta da uymaktadır. SO_3 değeri %0.52 olup, TS EN 450 standardında belirtilen %3 değerinin çok altında kalmaktadır. Düşük kireçli kül olması nedeniyle serbest kireç yüzdesi de %0.26 olup, standarttaki %1 sınırının altındadır. Sonuç olarak, Seyitömer uçucu külü dört ayrı standartta kimyasal bileşen bazında gereken koşullara tamamen uymaktadır.

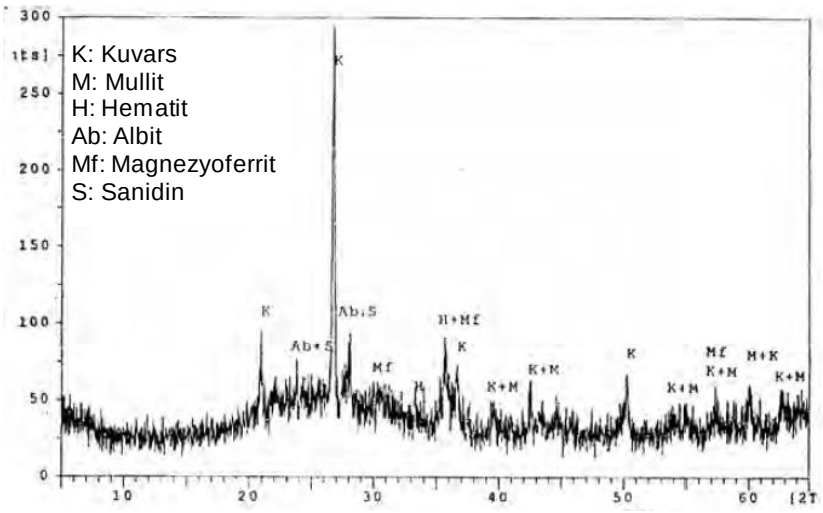
Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramına (XRD) göre, uçucu külde başta camsı faz olmak üzere, kuvars, mullit, magnezyoferrit, hematit kristalleri ve minör olarak alkali feldispatlar bulunmaktadır (Şekil. 3.13). Seyitömer uçucu külünün, X-ışınları difraktogramında camsı fazın 22-25° 2θ arasında maksimum verdiği ve arka planında camsı fazca zengin olduğu görülmüştür. Camsı fazın kuvars kristalinin

maksimum pikine yakın olması nedeniyle Seyitömer uçucu külü silissi yapıdadır (Türker vd., 2009).

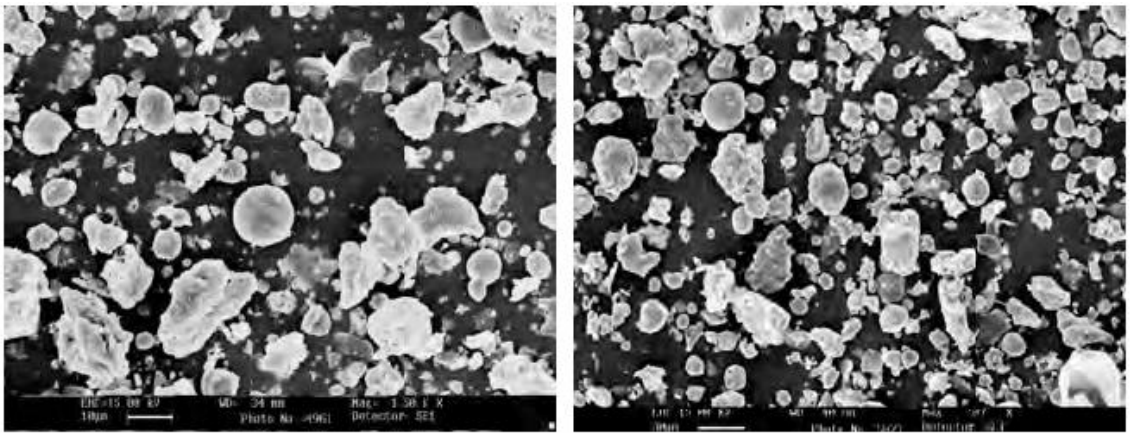
Tablo 3.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşimi ve standartlara uygunluğu

Oksit (%)	Uçucu kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	54.49						
Al_2O_3	20.58						
Fe_2O_3	9.27						
S+A+F	84.34				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	4.26					<10.00	>10.00
MgO	4.48				<5.00		
SO_3	0.52	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	2.01						
Na_2O	0.65						
KK	3.01	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.006	<0.10					
Serbest CaO	0.26	<1.00					
Reaktif SiO_2	39.01	>25.00	>25.00	>25.00			
Reaktif CaO	2.49		<10.00	>10.00			

Türker vd. (2009) Seyitömer uçucu külünde yaptıkları morfolojik analizde, tanelerin 1-30 µm arasında değiştiğini ve çoğunluğunun küresel, bazılarının ise düzensiz şekilli olmak üzere farklı morfolojide tanecikler içerdiğini belirlemişlerdir. Özellikle 10 mikronun altındaki taneciklerin içi dolu camsı küreler halinde olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 3.14). Taneciklere uyguladıkları mikro analizde bazı taneciklerin yüzeyinde magnezyoferrit ve hematit biriktiğini, masif kütle halinde nadiren rastlanan yapıların ise alkali feldispat bileşiminde olduğunu saptamışlardır (Şekil 3.15).

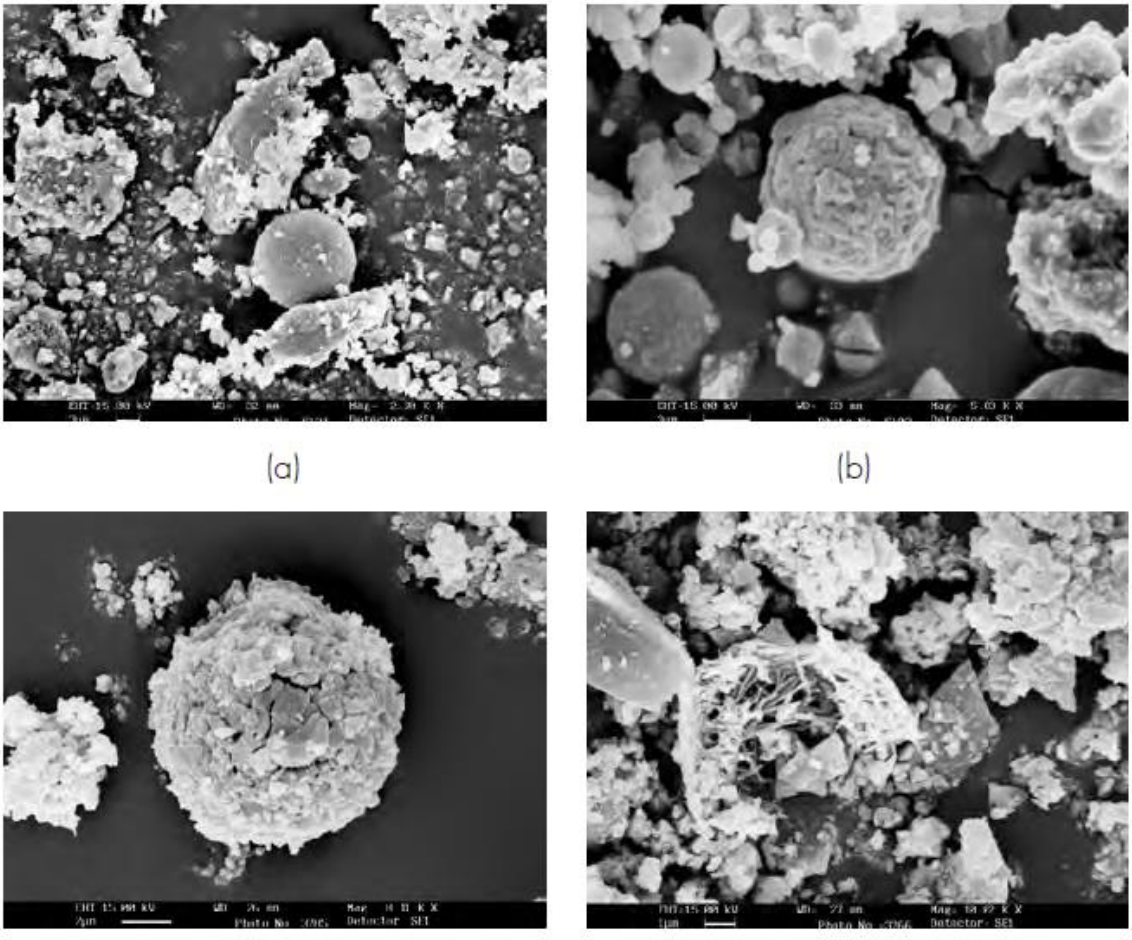


Şekil 3.13. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (Türker vd., 2009)



(a) (b)

Şekil 3.14. Seyitömer uçucu külünün morfolojik yapısına ait fotoğraflar: a) ve b) taneciklerin genel dağılımı (x500 ve x1500) (Türker vd., 2009)



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.15. Seyitömer uçucu külünün mikroyapısı: (a) Magnezyoferrit küresi (x8100), (b) Demir oksit kaplı tanecik (x5000), (c) Alkali feldispatlar (x2500), (d) Mullit kristalleri (x10000) (Türker vd., 2009)

3.1.2.3 Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin ana kimyasal yapıları linyosülfanatlar, hidroksikarboksilik asitler ve karbonhidratlardır. Katkı maddeleri beton karışımındaki su ihtiyacını %6.5'tan fazla azaltır, her yaştaki basınç dayanımını %10 oranında artırırlar. Daha az boşluklu beton elde etme imkânı sağlayarak dış etkilere dayanıklı beton elde edilir. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile su/çimento oranı düşük tutularak betonun akışkanlığı (pompalanabilirlik özelliği) artırılır, segregasyon olmadan kolay dökülebilir bir beton üretilebilir. Kullanılan katkıya göre değişmekle birlikte genellikle çimento miktarının ağırlıkça %0.2-5'si oranında kullanılır. Betonun karışım suyu miktarını %5-12 oranında azaltmasına rağmen işlenebilirlik değerini önemli ölçüde arttırır. Hem akışkanlaştırıcı hem de priz geciktirme özellikleri vardır. Süper akışkanlaştırıcı katkının kullanılması sonucu oluşan sertleşmiş betonda daha az boşluk, daha iyi görünüm ve daha yüksek dayanım sağlanmış olur.

DKK imalatı yapılırken, kıvamdan ödün vermeden enjeksiyon karışımının su/bağlayıcı oranını azaltarak yüksek performanslı kolonlar imal edebilmek için CHRYSO Optima 100 marka süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. CHRYSO Optima 100, yeni nesil süper akışkanlaştırıcı olarak etki eden modifiye fosfonat esaslı bir akışkanlaştırıcı, yani su azaltıcıdır. Optima 100 katkısı için üretici firma tarafından önerilen kullanım oranı yaklaşık olarak bağlayıcı miktarının %1-5'i kadar olmaktadır.

3.2 Deney Düzenekleri ve Ekipmanları

Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzenekleri ve ekipmanları şu şekildedir: Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi, enjeksiyon pompası, karıştırma bıçağı, büyük ölçekli konsolidasyon deney aleti, hidrolik yükleme sistemi, deney tankları, karot makinesi, elektrikli testere, laboratuvar mikseri ve numune kalıpları. Her bir ekipmanın özellikleri aşağıda anlatılmıştır.

3.2.1 Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi

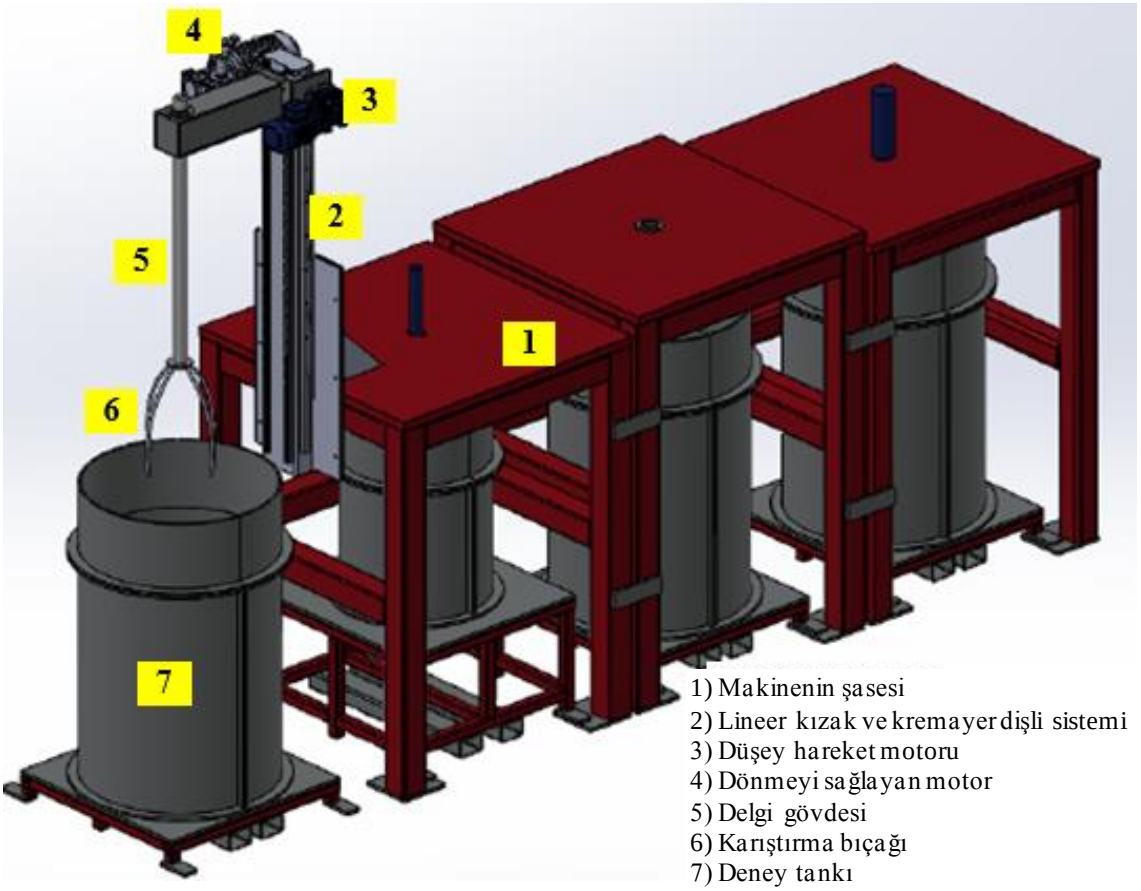
Derin karıştırma kolonlarının imalatı için Konya Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi kullanılmıştır. Makinenin teknik çizimleri Şekil 3.16'da, imal edilmiş hali Şekil 3.17'de verilmiştir. Makine ve ekipmanlarının imalatı 4 ay sürmüştür.

Makinenin şase ayakları 120 mm x 120 mm boyutlarındaki 4 mm kalınlıkta profilden ve ST37 sac kullanılarak imal edilmiştir. Hidrolik silindirlerin bağlandığı üst plakanın ölçüleri 1200 mm x 1200 mm, kalınlığı 40 mm'dir.

Karıştırıcı kafanın dikey hareketi lineer kızak ve kremayer dişli ile sağlanmıştır. Dikey hareket redüktörünün torku 52 Nm ve hareket hızı 100 cm/dk'dır. Kullanılan elektrik motorunun gücü 0.37 kW, dönme hızı 1400 devir/dk'dır. Redüktörün tahvil oranı %50'dir. Kullanılan kremayer Modül 2 ve uzunluğu 1700 mm dir. Kremayer üzerinde giden pinyon M2 18 diştir.

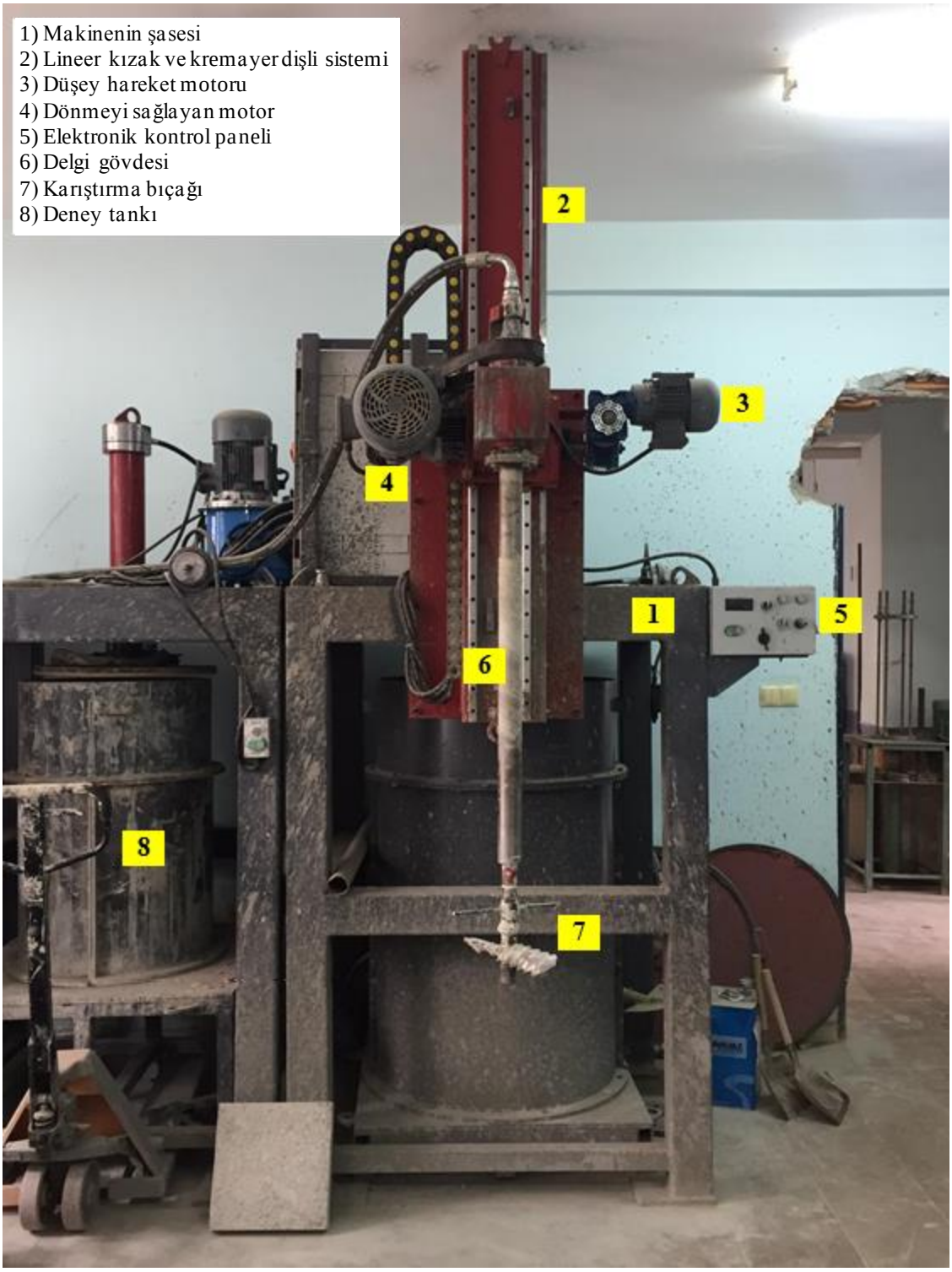
Karıştırıcı kol (delgi gövdesi) redüktörünün torku 97 Nm ve dönme hızı 193 devir/dk hızla dönmektedir. Bu devir kayış kasnak sistemi ile 100 devir/dk'ya düşürülmüştür. Kullanılan elektrik motorun gücü 2.2 kW ve hızı 1400 devir/dk'dır.

Her iki motor hızı da asenkron motor sürücü ile ayarlanabilmektedir. Sonuç olarak derin karıştırma makinesinin delgi gövdesinin düşey yöndeki hareket hızı 0-100 cm/dk, kendi ekseni etrafında dönme hızı 0-100 devir/dk arasında istenilen değerde çalışabilmektedir.



1) Makinenin şasesi
2) Lineer kızak ve kremayer dişli sistemi
3) Düşey hareket motoru
4) Dönmeyi sağlayan motor
5) Delgi gövdesi
6) Karıştırma bıçağı
7) Deney tankı

Şekil 3.16. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin teknik çizimi



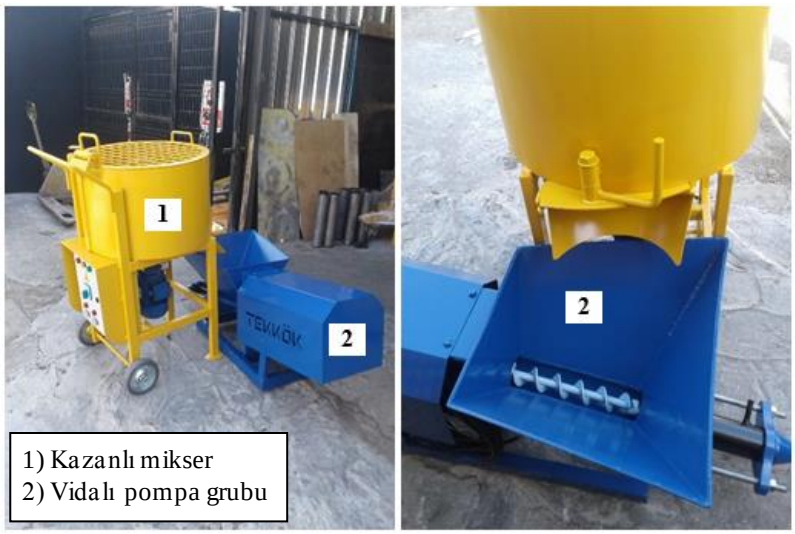
Şekil 3.17. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin imal edilmiş hali

3.2.2 Enjeksiyon pompası

Çalışma kapsamında; sistem parametrelerinin araştırıldığı deneylerde çimento ve sudan oluşan enjeksiyon hazırlanmaktadır. Uçucu kül katkılı derin karıştırma kolon imalatının

yapıldığı deneylerde ise çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su karıştırılarak enjeksiyon hazırlanmaktadır. Derin karıştırma kolon imalatının yapılabilmesi için enjeksiyonun homojen bir şekilde karıştırılıp hazırlanması gerekmektedir. Bunun için piyasada mevcut bulunan enjeksiyon pompası taramıza özel olarak tasarlanmış ve satın alınmıştır.

Derin karıştırma kolon imalatında enjeksiyonun zemine aktarılabilmesi için 30 bar basınç ile enjeksiyonu püskürtebilen arazi tipi (GP 45 modeli) bir enjeksiyon pompası kullanılmıştır (Şekil 3.18). Böylelikle enjeksiyonun hazırlanması ve karıştırılması standartlara uygun bir şekilde yapılmıştır. Enjeksiyon pompasının teknik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.18. Enjeksiyon pompasının genel görünüşü

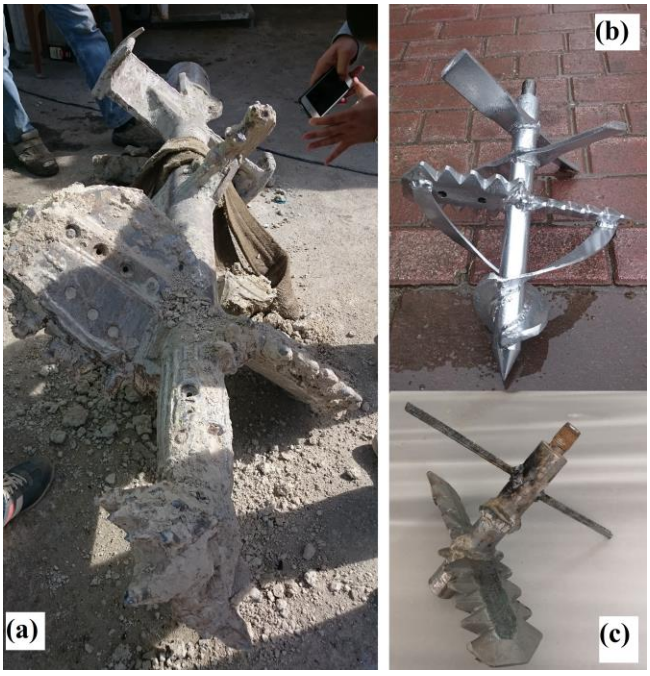
Tablo 3.3. Enjeksiyon pompasının özellikleri

Özellik	GP 45
AC güç	380 V, 50 Hz
Pompa motor gücü	5.5 kW
Mikser motoru gücü	2.2 kW
Mikser motoru devri	50 devir/dk
Üretim debisi	90 lt/dk
İletim mesafesi	Yatayda 150 m, düşeyde 30 m
Tane boyutu desteği	0-10 mm
Rotor-stator tipi	No12 (P12)
En yüksek basınç	25-30 bar
Mikser kazanı hacmi	75 lt
Kazan doldurma yüksekliği	1100 mm
Ağırlık	480 kg
Ebatlar (ExBxY)	1250 x 2500 x 1400 mm

Enjeksiyon hazırlanırken, ilk olarak akışkanlar (su ve/veya süper akışkanlaştırıcı katkı) daha sonra bağlayıcılar (çimento ve/veya uçucu kül) pompanın mikser bölümüne dökülmüş ve mikser çalıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edildikten sonra, enjeksiyon mikserden pompa grubuna aktarılmaktadır. Vidalı pompa grubu enjeksiyonu basınçlı bir şekilde aktarılacağı yere iletmektedir. Pompa grubundan çıkan hortum, derin karıştırma makinesinin delgi gövdesinin uç kısmına bağlanmış vaziyettedir. Buraya gelen enjeksiyon delgi gövdesinin içerisinden geçerek karıştırma bıçaklarının üzerinde bulunan deliklerden zemine aktarılmaktadır.

3.2.3 Karıştırma bıçağının tasarımı

Yapılan ön deneylerde zeminin enjeksiyonla homojen şekilde karıştırılabilmesi için sistem parametreleri yanında karıştırma bıçağının şeklinin ve enjeksiyon delik çaplarının büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu bağlamda arazideki DKK uygulamalarında kullanılan karıştırma bıçağına benzer bir bıçak tasarımı yapılmıştır. Arazide DKK imalatında kullanılan karıştırma bıçağı incelendiğinde, bıçağın zemine ilk girdiği kısımda burgulu bir sistem, daha sonra enjeksiyonun çıktığı ve zemini karıştıran iki adet ana kanat ve bunların üzerinde iki seviye daha kanat bulunduğu görülmektedir. Enjeksiyonun çıktığı ana kanatlar delgi gövdesine yatayla 45° açı yapacak şekilde kaynaklı iken, üstteki kanatlar yatay olarak kaynaklanmıştır. Ayrıca arazi tipi bıçakların üzerinde 3 mm çapında 4 adet enjeksiyon deliği bulunmaktadır (Şekil 3.19a).



Şekil 3.19. DKK imalatında kullanılan karıştırma bıçakları a) arazi tipi ve b, c) laboratuvar tipi

İlk olarak kanat uzunluğu 30 cm olan ve arazi tipi karıştırma bıçağına benzer bir bıçak tasarımı yapılmıştır (Şekil 3.19b). DKK imalatı sırasında bıçağın altındaki burgulu bölgeye zemin yapışarak burayı doldurmuştur. Ayrıca en üstte bulunan iki seviyeli ilave kanatların arası yakın olduğundan kanatlar arasına zemin dolmakta ve bıçak zemini karıştıramamaktadır. Bu sıkıntılardan sonra bıçağın altındaki burgulu kısım ve üstteki iki kanattan biri iptal edilmiştir. Karıştırma bıçağının son durumu Şekil 3.19c'de olduğu gibidir. Karıştırma bıçağının tasarımı yapılırken enjeksiyon deliklerinin çapı 2-3-4 mm olacak şekilde imal edilmiştir.

3.2.4 Deney tankları

Derin karıştırma kolonlarının imal edileceği zemin ortamını hazırlamak için özel tasarım 2 adet deney tankı imal ettirilmiştir. Deney tankının çapı 60 cm ve boyu 90 cm'dir. Tankın üst 30 cm'si tek parça silindirik bir kesite sahip iken, alttaki 60 cm'lik kısım iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki parça yarım silindir şeklinde olup, uzunluk boyunca kenarlarında vida bağlantı yerleri vardır. Üstteki tek parça ile alttaki parçaların da birbirine bağlanabilmesi için vida delikleri mevcuttur (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17). Tankın bu şekilde tasarlanmasının nedenleri şunlardır: Yüksek plastisiteli killi zemin deney tankına yerleştirildikten sonra sabit bir gerilme altında konsolide edilmektedir. Böylelikle homojen ve boşluksuz bir zemin ortamı oluşturulmaktadır. Konsolidasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için, yükleme plakasının üst bölgede düzgün hareket edebilmesi ve plaka-tank ara yüzeyinden zemin çıkmaması için üst bölge tek parça halinde üretilmiştir. Ayrıca tankın tabanında ve üstte bulunan yükleme plakasında su çıkışına müsaade eden drenaj delikleri bulunmaktadır. Yani tank içerisine yerleştirilen zemin çift yönlü drenaj koşullarına göre konsolide edilmektedir. Zemin ortamı oluşturulduktan sonra derin karıştırma kolon imalatı yapılmış ve belirli bir süre sonra tank açılıp kolon dışarıya çıkarılmıştır. Bu nedenle tankın alt bölgesi ikiye ayrılabilir şekilde tasarlanmıştır.

3.2.5 Büyük ölçekli konsolidasyon aleti

Yüksek plastisiteli killi zeminin 60 cm çapında ve 90 cm yüksekliğindeki deney tankına yerleştirilebilmesi için 400-450 kg zemin gerekmektedir. Killi zeminin hangi şartlarda tanka doldurulup konsolide edileceğini belirlemek için birçok deneme yapmak gerekmektedir. Bu nedenle zeminin su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisi 1/30 ölçekte daha küçük kalıplar içerisinde araştırılmıştır. Çapı 22 cm, yüksekliği 20 cm olan, kalıbın alt ve üst yüzeylerinden su drenajına müsaade edilen bir kalıp kullanılmıştır, yani çift yönlü bir drenaj

vardır (Şekil 3.20). Deney tankının da hem alt yüzeyinde hem de üzerindeki yükleme plakasında drenaj kanalları mevcuttur.

Şekil 3.20. Büyük ölçekli konsolidasyon aleti

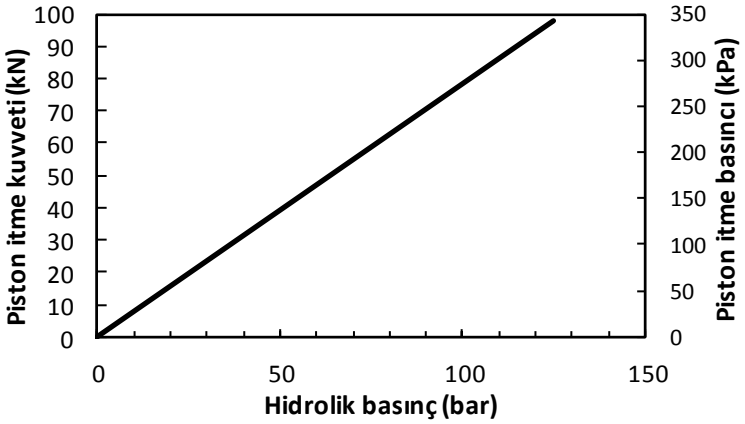
Büyük ölçekli konsolidasyon aleti, geoteknik mühendisliğinde kullanılan klasik konsolidasyon aletiyle aynı mekanizmaya sahiptir. Fakat zeminin yerleştirildiği kalıp, standart konsolidasyon ringinden (çapı 5cm, yüksekliği 2 cm) hacimsel olarak 194 kat daha büyük, deney tankından 30 kat daha küçüktür.

3.2.6 Hidrolik yükleme sistemi

Çalışma kapsamında yüksek plastisiteli killi zemin (400-450 kg) farklı su muhtevalarında karıştırılarak deney tankına yerleştirilmiş, sonrasında DKK imalatı yapılmıştır. Killi zemin tanka yerleştirildiğinde boşluklu bir zemin ortamı oluşmaktadır. Homojen ve boşluksuz bir zemin ortamı elde etmek için zeminin belirli ve sabit bir gerilme altında konsolide edilmesi gerekmektedir. Bunun için 3 takım yükleme çerçevesi ve hidrolik piston yaptırılmıştır (Şekil 3.21). Yükleme çerçevesi, derin karıştırma makinesinin şasesiyle aynı boyutlarda ve özelliklerdedir. Tasarlanan hidrolik pistonlar ise 0-100 kN yük uygulama kapasitesine sahiptir ve istenilen yük kademesinde yükü sabit olarak aktarmaktadırlar. Her bir pistonun altında 60 cm çapında ve 3 cm kalınlığında yükleme başlığı bulunmaktadır.

Pistonların, uygulanan hidrolik basınca karşılık oluşturdukları yük ve yükleme plakası aracılığıyla zemine aktardıkları gerilme ilişkisi Şekil 3.22'de verilmiştir.

Şekil 3.21. Tasarlanan yükleme çerçeveleri ve hidrolik yükleme pistonları



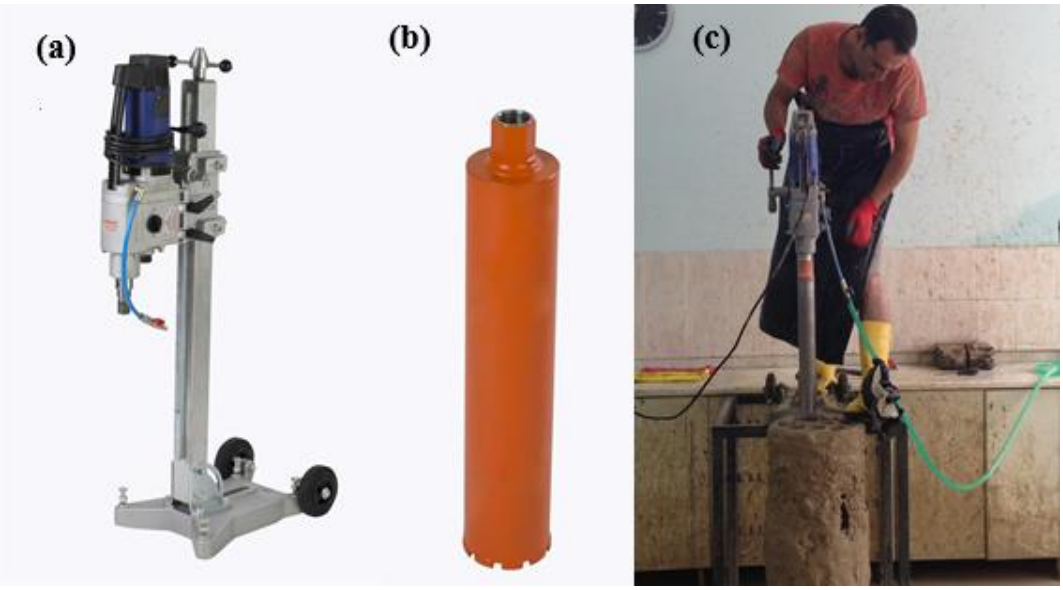
Şekil 3.22. Hidrolik pistonun çalışma basıncı-yük-gerilme ilişkisi (gerilme hesabı için 60 cm çapında yükleme başlığı dikkate alınmıştır)

3.2.7 Karot makinesi

İmal edilen derin karıştırma kolonlarından kür süreleri sonunda karot numunelerinin alınabilmesi için Çelikkal HN-300 markalı karot makinesi ve karot uçları satın alınmıştır (50 mm ve 60 mm). Karot alınırken dış çapı 60 mm olan karot ucu kullanılmıştır çünkü bu karot

ucundan 50 mm çaplı numuneler alınmaktadır. Karot makinesinin görüntüsü Şekil 3.23'te, teknik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Karot alımı sırasında karot uçlarının 1000 devir/dk hızla dönmesi sağlanmıştır. Ayrıca karot alınırken karot uçlarında ısınmadan kaynaklı oluşacak yıpranmayı engellemek ve kesilme sırasında açığa çıkan artık malzemenin karot deliğinden uzaklaşması için sisteme basınçlı su verilmiştir.



Şekil 3.23. a) Karot makinesi, b) 60 mm çaplı karot ucu ve c) karot alınması

Tablo 3.4. HN-300 karot makinesinin özellikleri

Özellik	Kapasite
Motor gücü	2600 watt
Gerilim	220-240 V AC 50 HZ
Delme kapasitesi	300 mm
Devir seçenekleri	3 vites (400-1000-1700 devir/dk)
Ağırlığı	35 kg
Uç girişi	1-1/4 UNC
Ebatlar	630*1100 mm

3.2.8 Elektrikli testere

İmal edilen kolonlardan 30-40 cm uzunluğunda karot numuneleri alınmıştır. Numune boyları dayanım deneyleri için 10 cm, permeabilite deneyleri için 3 cm, konsolidasyon deneyleri için 2 cm olacak şekilde kesilmiştir. Bunun için elektrikli testere kullanılmıştır (Şekil 3.24).

Şekil 3.24. Elektrikli testere ile karot numunelerinin kesilmesi

3.2.9 Laboratuvar mikseri

Uçucu kül katkılı derin karıştırma kolonu tasarımında hem derin karıştırma makinesi ile imal edilen (büyük ölçekli DKK) hem de laboratuvar mikseri kullanılarak karıştırılan zemin-bağlayıcı karışımlarının (küçük ölçekli DKK) performansı incelenmiştir. Küçük ölçekl DKK imalatı U-test marka UTG 0-130 kodlu laboratuvar mikseri ile yapılmıştır (Şekil 3.25). Çırpıcı karıştırma kabı yörüngesinde 10-240 devir/dk, kendi ekseni etrafında ise 20-480 devir/dk hızla dönmektedir. Makine üstündeki ayar düğmesi ile devir hızı kullanıcı tarafından kolayca ayarlanabilmektedir.

Şekil 3.25. a) Karıştırma kabı, b) çırpıcı ve c) laboratuvar mikseri

3.2.10 PVC kalıplar

Laboratuvar mikseri ile karıştırılarak oluşturulan zemin-bağlayıcı karışımları PVC kalıplara yerleştirilerek kür edilmiştir. Dayanım deneylerinde kullanılan numuneler çapı 5 cm ve boyu 10 cm, permeabilite deneylerinde kullanılan numuneler ise çapı 5 cm ve boyu 3 cm olan PVC kalıplara yerleştirilmiştir. Konsolidasyon deney numuneleri 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğindeki konsolidasyon ringleri içerisine yerleştirilerek kür edilmiştir.

3.3 Deneysel Çalışmaların Yönetimi

Proje kapsamında, yüksek plastisiteli killi bir zemin içerisinde ve laboratuvarda imal edilen model derin karıştırma kolonlarının (DKK) sıkışma, dayanım ve geçirimlilik özellikleri incelenmiştir. DKK imalatında bağlayıcı madde olarak çimento veya çimento+uçucu kül kullanılmıştır. Ayrıca karışımın işlenebilirliliğini arttırmak için süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Homojen karışmış, sürekli ve yüksek performans özelliklerine sahip DKK imalatının yapılabilmesinde iyileştirilmemiş (doğal) zeminin özellikleri, imalat parametreleri ve enjeksiyon malzemesinin özellikleri önemli rol oynamaktadır. Buna göre DKK'nın performansını etkileyen ve çalışmada dikkate alınan değişkenler şunlardır:

- İyileştirilmemiş (doğal) zeminin özellikleri
  - Doğal su muhtevası (w), kıvamı veya likitlik indisi (I_L)
  - Mukavemet özellikleri (q_u)
- Makine-teçhizattan kaynaklı sistemsel özellikler (imalat parametreleri)
  - Delgi gövdesinin batma ve geri çekme hızları
  - Karıştırma bıçağının dönme hızı
  - Enjeksiyon deliklerinin sayısı
  - Enjeksiyon deliklerinin çapı
  - Karıştırma süresi (tarama sayısı)
- İyileştirilmiş zeminin (zemin-bağlayıcı karışımı) özellikleri
  - Bağlayıcı dozajı
  - Enjeksiyon içerisindeki uçucu kül yüzdesi (uçucu kül içeren tasarımlarda)
  - Enjeksiyonun su/bağlayıcı oranı
  - Enjeksiyona katılan süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi (katkı içeren tasarımlarda)
  - Kür şartları ve süresi

DKK performansını etkileyen birçok parametre olduğundan dolayı tüm parametrelerin aynı anda araştırılması çok zordur. Bu nedenle çalışma iki ana bölüme ayrılmıştır. Birinci kısımda imalat parametreleri araştırılarak homojen ve sürekli DKK imalatı yapılabilmesi için optimum imalat parametreleri belirlenmiştir. İkinci kısımda ise uçucu kül katkılı DKK imalatı yapılarak, bunların geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bu aşamada hem derin karıştırma makinesi ile DKK imalatı yapılmış hem de mikserle karıştırılan zemin-bağlayıcı numuneleri hazırlanmıştır.

Derin karıştırma kolonları laboratuvarda ve model tankların içerisinde imal edildiğinden dolayı, farklı su içeriğine sahip killi zemin tankın içerisine farklı enerjilerde sıkıştırılarak (konsolide edilerek) yerleştirilmiştir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen değişkenlerden iyileştirilecek zeminin özellikleri dikkate alınarak arazi temsiliyeti sağlanmıştır. Makine-teçhizattan kaynaklı sistemsel özelliklerin dikkate alınmasıyla homojen ve sürekli bir kolon oluşturulabilmesi için gerekli parametreler araştırılmıştır. Bağlayıcı malzemenin özellikleri ise DKK'nın hem fiziksel (yoğunluk, geçirimlilik) hem de mekanik (sıkışma, dayanım) özelliklerini etkilemektedir.

3.3.1 İmalat (Sistem) parametrelerinin araştırılması

3.3.1.1 Yöntem

Çalışmanın bu kısmındaki amaç homojen ve sürekli bir DKK oluşturabilmek amacıyla sistem (imalat) parametrelerinin optimizasyonunu yapmaktır. Bunun için izlenilen yöntem şu şekildedir: Öncelikle doğal zemin belirli bir su muhtevasında karıştırılarak deney tankına yerleştirilmiş ve belirli bir gerilme altında konsolide edilmiştir. Homojen zemin ortamı oluşturulduktan sonra derin karıştırma makinesi kullanılarak DKK imalatı yapılmıştır. İmalat sırasında çimento ve sudan oluşan enjeksiyon kullanılmıştır. Kolon imalatından 28 gün sonra karot numuneleri alınarak bunların serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Daha sonra Taguchi yöntemi kullanılarak optimum imalat parametreleri belirlenmiştir. Son olarak optimum durumu temsil eden DKK imalatı yapılarak, alınan karot numuneleri ile doğrulama deneyi yapılmıştır.

3.3.1.2 Parametrelerin ve sınırlarının belirlenmesi (ön deneyler)

Homojen ve sürekli bir DKK imalatı için gerekli imalat parametreleri şu şekilde sıralanabilir:

- Karıştırma bıçağının tasarımı (bıçak geometrisi, karıştırıcı kanatların konumu, açısı ve kanat sayısı, enjeksiyon deliklerinin yeri, çapı ve sayısı)
- Çimento dozajı
- Enjeksiyonun su/çimento oranı
- Karıştırma bıçağının dönme hızı
- Delgi gövdesinin batma/çekme hızları
- Karıştırma süresi (tarama sayısı)
- İyileştirilecek zeminin doğal su muhtevası veya kıvamı

Karıştırma bıçağının tasarımı: Karıştırma bıçağının tasarımı arazi tipi bıçakların geometrisi (Şekil 3.19) dikkate alınarak yapılmıştır ve detaylar *alt başlık 3.2.3*'te verilmiştir. Araştırma kapsamında karıştırma bıçağı ile ilgili dikkate alınan parametre enjeksiyon deliklerinin çapı olmuştur. Ön deneyler sırasında enjeksiyon delik çapının 5 mm ve daha büyük olduğu durumlarda enjeksiyon çıkış basıncının çok düşük olduğu, hatta basınç oluşmadığı fark edilmiştir. Enjeksiyon düşük basınçla veya basınçsız olarak zemine aktarıldığında karıştırma bıçaklarının zemini yırtması, parçalaması ve karıştırması zor olmaktadır. Enjeksiyon delik çapının 2 mm'den düşük olması durumunda ise enjeksiyonun rahatlıkla deliklerden çıkamadığı ve bazı durumlarda tıkanmalar olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle enjeksiyon deliklerinin çapı 2-4 mm olacak şekilde seçilmiştir.

Çimento dozajı: Derin karıştırma uygulamalarında zemin cinsine bağlı olarak bağlayıcı dozajı 100-500 kg/m^3 arasında seçilebilmektedir (Topolnicki, 2004). Kumlu zeminler için 100 kg/m^3 dozaj değerinden başlanabilir fakat killi zeminlerde özellikle yüksek plastisiteli zeminlerde bağlayıcı dozajı az olduğunda zemine aktarılan enjeksiyon miktarı (su/bağlayıcı oranına bağlı olarak) da az olmaktadır. Bunun sonucunda ortamda yeteri kadar su olmadığından dolayı homojen zemin-bağlayıcı karışımının elde edilmesi zor olmaktadır. Bu bölümdeki çalışmalarda enjeksiyonun su/bağlayıcı oranı 1 olarak sabit seçilmiştir. Seçilen su/bağlayıcı oranında, homojen zemin-bağlayıcı karışımının elde edilebileceği en düşük dozaj miktarı 250 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. En yüksek dozaj ise 400 kg/m^3 olarak seçilmiştir.

Enjeksiyonun su/çimento oranı: Çalışmanın bu bölümünde su/çimento oranı 1 olacak şekilde sabit seçilmiştir ve değişken değildir. Uygulamada yaygın olarak su/çimento oranı 1 seçilmektedir.

Karıştırma bıçağının dönme hızı: Çalışmanın başında karıştırma bıçağının dönme hızı 10-50 devir/dk ve delgi gövdesinin batma hızı 20-80 cm/dk olarak seçilmişti. Bu parametreler seçilirken Türk, Avrupa ve Japon standartlarındaki değerler dikkate alınmıştır

(Tablo 2.4). Fakat ön denemelerde bu parametrelerin homojen bir DKK oluşumu için yeterli olmadığı anlaşılmıştır.

Laboratuvarda ilk derin karıştırma kolonu imal edilirken karıştırma bıçağının dönme hızı 50 devir/dk, batma hızı 50 cm/dk seçilmiştir. Çimento dozajı 200 kg/m^3 ve su/çimento oranı 1'dir. Ayrıca enjeksiyon deliklerinin çapı 5 mm'dir. Bu parametrelere göre homojen bir kolon oluşumu sağlanamamış ve kolondan karot alınamamıştır (Şekil 3.26-Şekil 3.28). Bunun sebeplerinden bir tanesi enjeksiyon deliklerinin çapı büyük olduğundan dolayı enjeksiyon deliklerden basınçla çıkamamakta ve zemini yırtıp karıştıramamaktadır. Diğer bir neden ise karıştırma bıçağının dönme hızı yetersiz kalmaktadır.

Şekil 3.26. İmal edilen ilk derin karıştırma kolonu (deneme kolonu)

Şekil 3.27. Kolondan karot alma denemesi (deneme kolonu)

Şekil 3.28. Homojen karışmayan kolon (deneme kolonu)

Yukarıdaki başarısızlıktan sonra uygulamanın içerisinde bulunan uzman kişilerin yardımına başvurulmuştur. İksa Mühendislik tarafından Aksaray'da devam eden DKK ile derin temel yapımı ve zemin iyileştirme çalışmaları yerinde incelenmiştir. Firma çalışanları sahadaki tecrübelerini bizimle paylaşmışlardır. Uygulama sırasında killi zeminlerde genellikle çimento dozajı 400 kg/m^3 (hacim oranı %52.5 olmaktadır), su/çimento oranı 1, karıştırma bıçaklarının dönme hızı ise 80 devir/dk seçilmektedir. Bıçakların dönme hızının 80 devir/dk değerinden az olduğu durumlarda homojen kolon oluşumunun sağlanamadığı ifade edilmiştir (bu killi zeminler için geçerlidir, kumlu zeminlerde karıştırma işlemi daha kolay olacağından dönme hızı düşürülebilir). Kolon hacminden hareketle enjeksiyon hacmi hesaplanmakta, enjeksiyonun hepsi zemine 6 seferde verilmektedir. Yani delgi gövdesi zemin yüzeyinden kolon alt ucuna kadar 3 kez inip çıkmakta ve enjeksiyon verme işlemi sürekli devam etmektedir. Enjeksiyon basıncı genellikle 150 bar civarında olmaktadır. Delgi gövdesinin batma hızı ise gerekli enjeksiyon hacminin zemine 6 seferde (3 kez batma, 3 kez çıkma) verilebilecek şekilde ayarlanmaktadır. Enjeksiyonun zemine iletilme debisi kontrol edilebildiğinden batma hızı da buna göre ayarlanmaktadır.

Laboratuvarda yapılan ön deneyler ve uygulama sırasında yapılan gözlemler sonucunda karıştırma bıçaklarının dönme hızı için 60-100 devir/dk sınır değerleri seçilmiştir.

Delgi gövdesinin batma/çekme hızları: Çalışma kapsamında delgi gövdesinin batma ve çekme hızları değişken olarak seçilmemiştir, çünkü buna gerek kalmamaktadır. DKK imalatı sırasında çimento dozajı ve su/çimento oranı bilinmektedir. Buna göre, ilk önce imal edilen kolonun hacmine bağlı olarak çimento ve su kütlesi dolayısıyla da enjeksiyon hacmi belirlenmektedir. Daha sonra hazırlanan enjeksiyonu kolon yüksekliği boyunca zemine aktaracak şekilde delgi gövdesinin batma hızı hesaplanmaktadır (enjeksiyon pompasının

iletim debisi sabittir). Kolon imalatı sırasında enjeksiyon zemine tek seferde verilmektedir. Delgi gövdesinin çekme hızı da batma hızıyla aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Karıştırma süresi: Kolon imalatı sırasında enjeksiyon kolon boyunca zemine tek seferde verilmekte, sonrasında karıştırma bıçakları döner vaziyette geri çekilmektedir (enjeksiyon vermeden). Bundan sonra karıştırma bıçakları döner vaziyette zemine 4 sefer daha batırılıp çıkarılmaktadır. Yani toplamda 10 kez tarama yapılmaktadır (5 kez batma, 5 kez geri çekme sırasında).

İyileştirilecek zeminin doğal su muhtevası veya kıvamı: Deney tankına yerleştirilecek zeminin hangi su muhtevasında veya kıvamda deney tankına yerleştirileceği büyük ölçekli konsolidasyon deney aletinde araştırılmış (Şekil 3.20), daha sonra elde edilen sonuçlar deney tankında kontrol edilmiştir. Burada ortaya çıkan sonuç şu şekildedir: Zemin likit limitten %3-5 daha fazla su muhtevasında karıştırıldığında kendi ağırlığı altında bile su kaybetmekte, zemin taneleri çökelmeye başlamaktadır. Bu da zeminin hedef su muhtevası değerinin istenilenden farklı olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle zemin su muhtevasının üst sınırı olarak likit limit değerinin (%52) alınmasına karar verilmiştir.

İyileştirilecek zeminin su muhtevası değerinin alt sınırın belirlenebilmesi için derin karıştırma makinesinin gücünün test edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle araziden getirilen zemin %27 su muhtevasında karıştırılıp deney tankına doldurulduktan sonra içerisindeki boşlukların giderilmesi ve homojen zemin ortamının oluşturabilmesi için 150 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir (bu konunun detayları *alt başlık 3.4.1.3*'te verilmiştir). Daha sonra çimento dozajı 400 kg/m^3, delgi gövdesinin batma hızı 50 cm/dk, karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk, enjeksiyon deliklerinin çapı 2 mm seçilerek DKK imalatı yapılmıştır. Çimento dozajı maksimum, enjeksiyon delik çapları minimum ve karıştırma bıçaklarının dönme hızı yeterli olmasına rağmen homojen DKK imalatı yapılamamıştır. Zemin çok katı bir kıvamda olduğu için (plastik limite yakın) seçilen dönme ve inme hızları yetersiz gelmiş, makine zorlanmaya başlamış ve delgi gövdesinin hareketini sağlayan kasnakları birbirine bağlayan kayışın dişleri sıyrılmaya başlamıştır. Bu görüldüğü anda bıçakların batma ve dönme hızları düşürülerek kolon imalatı tamamlanmıştır (Şekil 3.29). Bu kadar katı bir zemin hem makineyi zorlamaktadır hem de boşluklu bir kolon oluşmaktadır. Bu yüzden iyileştirilecek zeminin su muhtevası değerinin alt sınırı %35 seçilmiştir.

Şekil 3.29. Plastik kıvama yakın (%27) su muhtevasındaki a) zemin ortamı, b) boşluklu ve homojen karışmayan kolon

3.3.1.3 Homojen zemin ortamının oluşturulması

Kolon imalatı yapılmadan önce killi zeminin deney tankına hangi koşul ve şartlarda yerleştirileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü belirli bir su muhtevasında karıştırılan killi zemin deney tankına doldurulurken çok boşluklu bir zemin ortamı meydana gelmektedir. Öncelikle, homojen ve boşluksuz bir zemin ortamının hangi şartlarda elde edileceği araştırılmalı ve belirlenmelidir.

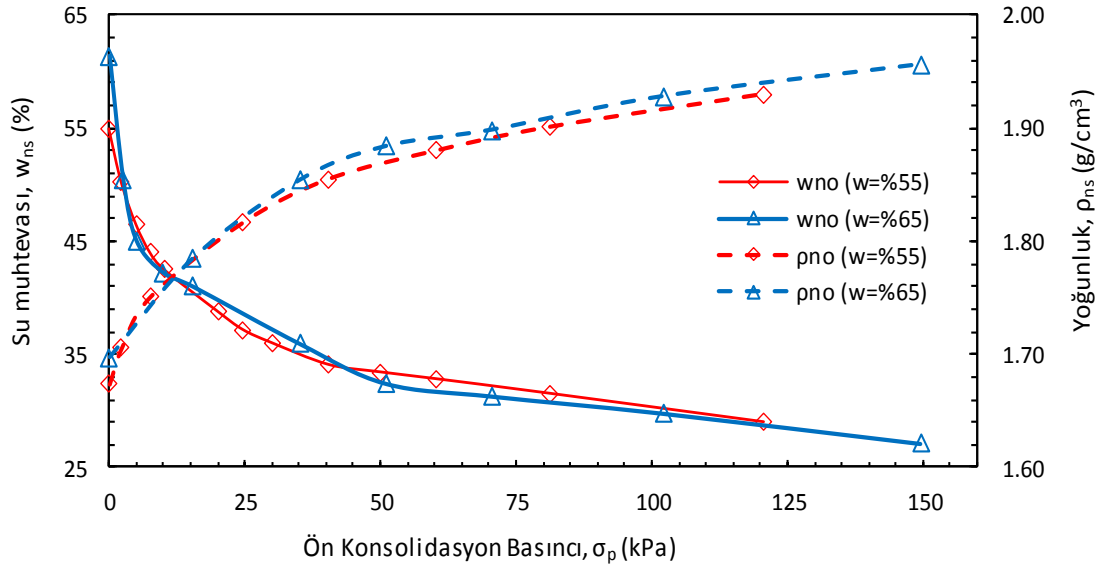
3.3.1.3.1 Zeminin konsolidasyon davranışı

Yüksek plastisiteli killi zeminin 60 cm çapında ve 90 cm yüksekliğindeki deney tankına doldurulabilmesi için 400-450 kg zemin gerekmektedir. Killi zeminin hangi şartlarda tanka doldurulup konsolide edileceği meselesini çözmek için birçok deneme yapmak gerekmektedir. Bu nedenle bu kısım çok zahmetli ve uzun olacağından dolayı zeminin su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisi 1/30 ölçekte daha küçük kalıplar içerisinde araştırılmıştır (Şekil 3.30).

İlk denemede, kalıpların birine su muhtevası %52, diğerine de %70 olan zemin yerleştirilerek 50 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon oturmaları

tamamlandıktan sonra her iki zeminin de su muhtevası %34 olmuştur. Yani zeminlerin başlangıç su muhtevası farklı bile olsa aynı gerilme ile konsolide edilince son durumdaki su muhtevaları aynı olmaktadır. İkinci denemede, başlangıç su muhtevası %55 ve %65 olan zeminler hazırlanarak farklı gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Her bir gerilme kademesinde konsolidasyon oturmaları bitene kadar (genellikle 4-5 gün) beklenmiştir. Yükleme başında ve oturmalar tamamlandıktan sonra zemin ağırlığı, yüksekliği, su muhtevası değerleri ölçülerek yoğunluk-su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisi belirlenmiştir (Şekil 3.31). Zeminin konsolidasyon davranışını anlamak için yapılan bu çalışmalar yalaşık 2 ayda tamamlanmıştır.

Şekil 3.30. Zeminin su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisinin 1/30 ölçekte araştırılması



Şekil 3.31. Zeminin yoğunluk-su muhtevası-ön konsolidasyon basıncı ilişkisi (w_{no} ve w_{ns} zeminin başlangıç ve son durumdaki su muhtevaları, ρ_{no} ve ρ_{ns} zeminin başlangıçtaki ve son durumdaki doğal yoğunluklarını göstermektedir)

Zeminin konsolidasyon davranışı anlaşıldıktan sonra aynı ilişkinin deney tankında sınanması gerekmektedir. Deney tankı 400-450 kg zemin almaktadır ve araziden getirilen zeminin belirli bir su muhtevasında karıştırılarak tanka doldurulması gerekmektedir. Araziden hafriyat yapılarak laboratuvara getirilen yüksek plastisiteli zeminin doğal su muhtevası %29'dur. Zemin içerisinde çok küçük zemin tanelerinden, boyutu 30 cm x 30 cm x 30 cm olan kil topaklarına kadar değişen büyüklüklerde zemin parçaları bulunmaktadır. Ayrıca zemin yüksek plastisiteli olduğundan bu zemin parçacıklarını dağıtmak ve belirli bir su muhtevasında homojen karıştırmak oldukça zor olmaktadır. Büyük ölçekli deneylerde zemini tanka yerleştirmek için aklımıza gelen ilk düşünce zemini likit kıvamda karıştırıp tanka yerleştirmek ve hedef su muhtevasına gelene kadar konsolide etmek oldu. Çünkü araziden gelen zemine ne kadar çok su eklersek irili ufaklı kil topaklarının erimesi, ezilmesi, su ile temas etmesi o kadar kolay olmaktadır. Aksi halde yüksek plastisiteli kilin işlenmesi (belirli bir su muhtevasında homojen karıştırılması) oldukça zor bir meseledir. Bu düşünceden hareketle likit kıvamda (%52) zemin hazırlanarak 25, 40 ve 70 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Her bir yükleme kademesinde 1 hafta beklenilmesine rağmen oturmaların halen devam ettiği, tankın alt/üst bölgeleri ile orta bölgesinin farklı su muhtevalarına sahip oldukları gözlenmiştir (Tablo 3.5). Çünkü zemin içerisindeki su tankın tabanında ve üstte bulunan drenaj deliklerinden çıktığı için suyun çıkış yerine yakın bölgelerin su muhtevası daha çabuk azalırken, drenaj kanallarından uzaklaştıkça suyun çıkışı uzun zaman almaktadır. Ayrıca zeminin alt ve üst bölgeleri daha çabuk konsolide olduğu için bu bölgelerin geçirimsizliği artmakta ve orta bölgelerdeki suyun zemin dışına çıkması çok uzun sürmektedir. Tank içerisindeki zeminin her yerinin aynı su muhtevasına sahip olabilmesi için çok uzun süre konsolide edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, killi zemin hedef su muhtevasında karıştırılıp tank içerisine yerleştirildikten sonra konsolide edilmiştir.

Tablo 3.5. Likit kıvamdaki (w=%52) zeminin deney tankındaki konsolidasyon davranışı

Ön konsolidasyon basıncı (kPa)	Yüzeye ve tank tabanına yakın bölgelerin su muhtevası (%)	Yüzeyden 25-30 cm aşağıdaki bölgenin su muhtevası (%)
25	38.6	51.3
40	35.1	49.8
70	32.7	46.6

Homojen zemin ortamının oluşturulması: Yukarıda edinilen tecrübeler sonucunda homojen zemin ortamının oluşturulması için yapılan işlemlerin sıralaması şu şekildedir: İlk önce araziden getirilen zeminin su muhtevası belirlenmiştir. Daha sonra deney tankını dolduracak kadar zemin tartılarak, boyutları 150 cm x 400 cm x 50 cm (ExBxY) olan bir tankın içerisine doldurulmuştur. Hedef su muhtevası ile zemin su muhtevası arasındaki fark

kadar su zemine ilave edilerek küreklerle karıştırılmıştır. Zemin çok topaklı ve hemen dağılmadığından dolayı, zeminin üzeri poşetle kapatılarak en az 1 gün beklenmiştir. Böylelikle zemin parçalarının her tarafının suyla temas etmesi sağlanmıştır. 1 veya 2 gün sonunda bile hala tüm zemin parçalarının dağılmadığı, suyla temas etmediği, yani zeminin her yerinin aynı su muhtevasında olmadığı görülmüştür. Bu nedenle 2. gün zemin çizmeyle çiğnenmiştir. Bu esnada küreklerle zemin birkaç kez karıştırılıp, alt üst edilmiştir. 2. gün sonunda zeminin farklı bölgelerinden su muhtevası örnekleri alınmış ve hedeflenen su muhtevası değerinden farklı ise fark kadar su ilave edilerek zeminin kürekle karıştırılması, çizmeyle çiğnenmesi işlemi tekrar edilmiştir (Şekil 3.32).

Şekil 3.32. Zeminin hedef su muhtevasında karıştırılması: a) araziden hafriyatla getirilen topaklı zemin, b) zeminin %35 su muhtevasında çiğnenerek karıştırılması, c) zeminin %52 su muhtevasında çiğnenerek karıştırılması ve d) zeminin üzerinin poşetle örtülerek kür edilmesi

Zemin, su muhtevası ayarlandıktan sonra küreklerle tankın içerisine yerleştirilmiştir. Bu durumda killi zemin kendini tuttuğundan dolayı zemin kendiliğinden yerleşmemekte (likit kıvama yakın zeminler daha kolay yerleşmekte ve daha az boşluk kalmaktadır) ve oldukça

boşluklu bir zemin yapısı olmaktadır. Son olarak deney tankı hidrolik piston altına yerleştirilerek, Şekil 3.31'de verilen grafikten zeminin su muhtevasına karşılık gelen ön konsolidasyon basıncı altında oturmalar bitene kadar (genellikle 2-3 gün) beklenmektedir (Şekil 3.33). Bu aşamada zeminden su çıkışı olmamakta, sadece zemin yapısı içerisindeki boşluklar kapanmaktadır ve boşluksuz, homojen bir zemin ortamı oluşturulmuş olmaktadır (Şekil 3.34). Böylelikle 1 deney için homojen zemin ortamının oluşturulması 4-5 gün sürmektedir.

Şekil 3.33. Zeminin sabit yük uygulayan hidrolik piston altında konsolide edilmesi

Şekil 3.34. Homojen zemin ortamının elde edilmiş hali

3.3.1.4 Deney programı

Laboratuvardaki ve uygulamadaki deneyimlerimiz sonucunda, homojen bir DKK oluşumu için gerekli sitem parametreleri şu şekilde belirlenmiştir: Çimento dozajı 250-400 kg/m^3, karıştırma bıçaklarının dönme hızı 60-100 devir/dk, enjeksiyon deliklerinin çapı 2-4 mm ve iyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi 0.4-1.0.

Araştırma kapsamında 4 adet parametre olduğu için her bir parametre için 3 seviye seçilerek, Taguchi yöntemine özgü 4 parametre ve 3 seviyeli L9 deneysel tasarım tablosu kullanılarak deney programı oluşturulmuştur (Tablo 3.6). Parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.6. L9 Taguchi deney tasarım tablosu

Deney No	Parametreler ve seviyeleri			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tablo 3.7. Sistem parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan parametreler ve seviyeleri

Seviye	Parametre			
	A	B	C	D
	Çimento dozajı (kg/m^3)	Dönme hızı (devir/dk)	Delik çapı (mm)	Zeminin likitlik indisi
1	250	60	2	0.4
2	325	80	3	0.8
3	400	100	4	1.0

Deney programında zeminin fiziksel özelliği olarak su muhtevası yerine zeminin likitlik indisi (I_L) parametresi kullanılmıştır. Bilindiği gibi zeminin su muhtevası değeri çok kapsayıcı bir özellik değildir. Fakat zeminin su muhtevası kıvam limitleriyle birlikte değerlendirildiğinde daha kapsayıcı olmaktadır. Bu nedenle deneysel tasarım tablosundaki sonuncu parametre için zeminin likitlik indisi değeri kullanılmıştır. Böylelikle, farklı özelliklere sahip killi zeminlerle kıyaslama imkânı olabilecektir. Zeminin su muhtevası %35-45 ve 52 için likitlik indisi

değerleri sırasıyla 0.4, 0.8 ve 1 olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.2). Zemin %35 ve %45 su muhtevasında plastik kıvamda iken, %52 su muhtevasında likit kıvamdadır.

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_l - w_p} \tag{3.2}$$

burada, w: zeminin doğal su muhtevası, w_p =zeminin plastik limiti, w_l =zeminin likit limiti.

3.3.1.5 Kolon imalatı

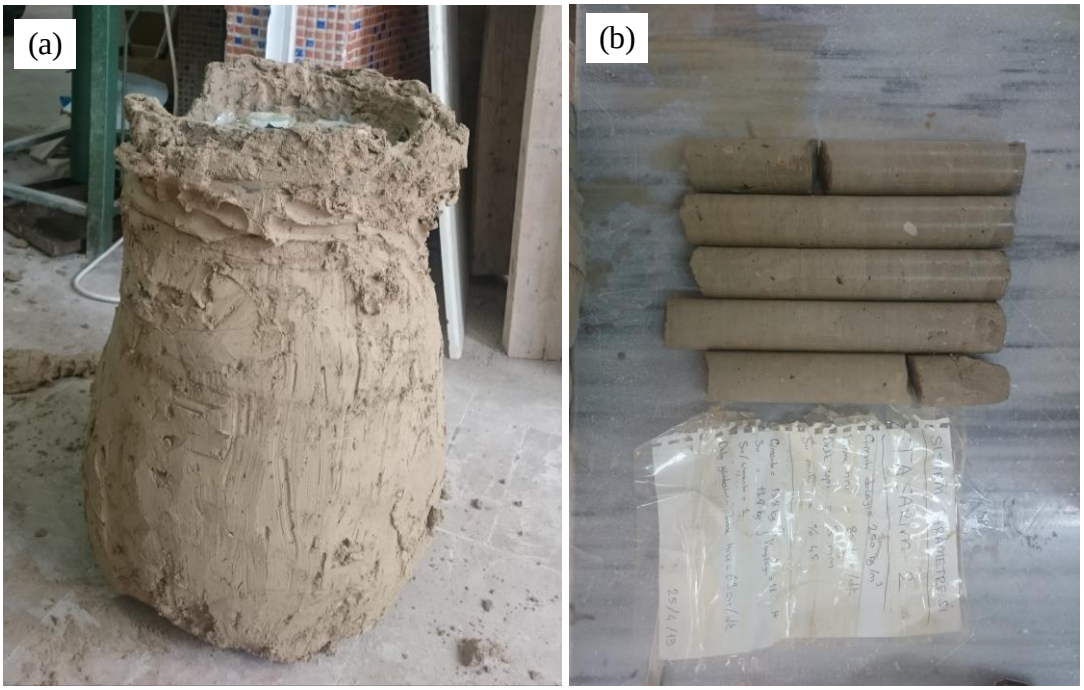
Derin karıştırma kolon imalat aşamaları adım adım aşağıda özetlenmiştir.

- İlk önce imal edilecek kolonun hacmi hesaplanmaktadır. Kolonun yükseklik ve çap (30 cm) bilgileri kullanılarak kolon hacmi hesaplanır. Daha sonra imalat sırasında gerekli çimento dozajına göre çimento kütlesi (dozaj ve kolon hacminin çarpımı) belirlenir. Sistem parametrelerinin optimizasyonu kısmındaki tüm deneylerde su/çimento oranı 1 seçilmiştir. Bundan hareketle enjeksiyon suyunun kütlesi hesaplanır ve tartılır.
- Kolon imalatına geçilmeden önce, delgi gövdesinin batma ve çekme hızlarının ayarlanması gerekmektedir. Bunun için enjeksiyon hacmine eşit olacak şekilde su tartılır, enjeksiyon pompasına dökülür ve su sisteme verilir. Delgi gövdesinin kolon yüksekliği boyunca hareket mesafesinde suyun tamamının deliklerden çıkabilmesi için gereken hareket hızı deneyerek belirlenir.
- Çimento ve su enjeksiyon pompasının mikser bölümüne dökülerek en az 10-15 dk boyunca karıştırılır ve çimento enjeksiyonu hazır hale getirilir.
- Enjeksiyon deliklerinin çapı tasarıma uygun şekilde değiştirilir.
- Deney tankı derin karıştırma makinesinin delgi gövdesi altında merkezlenir. Makineden, karıştırma bıçaklarının dönme hızı ile delgi gövdesinin hareket hızı elektronik kontrol panelinden ayarlanır. Kolon imalatı sırasında tüm enjeksiyon zemin yüzeyinden kolon alt ucuna kadar bir seferde zemine verilmektedir. Enjeksiyon zemine verildikten sonra, karıştırma bıçakları döner vaziyette iken delgi gövdesi kolon içerisinde 4 kez daha tarama yapmaktadır (toplamda 5 kez batma-çıkma). Bunun nedeni zeminin homojen karışmasını sağlamaktır. 5 tarama yapılmasının sebebi arazi tipi (Şekil 3.19a) ve laboratuvar tipi (Şekil 3.19b, c) karıştırma bıçakları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Arazideki DKK imalatlarında genellikle 3 tarama (3 kez batma-çıkma) yapılmaktadır (Topolnicki,

2009) ve arazi tipi karıştırma bıçağı üzerinde 3 seviyede kanat bulunmaktadır. Yani kolon imalatı sırasında herhangi bir derinlikteki zemin ortamı 18 kez karıştırılmaktadır (2 x tarama sayısı x kanat seviyesi=18). Laboratuvar tipi karıştırma bıçağında 2 seviyeli kanat bulunduğundan dolayı 5 tarama yapılmaktadır. Yani zemin her noktada 2 x 5 x 2 = 20 kez karıştırılmış olmaktadır.

- İmal edilen kolonlar 5-7 gün zemin ortamı içerisinde bekletilmiş, daha sonra deney tankı açılarak kolon çıkarılıp poşetlenmiştir. Kolonlardan 28 gün sonunda karot numuneleri alınarak, numunelerin dayanımları belirlenmiştir. Bu süreçler ile ilgili fotoğraflar Şekil 3.35-Şekil 3.43 arasında verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, tüm tasarımlarda başarılı kolon imalatının yapıldığı, düzgün karot numunelerinin alınabildiği görülmektedir.

Şekil 3.35. SP-1 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)



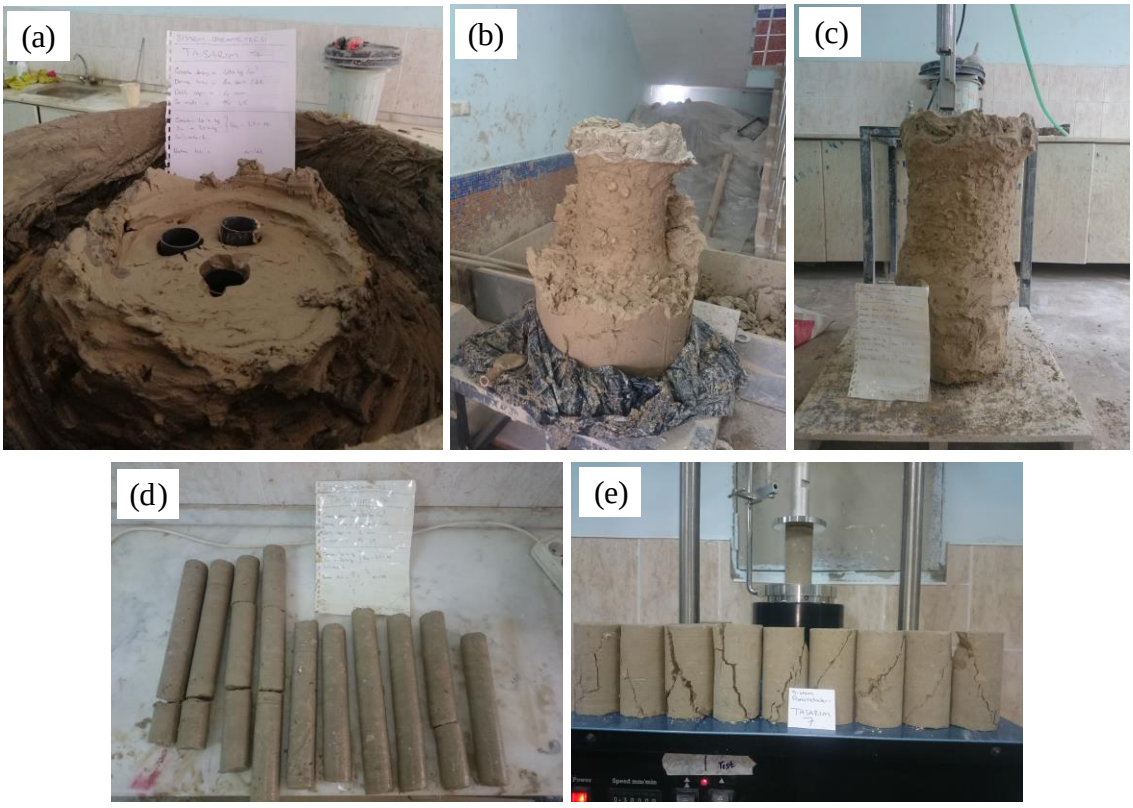
Şekil 3.36. SP-2 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) alınan karot numuneleri (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.37. SP-3 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) imalat sonrası görünüm, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.38. SP-4 numaralı DKK: a) imal edilen kolon, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi, e) imalat sonrası görünüm (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.39. SP-5 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon iç yapısı, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.40. SP-6 numaralı DKK: a) kolon tanktan çıkarılırken, b) imal edilen kolon, c) alınan karot numuneleri, d) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)



Şekil 3.41. SP-7 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon tanktan çıkarılırken, c) imal edilen kolon, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.42. SP-8 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) karot alma sonrası görünüm, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Şekil 3.43. SP-9 numaralı DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) kolon tanktan çıkarılırken, c) imal edilen kolon, d) alınan karot numuneleri, e) UCS deneyindeki kayma yüzeyi (Sistem parametrelerinin araştırılması

3.3.1.6 Karot alınması

DKK imalatından 28 gün sonra kolonlardan karot numuneleri alınmıştır. Kolon boyları 60-70 cm arasında değiştiğinden dolayı ilk önce kolonun üst tarafından 5-6 kez karot alınmıştır (Şekil 3.44). Daha sonra kolon ters çevrilerek kolonun alt bölgesinden de 5-6 kez karot alınmıştır. Alınan karot numunelerinin uzunluğu 30-40 cm arasında değişmektedir. Bazı tasarımlarda çok düzgün, kesintisiz karot alınabilirken, bazı tasarımlarda karot alınırken kopmalar, parçalanmalar olmuştur. Bu da kolon imalatı için seçilen imalat parametrelerine bağlı olarak homojen karışımın elde edilip edilmemesine bağlı olmaktadır.

Şekil 3.44. İmal edilen kolonlardan karot alınması

3.3.1.7 Yapılan ölçümler ve deneyler

Yüksek performanslı, homojen ve sürekli DKK oluşumunun araştırıldığı bu bölümde yapılan ölçümler ve deneyler şu şekildedir: İlk önce kolon imalatı sırasında yaş haldeki (prizini almadan önce) zemin-enjeksiyon karışımlarından örnekler alınarak bunların yaş yoğunlukları ile su muhtevaları belirlenmiştir. Ayrıca kolon imalatı sırasında yapılan gözlemler not edilmiştir. 28 günün sonunda alınan karot numunelerinin ise yoğunluk ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Tüm sonuçlar 4. bölümde “araştırma sonuçları” başlığı altında verilmiştir.

3.3.2 Uçucu kül katkılı DKK tasarımı

Bu kısımdaki amaç uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkılı DKK imalatı sonucunda araştırılan parametrelerin numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmaktır. Enjeksiyon içeriği (bağlayıcı dozajı, bağlayıcı içerisindeki uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı) ve iyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi (su muhtevası veya kıvamı) araştırılan parametrelerdir. İyileştirilen zeminin su muhtevasına bağlı olarak yüksek dayanım, düşük geçirimlilik ve sıkışabilirlik özelliklerine sahip DKK tasarımı yapılabilmesi için araştırılan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir.

3.3.2.1 Parametrelerin ve sınırlarının belirlenmesi (ön deneyler)

Uçucu kül katkılı DKK tasarımlarında dikkate alınan parametreler şunlardır:

- Bağlayıcı dozajı
- Enjeksiyondaki uçucu kül/toplam bağlayıcı oranı
- Enjeksiyondaki süper akışkanlaştırıcı yüzdesi
- Enjeksiyonun su/bağlayıcı oranı
- İyileştirilecek zeminin likitlik indisi

Bağlayıcı dozajı: Çalışmanın bu bölümünde bağlayıcı olarak çimento ve uçucu kül kullanılmıştır. Derin karıştırma uygulamalarında, zemin cinsine bağlı olarak bağlayıcı dozajı 100-500 kg/m^3 arasında seçilebilmektedir (Topolnicki, 2004). Bağlayıcı dozajı için alt ve üst sınırlar 200-425 kg/m^3 olarak seçilmiştir.

Enjeksiyondaki uçucu kül/toplam bağlayıcı oranı (UKO): Beton karışımı için uçucu kül kullanımının yaygın şekli bağlayıcı içerisine %25 oranından daha az katılmasıdır (Siddique, 2004; Mala vd., 2013; Malhotra, 1990; Naik vd., 1994). Bu şekilde betonun uzun dönem dayanımı artar, hidratasyon ısısı azalır, klor direnci ve işlenebilirlik artar. Bununla birlikte çimento ile %100 yer değiştirme oranında bile uçucu kül kullanıldığı olmuştur (Cross vd., 2005). Fakat bu durumda hem erken dayanım problemi oluşmakta hem de malzeme kalitesi düşmektedir (Kim vd., 2016). ACI (2014), beton içerisine toplam bağlayıcının %50 ve daha fazlası kadar uçucu kül katıldığında betonu yüksek hacimde uçucu kül içeren beton olarak tanımlamaktadır. Yoo vd. (2017) beton içerisine %0 ve %50 oranında uçucu kül ikame ederek betonarme kolonların eksenel yük taşıma gücünü araştırmışlardır. Alaka ve Oyedele (2016) betona %50-65 oranında uçucu kül katıldığında basınç dayanımının arttığını fakat eğilme ve çekme dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Ignjatovic (2017) beton içerisine %50

ve %70 oranında uçucu kül ikame ettiğinde, dayanımın %20 arttığını belirtmiştir. Huang vd. (2013) beton içerisine %80 ikame oranına kadar uçucu kül (düşük kızdırma kaybı olan) katılmasının uygulanabilir olduğunu ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir.

Uçucu kül kullanımı beton üretiminde oldukça yaygındır. Geoteknik mühendisliğinde ise genellikle yüzeysel stabilizasyon amacıyla kullanılmaktadır. Literatür taraması sonucunda enjeksiyon içerisine uçucu kül katılan çok fazla çalışma bulunamamıştır. Li vd. (2018) çimento bazlı enjeksiyon içerisine %40 oranına kadar uçucu kül katmışlardır.

Yukarıda verilen literatür taramasına göre bu çalışma kapsamında uçucu külün toplam bağlayıcı içerisindeki oranı için sınır değerler %0-60 olarak seçilmiştir. Uçucu kül en fazla %80 oranına kadar kullanılabilmesine rağmen, çalışmada bu oranlara çıkılmamıştır. Çünkü uçucu kül kullanıldığında erken dayanım problemi olmaktadır.

Enjeksiyondaki süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı: Derin karıştırma yöntemiyle imal edilen kolonların performansı üzerinde enjeksiyonun içeriği ve kıvamı oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Enjeksiyon hazırlanırken su/bağlayıcı oranının az veya çok olması durumlarında olumlu ve olumsuz koşullar ortaya çıkmaktadır. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça zemin-bağlayıcı karışımının dayanımı artmaktadır. Fakat bu oran çok düşük olursa hem enjeksiyonun yoğunluğu artarak enjeksiyon deliklerinden çıkması zorlaşır hem de ortamda yeterli su olmadığı için homojen karışım elde etmek zorlaşır. Su/bağlayıcı oranı çok fazla olursa da zemin-bağlayıcı karışımının dayanımı düşer. Bu nedenle enjeksiyon içerisinde kullanılacak malzemelerin sınır değerlerinin belirlenebilmesi için bazı ön deneyler yapılmıştır.

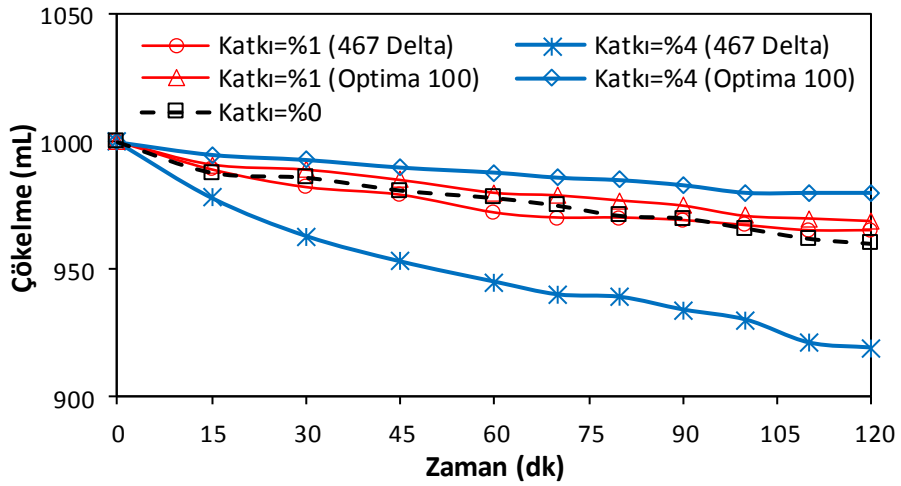
Ön denemeler sonucunda derin karıştırma makinesinin enjeksiyon pompası, marsh hunisinden akma zamanı 100-120 sn olan karışımları rahatlıkla pompalayabildiği görülmüştür. Arazide imal edilen DKK düşünüldüğünde, enjeksiyon hortumlarının tıkanmaması, enjeksiyonun zemine rahatlıkla aktarılabilmesi ve zemin-bağlayıcı karışımının homojen karışabilmesi için enjeksiyonun belirli bir su/bağlayıcı oranına sahip olması gerekmektedir. Bu bağlamda arazideki uygulamalar da göz önüne alındığında enjeksiyonun marsh hunisinden akma zamanının en fazla 50-60 sn olması iyi olacaktır. Bu nedenle enjeksiyon kıvamı belirlenirken bu süreden daha fazla akma zamanına sahip enjeksiyonların hazırlanmaması gerekmektedir.

Enjeksiyon deneylerine geçmeden önce iki farklı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin (Chryso marka 467 Delta ve Optima 100 katkıları) enjeksiyon kıvamına olan etkisi incelenmiştir. Enjeksiyon içerisindeki katı tanelerin (çimento ve uçucu kül) içerisinde %60 oranında uçucu kül bulunması halinde ve su/bağlayıcı oranı 1 olan karışım için iki farklı katkı maddesi kullanılarak hangisinin akma süresini daha çok azalttığını anlamak adına

marsh hunisi deneyleri yapılmıştır (Tablo 3.8). Deney sonuçlarına bakıldığında Optima 100 katkısının daha iyi sonuçlar verdiği ve daha fazla su kesme özelliğinin olduğu anlaşılmıştır. Her iki katkı ile hazırlanan karışımlara ait sedimentasyon deney sonuçları da Şekil 3.45'de verilmiştir. Sedimentasyon deney sonuçları da göstermektedir ki Optima 100 katkısı hem akışkanlığı artırmaktadır hem de çökelme miktarını azaltmaktadır. %1 katkı içeren durumda çökelme 467 delta katkısı ile %3.5 iken Optima 100 katkısı ile %3.1 olmuştur. %4 katkı içeren durumda çökelme 467 delta katkısı ile %8.1 iken Optima 100 katkısı ile %2 olmuştur.

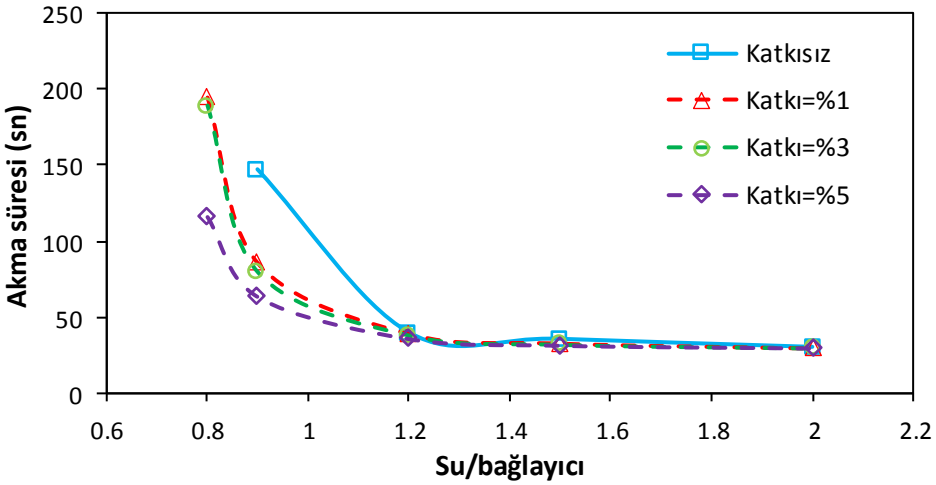
Tablo 3.8. Farklı katkılar ile yapılan marsh hunisi deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1)

Katkı yüzdesi (%)	467 Delta	Optima 100
	t (sn)	t (sn)
0	70.0	70.0
1	67.4	56.4
4	55.0	49.0



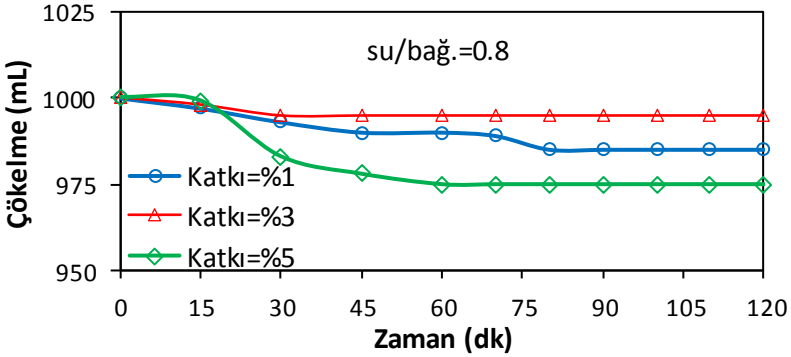
Şekil 3.45. Farklı katkılar ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1)

Enjeksiyonun akışkanlığını artıran en uygun katkı seçildikten sonra, Optima 100 süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip enjeksiyonlar (UKO=%60 iken) hazırlanarak marsh hunisi deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.46). Deney sonuçlarına bakıldığında katkılı veya katkısız durum için su/bağlayıcı oranı 1.2'den büyük olan enjeksiyonlarda akma süresi 40 sn ve altında kalmaktadır. Katkısız durum için enjeksiyonun pompalanabilir olduğu en düşük su/bağlayıcı oranı 1.1 olmuştur. %1 ve %3 katkı içeren enjeksiyonlarda bu oran 0.9'a düşerken, %5 katkı içeren enjeksiyonlarda su/bağlayıcı oranı 0.85'e kadar düşürülebilmektedir.

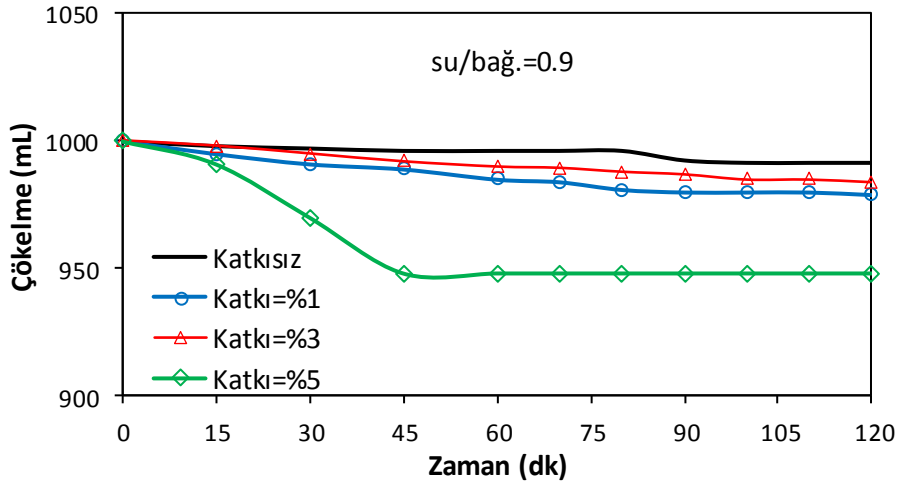


Şekil 3.46. Optima 100 katkısı ile farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip enjeksiyonların marsh hunisi deneyi sonuçları (UKO=%60)

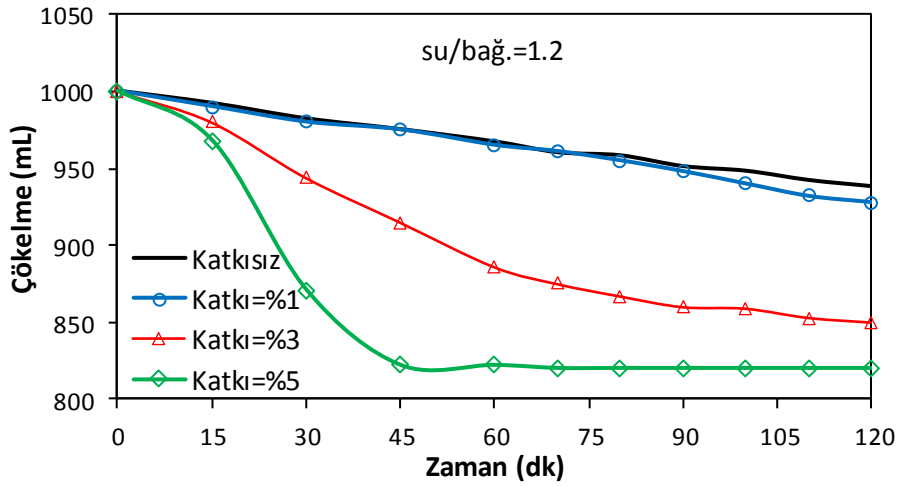
Optima 100 süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip enjeksiyonlar hazırlanarak (UKO=%60 iken) sedimentasyon deneyleri yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.8 iken 1 saat sonunda tüm katkı miktarları için enjeksiyon priz alarak sertleşmiştir ve çökelme miktarı en fazla %2.5 olmuştur (Şekil 3.47). Su/bağlayıcı oranı 0.9 iken %3 katkıya kadar en fazla %2.1 çökelme olurken, %5 katkılı durumda 45 dk sonra enjeksiyon prizini almıştır (Şekil 3.48). Su/bağlayıcı oranı 1.2 iken %3 katkıya kadar en fazla %15 çökelme olurken, %5 katkılı durumda 70 dk sonra enjeksiyon prizini almıştır (Şekil 3.49). Su/bağlayıcı oranı 1.5 iken enjeksiyonun tüm katkı miktarlarında 2 saat boyunca priz almadığı ve çökelmenin devam ettiği görülmüştür (Şekil 3.50). Bu durumda katkısız, %1, %3 ve %5 katkı içeren enjeksiyonların çökelme yüzdeleri sırasıyla %11.9, %15.9, %28.8 ve %32.2 olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 2 iken katkısız, %1, %3 ve %5 katkı içeren enjeksiyonların çökelme yüzdeleri sırasıyla %31.8, %34.8, %36.8 ve %45.1 olmuştur (Şekil 3.51).



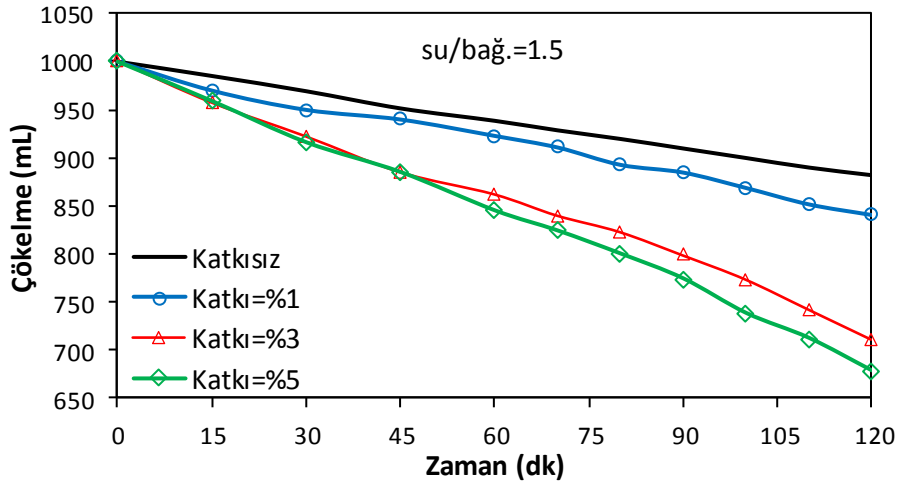
Şekil 3.47. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=0.8)



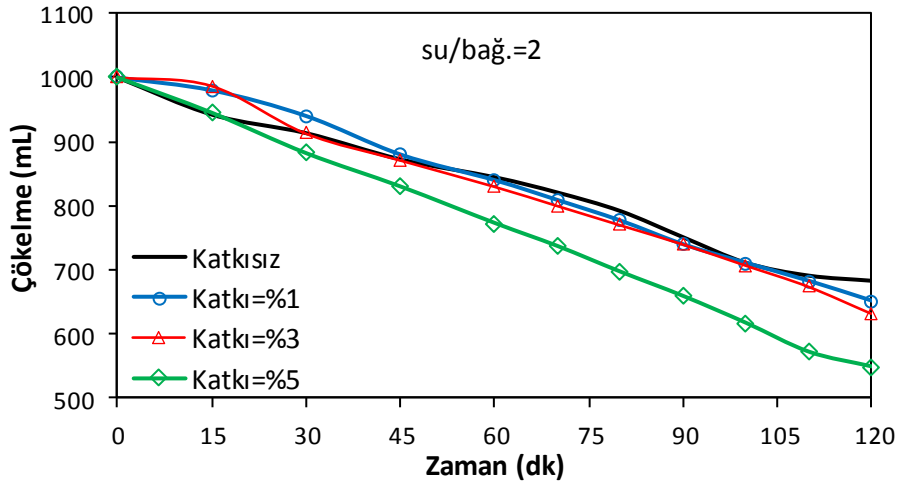
Şekil 3.48. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=0.9)



Şekil 3.49. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1.2)



Şekil 3.50. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=1.5)



Şekil 3.51. Optima 100 katkısı ile yapılan sedimentasyon deneyi sonuçları (UKO=%60, su/bağlayıcı=2)

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında DKK imalatı için oluşturulacak deney programlarında Taguchi Yöntemi kullanılacağı için araştırılacak parametrelerin farklı seviyelerinin etkisi görülmek istenmiştir. Bu bağlamda süper akışkanlaştırıcı katkının olmadığı veya en fazla olduğu, su/bağlayıcı oranının minimum değeri (su/bağlayıcı oranı için üst sınır bulunmamaktadır, genellikle 1.2, genişletilmiş sınırlar düşünülürse 2.5'a kadar çıkılabilmektedir.), uçucu külün olmadığı veya en fazla olduğu durumlar araştırmaya dâhil edilmelidir. Enjeksiyonla ilgili yapılan ön deneyler sonucunda şu sonuca varılmıştır: Uçucu külün toplam kuru bağlayıcı içerisindeki oranı en fazla %60 seçilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin üst sınırı %5'te bırakılmıştır. Su/bağlayıcı oranının alt ve üst sınırları 0.8 ve 1.4 olarak seçilmiştir.

3.3.2.2 Deney programı

Literatür taraması ve yapılan enjeksiyon deneyleri sonucunda, uçucu kül katkılı DKK imalatında kullanılacak parametrelerin alt ve üst sınırlar şu şekilde belirlenmiştir: Bağlayıcı dozajı 200-425 kg/m^3, uçucu kül oranı (UKO) %0-60, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi %0-5, su/bağlayıcı oranı 0.8-1.4 ve iyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi 0.4-1.0.

Araştırma kapsamında 5 adet parametre bulunmaktadır ve her bir parametre için 4 seviye seçilerek, Taguchi yöntemine özgü 5 parametre ve 4 seviyeli L16 deneysel tasarım tablosu kullanılarak deney programı oluşturulmuştur (Tablo 3.9). Parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9. L16 Taguchi deney tasarım tablosu

Deney No	Parametreler ve parametre seviyeleri					Deney No	Parametreler ve parametre seviyeleri				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	2	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

Tablo 3.10. Uçucu kük katkılı DKK tasarımlarında kullanılan parametreler ve seviyeleri

Seviye	Parametre				
	A	B	C	D	E
	Bağlayıcı dozajı (kg/m^3)	Uçucu kül / toplam bağlayıcı (%)	Katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı	Zeminin likitlik indisi
1	200	0	0	0.8	0.4
2	275	20	1	1.0	0.6
3	350	40	3	1.2	0.8
4	425	60	5	1.4	1.0

3.3.2.3 DKK makinesi ile imalat (Büyük ölçekli DKK tasarımı)

3.3.2.3.1 Yöntem

Çalışmanın bu kısmındaki amaç sahadaki uygulamaya benzer şekilde laboratuvarda DKK imalatı yaparak, imalat parametrelerinin optimizasyonunu yapmaktır. Bu bölümde, enjeksiyon içerisine yüksek oranda uçucu kül katılarak, bunun kolon performansına etkileri araştırılmıştır. Bunun için izlenilen yöntem şu şekildedir: Öncelikle doğal zemin belirli bir su muhtevasında karıştırılarak deney tankına yerleştirilmiş ve belirli bir gerilme altında konsolide edilmiştir. Homojen zemin ortamı oluşturulduktan sonra derin karıştırma makinesi kullanılarak DKK imalatı yapılmıştır. Homojen karışmış kolon imalatının yapılabilmesi için, imalat parametreleri olarak bir önceki bölümde (*alt başlık 3.4.1.*) belirlenen optimum imalat parametreleri kullanılmıştır. İmalat sırasında çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı ve sudan oluşan enjeksiyon kullanılmıştır. Kolon imalatından 28 ve 56 gün sonra karot numuneleri alınarak bunların serbest basınç ve üç eksenli basınç dayanımları, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra da Taguchi yöntemi

kullanılarak araştırılan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Son olarak optimum durumu temsil eden DKK imalatı yapılarak, alınan karot numuneleri ile doğrulama deneyi yapılmıştır.

3.3.2.3.2 Kolon imalatı

Uçucu kül katkılı DKK tasarımında homojen zemin ortamının oluşturulması *alt başlık 3.4.1.3*'te anlatıldığı gibi yapılmıştır. Homojen zemin ortamının elde edilebilmesi için farklı su muhtevalarında karıştırılan killi zemin deney tankına yerleştirildikten sonra hidrolik pistonlar altında konsolide edilmiştir. Zemin kıvamına bağlı olarak zemine uygulanan ön konsolidasyon basıncı değerleri Tablo 3.11'de verilmiştir. Kolon imalatı *alt başlık 3.4.1.5*'te anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Kolon imalatı sırasında optimum imalat parametreleri (karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk ve enjeksiyon deliklerinin çağı 3 mm) kullanılmıştır. Delgi gövdesinin batma hızı enjeksiyon hacmi üzerinden hesaplanmıştır (örneğin 20 lt enjeksiyon 3 mm çapındaki 4 adet enjeksiyon deliklerinden 60 sn'de çıkmaktadır). Enjeksiyon hazırlanırken karışımdaki oranlara göre su tartılarak, süper akışkanlaştırıcı suya karıştırılmıştır. Daha sonra enjeksiyon pompasının mikser bölümüne önce akışkanlar, daha sonra çimento ve uçucu kül katılarak homojen karışım elde edilene kadar (genellikle 10-15 dk) karıştırılmıştır. Daha sonra DKK imalatı yapılmıştır. Kolon imalatı sırasındaki ve sonrasındaki süreçleri gösteren fotoğraflar Şekil 3.52-Şekil 3.67 arasında verilmiştir.

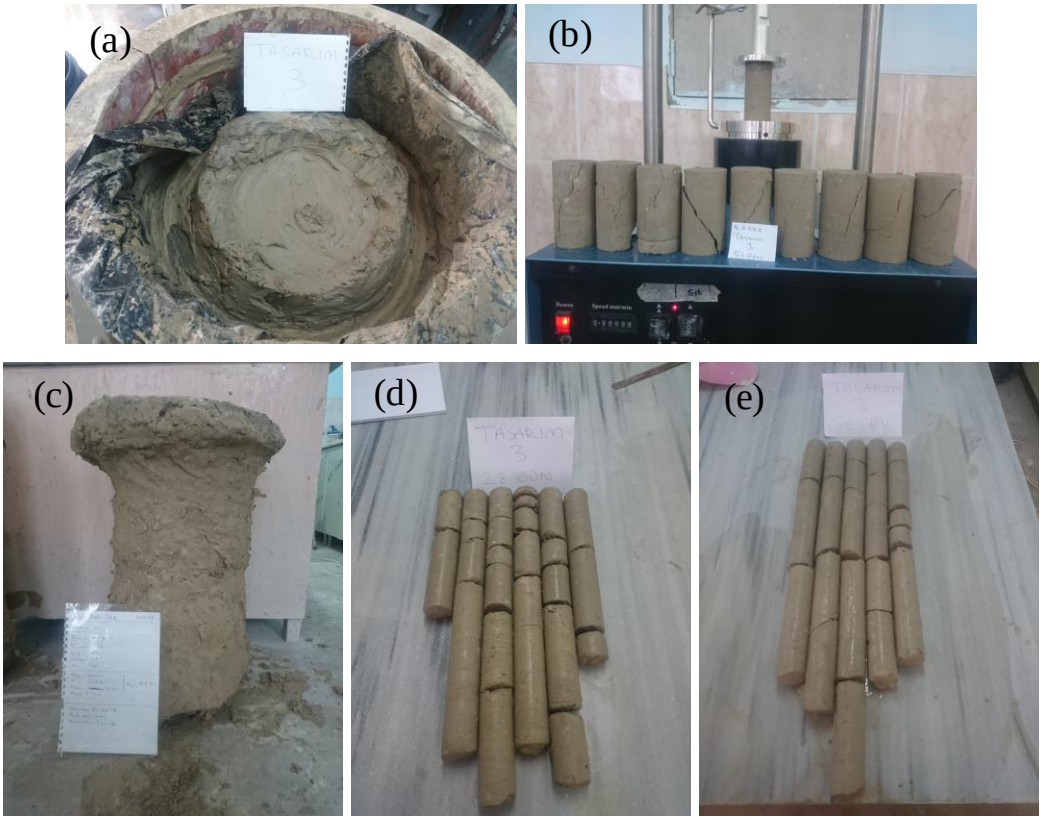
Tablo 3.11. Homojen zemin ortamı için uygulanan ön konsolidasyon basıncı

Zeminin su muhtevası (w)	Zeminin likitlik indisi (I_L)	Uygulanan ön konsolidasyon basıncı, σ_p (kPa)	Uygulanan yük * (kN)
35	0.4	38.0	10.74
40	0.6	18.0	5.09
45	0.8	6.0	1.70
52	1.0	2.5	0.71

* Zemine uygulanan yük değeri için 60 cm plaka çapı dikkate alınmıştır.

Şekil 3.52. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 1: a) imalat sonrası görünüm, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) imal edilen kolon

Şekil 3.53. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 2: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri



Şekil 3.54. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 3: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

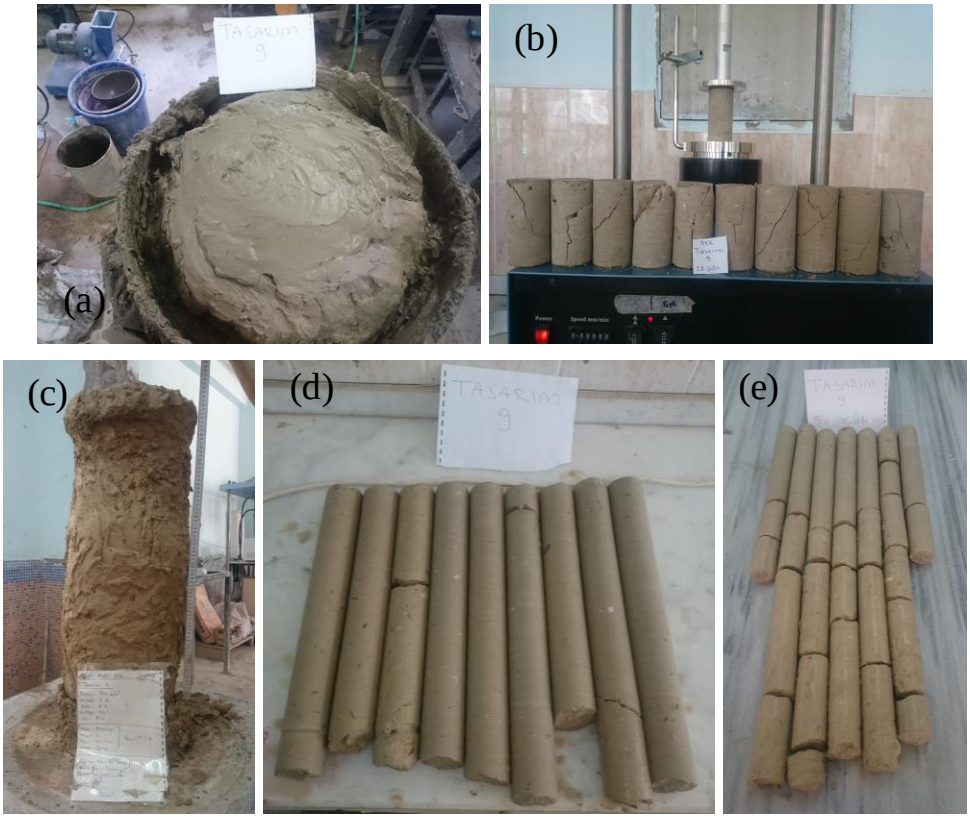
Şekil 3.55. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 4: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 56 ve d) 28 günlük karot numuneleri, e) kayma yüzeyleri

Şekil 3.56. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 5: a) imalat sonrası görünüm, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) kayma yüzeyleri

Şekil 3.57. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 6: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri

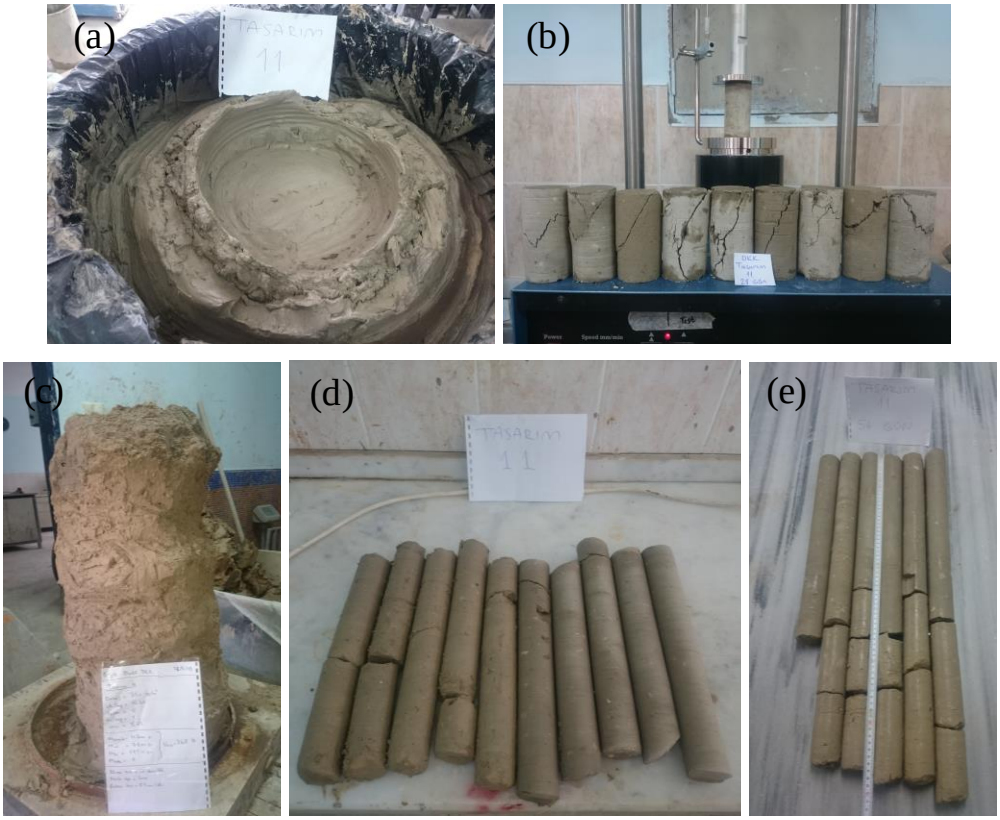
Şekil 3.58. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 7: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

Şekil 3.59. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 8: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

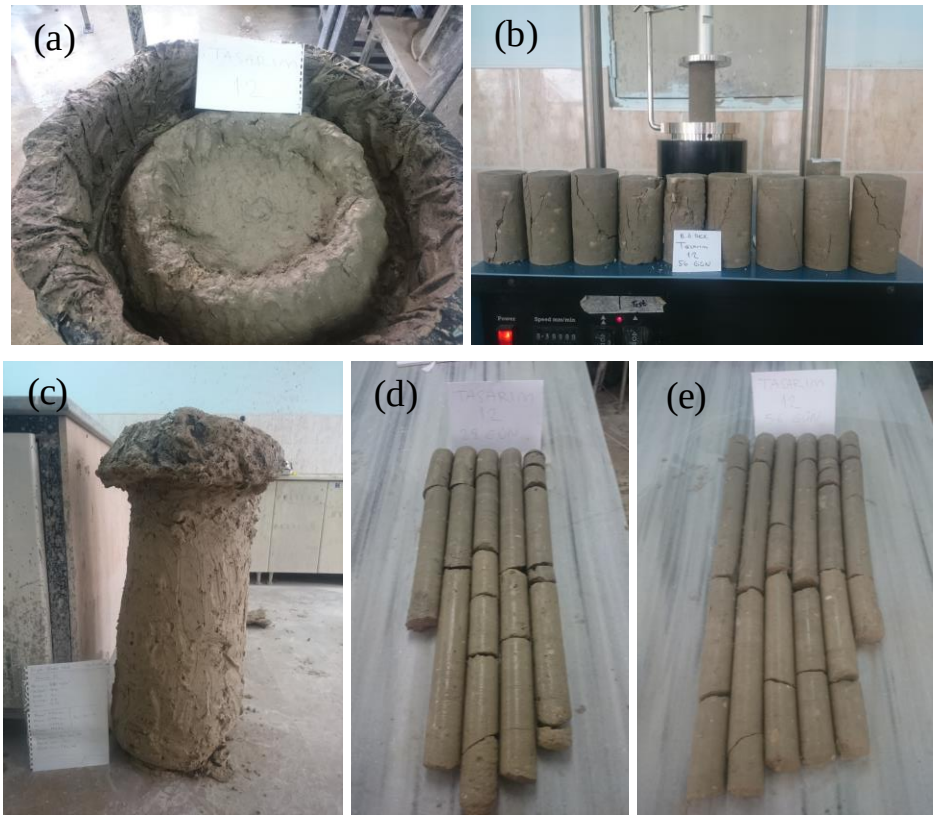


Şekil 3.60. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 9: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

Şekil 3.61. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 10: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

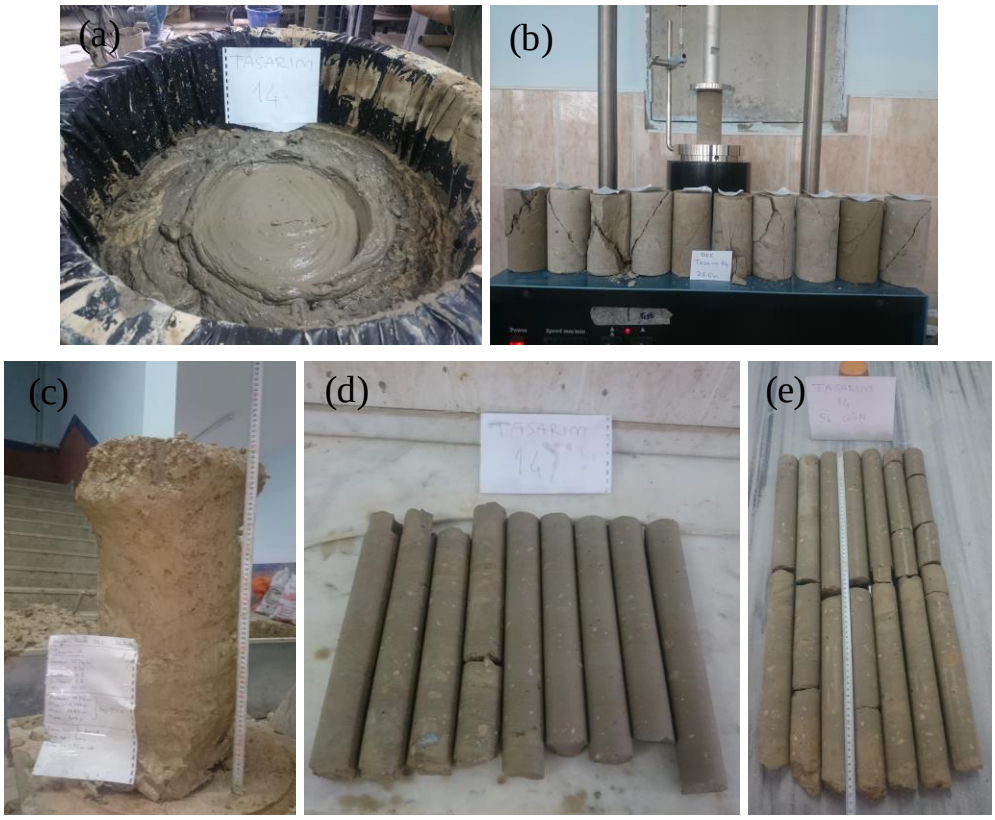


Şekil 3.62. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 11: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri



Şekil 3.63. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 12: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

Şekil 3.64. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 13: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri



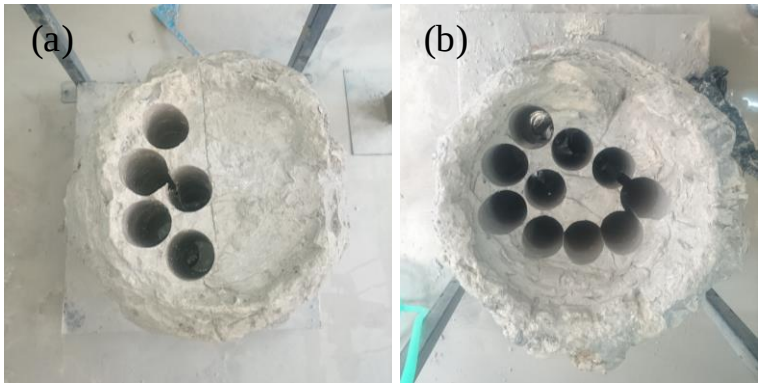
Şekil 3.65. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 14: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

Şekil 3.66. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 15: a) imalat sonrası görünüm, b) imal edilen kolon, c) 28 ve d) 56 günlük karot numuneleri

Şekil 3.67. Büyük ölçekli DKK, Tasarım 16: a) imalat sonrası görünüm, b) kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon, d) 28 ve e) 56 günlük karot numuneleri

3.3.2.3.3 Karot alınması

Kolon imal edildiği zemin ortamında 5-6 gün bekletilmiş, daha sonra tank açılarak kolonun etrafı temizlenmiş ve kurumaması için poşetlenerek küre bırakılmıştır. Uçucu kül oranı fazla olan tasarımlarda bu süre 7-8 gün olmaktadır çünkü bu kolonlar geç dayanım kazandığından dolayı kolonun tanktan çıkarılırken dağılma ihtimali bulunmaktadır. Kolonlardan 28 ve 56 gün kür süresi sonunda karot alınacağından dolayı, kolonun yarısından 28 gün, diğer yarısından ise 56 gün sonra karot numuneleri alınmıştır (Şekil 3.68).



Şekil 3.68. Uçucu kül katkılı kolonlardan karot alınması: a) 28 gün sonra, b) 56 gün sonra

3.3.2.3.4 Yapılan ölçümler ve deneyler

İlk önce kolon imalatı sırasında yaş haldeki (prizini almadan önce) zemin-enjeksiyon karışımlarından örnekler alınarak bunların yaş yoğunlukları ile su muhtevaları belirlenmiştir. Ayrıca kolon imalatı sırasında yapılan gözlemler not edilmiştir. Daha sonra kolon tank içerisinden çıkarıldığı zaman kolonun farklı yerlerinden su muhtevası örnekleri alınmıştır. 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda alınan karot numunelerinin ise yoğunluk, su muhtevası, serbest basınç dayanımı, konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç dayanımı, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik katsayıları belirlenmiştir. Tüm sonuçlar 4. bölümde "araştırma sonuçları" başlığı altında verilmiştir.

3.3.2.4 Laboratuvar mikseri ile imalat (Küçük ölçekli DKK tasarımı)

3.3.2.4.1 Yöntem

Çalışmanın bu kısmındaki amaç *alt başlık 3.4.2.3*'te derin karıştırma makinesi ile oluşturulan kolonları (büyük ölçekli DKK) temsil eden zemin-bağlayıcı karışımlarının (küçük ölçekli DKK) performans özelliklerini belirlemektir. Bu sayede laboratuvar mikseri ile

karıştırılan zemin-bağlayıcı numuneleri ile büyük ölçekli DKK arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Bu bölümde, takip edilen deney programı ile araştırılan parametreler ve bunların seviyeleri büyük ölçekli DKK tasarımıyla aynıdır. Bu bölümdeki farklılık numune hazırlama ve kür şartları bakımından meydana gelmektedir. Bunun için izlenilen yöntem şu şekildedir: Öncelikle killi zemin, su, çimento, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkı tartılarak laboratuvar mikseriyle karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan karışım PVC kalıplara yerleştirilerek kür edilmiştir. 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda numuneler kalıplardan çıkarılarak bunların serbest basınç ve üç eksenli basınç dayanımları, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik katsayıları belirlenmiştir. Daha sonra Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılan parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Son olarak optimum durumu temsil eden zemin-bağlayıcı numuneleri hazırlanarak doğrulama deneyleri yapılmıştır.

3.3.2.4.2 Numune hazırlama

Mikser ile karıştırılan zemin-bağlayıcı karışımlarının hazırlanması ve kalıba yerleştirilmesi ile ilgili standart bir uygulama yoktur. Yöntemler birbirine benzemekle birlikte aralarında birtakım farklılıklar mevcuttur. Bunun için numune hazırlama yöntemleriyle ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar ve deney standartları incelenmiştir.

Japonya Geoteknik Birliği (2000) tarafından önerilen numune hazırlama yöntemi şu şekildedir: Araziden ince çeperli numune alıcı ile örnek alınır ve doğal su muhtevasında saklanır. Zemin-bağlayıcı karışımı kanca tipi karıştırıcı ve 120-300 devir/dk harekete sahip çırpıcı kullanılarak 10 dk süresince karıştırılır. Hazırlanan karışım 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki kalıplara 3 tabaka halinde yerleştirilir. Her tabaka 5 mm çaplı çubuk ile şişlenir ve karışımdaki hava kabarcıklarının çıkması için kalıp yavaşça yere vurulmalıdır. Kalıp doldurulduktan sonra numune suyunu kaybetmeyecek şekilde poşetlenir ve 20±3 °C'de %95 bağıl nemde kür edilir.

EuroSoilStab (2002) tarafından önerilen numune hazırlama yöntemi şu şekildedir: Araziden tüp, piston veya Delft numune alıcı ile zemin örneği alınır ve numune bozulmadan saklanır. Zemin-bağlayıcı karışımını hazırlamak için uygun bir çırpıcı kullanılarak 5 dk süresince karıştırma işlemine devam edilir. Karıştırma süresi zemin cinsine göre değişebilir. Hazırlanan karışım 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki kalıplara yerleştirilir. Kalıbın iç yüzeyi yağ veya parafin ile kaplanmalıdır. Karışım kalıba tabakalar halinde yerleştirilir. 45 mm çaplı, 10 mm kalınlıktaki plakaya 50 mm uzunluğundaki çubuk sabitlenerek, her tabakaya 2 sn süresince 100 kPa sabit gerilme uygulanmalıdır. Kalıp doldurulduktan sonra numune suyunu kaybetmeyecek şekilde poşetlenir ve 18-22 °C'de kür edilir.

Jacobson vd. (2003) tarafından önerilen numune hazırlama yöntemi şu şekildedir: Araziden alınan zemin örnekleri açıkta bırakılmadan %100 bağıl nemde (20 °C) saklanmaktadır. Çalışmada kanca tipi karıştırıcıya sahip çırpıcı kullanılmıştır. Çırpıcı dış yörüngede 150 devir/dk, iç yörüngede ise 68 devir/dk ile dönmelidir. Hazırlanan karışım 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki kalıplara tabakalar halinde yerleştirilir. Her tabaka 5 mm çaplı çubukla 25 defa şişlenir ve tabakalara 5-10 sn süresince 100 kPa sabit gerilme uygulanır. Karışım 20±3 °C'de %100 bağıl nemde kür edilir.

Bhadriraju vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli killi zeminler kullanılarak hazırlanan zemin-bağlayıcı karışımları için laboratuvar aşamaları belirlenmiştir. Çalışmada, araziden alınan zemin örnekleri 60 °C'de kurutulduktan sonra öğütülerek 0.425 mm çaplı elekten elenmiştir. Seçilen bağlayıcı faktörüne göre bağlayıcı miktarı belirlenmektedir. Bağlayıcı faktörü;

$$\alpha = \frac{W_b}{W_s} \cdot \frac{\gamma_n}{1 + w_n} \cdot 100 \qquad (3.2)$$

burada, W_b=bağlayıcının kuru ağırlığı, W_s=zeminin kuru ağırlığı, γ_n=zeminin doğal yoğunluğu, w_n=zeminin doğal su muhtevası

formülü ile hesaplanır. Zeminin doğal su muhtevası ile enjeksiyondan gelecek su miktarları toplanarak su tartılır. İlk önce bağlayıcılar kuru halde karıştırılır, daha sonra su ilave edilerek 2-3 dk karıştırılır ve enjeksiyon hazırlanır. Kuru zemin kâseye konur. Mikserin karıştırıcısı dış aksta 60 devir/dk, iç aksta 152 devir/dk hızla dönecek şekilde ayarlanır. Mikser çalışırken enjeksiyon yavaş yavaş kâseye dökülür. 2 dk süresince karıştırma işlemi yapılır ve mikser durdurularak topaklanan zeminler parçalanır. Daha sonra 2-3 dk daha karıştırma işlemine devam edilir. Çalışmada kalıp olarak 70 mm çapında, 156 mm yüksekliğinde yarılabilir kalıplar kullanılmıştır. Karışım kalıba yerleştirilmeden önce kalıp gres yağı ile yağlanmıştır. Karışım kalıba 5 tabaka halinde yerleştirilmiş, her tabaka 5 mm çaplı çubukla 30 defa şişlenmiştir. Şişleme sonucunda oluşan kılcal boşluklardan kurtulmak için 2 kg ağırlığındaki tokmak 5 cm yükseklikten 25 defa düşürülerek sıkıştırma yapılmıştır. Hazırlanan numune poşete konup 2-3 saat beklenmiştir. Bu süre sonunda numune kalıptan çıkarılarak tekrar poşetlenmiş ve %100 bağıl nem oranında küre bırakılmıştır.

Yukarıdaki standartlar ve çalışmalardan elde edilen bilgiler neticesinde DKK numuneleri şu şekilde hazırlanmıştır: Araziden alınan zemin etüvde 60 °C'de kurutulmuştur. Zemin yüksek plastisiteli olduğu için zemin topakları kuruduğu zaman yüksek mukavemete sahip olmaktadır. Bu nedenle ilk önce zemin topakları plastik tokmakla dövülerek küçük

parçalara ayrılmıştır. Bu aşamada taş parçalarının ezilmemesi ve zeminin doğal yapısının bozulmaması için azami hassasiyetle çalışılmıştır. Parçalanan zemin numuneleri 20 mm çaplı elekten elenmiş ve elek altına geçen zemin DKK numunelerinin hazırlanması için kullanılmıştır. 70-80 kg elenmiş zemin 1 haftada elde edilebilmiştir.

Tablo 3.9'da verilen her bir tasarım için karışımdaki malzemelerin kütleleri şu şekilde hesaplanmıştır: İlk önce her tasarım için gerekli karışım hacmi hesaplanmıştır. Zemin-bağlayıcı numunelerinin performans deneylerinde 2 adet serbest basınç, 4 adet üç eksenli basınç, 1 adet konsolidasyon ve 1 adet permeabilite deneyi yapılmıştır. Dayanım deneylerinde kullanılacak numune boyutları 5 cm çapında ve 10 cm boyunda, diğer deneylerde kullanılacak numune boyutları 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğindedir. Ayrıca 7, 28 ve 56 gün kür süreleri düşünüldüğünde gerekli numune sayısı 3 katına çıkmaktadır. Bu yüzden tüm deneylerde kullanılacak numune hacmi kadar karışım hazırlanması gerekmektedir. Karışım sırasında oluşabilecek zayiatlar düşünülerek %10 daha fazla karışım hazırlanmıştır. Toplam karışım hacmi belirlendikten sonra her bir malzemenin hacminin veya kütlesinin hesaplanması gerekmektedir. Karışım hacmi ile bağlayıcı dozajı çarpılarak toplam bağlayıcı kütlesi (çimento ve uçucu kül toplamı) bulunmuştur. Bağlayıcı kütlesi, UKO ile çarpılarak uçucu kül miktarı, dolayısıyla da çimento miktarı belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı toplam kuru bağlayıcı kütlesi üzerinden yüzdece hesaplanmıştır. Enjeksiyon suyu, toplam kuru bağlayıcı miktarı ile su/bağlayıcı oranı çarpılarak hesaplanmıştır. Enjeksiyondaki malzemelerin yoğunlukları bilindiği için hacimleri hesaplanmış ve toplam karışım hacminden çıkarılarak doğal zeminin hacmi bulunmuştur. Bu aşamadan sonra kuru zemin kütlesi ve zeminin su muhtevasına karşılık gelen su miktarları hesaplanmıştır.

İlgili tasarımdaki karışım hazırlanırken tüm malzemelerin kütleleri belirlendikten sonra karıştırma işlemi şu şekilde yapılmıştır. Çimento, uçucu kül ve zemin kuru halde kâseye doldurularak mikser ile 1-2 dk süresince karıştırılmıştır. Böylelikle kuru malzemelerin kendi içerisinde homojen bir şekilde karışımı sağlanmıştır. Daha sonra mikserin karıştırıcısı dış aksta 60 devir/dk, iç aksta 152 devir/dk hızla dönecek şekilde ayarlanmıştır. Bu aşamadan sonra, başka bir kap içerisinde enjeksiyondan ve zeminin doğal su muhtevasından gelen su miktarınca su hazırlanmıştır. Suyun içerisine süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilerek su ile karıştırılmıştır. Hazırlanan su-katkı karışımı mikser çalışır halde iken kâseye dökülerek zemin-bağlayıcı karışımı 3-4 dk süresince karıştırılmıştır. Bu süre sonunda karıştırma işlemine ara verilerek kâsenin yüzeyine yapışan malzemeler karışıma dâhil edilmiştir. Ayrıca topaklanan parçalar oluşmuşsa el yardımıyla bu parçalar ezilerek karışıma dâhil edilmiştir. Bu işlemden sonra mikser ile karıştırma işlemine 5-6 dk süresince devam edilmiştir. Toplam karıştırma süresi 10-12 dk olmaktadır. Hazırlanan karışımlar daha

önceden hazırlanan PVC kalıplar içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.69). Kalıpların iç yüzeyi gres yağı ile yağlanmıştır.

Şekil 3.69. Mikserle karıştırılan zemin-bağlayıcı numunelerinin kalıba yerleştirilmesi

3.3.2.4.3 Kür etme şartları

Küçük ölçekli DKK tasarımında hazırlanan zemin-bağlayıcı karışımlarının kür süresi boyunca su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde bekletilmesi gerekmektedir. Numunelerin kürde bekletilmesi ASTM C 511/13 standardına ve FHWA (2013) raporunda belirtilen şartlara göre yapılmıştır. Buna göre numunelerin 23±2°C sıcaklıkta ve %95 bağıl nem ortamında saklanması gerekmektedir. Her bir numune, içi bir miktar ıslatılan buzdolabı poşetine konmuş, içerisindeki hava alınarak poşetin ağzı düğümlenmiştir. Daha sonra, poşetlenen numuneler ağzı kapaklı büyük plastik kaplar içerisine yerleştirilmiştir. Plastik kabın altına 2-3 parmak su ilave edilmiştir. Böylelikle numunelerin su muhtevasını kaybetmeden saklanması sağlanmıştır.

3.3.2.4.4 Yapılan ölçümler ve deneyler

İlk önce PVC kalıplara yerleştirilen numunelerin çap, boy ve ağırlık bilgileri ölçülerek yaş haldeki (prizini almadan önce) yoğunlukları belirlenmiştir. Ayrıca numune hazırlama sırasında yapılan gözlemler not edilmiştir. 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda numuneler kalıplardan çıkarılarak yoğunluk, su muhtevası, serbest basınç dayanımı, konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç dayanımı, konsolidasyon parametreleri ve geçirimlilik katsayıları belirlenmiştir. Tüm sonuçlar 4. bölümde “araştırma sonuçları” başlığı altında verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Proje kapsamında farklı kıvamlardaki yüksek plastisiteli killi zeminlerde imal edilen DKK'nın performans özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın büyük bölümünde, sahadaki uygulamaya benzer şekilde laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi kullanılarak kolon imalatı yapılmıştır. İlk önce DKK'nın homojen karışması ve kolon boyunca süreksizliklerin olmaması için gerekli imalat parametreleri araştırılmıştır. Daha sonra, uçucu kül katkılı DKK'nın fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu kısımda hem derin karıştırma makinesi ile kolon imalatı yapılmış (büyük ölçekli DKK) hem de laboratuvar mikseri ile karıştırılan zemin-bağlayıcı numuneleri hazırlanmıştır (küçük ölçekli DKK). Bahsedilen tüm araştırma konularında, DKK'nın farklı kür süreleri sonundaki fiziksel (su muhtevası, yoğunluk, permeabilite katsayısı) ve mekanik (serbest basınç ve üç eksenli basınç dayanımları, konsolidasyon parametreleri) özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar için istatistiki analizler yapılarak araştırılan parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir.

4.1 Sistem (İmalat) Parametrelerinin Araştırılması

Sistem (imalat) parametrelerinin araştırıldığı bu bölümde, Tablo 4.1'de verilen deney programına göre kolon imalatı yapılmıştır. Kolon imalatının nasıl yapıldığı (homojen zemin ortamının oluşturulması, enjeksiyon hazırlanması ve kolon imalat aşamaları) *alt başlık 3.4.1*'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

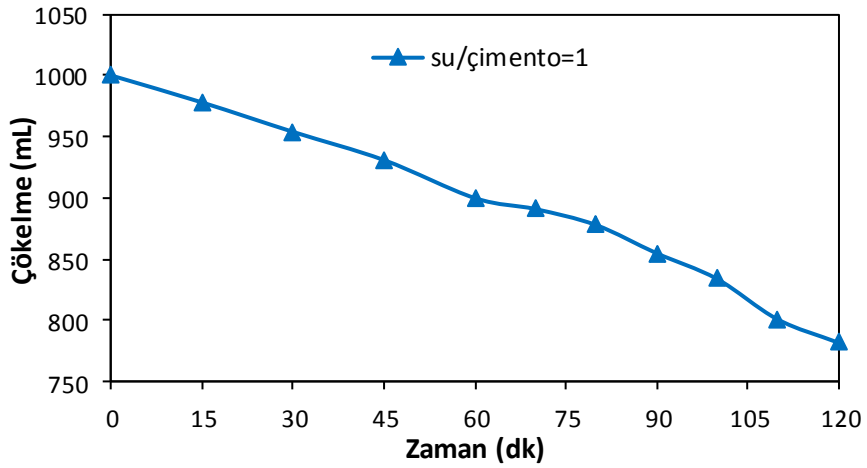
Tablo 4.1. Taguchi'nin L9 tasarım tablosu ile oluşturulan deney programı

Tasarım numarası	Parametreler ve seviyeleri			
	Çimento dozajı (kg/m^3)	Dönme hızı (devir/dk)	Delik çapı (mm)	Zeminin likitlik indisi (I_L)
1	250	60	2	0.4
2	250	80	3	0.8
3	250	100	4	1.0
4	325	60	3	1.0
5	325	80	4	0.4
6	325	100	2	0.8
7	400	60	4	0.8
8	400	80	2	1.0
9	400	100	3	0.4

Not: Tüm tasarımlarda enjeksiyon hazırlanırken su/çimento oranı 1 seçilmiştir.

Enjeksiyon içerisinde kullanılan çimentonun yoğunluğu 3.2 g/cm^3 ve suyun yoğunluğu 1 g/cm^3'tür. Bu bölümde hazırlanan enjeksiyonlarda su/çimento oranı 1 seçildiğinden dolayı, enjeksiyonun yoğunluğu 1.524 g/cm^3 olmaktadır. ASTM D6910/D6910M-19 standardına göre

yapılan Marsh hunisi deneyi sonucuna göre enjeksiyonun akma süresi 28.6 sn olmaktadır. ASTM C940-16 standardına göre yapılan çökelme deney sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Hazırlanan enjeksiyon 2 saat sonunda %21.8 oranında çökelmiştir ve stabil değildir. Fakat kolon imalatının en fazla yarım saat içerisinde tamamlandığı düşünülürse, enjeksiyondaki çökelme %4.6 olmaktadır. Bu süre zarfında enjeksiyonun homojenliğini koruduğu söylenebilir.



Şekil 4.1. Çimento enjeksiyonun çökelme deneyi sonucu

4.1.1 Gözlem sonuçları

Maliyetinin düşük olmasından dolayı DKK ile zemin iyileştirmesi oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Fakat DKK imalatı sırasında iyileştirilen zeminde birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. DKK imal edilirken zeminde boşluk suyu basınçlarının arttığı (Shen vd., 2003a; Fang ve Yin, 2007), yer hareketlerinin meydana geldiği (Chai vd., 2005, 2009) ve kolon çevresindeki zemin özelliklerinin değiştiği (Shen vd., 2008) ifade edilmektedir. Bu nedenle kolon imalatı sırasında karıştırma bıçaklarının zeminle çimento enjeksiyonunu karıştırma durumu gözlenmiştir. Tasarım parametrelerine bağlı olmakla birlikte genel bir değerlendirme şu şekilde yapılabilir:

- İyileştirilecek zemin yumuşak kıvamda bile olsa çimento dozajı az olduğu durumda ortamda yeterli su olmadığı için (su/çimento=1) karışım katı olmakta ve homojen karışım elde etmek zor olmaktadır. Hem çimento dozajı az hem de karışım kötü olduğu için kolon dayanımı düşük olmaktadır.
- Karıştırma bıçaklarının dönme hızı zemini parçalamak ve enjeksiyonla homojen karıştırmak için en önemli parametredir. Likit kıvamdaki zemin için 80 devir/dk değerinden

fazla dönme hızı seçildiğinde iyileştirilecek zeminde çok fazla dalgalanma ve yatay deplasman olmaktadır. Böyle bir zemin ortamında dönme hızı çok seçilmemelidir veya imalat sırasında düşük deplasman oluşturan LODİC yöntemi (CDIT, 2002) kullanılmalıdır. Aksi halde imalatın yapıldığı bölgeye yakın yerlerdeki hassas yapılarda (tarihi yapılar, metro tüneli vs.) oturma problemiyle karşılaşılabilir. Chen vd. (2013) yumuşak siltli killi zemindeki DKK imalatı sırasında artık boşluksuyu basıncının arttığını ve kolon çevresindeki zeminde hareket meydana geldiğini, bunun da metro tüneline hasar vereceğini belirtmişlerdir. Ön denemeler sonucunda, imalat sırasında yüksek su/çimento oranına sahip enjeksiyon kullanılmış, karıştırma hızı düşük tutulmuş, delgi gövdesi çekilirken enjeksiyon verilmemiş ve kolon imalatı tünele en uzak noktadan en yakın yere doğru yapılmıştır. Kolon imalatı sırasında zemindeki boşuk suyu basınçları ve zemin hareketleri izlenmiştir. Çalışmada su/çimento oranı 1.3-1.6, çimento miktarı 360-400 kg/m, batma hızı 0.25-0.4 m/dk, çekme hızı 0.4-0.7 m/dk, dönme hızı 15.6 devir/dk, enjeksiyon debisi 118x2 L/dk ve enjeksiyon basıncı 0.6 MPa seçilmiştir. 90 gün sonunda kolon dayanımları 1.38-1.54 MPa elde edilmiştir.

- Karıştırma bıçaklarının üzerinde bulunan delik çapı, buradan çıkacak enjeksiyon basıncını etkilemektedir. Bu nedenle delik çapı ne kadar az olursa o kadar yüksek basınç elde edilmekte ve zeminin parçalanması ve enjeksiyonla karışması daha kolay olmaktadır.

Kolon imalatından sonra, kolon zemin ortamı içerisinde en az 5 gün bekletilmiştir. Bu süre sonunda tankın içerisinden çıkarılan kolonun çapı ve boyu ölçülmüştür. Daha sonra kolon poşetlenerek kür süresi sonuna kadar beklenmiştir. Kolon imalatı sırasında yapılan gözlem ve ölçümler Tablo 4.2'te verilmiştir.

Tablo 4.2. Kolon imalatı sırasındaki gözlemler ve yapılan ölçümler (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Deney No	Delgi gövdesi inme hızı (cm/dk)	Kolon boyu (cm)	Ortalama kolon çapı (cm)	Gözlemler
SP-1	70	68	33.1	Çimento dozajı az olduğu için karışım katı oldu ve makine zorlandı. Bıçak zemini zor karıştırdı. Zemin bıçağa yapıştı, zeminin parçalanarak enjeksiyonla homojen karışması 3-4 taramadan sonra olmaya başladı. Karıştırma bıçakları dönerken zeminde dalgalanma olmadı.
SP-2	70	65	35.8	Zemin-bağlayıcı karışımı ile ilgili gözlemler Tasarım 1 ile aynıydı. Ancak, karıştırma bıçağının dönme hızı dakikada 60 devirden 80 devire yükseldiği için kolon etrafındaki zeminde bir miktar dalgalanma oldu.
SP-3	70	60	35.8	İyileştirilecek zemin likit kıvamda olduğundan dolayı, kolon bölgesindeki zemin-bağlayıcı karışımının kıvamı Tasarım 1 ve 2'ye göre daha cıvık olmuştur. Karıştırma bıçağının dönme hızı 100 devir/dk ve zemin çok yumuşak olduğundan dolayı kolon etrafındaki zeminde çok fazla dalgalanma olmuştur.
SP-4	60	60	36.0	Çimento dozajı arttığı için zemin-bağlayıcı karışımına gri renk hâkim olmaya başladı. Ek olarak, Tasarım 3'e kıyasla daha yumuşak ve homojen bir karışım elde edildi. Kolonun etrafındaki zeminde küçük bir dalgalanma oldu. (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 3 ile aynıdır.)
SP-5	60	74	35.7	Kolon imalatı ile ilgili gözlemler, genellikle Tasarım 1 ile aynıydı, ancak çimento dozajı ve bıçağın dönme hızı arttığından, Tasarım 1'e kıyasla daha iyi bir zemin-bağlayıcı karışımı (daha yumuşak) elde edildi. (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 1 ile aynıdır.)
SP-6	60	65	35.0	İlk taramadan itibaren çok iyi bir zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. Bunun nedeni, çimento dozajının Tasarım 2'den daha büyük olması, dönme hızının maksimum ve delik çapının minimum olmasıdır (enjeksiyon basıncı maksimumdur). (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 1 ile aynıdır.)
SP-7	50	70	32.7	Çimento dozajının yüksek olmasından dolayı daha yumuşak bir zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. Fakat bu karışım son karıştırma aşamasında ancak elde edilebildi, çünkü karıştırma bıçağının dönme hızı minimumdur ve delik çapları maksimumdur. (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 2 ve 6 ile aynıdır.)
SP-8	50	70	32.8	İlk taramadan itibaren çok iyi bir zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 3 ve 4 ile aynıdır.)
SP-9	50	70	32.0	Kolon imalatı ile ilgili gözlemler, genellikle Tasarım 5 ile aynıydı, ancak çimento dozajı ve bıçağın dönme hızı arttığından, Tasarım 5'e kıyasla daha iyi bir zemin-bağlayıcı karışımı (daha yumuşak) elde edildi. (İyileştirilmemiş zemin Tasarım 1 ve 5 ile aynıdır.)

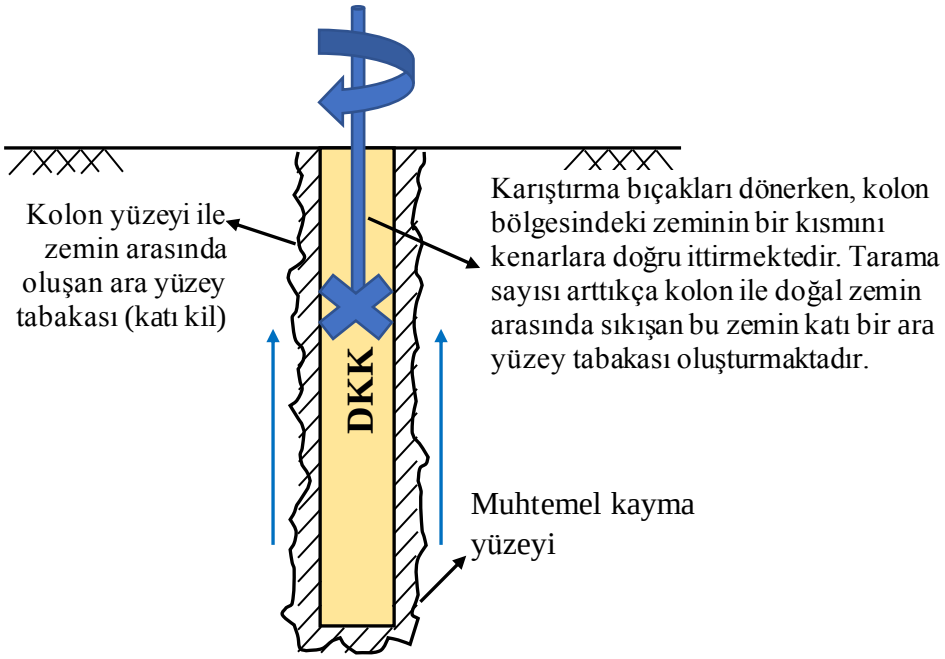
4.1.1.1 Ara yüzey tabakasının oluşumu

Kolon imalatı tamamlandıktan sonra kolonların ortalama çapı ölçülmüştür. Burada dikkat çeken bir konu karıştırma bıçağının çapı 30 cm olmasına rağmen ölçülen kolon çapı 32-36 cm arasında değişmektedir (Tablo 4.3). Kolon tank içerisinden çıkarıldıktan sonra kolon yüzeyi spatula ile sıyrılarak temizlenmiş ve kolon çapı ölçülmüştür. Daha sonra karot numuneleri alınırken kolon yüzeyi su ile temas edince buraya yapışan zemin fark edilerek iyice temizlenmiştir (Şekil 4.2). Bu gözlem sonucunda şu fark edilmiştir: Kolon imalatı sırasında karıştırma bıçakları dönerken o bölgedeki zeminin bir kısmını kenarlara doğru iterek kolon bölgesi ile iyileştirilmeyen zemin arasında bir ara tabaka oluşturmaktadır. Bu ara tabaka kolon yüzeyine çok güçlü bağlarla tutunmuş halde ve iyileştirilecek zemine göre çok daha katı bir kıvamdadır (Şekil 4.3). Bu gözlem ile birlikte şu varsayım yapılabilir: Derin karıştırma kolonu zemin içerisinde yüklemeye maruz kaldığında kayma yüzeyi kolon yüzeyinde değil, oluşan ara tabaka ile iyileştirilecek zemin arasında olacaktır. Çünkü bu ara yüzey kolon yüzeyindeki düzleme göre daha zayıftır. Bu sonuç, derin karıştırma kolonlarının taşıma gücü hesabında çevre sürtünmesi direncini hesaplamaya yarayan adhezyon katsayısının (α) tekrar irdelenmesi gerektiğini ve bu katsayının kazıklı temellerdekinden farklı olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.3. İmal edilen kolonların çapı

Deney No	Kolon alt bölgesinin çapı (cm)	Kolon orta bölgesinin çapı (cm)	Kolon üst bölgesinin çapı (cm)	Kolonun ortalama çapı (cm)
SP-1	31.2	33.1	35.0	33.1
SP-2	42.0	38.8	34.7	36.8
SP-3	44.6	36.6	35.0	35.8
SP-4	39.5	35.0	33.4	36.0
SP-5	34.4	36.9	35.7	35.7
SP-6	36.9	34.1	34.1	35.0
SP-7	32.8	32.8	32.5	32.7
SP-8	32.8	32.8	32.8	32.8
SP-9	31.5	31.5	33.1	32.0

Şekil 4.2. Kolon yüzeyi ile iyileştirilecek zemin arasında oluşan ara yüzey tabakası



Şekil 4.3. Ara yüzey tabakasının oluşum mekanizması

DKK imalatı sırasında kolon çevresindeki zeminde oluşan değişiklikler farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu çerçevede kolon dış yüzünden itibaren üç farklı bölgenin oluştuğu ifade edilmektedir. Bunlar; genişletilmiş bölge, geçiş bölgesi (ara yüzey tabakası) ve sınır tabakasıdır (Shen vd., 2003a; Larsson ve Kosche, 2005). Genişletilmiş bölge kolon çevresine sızan enjeksiyon ile oluşmaktadır (Shen ve Miura, 1999; Shen vd., 2003a, b). Geçiş bölgesinde zeminin kayma direncinin arttığı ifade edilmiştir (Shen vd., 2003a; Larsson ve Kosche, 2005). Geçiş bölgesinde kalsiyum iyonlarının hem moleküler

difüzyon ile yer değiştirdiği (Rajasekaran ve Rao, 1997; Rogers vd., 2000; Hayashi vd., 2003) hem de enjeksiyon zemine aktarılırken hidrolik yırtılma ile bu bölgeye iletildiği (Shen ve Miura, 1999; Shen vd., 2003b) sonucuna varılmıştır. Bu yönüyle ara yüzey tabakasıyla ilgili elde edilen sonuçlar başka araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir. Sınır tabakasında ise zeminin kayma direncinin azalabileceği ifade edilmektedir (Larsson ve Kosche, 2005). Shen vd. (2003c) enjeksiyonun zemine aktarılırken itme kuvveti uyguladığını ve bıçaklar dönerken oluşan kesme kuvvetlerinin zemini parçaladığını, bunun da kolon çevresinde yanal hareketlere neden olarak zemin özelliklerini değiştirdiğini ifade etmişlerdir. Kolon çevresindeki zeminde oluşan çatlaklara çimento hidratasyonu sonucunda oluşan Ca^{+2} iyonlarının nüfuz ederek, zemindeki H^{+}, Na^{+} ve K^{+} katyonlarıyla yer değiştirdiği, bunun sonucunda da zemin kıvamının değiştiği ifade edilmektedir (Rowe ve Booker, 1991; Mitchell, 1993; Herrin ve Mitchell, 1961). Bu yönüyle DKK imalatı sırasındaki gözlemler literatürle uyumlu olmaktadır.

4.1.2 Fiziksel özellikler

Kolon imalatı sırasında karışımın yoğunluğu, bağlayıcı faktörü, bağlayıcı içeriği, toplam su/çimento oranı, karışımın su muhtevası ve hacim oranı gibi özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Kolon imalatında, çimento dozajı 250, 325 ve 400 kg/m^3 olduğunda bağlayıcı faktörü sırasıyla 250, 325 ve 400 kg/m^3 olmaktadır (Tablo 4.4). Bağlayıcı faktörü 1 m^3 iyileştirilmemiş zemine verilen çimento kütlesini göstermektedir, bu da dozajla aynı kavramı temsil etmektedir. Çimento dozajı 250, 325 ve 400 kg/m^3 seçildiğinde, hacim oranı sırasıyla %32.8, %42.7 ve %52.5 olmaktadır. Hacim oranı enjeksiyon hacminin imal edilen kolon hacmine (kolon bölgesindeki iyileştirilmemiş zemin hacmi) bölünmesiyle bulunmaktadır. Örneğin, 400 kg/m^3 dozaj ile kolon imalatı yapıldığında oluşan kolon hacminin %52.5'i kadar enjeksiyonun zemine verilmesi gerekmektedir. Zemin enjeksiyonla karıştığı zaman su muhtevası yaklaşık olarak %10-15 artmaktadır. Enjeksiyondaki su/çimento oranı 1 seçilmiştir fakat zemin-enjeksiyon karışımı dikkate alındığında karışımın toplam su/çimento oranı 2.20-3.33 arasında değişmektedir. Zemin-enjeksiyon karışımlarının likitlik indisi değerleri 0.8-1.4 arasında değişmektedir. BRN, enjeksiyonun zemine aktarılmasından sonra karıştırma bıçaklarının batma veya geri çekme sırasındaki (1 m uzunluk için) toplam dönme sayısı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 2.9 ile hesaplanabilir (Mizuno vd., 1988). Kolon imalatı sırasında BRN değerleri 514-1200 devir/m aralığında değişmektedir (Tablo 4.4).

Tablo 4.4. Kolon imalatı sırasında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri

Tasarım numarası	α (kg/m³)	a_w (%)	W_T:W_c	VR (%)	$l_{L,mix}$	BRN (devir/m)
SP-1	250	18.2	2.92	32.8	0.8	514
SP-2	250	20.8	3.16	32.8	1.1	686
SP-3	250	22.3	3.33	32.8	1.3	857
SP-4	325	29.0	2.80	42.7	1.4	600
SP-5	325	23.7	2.48	42.7	0.8	800
SP-6	325	27.1	2.66	42.7	1.2	1000
SP-7	400	33.3	2.35	52.5	1.2	720
SP-8	400	35.6	2.46	52.5	1.4	960
SP-9	400	29.1	2.20	52.5	0.9	1200

Enjeksiyon yoğunluğu (1.524 g/cm³) zeminin doğal yoğunluğundan düşük olduğu için karışımın yoğunluğu da zemin yoğunluğundan düşük olmaktadır ve 1.652-1.772 g/cm³ arasında değişmektedir. Doğal zeminin su muhtevası %35-52 arasında iken karışımın son durumdaki su muhtevası %45-64.6 arasında değişmektedir. Yani zemin enjeksiyonla karıştığı zaman ortamın su muhtevası %10-13 kadar artmıştır. Kür süresi sonunda ise karışımın su muhtevası kür edilmeden önceki duruma göre %4-5 azalmaktadır. Bunun sonucu olarak kür sonundaki numune yoğunluğu kür edilmeden önceki duruma göre daha az olmaktadır (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri

Tasarım numarası	Zemin		Kür edilmeden önce		Kür edildikten sonra	
	Su muhtevası, w (%)	Doğal yoğunluk, ρ_n (g/cm³)	Yoğunluk, ρ (g/cm³)	Su muhtevası, w (%)	Yoğunluk, ρ (g/cm³)	Su muhtevası, w (%)
SP-1	35	1.854	1.772	45.0	1.728	40.3
SP-2	45	1.741	1.687	54.5	1.693	51.9
SP-3	52	1.706	1.661	60.7	1.634	51.3
SP-4	52	1.706	1.652	62.8	1.640	54.2
SP-5	35	1.854	1.755	47.4	1.677	44.6
SP-6	45	1.741	1.676	56.7	1.687	51.2
SP-7	45	1.741	1.666	58.7	1.607	52.9
SP-8	52	1.706	1.643	64.6	1.593	62.6
SP-9	35	1.854	1.740	49.7	1.663	51.3

4.1.3 Serbest basınç dayanımı (UCS)

İmal edilen derin karıştırma kolonlarının boyları 60-70 cm arasında değişmektedir. Her bir kolonun alt, orta ve üst bölgelerinden alınan karot numuneleri (genellikle her bölgeden 20-25 cm uzunluğunda karot alınmıştır) için yapılan serbest basınç deney sonuçları (UCS) Ek-1'de verilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak karot numunelerine ait gerilme-birim deformasyon (q_u-ε) grafikleri ve her bir deneye ait Mohr daireleri ile bunların ortalamasını temsil eden kırılma zarfı çizilmiştir. Daha sonra kabul edilen veriler için histogram grafiği çizilerek verilerin normal dağılıma sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Son olarak ise veriler üzerinde olasılık grafiği çizilerek, verilerin %95 güven aralığı için genel dağılımına bakılmıştır (Ek-1). Verilerin uygun olması halinde optimizasyon çalışmalarına geçilmiştir.

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin dayanım sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir. Her bölgenin ortalama dayanımı parantez içerisinde yazılmıştır. Kolon alt, orta ve üst bölgelerinin dayanımları birbirine yakın olduğundan kolon imalatı sırasında kolonun her yerinde homojen bir karışım elde edildiği söylenebilir. Her bir kolondan alınan karot numunelerinin dayanımlarının ortalaması alınarak ortalama kolon dayanımı elde edilmiştir.

Her bir kolondan 9 ile 21 arasında karot numunesi alınarak, bunların dayanımı belirlenmiştir. Aynı kolondan alınan karot numuneleri arasında 2-3 kata kadar dayanım farkı olmaktadır. Bu nedenle bir kolonun ortalama dayanımını bulabilmek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Karot dayanım değerlerinden anlamsız olabilecek değerlerin elenmesi için ilk önce istatistiki bir yöntem olan Q testi (Dean ve Dixon, 1951) uygulanmıştır. Bunun sonucunda veriler arasında genel dağılımı etkileyen ve anlamsız kalan veriler ortalamaya dâhil edilmemiştir. Q testi şu şekilde yapılmaktadır:

- Veriler küçükten büyüğe sıralanır. Ardışık iki veri arasındaki fark, son ve ilk veri arasındaki farka (genel fark) bölünerek bir oran bulunur.
- Bu oran, çalışılan güven aralığı ve veri sayısına göre geliştirilen tablodaki oran ile kıyaslanır. Eğer bulunan oran tablodaki orandan küçükse analiz edilen veri anlamlıdır, büyükse anlamsızdır ve iptal edilir (EK-1'de verilen grafiklerde iptal edilen verilere ait Mohr daireleri kesikli çizgi ile gösterilmiştir). Q testinde kullanılan tablo Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Kolonların farklı bölgelerinden alınan karot dayanımları ve zemin iyileştirme derecesi (Sistem parametrelerinin araştırılması)

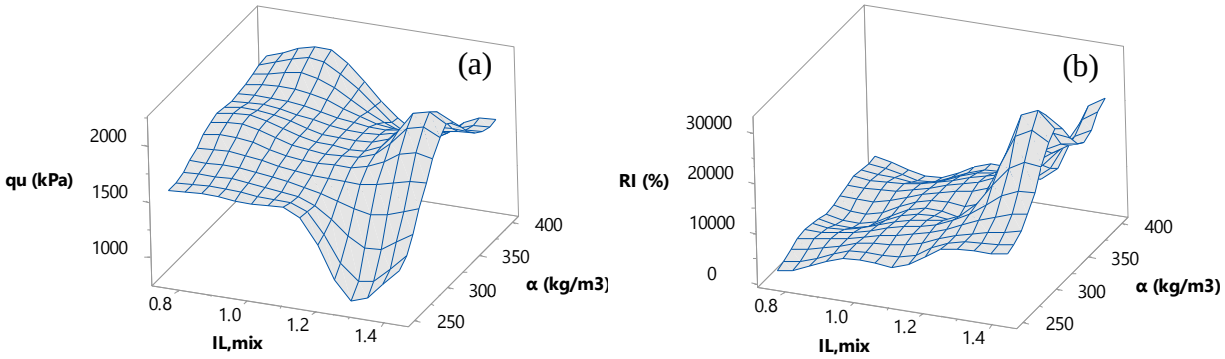
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
q_u (kPa) (Kolon alt bölgesi)	1775.0 1695.5 1906.3 1661.4 (1759.6)	1602.0 1679.7 1559.7 (1613.8)	703.4 550.3 (626.9)	*1124.0* 2060.5 2243.9 (2152.2)	2235.0 1345.0 1150.0 1458.2 1600.0 (1557.6)	1411.6 1199.0 1396.9 1726.8 1753.3 (1497.5)	1308.2 1515.0 1330.0 1526.9 2041.7 1957.8 1091.4 (1468.9)	*820.8* 1600.0 1842.4 2015.3 (1819.2)	1658.6 1604.8 1535.7 1638.1 2141.1 1957.9 2079.4 (1802.2)
q_u (kPa) (Kolon orta bölgesi)	1390.2 934.0 1774.0 1380.3 (1369.6)	1173.2 1270.3 1434.7 1562.1 (1360.1)	760.0 1030.0 (895.0)	1806.8 2345.8 *996.9* (2076.3)	1245.0 2682.7 2070.0 1823.3 1890.0 (1942.2)	1891.1 1939.2 2035.0 (1955.1)	1726.2 1705.2 1409.4 1183.6 1199.3 2048.8 1762.2 995.7 (1497.7)	1628.7 1573.7 1637.7 1551.0 (1597.8)	1935.0 2202.3 2183.2 2397.6 1846.8 1976.4 (2090.2)
q_u (kPa) (Kolon üst bölgesi)	1113.3 1801.2 1564.2 1830.1 (1577.2)	1255.8 2031.2 1763.9 2063.3 (1778.6)	946.9 1006.1 (976.5)	2038.8 2134.9 *1057.3* (2086.9)	1790.0 1420.0 3078.0 2185.0 1390.0 2261.9 (2020.8)	1243.2 1768.8 2043.4 1857.3 (1728.2)	1724.2 965.7 1124.9 868.8 1023.7 810.0 (1290.9)	1740.1 1400.0 1774.3 1593.2 1540.6 1670.0 (1619.7)	2481.2 2367.0 2284.7 2453.5 2255.0 2125.0 (2327.7)
N [a]	12	11	6	9	16	12	21	14	19
$q_{u,max}/q_{u,min}$	2.0	1.8	1.9	1.3	2.7	1.7	2.5	1.4	1.6
$q_{u,c}$ (kPa) (ortalama)	1568.8	1581.4	832.8	2105.1	1851.5	1688.8	1396.1	1659.0	2059.1
$q_{u,s}$ (kPa)	74.8	25.0	6.9	6.9	74.8	25.0	25.0	6.9	74.8
RI (%)	2097	6326	12069	30509	2475	6755	5585	24043	2753

Not: Her bir kolon bölgesinin ortalama dayanımı parantez içinde verilmiştir. İtalik yazılan dayanım değerleri ortalamaya alınmamıştır.
[a] Deney yapılan karot numunelerinin sayısını göstermektedir.

Tablo 4.7. Q testi için farklı güven seviyelerindeki kritik Q değerleri (Dean ve Dixon, 1951)

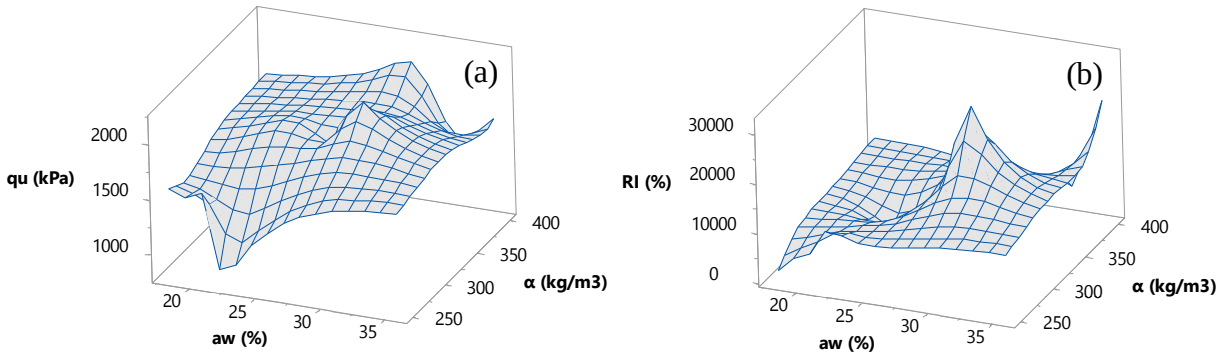
Gözlem sayısı, N	Güven Seviyesi		
	Q90%	Q95%	Q99%
6	0.560	0.625	0.740
9	0.437	0.493	0.598
11	0.392	0.444	0.542
12	0.376	0.426	0.522
14	0.349	0.396	0.488
16	0.329	0.396	0.488
19	0.306	0.349	0.433
21	0.300	0.342	0.425

Genel olarak zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi ($I_{L,mix}$) azaldığında ve çimento dozajı ve/veya faktörü (α) arttığında dayanımın (q_u) arttığı görülmektedir. $I_{L,mix}$ ve α arttığında ise zemin iyileştirme derecesi artmaktadır. Çimento faktörü 325 kg/m³'ten az olduğu durumda, $I_{L,mix}$ likit limit altında veya likit limit civarında olduğu zaman kolon dayanımının çok değişmediği, $I_{L,mix}$ 1.1'den büyük olduğunda ise dayanımın çok azaldığı görülmektedir (Şekil 4.4). Bergado ve Lorenzo (2005), serbest basınç dayanımı bakımından en iyi performansa sahip DKK'nın karışımdaki toplam su muhtevasının zeminin likit limit kıvamına yakın su muhtevası olduğunu belirlemiştir. Bu yönüyle elde dilen bu sonuç literatürle uyuşmaktadır.



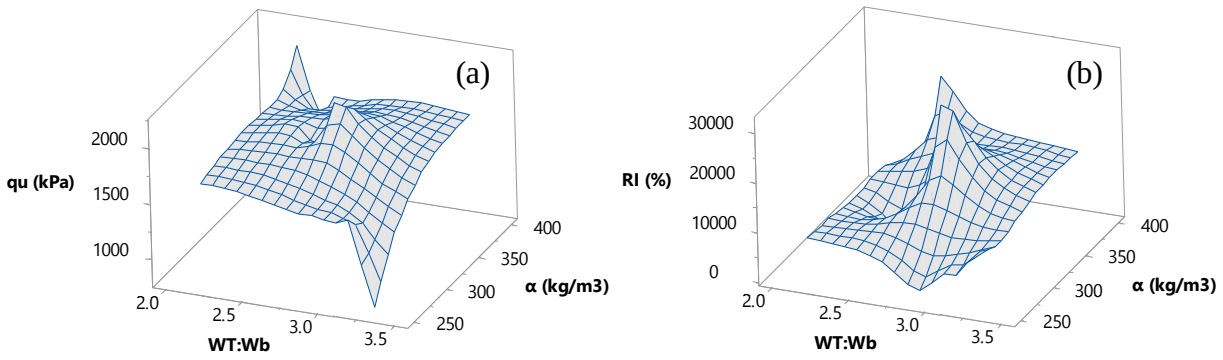
Şekil 4.4. Çimento faktörü ve karışımın likitlik indisi ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

Genel olarak çimento içeriği ve çimento faktörü arttıkça hem kolon dayanımı hem de zemin iyileştirme derecesi artmaktadır fakat bu artış çimento içeriğinin %25'den daha büyük olduğu durumlarda daha belirgindir (Şekil 4.5). Cavey vd. (2005) arazide imal ettikleri DKK için çimento faktörünü ilk başta 260 kg/m³ seçmişler fakat dayanımın yetersiz kalmasından dolayı bunu 320 kg/m³ değerine çıkmışlardır. Burada önemli olan tasarım dayanımına ulaşacak şekilde çimento içeriğinin ve faktörünün belirlenmesidir.



Şekil 4.5. Çimento faktörü ve çimento içeriği ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

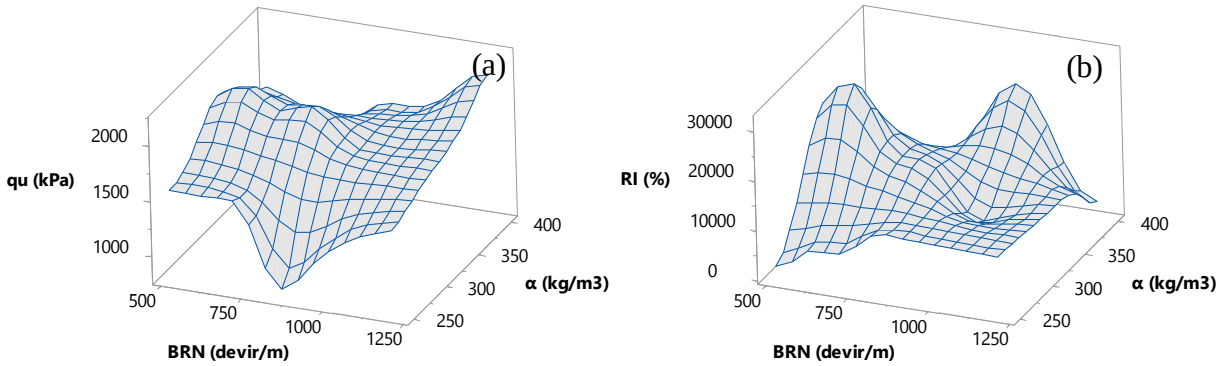
Çimento faktörü 325 kg/m^3'ten küçük olduğu zaman karışımın toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) arttıkça dayanım ve zemin iyileştirme derecesi azalmakta, W_T:W_b 3'ten büyük olduğunda farklılık belirginleşmektedir. Benzer sonuç farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Miura vd., 2002; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2005). Çimento faktörü 325 kg/m^3'ten büyük olduğu zaman ise W_T:W_b arttığında dayanımda çok fazla azalma olmamıştır (Şekil 4.6). Çimento katkılı killi zeminin mühendislik özellikleri karışımdaki toplam su miktarı tarafından etkilenmektedir. Çünkü karışımda bulunan su hem çimento hidratasyonu hem de homojen karışım elde edebilmek için gereklidir (Porhoba vd., 2000; Miura vd., 2001; Bergado ve Lorenzo, 2002; Lorenzo ve Bergado, 2004). Karışım içerisinde yeterli miktarda su bulunmadığı zaman, çimentolanmayı sağlayan iyonlar zemin taneleri arasındaki boşluklara dağılırlar. Su miktarı çok fazla olduğunda ise zemin tanelerini birbirine bağlamak için çok daha fazla çimentoya ihtiyaç vardır.



Şekil 4.6. Çimento faktörü ve karışımın toplam su/bağlayıcı ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

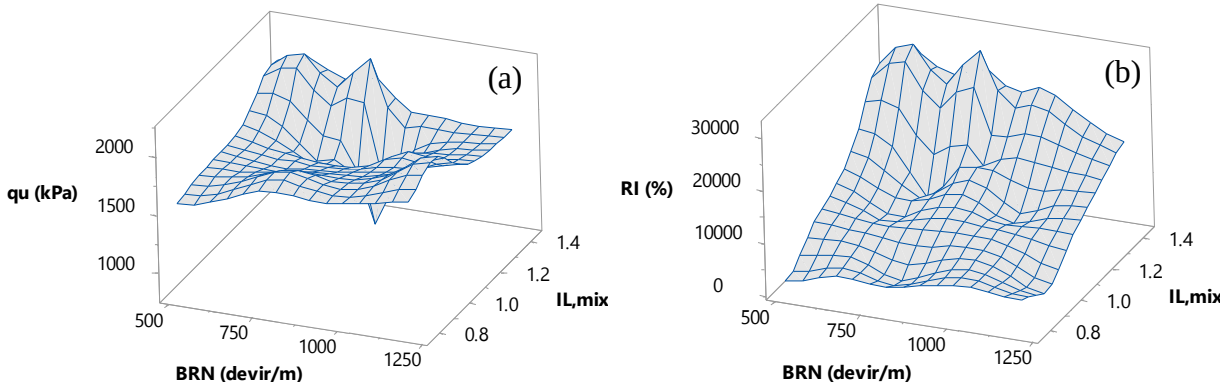
Karıştırma bıçaklarının 1 m derinlikte dönme sayısını ifade eden BRN ile çimento faktörü ve dayanım arasındaki ilişki Şekil 4.7'de verilmiştir. Çimento faktörü 250 kg/m^3 olduğunda kolon dayanımı zaten düşük çıkmakla birlikte BRN arttıkça dayanımın düştüğü görülmektedir. Çimento faktörü 300-350 kg/m^3 arasında BRN 500-1000 devir/m olduğunda kolon dayanımı olumlu yönde etkilenmiştir. Çimento faktörü 350 kg/m^3'ten fazla olduğu durumda ise BRN'nin 1000 devir/m değerinden yüksek olması gerekmektedir. Zaten çimento faktörü arttıkça enjeksiyon hacmi artmakta ve bu enjeksiyonun zemine aktarılabilmesi için delgi gövdesinin batma hızı az olmalıdır. Bunun sonucunda da BRN yüksek çıkmaktadır. Bunlara ilave olarak; amacımız belirli bir kolon dayanımı elde etmekten ziyede zemini iyileştirmek olduğunda şunlar söylenebilir: Çimento faktörü 250 kg/m^3 olduğunda BRN arttıkça RI artmakta fakat 800 devir/m değerinden sonra fazla etkili olmamaktadır. Genel olarak 350 kg/m^3 çimento faktöründen az çimento kullanıldığında 800-900 devir/m değerinden yüksek BRN seçilmesinin RI üzerinde çok etkisi bulunmamaktadır. 300-350 kg/m^3 çimento faktörü için en çok zemin iyileştirmesi 500-800 devir/m ile olurken, 350

kg/m^3'ten fazla çimento kullanılınca BRN 850-1100 devir/m arasında iken iyi sonuç vermiştir. BRN sayısına bağlı olarak zemin-enjeksiyon karışımlarının niteliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Larsson, 2005a, b; Topolincki, 2009; Boehm, 2012). Araştırmacılar BRN sayısı arttıkça homojen karışım elde etmenin kolaylaştığını ve kolon dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.



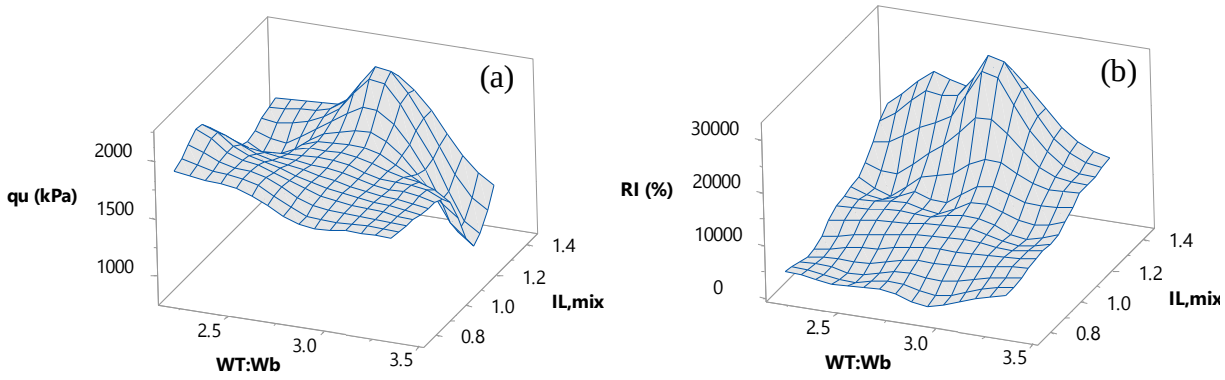
Şekil 4.7. Çimento faktörü ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

BRN ve zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi parametrelerinin q_u ve RI üzerindeki etkileri Şekil 4.8'de verilmiştir. Buna göre $I_{L,mix}$ likit limitin altında olduğunda BRN arttıkça kolon dayanımı artmaktadır. Fakat $I_{L,mix}$ likit limit ve bunun üzerinde ise BRN 800-900 devir/m değerinden daha yüksek olduğunda kolon dayanımı azalmaktadır. Bu sonuç kolon imalatı sırasında yapılan gözlemlerde de fark edilmiştir. Çünkü likit kıvam ve üzerindeki zeminlerde kolon imalatı yapılırken dönme hızı çok seçildiğinde zeminde yanal ötelenme ve dalgalanma artmaktadır. BRN ve $I_{L,mix}$ parametrelerinin zemin iyileştirme derecesi üzerindeki etkisi kolon dayanımında olduğu gibidir.



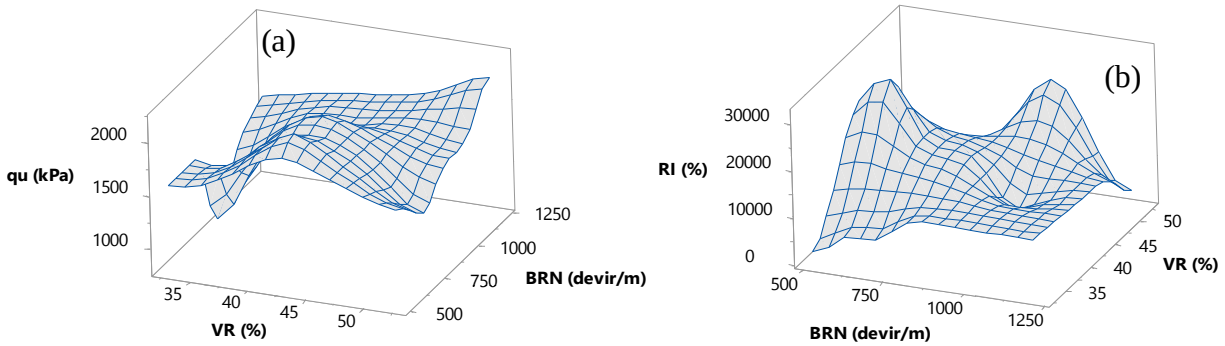
Şekil 4.8. $I_{L,mix}$ ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

Genel itibariyle zemin-enjeksiyon karışımının toplam su/bağlayıcı oranı ve likitlik indisi arttıkça kolon dayanımı azalmaktadır. $I_{L,mix}$ arttıkça zemin iyileştirme derecesi artmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. $I_{L,mix}$ ve W_T:W_b ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

Kolon imalatı sırasında hacim oranı (VR) %40-45 arasında ve BRN 500-900 devir/m arasında olduğunda kolon dayanımının yüksek elde edildiği görülmektedir. Ayrıca VR arttıkça, yüksek kolon dayanımı elde edebilmek için BRN'nin yüksek olması gerekmektedir. VR, %35 olduğunda BRN arttıkça RI artmakta fakat 800 devir/m değerinden sonra fazla etkili olmamaktadır. Genel olarak VR %35-45 değerleri arasında olduğunda 800-900 devir/m değerinden yüksek BRN seçilmesinin RI üzerinde çok etkisi bulunmamaktadır. VR, %40-45 aralığında iken en fazla zemin iyileştirmesi 500-800 devir/m ile olurken, VR %45'ten fazla olduğunda BRN 850-1100 devir/m arasında iken iyi sonuç vermiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. VR ve BRN ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki

4.1.4 İstatistiksel analiz sonuçları

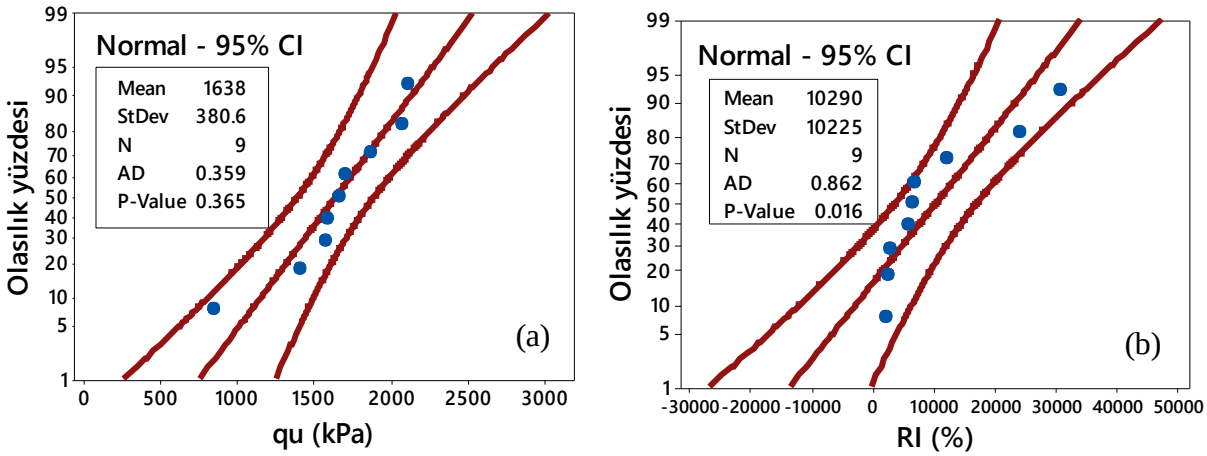
İmalat parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenirken hem kolon dayanımı (q_u) hem de zemin iyileştirme oranı (RI) dikkate alınmıştır. Çünkü farklı kıvamlardaki killi zeminlerde

üretilen kolonların dayanımları bazı durumlarda birbirine yakın olmaktadır. Bu olay tasarım 6 ve 8 özelinde belirgin bir şekilde görülmektedir. İyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi ve serbest basınç dayanımı, tasarım 6 için 0.8 ve 25 kPa, tasarım 8 için 1.0 ve 6.9 kPa'dır. Bu iki farklı zemin ortamında, kolon imalat parametreleri sırasıyla, tasarım 6 için çimento dozajı 325 kg/m^3, karıştırma bıçağının dönme hızı 100 devir/dk ve enjeksiyon deliklerinin çapı 2 mm'dir. Tasarım 8 de ise çimento dozajı 400 kg/m^3, karıştırma bıçağının dönme hızı 80 devir/dk ve enjeksiyon deliklerinin çapı 2 mm'dir. Farklı zemin ortamlarına ve imalat parametrelerine sahip bu iki tasarımda, kolonların ortalama dayanımları tasarım 6 için 1688.8 kPa ve tasarım 8 için 1659.0 kPa olmaktadır. Kolon dayanımları birbirine çok yakın olmasına rağmen, tasarım 6'daki iyileştirme derecesi %6755 iken, tasarım 8'de %24043 olmaktadır. Başka bir deyişle, tasarım 8'deki zemin ortamında oluşturulan kolon ile tasarım 6'ya göre 3-4 kat daha fazla zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Zemin iyileştirme oranı (RI) Denk. 4.1 ile hesaplanabilir.

$$RI(\%) = \frac{q_{u,c}}{q_{u,s}} \tag{4.1}$$

burada, $q_{u,c}$ kolon dayanımını, $q_{u,s}$ iyileştirilmemiş zeminin dayanımını göstermektedir.

İmal edilen kolonlar için ortalama dayanım (q_u) ve zemin iyileştirme oranı (RI) olarak bulunan değerlerin dağılımına bakıldığında şunlar söylenebilir: 9 kolondan elde edilen dayanım değerleri için normal olasılık grafiği çizildiğinde, %95 güven aralığı için P değeri 0.365 olup 0.005 değerinden büyüktür. Bundan dolayı verilerin anlamlı dağıldığını söyleyebiliriz (Şekil 4.11a). RI sonuçları için P değeri 0.016 olmuştur ve 0.005 değerinden büyük olduğu için verilerin dağılımı düzgündür (Şekil 4.11b).



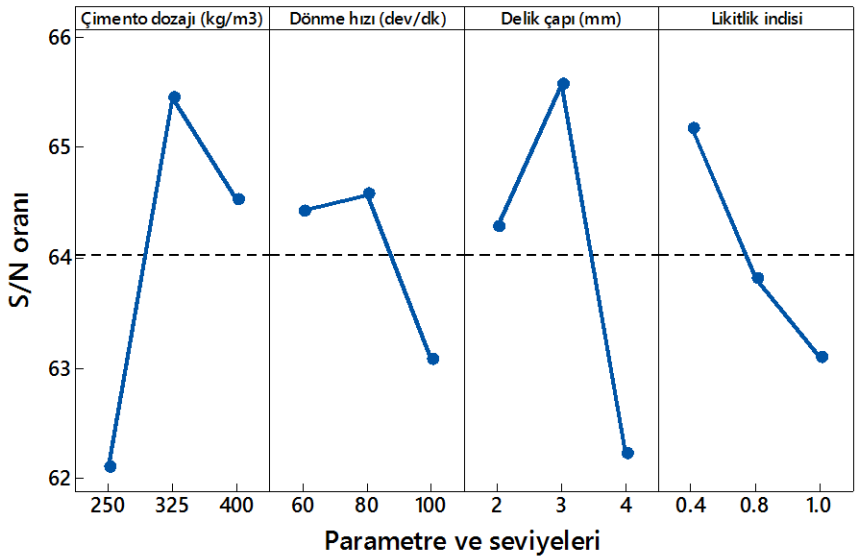
Şekil 4.11. a) Dayanım ve b) zemin iyileştirme oranı için normal olasılık grafikleri (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Derin karıştırma kolonlarının performansına etki eden imalat parametrelerinin q_u ve RI üzerindeki etkileri Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonuçlar üzerinde etkili olan imalat parametrelerinin en uygun seviyesini bulmak için S/N analizi, varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizler MİNİTAB programı kullanılarak yapılmıştır.

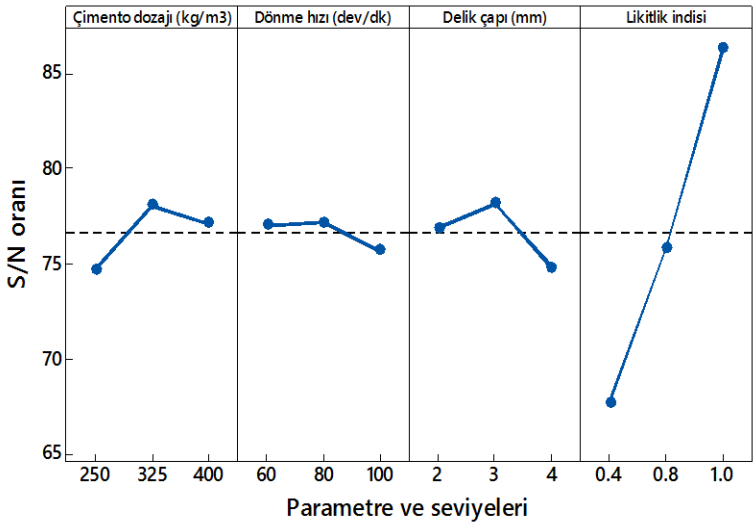
S/N analizi sonuçları

Sonuçların istatistiksel analizi sürecinde, RI ve q_u sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. İlk önce, Taguchi analizi yapılmış ve S/N oranları elde edilmiştir. Bu kısımdaki amaç, en yüksek iyileştirme derecesi veya en yüksek kolon dayanımı elde etmek olduğundan dolayı S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi analizinde S/N oranı tercih edilen kalite özelliğini belirlemek için Taguchi tarafından belirlenen tarafsız bir fonksiyondur. Taguchi, ortalama azalırken standart sapmanın da azaldığını veya bunun tersinin olduğunu bulmuştur. Taguchi analizinde, S/N oranının standart sapma yerine ölçülebilir değer olarak kullanılmasının nedeni budur.

S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir. q_u ve RI; çimento dozajı 325 kg/m^3, dönme hızı 80 devir/dk ve delik çapı 3 mm'ye kadar artmakta ve bundan sonra azalmaya başlamaktadır. Zeminin likitlik indisi veya su muhtevası arttıkça q_u azalırken, RI artmaktadır. Zeminin likitlik indisi arttıkça, kolon bölgesindeki zemin-enjeksiyon karışımının su muhtevası arttığı için karışımın toplam su/çimento oranı artmakta ve dayanım düşmektedir. Fakat zemin dayanımına göre ne kadarlık iyileştirme yapıldığına bakıldığında likitlik indisi fazla olan zeminde oransal olarak daha fazla iyileştirme yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4.12. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Sistem parametrelerinin araştırılması)



Şekil 4.13. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Sistem parametrelerinin araştırılması)

q_u ve RI'yı etkileyen parametrelerin önem derecesi S/N analizinden elde edilen cevap tablosundaki "delta" değerinden anlaşılabilir. Delta değeri, ilgili parametre için elde edilen S/N oranlarından en büyük ve en küçük olanın farkı ile bulunmaktadır. Delta değeri büyük olan parametre sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olmaktadır. İmalat parametrelerinin kolon dayanımı üzerindeki etki sırası çimento dozajı, enjeksiyon deliklerinin çapı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası) ve karıştırma bıçağının dönme hızı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.8). Zeminin likitlik indisi (su muhtevası) zemin iyileştirme derecesi üzerinde etkili olan en önemli parametredir. Çünkü zemin kıvamına bağlı olarak kolon dayanımındaki artış en fazla likit kıvamdaki zeminde olmaktadır. Zemin iyileştirme derecesi üzerinde etkili olan imalat parametrelerinin önem derecesine göre sıralaması zeminin likitlik indisi, çimento dozajı, enjeksiyon delik çapı ve karıştırma bıçağının dönme hızı şeklindedir (Tablo 4.8).

Tablo 4.8. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler			
		Çimento dozajı	Dönme hızı	Delik çapı	Likitlik indisi
Kolon dayanımı, q_u (kPa)	1	62.10	64.43	64.29	**65.18**
	2	**65.46**	**64.58**	**65.57**	63.81
	3	64.52	63.08	62.22	63.09
	Delta	3.35	1.5	3.35	2.09
	Sıralama	1	4	2	3
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	74.7	77.02	76.88	67.7
	2	**78.05**	**77.17**	**78.17**	75.85
	3	77.12	75.67	74.82	**86.31**
	Delta	3.35	1.5	3.35	18.61
	Sıralama	2	4	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

İmalat parametrelerinin kolon dayanımına etkilerinin araştırıldığı bu bölümde 4 parametre ve her parametrenin 3 seviyesi bulunmaktadır. Bu nedenle sistemin serbestlik derecesi (D_f) 8 olmaktadır. Serbestlik derecesi parametre sayısı ile seviye sayısının 1 eksiğinin çarpımıyla elde edilmektedir. Modeldeki hataların da serbestlik derecesi 2 olduğundan dolayı, varyans analizi yapılırken 4 parametre ve 3 seviye için gerekli serbestlik derecesi şartı sağlanamamaktadır. Bu nedenle varyans analizinde sonuçlar üzerinde diğer parametrelere göre en az etkili olan parametre (karıştırma bıçaklarının dönme hızı) modelden çıkarılmıştır.

Kolon dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.13, %96.53 ve %82.42 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Çimento dozajı ve delik çapı için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Zeminin likitlik indisi için ise P değeri 0.054 elde edilmiştir. P değeri 0.05 değerinden çok az büyük çıkmıştır ve zemin kıvamının da dayanım sonuçları üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Kolon dayanımı üzerinde çimento dozajı %40.35, delik çapı %43.64 ve likitlik indisi % 15.14 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.87 olmuştur (Tablo 4.9).

Tablo 4.9. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Çimento Dozajı	2	433979	40.35%	433979	216989	46.47	0.021
Delik çapı	2	469399	43.64%	469399	234700	50.26	0.020
Likitlik indisi	2	162865	15.14%	162865	81432	17.44	0.054
Hata	2	9339	0.87%	9339	4669		
Toplam	8	1075581	100.00%				

Kolon dayanımı sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.2'de verilmiştir.

$$\frac{q_u^{\lambda}-1}{\lambda \cdot g^{\lambda-1}} = 658.1 + \begin{bmatrix} -289.0 \\ +242.9 \\ +46.2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} ÇD_1 \\ ÇD_2 \\ ÇD_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -75.8 \\ +309.8 \\ -234.0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DÇ_1 \\ DÇ_2 \\ DÇ_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +174.6 \\ -152.8 \\ -21.8 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \end{pmatrix} \quad 4.2)$$

burada, λ=3 (Box-Cox dönüşüm katsayısı) ve g=1589.76 (dayanım sonuçlarının geometrik ortalaması). $ÇD_1$, $ÇD_2$, $ÇD_3$ çimento dozajı parametresinin seviyelerini, $DÇ_1$, $DÇ_2$, $DÇ_3$ delik çapı seviyelerini ve $I_{L,1}$, $I_{L,2}$, $I_{L,3}$ likitlik indisi seviyelerini göstermektedir.

Yukarıdaki denklem kullanılarak kolon dayanımı tahmin edilmek istendiğinde, sadece ilgili parametrelerin seviyeleri için verilen katsayılar kullanılarak matematiksel işlemler yapılmalıdır. Örneğin, çimento dozajı 325 kg/m^3, delik çapı 3 mm ve likitlik indisi 1.0 seçildiğinde tahmin edilen kolon dayanımı 2081.2 kPa olarak hesaplanır.

Zemin iyileştirme oranı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.79, %99.17 ve %95.80 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, zemin iyileştirme derecesi üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %96.01 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde çimento dozajının %2.12 ve enjeksiyon deliklerinin çapının %1.67 etkisi bulunmaktadır (Tablo 4.10). Zemin likitlik indisi dışındaki tüm parametrelerin zemin iyileştirme derecesi üzerindeki etkisi çok düşük çıkmıştır. Çünkü zemin kıvamı iyileştirme derecesi üzerinde çok baskın bir parametredir. İyileştirme derecesi bulunurken, kolon dayanımı ile zemin dayanımı arasındaki oran bulunduğu için ve likit kıvamdaki zeminin dayanımı çok düşük olduğundan, iyileştirme derecesi yumuşak zeminlerde çok yüksek çıkmaktadır. Burada bulunan istatistiksel sonuçlar parametreler arasındaki göreceli önemi göstermektedir. Çimento dozajı ve delik çapı için P değerleri sırasıyla 0.089 ve 0.111 elde edilmiştir. P değerleri 0.05'ten büyüktür ve sonuçlar üzerinde yaklaşık olarak %90 seviyelerinde bir ilişki olduğu söylenebilir. Zeminin likitlik indisi için ise P değeri 0.002 elde edilmiştir. P değeri 0.05 değerinden düşük çıkmıştır ve zemin kıvamı iyileştirme oranı sonuçları üzerinde oldukça etkilidir. Oluşturulan modelin hata payı %0.87 olmuştur (Tablo 4.10).

Tablo 4.10. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen ANOVA sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Çimento Dozajı	2	0.000006	2.12%	0.000006	0.000003	10.22	0.089
Delik çapı	2	0.000005	1.67%	0.000005	0.000002	8.05	0.111
Likitlik indisi	2	0.000265	96.01%	0.000265	0.000132	463.2	0.002
Hata	2	0.000001	0.21%	0.000001	0		
Toplam	8	0.000276	100.00%				

RI sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.3'de verilmiştir.

$$-RI^{\lambda} = \text{-}0.013377 + \begin{bmatrix} -0.001127 \\ +0.000713 \\ +0.000414 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} ÇD_1 \\ ÇD_2 \\ ÇD_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.000107 \\ +0.000924 \\ -0.000818 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DÇ_1 \\ DÇ_2 \\ DÇ_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.006955 \\ +0.000670 \\ +0.006285 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

burada, λ=-0.5 (Box-Cox dönüşüm katsayısı). $ÇD_1$, $ÇD_2$, $ÇD_3$ çimento dozajı parametresinin seviyeleri, $DÇ_1$, $DÇ_2$, $DÇ_3$ delik çapı seviyeleri ve $I_{L,1}$, $I_{L,2}$, $I_{L,3}$ likitlik indisi seviyelerini göstermektedir.

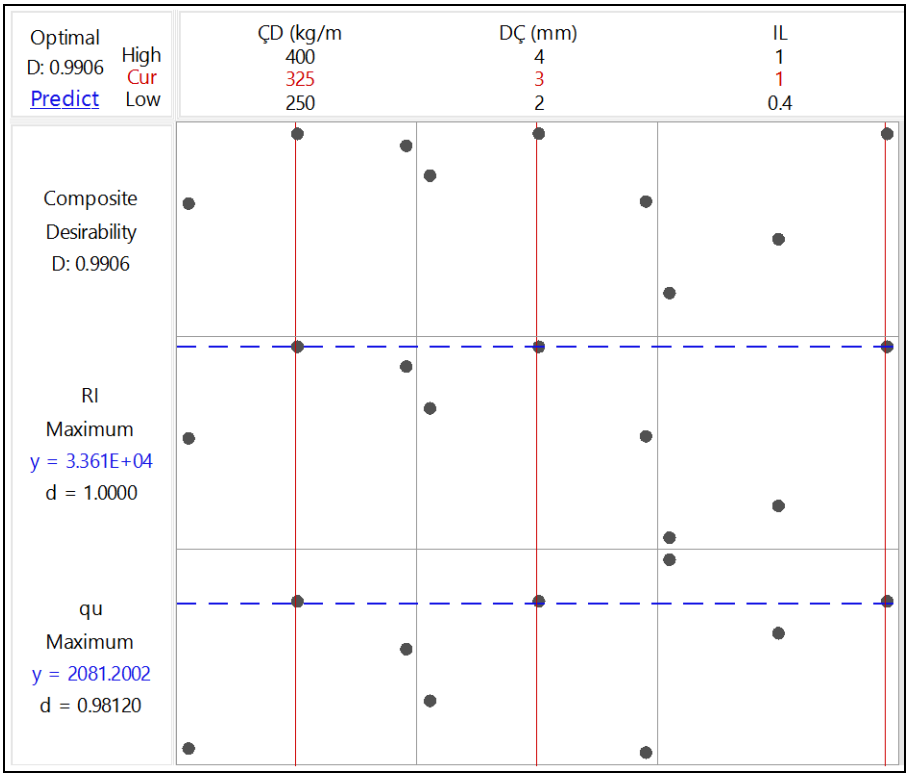
Hem S/N analizi hem de ANOVA sonuçlarına göre karıştırma bıçağının dönme hızının (DH) kolon dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen istatistiksel sonuçlar, araştırılan parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki sırasını vermektedir. Fakat kolon imalatı sırasındaki gözlemler karıştırma bıçağının dönme hızının önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Birçok araştırmacı karıştırma bıçağının geometrisi, bıçakların batma/çekme ve dönme hızlarının iyileştirilmiş zemin özelliklerini etkilediğini ifade etmiştir (Dong vd., 1996; Shen vd., 2004, 2005; Al-Tabba ve Evans, 1998). Madhyannapu vd. (2010) orta ve yüksek plastisiteli killi zeminde bıçakların dönme hızı 40 devir/dk iken homojen kolon oluşumunu sağlayabilmiştir. Fakat bu çalışmada kolon imalatı sırasında karıştırma bıçağının dönme hızı 60 devir/dk değerinden az olduğu durumda homojen karışmış zemin-bağlayıcı karışımı elde edilememiştir (Şekil 4.14a). Bu durum zemin özelliklerine göre bıçakların dönme hızının değişebileceğini göstermektedir.

Ön deneyler sırasında homojen karışmış bir kolon imalatı için karıştırma bıçağının dönme hızının en az 60 devir/dk olması gerektiği belirlenmiştir. Liu vd. (2012) karıştırma bıçağının dönme hızı 60 devir/dk, su/çimento oranı 0.55 ve çimento dozajı 255 kg/m^3 iken DKK imalatı yapmışlar, sonuç olarak kolon dayanımını 1000-1600 kPa ve zemin iyileştirme derecesini %10000-16000 elde etmişlerdir. Mullins ve Gunaratne (2015) DKK imalatında bıçakların dönme hızının 50-100 devir/dk arasında seçilmesi gerektiğini söylemektedir. Karıştırma bıçağının hızı 60-80 veya 100 devir/dk olduğu durumların hepsinde (Şekil 4.14b, c) homojen karışmış kolon imalatı yapılabildiği için bu parametre istatistiki olarak anlamsız çıkmıştır denebilir. Larsson vd. (2005) istatistiki değerlendirme sonucunda (arazi uygulaması, DH=80-160 devir/dk) bıçakların dönme hızının DKK performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir.

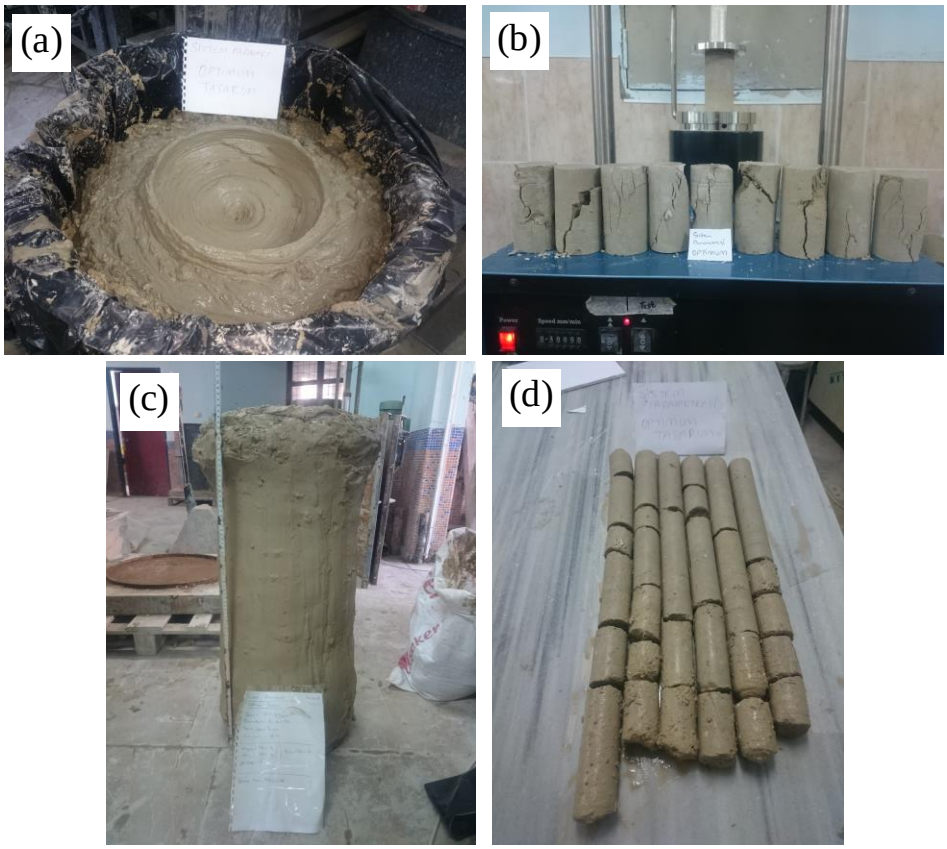
Şekil 4.14. a) Homojen olmayan zemin-bağlayıcı karışımı (DH<60 devir/dk), b, c) Homojen karışmış kolon (Tasarım 4, DH=60 devir/dk)

4.1.4.1 Optimum tasarım

S/N analizi sonuçlarına göre optimum imalat parametreleri; çimento dozajı 325 kg/m^3, karıştırma bıçağının dönme hızı 80 devir/dk ve enjeksiyon deliklerinin çapı 3 mm olarak belirlenmiştir. ANOVA ve regresyon analizi yapıldığında ise karıştırma bıçaklarının dönme hızının sonuç üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. En yüksek DKK mukavemeti, %35 su içeriğine sahip (I_L=0.4) killi zeminlerde elde edilmiştir. Fakat en büyük zemin iyileştirme derecesi kilin likit kıvamında (I_L=1) elde edilmiştir. Bu nedenle, kilin farklı kıvamları için elde edilen optimum imalat parametrelerinin kullanılması daha doğru olacaktır. Geliştirilen istatistiksel modellere dayanarak, optimum imalat parametreleri için kolon dayanımı 2081.2 kPa, zemin iyileştirme oranı %33610 olarak tahmin edilmiştir (Şekil 4.15). Yapılan optimizasyonun güven derecesi %99 elde edilmiştir. Bu sonuçların doğrulanabilmesi için optimum koşulları temsil eden kolon imalatı (I_L=1 olan zemin ortamında) yapılmış ve 28 gün sonunda karot numuneleri alınarak kolon dayanımı belirlenmiştir. Bu süreçler ile ilgili fotoğraflar Şekil 4.16'da verilmiştir.

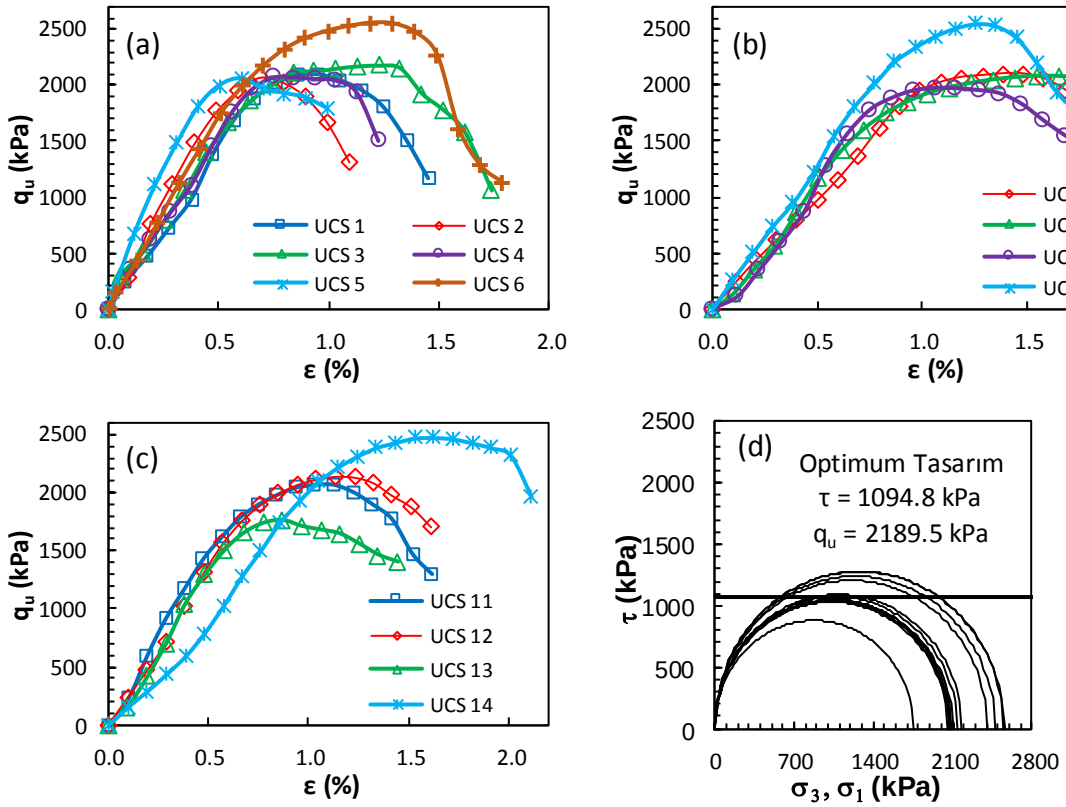


Şekil 4.15. ANOVA sonuçlarına göre elde edilen optimizasyon sonuçları (Sistem parametrelerinin araştırılması)



Şekil 4.16. Optimum durumda imal edilen DKK: a) imalat sonrası görünüm, b) karot numunelerinin kayma yüzeyleri, c) imal edilen kolon ve d) alınan karot numuneleri (Sistem parametrelerinin araştırılması)

Optimum tasarıma göre imal edilen kolon için, imalat sonrasındaki yaş zemin-enjeksiyon karışımının su muhtevası %62.8 ve yoğunluğu 1.652 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. 28 gün kür süresi sonunda ise karot numunelerinin su muhtevası %57.3 ve yoğunluğu 1.667 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Kolonun alt, orta ve üst bölgelerinin ortalama dayanımları sırasıyla 2114.6 kPa, 2287.6 kPa ve 2174.2 kPa olmaktadır. Bu değerler birbirine yakın olduğu için kolonun her tarafının aynı özellikte karıştığı söylenebilir. Kolonun ortalama dayanımı 2189.5 kPa olmaktadır. 14 adet karot numunesi incelendiğinde en büyük ve en küçük dayanım arasındaki oran 1.45 olmaktadır (Şekil 4.17). Optimum durumda zemin iyileştirme derecesi %31732 olmaktadır. Bu sonuçlara göre istatistiksel analizlerden elde edilen sonuçlar ile optimum sonuçlar arasında dayanım bakımından %5.2, zemin iyileştirme derecesi bakımından %5.6 fark bulunmaktadır.



Şekil 4.17. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) mohr daireleri

4.2 Uçucu Kül Katkılı DKK Tasarımı

Çalışmanın bu bölümündeki amaç uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkılı DKK imalatı sonucunda araştırılan parametrelerin numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine

olan etkisini araştırmaktır. Enjeksiyon içeriği (bağlayıcı dozajı, bağlayıcı içerisindeki uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı) ve iyileştirilmemiş zeminin kıvamı araştırılan parametrelerdir. Her parametrenin 4 seviyesi olduğu için, Taguchi yöntemine göre 5 parametreli ve 4 seviyeli L16 ortogonal tasarım tablosu kullanılarak deneyler tasarlanmıştır (Tablo 4.11). L16 tasarım tablosu ile hem küçük ölçekli (mikserle karıştırılan zemin-bağlayıcı karışımları) hem de büyük ölçekli (DKK makinesi ile imalat) DKK imalatı yapılarak numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 4.11. Küçük ve büyük ölçekli DKK imalatında kullanılan L16 tasarım tablosu

Tasarım numarası	Parametreler ve seviyeleri				
	Bağlayıcı dozajı (kg/m^3)	Uçucu kül / toplam bağlayıcı (%)	Katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı	Zeminin likitlik indisi
1	200	0	0	0.8	0.4
2	200	20	1	1.0	0.6
3	200	40	3	1.2	0.8
4	200	60	5	1.4	1.0
5	275	0	1	1.2	1.0
6	275	20	0	1.4	0.8
7	275	40	5	0.8	0.6
8	275	60	3	1.0	0.4
9	350	0	3	1.4	0.6
10	350	20	5	1.2	0.4
11	350	40	0	1.0	1.0
12	350	60	1	0.8	0.8
13	425	0	5	1.0	0.8
14	425	20	3	0.8	1.0
15	425	40	1	1.4	0.4
16	425	60	0	1.2	0.6

Enjeksiyonun özellikleri:

Enjeksiyonun zemine farklı tekniklerle aktarıldığı uygulamalarda (derin karıştırma veya jet grout kolonları) enjeksiyon özelliklerinin bilinmesi ve imalat sırasında bu enjeksiyonun homojenliğinin bozulmaması gerekmektedir. Tablo 4.11'de verilen deney programına göre her tasarımdaki enjeksiyon için Marsh hunisi ve sedimentasyon deneyleri yapılmıştır.

Marsh hunisi deneyleri ile enjeksiyonun akma zamanı belirlenmiştir (Tablo 4.12). Her bir tasarım için enjeksiyonun akma zamanı incelendiğinde şunlar söylenebilir: Genellikle enjeksiyonun Marsh hunisinden akma zamanı 27-40 sn arasında değişmektedir. En düşük akma zamanı 26.99 sn ile Tasarım 9'da olmaktadır. Tasarım 9'daki enjeksiyonda uçucu kül bulunmamakta, katkı miktarı %3 ve su/bağlayıcı oranı en fazla değer olan 1.4'tür. En yüksek

akma zamanına sahip enjeksiyon Tasarım 12'de bulunmaktadır. Bu tasarımda uçucu kül oranı en fazla (%60) ve su/bağlayıcı oranı (0.8) en düşük değerlere sahiptir. Katkı miktarı ise %1 ile düşük kalmaktadır. En yoğun kıvama sahip enjeksiyonda bile (Tasarım 12) kolon imalatı sırasında enjeksiyon deliklerden rahatlıkla zemine aktarılabilmiştir. Tekin ve Mollamahmutoğlu (2010) enjeksiyonun zemine aktarılabirliğinin enjeksiyonun reolojik özelliklerine, enjeksiyon basıncına, zeminin tane çapına ve ince tane miktarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 4.12. Marsh hunisi deneyinden elde edilen akma zamanları

Tasarım Numarası	t_1 (sn)	t_2 (sn)	t_3 (sn)	t_{ort} (sn)
1	35.91	33.53	33.53	34.32
2	28.81	30.07	30.16	29.68
3	28.91	29.78	28.51	29.07
4	29.81	30.40	29.50	29.90
5	26.75	27.62	27.19	27.19
6	28.50	27.94	28.32	28.25
7	39.72	39.71	38.62	39.35
8	35.90	37.03	36.00	36.31
9	26.78	27.37	26.81	26.99
10	28.72	27.87	28.75	28.45
11	34.34	34.32	35.29	34.65
12	67.91	72.40	67.41	69.24
13	29.10	27.91	28.53	28.51
14	32.63	33.66	32.65	32.98
15	28.66	28.00	29.06	28.57
16	31.19	32.00	31.68	31.62

Sedimentasyon (çökelme) deney sonuçlarına bakıldığında %10 çökelme yüzdesine en erken 45 dk ile 4, 5, 6, 9 ve 15 numaralı tasarımlarda ulaşılmıştır. 7, 12 ve 14 numaralı tasarımlarda 2 saat sonunda bile %10 çökelme yüzdesine ulaşılmamıştır. Bu tasarımlardaki enjeksiyonlar kararlı bir yapıya sahiptir (Tablo 4.13). Tan ve Zaimoğlu (2004) %20 uçucu kül katkılı enjeksiyonların çökelme yüzdesinin en az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. 7, 12 ve 14 numaralı tasarımlarda uçucu kül miktarı sırasıyla %20, %40 ve %60'dır. Bu tasarımlarda su/bağlayıcı oranı 0.8 iken katkı ve uçucu kül miktarları farklı olsa bile hepsi kararlı yapıya sahip olmuştur. Bu sonuç sedimentasyon sonuçları değerlendirilirken uçucu kül, katkı ve su miktarlarının birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Diğer tasarımlardaki enjeksiyonlar 2 saat sonunda kararsız hale gelmektedir, fakat bu derin karıştırma uygulamasında çok önemli değildir. Çünkü hazırlanan enjeksiyon zemine aktarılana kadar sürekli olarak karıştırılmakta ve tanelerin çökelmesine izin verilmemektedir.

Tablo 4.13. Sedimentasyon deneylerinden elde edilen çökelme yüzdeleri

Tasarım Numarası	Çökelme Yüzdesi (%)									
	15 dk	30 dk	45 dk	60 dk	70 dk	80 dk	90 dk	100 dk	110 dk	120 dk
1	2.1	3.7	5.7	7.3	8.2	9.8	11.0	13.2	16.0	16.2
2	3.7	4.9	7.6	10.0	11.5	14.0	15.9	18.5	19.0	19.5
3	3.0	5.9	8.8	11.4	13.2	14.8	16.1	17.5	19.2	20.9
4	3.8	8.0	12.2	15.0	17.0	19.6	22.0	25.0	29.0	30.0
5	4.0	7.4	11.1	15.1	17.9	20.4	23.4	26.9	31.0	33.0
6	3.4	8.0	12.2	15.8	18.5	21.0	23.8	26.4	28.1	31.8
7	1.1	2.5	4.2	5.8	6.8	7.4	7.8	8.4	8.5	8.6
8	1.6	2.8	4.1	6.0	7.5	8.9	9.8	10.9	12.0	12.8
9	4.3	9.5	13.8	17.3	21.5	23.4	26.0	29.5	32.0	35.0
10	3.2	6.0	8.1	10.9	12.3	14.1	16.0	17.5	20.7	22.2
11	2.8	4.0	5.2	6.9	8.0	8.9	9.8	10.9	11.9	12.8
12	1.0	1.5	1.9	2.0	2.5	3.0	3.1	3.5	3.8	4.0
13	2.9	4.8	6.3	8.2	9.6	11.0	12.4	13.8	15.0	16.4
14	1.3	2.4	3.6	4.8	5.5	6.5	7.0	7.9	8.5	9.2
15	3.2	7.0	10.5	13.5	16.5	17.9	20.0	22.3	24.4	26.1
16	2.0	3.9	5.8	7.3	8.7	9.9	11.1	12.3	13.5	15.0

4.2.1 Büyük ölçekli DKK (derin karıştırma makinesi ile imalat)

Kolon imalatı sırasında, bir önceki bölümde elde edilen optimum imalat parametreleri kullanılmıştır. Buna göre karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk ve enjeksiyon deliklerinin çapı 3 mm seçilmiştir. Bağlayıcı dozajı, uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve su/bağlayıcı oranı her tasarımda farklıdır.

4.2.1.1 Gözlem sonuçları

Kolon imalatı sırasında zemin-enjeksiyon karışımının niteliği hakkında yapılan gözlemler Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14. Büyük ölçekli DKK imalatı sırasında yapılan gözlemler

Tas. Num.	Batma hızı (cm/dk)	Kolon boyu (cm)	Ortalama kolon çapı (cm)	Gözlemler
1	102	77	32.4	Enjeksiyon hacmi ve zeminin su muhtevası az olduğu için karışım katı oldu ve makine zorlandı. Bıçak zemini zor karıştırdı. Zemin bıçağa yapıştı, zeminin parçalanarak enjeksiyonla homojen karışması 4-5 taramadan sonra olmaya başladı. Karıştırma bıçakları dönerken zeminde dalgalanma olmadı.
2	85	70	31.7	Tasarım 1'e göre zemin-bağlayıcı karışımı daha yumuşak kıvamda oldu çünkü su/bağlayıcı oranı ve zeminin su muhtevası daha fazladır. Homojen karışım 2-3 taramadan sonra elde edildi.
3	73	65	30.8	Zemin yumuşak, enjeksiyon hacmi fazla olduğu için karışım oldukça iyi oldu. Homojen karışım 2-3 taramadan sonra elde edildi.
4	64	60	32.1	Su/bağlayıcı oranı ve zeminin su muhtevası Tasarım 2'ye göre daha fazladır. İlk taramadan itibaren homojen karışım elde edildi. Zemin-bağlayıcı karışımı ilk başta çok cıvıktı fakat 3-4 tarama yapıldıktan sonra ortamdaki su emilerek karışımın kıvamı likit kıvama yakın bir görünümdeydi. (Zemin ortamı Tasarım 3 ile aynıdır.)
5	58	60	32.8	Tasarım 4'e benzer bir imalat oldu. (Zemin ortamı Tasarım 4 ile aynıdır.)
6	51	60	33.2	Tasarım 3'e göre daha fazla enjeksiyon kullanıldığından çok daha cıvık bir karışım oldu ve ikinci taramadan itibaren homojen karışım elde edildi. (Zemin ortamı Tasarım 3 ile aynıdır.)
7	72	75	33.0	Zeminin su muhtevası Tasarım 2 ile aynıdır, fakat daha fazla enjeksiyon kullanıldığı için homojen zemin-bağlayıcı karışımının elde edilmesi Tasarım 2'ye göre daha kolay oldu. (Zemin ortamı Tasarım 2 ile aynıdır.)
8	63	80	32.4	Enjeksiyon hacmi Tasarım 1'e göre iki kat fazla olduğundan daha cıvık bir karışım elde edildi. Zemin sert olduğundan parçalanarak enjeksiyonla homojen karışması 3-4 taramadan sonra olmaya başladı. (Zemin ortamı Tasarım 2 ile aynıdır.)
9	43	80	31.8	Tasarım 7'ye benzer bir imalat oldu. Fakat Tasarım 2 ve 7'ye göre karışımın hem su muhtevası daha fazla olmuştur hem de enjeksiyon hacmi diğerlerinden oldukça yüksektir. (Zemin ortamı Tasarım 2 ve 7 ile aynıdır.)
10	46	80	31.3	Tasarım 8'e benzer bir imalat oldu, fakat daha kolay karıştı. (Zemin ortamı Tasarım 1 ve 8 ile aynıdır.)
11	52	70	31.0	İlk taramadan itibaren homojen zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. Tasarım 4 ve 5'e göre enjeksiyon hacmi fazla olmasına rağmen karışımın su muhtevası diğerleriyle aynı olmuştur. (Zemin ortamı Tasarım 4 ve 5 ile aynıdır.)
12	59	80	30.3	2-3 taramadan sonra homojen zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. Tasarım 3 ve 6'ya göre enjeksiyon hacmi fazla olmasına rağmen karışımın su muhtevası diğerleriyle aynı olmuştur. (Zemin ortamı Tasarım 3 ve 6 ile aynıdır.)
13	45	75	30.5	İlk taramadan itibaren homojen zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi çünkü enjeksiyon hacmi Tasarım 3, 6 ve 12'den fazladır. (Zemin ortamı Tasarım 3, 6 ve 12 ile aynıdır.)
14	51	70	30.0	İlk taramadan itibaren homojen zemin-bağlayıcı karışımı elde edildi. Gözlemler Tasarım 11 ile aynıdır. (Zemin ortamı Tasarım 4, 5 ve 11 ile aynıdır.)
15	35	80	30.7	Enjeksiyon hacmi çok fazla fakat zemin sert olduğu için 3-4 taramadan sonra homojen karışım elde edildi. (Zemin ortamı Tasarım 1, 8 ve 10 ile aynıdır.)
16	38	75	30.0	Tasarım 9'a göre homojen karışımın elde edilmesi daha kolay oldu. (Zemin ortamı Tasarım 2, 7 ve 9 ile aynıdır.)

Genel olarak tüm tasarımlarda homojen karışmış DKK imalatı yapılabilmiştir. Burada dikkat çeken husus, bağlayıcı dozajının ve/veya zemin su muhtevasının yüksek olduğu tasarımlarda homojen karışım 1-2 taramadan sonra elde edilebilirken, dozajın az ve/veya zemin su muhtevasının az olduğu tasarımlarda homojen karışım 3-4 taramadan sonra elde edilebilmiştir. Zemin ile enjeksiyonun kolay ve homojen karışması zemin-enjeksiyon karışımının kıvamına bağlı olmaktadır (Grisolia vd., 2012, 2013; Marzano vd., 2012). Daha katı olan karışımlarda tarama sayısı artırılarak homojen karışım elde edilebilir fakat bu DKK imalat maliyetini artıracaktır (Lorenzo ve Bergado, 2000). Kolon imalatı sırasında, sistem parametrelerinin araştırıldığı kısımda olduğu gibi kolon yüzeyi ile iyileştirilmemiş zemin arasında ara yüzey tabakası oluşmuştur (bknz. *alt başlık 4.1.1*).

4.2.1.2 Fiziksel özellikler

Kolon imalatı sırasında karışımın yoğunluğu, bağlayıcı faktörü, bağlayıcı içeriği, toplam su/çimento oranı, karışımın su muhtevası ve hacim oranı gibi özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde enjeksiyon içerisinde çimento ve uçucu kül olduğundan dolayı bağlayıcı içeriği ve hacim oranı bağlayıcı dozajına göre sabit olmamakta ve her tasarım için farklı olmaktadır. Çimento ve uçucu külün yoğunlukları farklı olduğu için bunların farklı oranlarda karıştırılması ve her tasarım için su/bağlayıcı oranının değişkenlik göstermesi nedenlerinden dolayı bu parametreler değişken olmuştur. Bağlayıcı dozajı ve faktörü 250-400 kg/m^3 arasında olduğunda, bağlayıcı içeriği %14.6-37.9 arasında, hacim oranı ise %22.3-75.9 arasında değişmektedir. O'Rourke ve McGinn (2004) bağlayıcı faktörü 250-470 kg/m^3 iken DKK imalatı yaptıklarında kolon bölgesindeki zeminin %60-100'ü kadarının (hacim oranı olarak düşünülebilir) yer değiştirdiğini ifade etmişlerdir. Deney tasarımındaki kolon imalat parametrelerine bağlı olarak, zemin-enjeksiyon karışımında toplam su/bağlayıcı oranı 2.2-4.3 arasında değişkenlik göstermektedir. Zemin-enjeksiyon karışımlarının likitlik indisi değerleri 0.61-1.46 arasında değişmektedir. BRN, enjeksiyonun zemine aktarılmasından sonra karıştırma bıçaklarının batma veya geri çekme sırasındaki (1 m uzunluk için) toplam dönme sayısı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 2.9 ile hesaplanabilir (Mizuno vd., 1988). Kolon imalatı sırasında BRN değerleri 377.5-1286.8 devir/m aralığında değişmektedir (Tablo 4.15).

Tablo 4.15. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri (Büyük ölçekli DKK)

Tasarım numarası	$\alpha_{in\text{-}place}$ (kg/m^3)	α (kg/m^3)	a_w (%)	W_T:W_b	VR (%)	$I_{L,mix}$	BRN (devir/m)
BÖ-1	200	200	14.6	3.20	22.3	0.61	377.5
BÖ-2	200	200	15.6	3.56	27.1	0.87	459.2
BÖ-3	200	200	16.7	3.90	32.1	1.13	544.1
BÖ-4	200	200	17.8	4.32	37.1	1.45	629.0
BÖ-5	275	275	24.5	3.32	41.9	1.46	710.0
BÖ-6	275	275	22.9	3.36	48.0	1.37	813.6
BÖ-7	275	275	21.5	2.66	33.6	0.83	570.3
BÖ-8	275	275	20.0	2.75	39.5	0.79	669.5
BÖ-9	350	350	27.3	2.86	60.9	1.32	1033.6
BÖ-10	350	350	25.5	2.57	55.7	1.01	944.7
BÖ-11	350	350	31.2	2.67	48.1	1.39	816.6
BÖ-12	350	350	29.1	2.34	42.6	1.03	722.1
BÖ-13	425	425	35.4	2.27	57.8	1.25	980.3
BÖ-14	425	425	37.9	2.17	49.8	1.26	845.1
BÖ-15	425	425	30.9	2.53	75.9	1.27	1286.8
BÖ-16	425	425	33.2	2.41	68.3	1.27	1158.4

Zemin, enjeksiyon ve zemin-enjeksiyon karışımlarına ait yoğunluk ve su muhtevası bilgileri hem hesaplama sonucunda hem de kür başında ve sonundaki ölçümler neticesinde elde edilmiştir (Tablo 4.16). Zemin yoğunluğu 1.706-1.854 g/cm^3, enjeksiyon yoğunluğu ise 1.322-1.616 g/cm^3 arasında değişmektedir. Homojen karışım elde edilebilmesi için enjeksiyon yoğunluğunun önemli olduğu farklı araştırmacılar tarafından bildirilmiş olup genellikle 1.5 g/cm^3 olmaktadır (Porbaha 2002; Porbaha vd., 2000, 2001; Lee vd., 2006, 2008). Zemin enjeksiyon karışımlarının yoğunluk değerleri hesaplama sonucunda 1.602-1.811 g/cm^3, kür edilmeden önce (imalattan hemen sonra) 1.599-1.800 g/cm^3 ve kür süresi sonunda 1.584-1.728 g/cm^3 arasında değişmektedir. Hesaplama ile ölçüm sonuçları arasındaki farklılık kolon imalatı sırasında zeminin bir kısmının yanlara doğru itilmesi sonucunda karışım içerisindeki zemin kütlesinin net olarak bilinememesinden kaynaklanmaktadır. Kür öncesinde ve sonunda ölçülen yoğunluk değerlerindeki farklılık ise numunelerin su muhtevalarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Kür süresi sonunda karışımın su muhtevası kür edilmeden önceki duruma göre %5-10 azalmaktadır (Tablo 4.16). Azalan su kil-çimento-uçucu kül arasındaki hidratasyon reaksiyonlarında kullanılmaktadır. Benzer sonuç Horpibulsuk vd. (2005) tarafından da ifade edilmiştir.

Doğal zeminin su muhtevası %35-52 arasında iken zemin enjeksiyon karışımının son durumdaki su muhtevası (kür öncesi) %37.9-66.4 arasında değişmektedir. Zemin enjeksiyonla karıştığı zaman su muhtevası yaklaşık olarak %10-15 artmaktadır. Kolon

çevresinde oluşan ara yüzey tabakasının su muhtevası ise %31.7-61.4 arasında olmaktadır. Ara yüzey tabakasının su muhtevası; tasarım parametrelerine bağlı olarak doğal zeminin su muhtevasından %15'e kadar fazla, kür başındaki karışımdan ise %15'e kadar düşük olabilmektedir (Tablo 4.16).

Tablo 4.16. Kolon imalatında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri (Büyük ölçekli DKK)

Tasarım numarası	Zemin	Enjeksiyon	Zemin-enjeksiyon karışımı						
			Hesaplama		Ölçüm sonuçları				
					Kür öncesi		Kür sonu		
	ρ (g/cm³)	ρ (g/cm³)	ρ (g/cm³)	w (%)	ρ (g/cm³)	w (%)	w* (%)	ρ (g/cm³)	w (%)
BÖ-1	1.854	1.618	1.811	40.7	1.800	37.9	31.7	1.728	37.8
BÖ-2	1.794	1.485	1.728	48.1	1.680	50.7	46.3	1.655	42.7
BÖ-3	1.741	1.391	1.656	55.7	1.599	58.7	51.2	1.654	54.2
BÖ-4	1.706	1.322	1.602	65.3	1.612	66.4	61.4	1.584	59.9
BÖ-5	1.706	1.452	1.631	65.4	1.616	59.5	51.8	1.652	55.0
BÖ-6	1.741	1.376	1.623	62.7	1.653	63.2	54.3	1.636	55.0
BÖ-7	1.794	1.513	1.723	47.1	1.697	50.4	45.1	1.631	44.9
BÖ-8	1.854	1.415	1.730	45.8	1.672	50.9	42.6	1.651	49.2
BÖ-9	1.794	1.396	1.643	61.5	1.737	62.0	45.3	1.667	53.6
BÖ-10	1.854	1.414	1.697	52.3	1.757	53.1	41.2	1.700	47.1
BÖ-11	1.706	1.454	1.624	63.4	1.644	59.6	52.5	1.639	52.2
BÖ-12	1.741	1.488	1.666	52.9	1.633	55.5	49.7	1.664	50.1
BÖ-13	1.741	1.508	1.656	59.4	1.686	58.4	48.8	1.671	56.4
BÖ-14	1.706	1.561	1.658	59.7	1.675	60.5	53.1	1.666	50.9
BÖ-15	1.854	1.350	1.637	59.8	1.636	58.4	50.6	1.657	50.1
BÖ-16	1.794	1.369	1.622	59.9	1.636	59.0	49.2	1.633	52.4

Not: w* kolon çevresinden alınan numunelerin (ara yüzey tabakası) su muhtevasını göstermektedir.

İmal edilen kolonların dayanım, sıkışma indisi ve permeabilite gibi performans değerleri enjeksiyon içeriğine ve imalat parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle proje kapsamında sadece araştırılan parametreler ile kolon performansı arasında ilişki kurmakla yetinilmemiş, zemin-enjeksiyon karışımıyla ilgili bir takım fiziksel özellikler ve kolon imalat parametreleri ile DKK performansı arasında ilişkiler kurulmuştur. Bu ilişkilerin kurulmasında kolon performans (dayanım, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı) bilgileri ile Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'da verilen bir takım imalat parametreleri kullanılmıştır. Kurulan ilişkiler genellikle 28 ve 56 gün kür sürelerinde aynı olduğu için yapılan kıyaslamalar sadece 56 gün

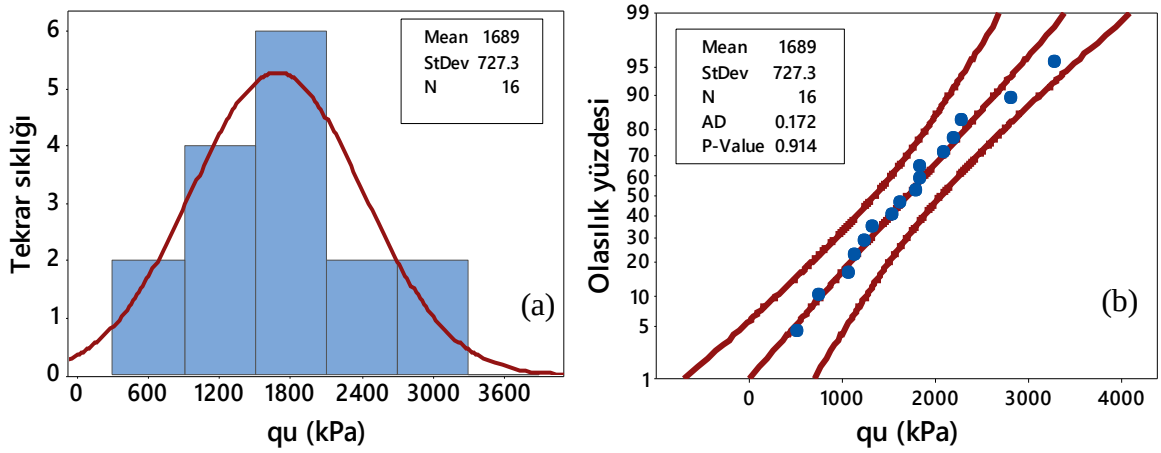
kür süresi için verilmiştir. DKK performansı ve fiziksel özellikler arasındaki ilişkiler her bir deney grubunun sonunda yer alan "tartışma" bölümünde irdelenmiştir.

4.2.1.3 Serbest basınç deneyi (UCS)

Kolonların dayanımı 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda belirlendiği için kolonun yarısından 28. gün, diğer yarısından ise 56. gün sonra karot alınmıştır. Her bir kolonun alt, orta ve üst bölgelerinden alınan karot numuneleri (genellikle her bölgeden 20-25 cm uzunluğunda karot alınmıştır) için yapılan serbest basınç deney sonuçları (UCS) Ek-2'de verilmiştir. Optimum imalat parametreleri belirlenirken hem kolon dayanımı (q_u) hem de zemin iyileştirme oranı (RI) dikkate alınmıştır.

4.2.1.3.1 Kür süresi: 28 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınmış karot numunelerinden elde edilen q_u ve RI sonuçları Tablo 4.17'de verilmiştir. Her bölgenin ortalama dayanımı parantez içerisinde yazılmıştır. Her bir kolondan alınan karot numunelerinin dayanımlarının ortalaması alınarak ortalama kolon dayanımı elde edilmiştir. Kolonların 28 günlük q_u değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma yakındır. %95 güven aralığı için normal olasılık grafiği çizildiğinde, P değeri 0.914 olup 0.005 değerinden büyüktür. Bundan dolayı verilerin dağılımı anlamlıdır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Tablo 4.17. Kolondan alınan karot numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
q_u (kPa) (kolon üst bölgesi)	2042.5 1704.3 2370.6	2070.0 1600.0 1750.0 1260.0	885.0 1270.0	561.0 695.0	1434.3 1392.4 685.0	1240.1 1448.0 1343.1 1821.3 970.8 1219.5 1597.0	2441.7 2519.6 1670.0 2507.0	2195.0 1745.0 2009.0 1186.0 1761.0 1631.0	1775.0 2178.1 2442.2 2035.6 2478.9 1700.0 1950.0 2290.0 2379.3	2139.4 2651.9 2430.8 2637.8 2372.0 1559.2	2600.0 2162.0 2800.0 2455.3 2996.5 2800.0	1786.0 2547.2 1725.6	2714.0 3480.0 3635.1 2987.2 3250.0 3702.6 3180.0 2612.7	3320.0 3620.0 3676.2 4220.5 4104.5 4267.1 3738.8	2892.1 2073.0 3481.0 3121.6	2928.4 2900.0 2646.5 2339.3 2933.7 2754.5
	(2039.1)	(1670.0)	(1077.5)	(628.0)	(1170.6)	(1377.1)	(2284.6)	(1754.5)	(2136.6)	(2298.5)	(2635.6)	(2019.6)	(3195.2)	(3849.6)	(2891.9)	(2750.4)
q_u (kPa) (kolon orta bölgesi)	228.0 155.0	1455.0 1590.0				1238.2 1438.7 1025.3 1436.2 1515.5	2316.8 2565.0 1550.0 2161.1 1055.3	2065.0 1734.0 1262.0 1306.0	1798.4 1430.0 1620.0 1880.0 2126.0	2466.5 1961.7 1997.5 1809.6 2032.0 1731.7	481.3 3018.5 2806.4 932.1 2380.0	1281.0 1063.0 1281.0 3107.0 1541.0	1307.3 2866.0 3618.6 3440.0 4119.4	2083.0 4552.4 3983.3 4950.5 4843.0 1927.3	2436.0 3520.2 3781.1 2287.5 2170.0	982.1 2582.4 2158.8 2463.5
	(191.5)	(1522.5)				(1330.8)	(1929.6)	(1591.8)	(1770.9)	(1999.8)	(1923.7)	(1654.6)	(3070.3)	(3723.3)	(2839.0)	(2046.7)
q_u (kPa) (kolon alt bölgesi)	1260.0 760.0 135.0 1290.0 640.0	280.0 605.6 795.0 672.0 240.0	665.0 551.0 275.0	475.1 390.6 334.5	970.0 1420.8 1273.6 1385.0	812.2 1079.7 1151.8 1721.8	1138.8 1150.0 847.6 1203.3 266.2 590.0	600.0 740.0	811.8 866.0 1132.3	1504.2 2108.7 1708.7	686.6 1380.2 515.9	1141.0 1892.0 2050.0	817.4 1145.1 1798.5	1600.0 2225.0 1160.0 1315.0	1551.7 1162.3 1272.3 1271.3 1085.0	864.0 1771.1 861.7
	(817.0)	(518.5)	(497.0)	(400.1)	(1262.4)	(1191.4)	(866.0)	(670.0)	(936.7)	(1773.9)	(860.9)	(1694.3)	(1253.7)	(1575.0)	(1268.5)	(1165.6)
N [a]	10	11	5	5	7	16	15	12	17	15	14	11	16	17	14	13
$q_{u,max}/q_{u,min}$	15.0	8.6	4.6	2.1	2.1	2.2	9.6	3.7	3.1	1.8	6.3	2.9	5.0	4.3	3.5	3.4
$q_{u,c}$ (kPa) (ortalama)	1058.5	1119.8	729.2	491.2	1223.0	1316.1	1598.8	1519.5	1817.3	2075.0	1806.7	1765.0	2792.1	3269.8	2266.2	2168.2
$q_{u,s}$ (kPa)	74.8	45.9	25.0	6.9	6.9	25.0	45.9	74.8	45.9	74.8	6.9	25.0	25.0	6.9	74.8	45.9
RI (%)	1415	2440	2917	7119	17725	5264	3483	2031	3959	2774	26184	7060	11168	47388	3030	4724

Not: Her bir kolon bölgesinin ortalama dayanımı parantez içinde verilmiştir.

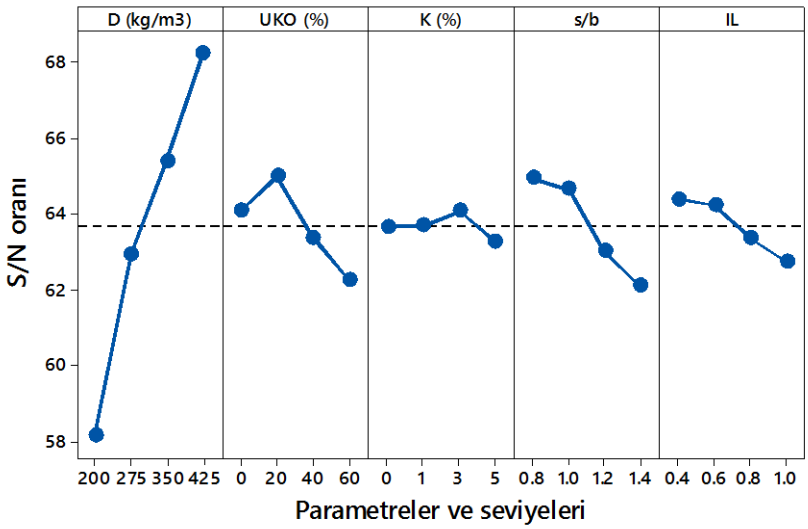
[a] Kolondan alınan karot sayısını göstermektedir.

TÜBİTAK

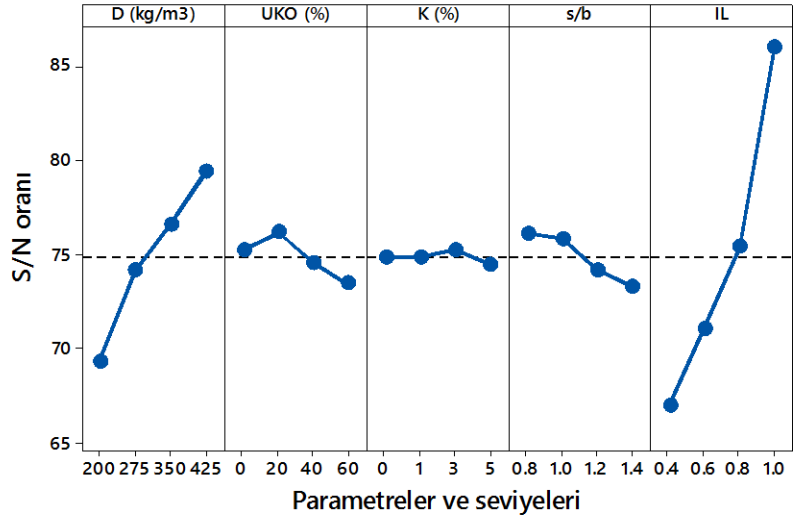
S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

q_u ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. q_u ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı (UKO) %20 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça hem q_u hem de RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_u azalırken, RI artmaktadır. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da ifade edilmektedir (Jacobson vd., 2002; Porbaha vd., 2000; Tan vd., 2002; Matsuo vd., 1996; Miura vd., 2002; Horpibulsuk vd., 2003).



Şekil 4.19. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



Şekil 4.20. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin 28 günlük kolon dayanımı üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. Zeminin likitlik indisi RI üzerinde etkili olan en önemli parametredir. 28 günlük RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.18).

Tablo 4.18. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Kolon dayanımı, q_u (kPa)	1	58.14	64.09	63.68	**64.95**	**64.39**
	2	62.96	**65.00**	63.69	64.67	64.24
	3	65.40	63.39	**64.09**	63.02	63.37
	4	**68.26**	62.28	63.29	62.13	62.75
	Delta	10.12	2.72	0.80	2.82	1.64
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	69.28	75.22	74.82	**76.09**	66.92
	2	74.10	**76.14**	74.83	75.81	71.01
	3	76.54	74.53	**75.23**	74.15	75.42
	4	**79.40**	73.42	74.43	73.26	**85.97**
	Delta	10.12	2.720	0.80	2.82	19.06
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

q_u ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.83, %99.15 ve %95.15 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğundan dolayı bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %84.98, uçucu kül oranı %5.84, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %2.17 ve su/bağlayıcı oranı %6.84 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.17 olmuştur (Tablo 4.19). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.19. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	6742216	84.98%	6742216	2247405	498.32	0.000
Uçucu kül oranı	3	463460	5.84%	463460	154487	34.25	0.008
Katkı oranı	3	171942	2.17%	171942	57314	12.71	0.033
Su/bağlayıcı oranı	3	542944	6.84%	542944	180981	40.13	0.006
Hata	3	13530	0.17%	13530	4510		
Toplam	15	7934091	100.00%				

$$q_u = 1688.5 + \begin{bmatrix} -838.8 \\ -274.2 \\ +177.5 \\ +935.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +34.2 \\ +256.6 \\ -88.3 \\ -202.6 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -101.2 \\ -95.0 \\ +145.4 \\ +50.8 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +234.5 \\ +121.0 \\ -139.7 \\ -215.8 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.98, %99.90 ve %99.43 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %76.33 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %21.51, su/bağlayıcı oranının %1.17 ve uçucu kül oranının %0.97 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelde tüm parametreler için P değeri 0.05'ten küçük olmakta ve anlamlılık düzeyi oldukça yüksektir. Oluşturulan modelin hata payı %0.87 olmuştur (Tablo 4.20). Regresyon denklemi Denklem 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.20. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	0.004928	21.51%	0.004928	0.001643	1075.65	0.000
Uçucu kül oranı	3	0.000223	0.97%	0.000223	0.000074	48.71	0.005
Su/bağlayıcı oranı	3	0.000267	1.17%	0.000267	0.000089	58.37	0.004
Likitlik indisi	3	0.017492	76.33%	0.017492	0.005831	3818.04	0.000
Hata	3	0.000005	0.02%	0.000005	0.000002		
Toplam	15	0.022915	100.00%				

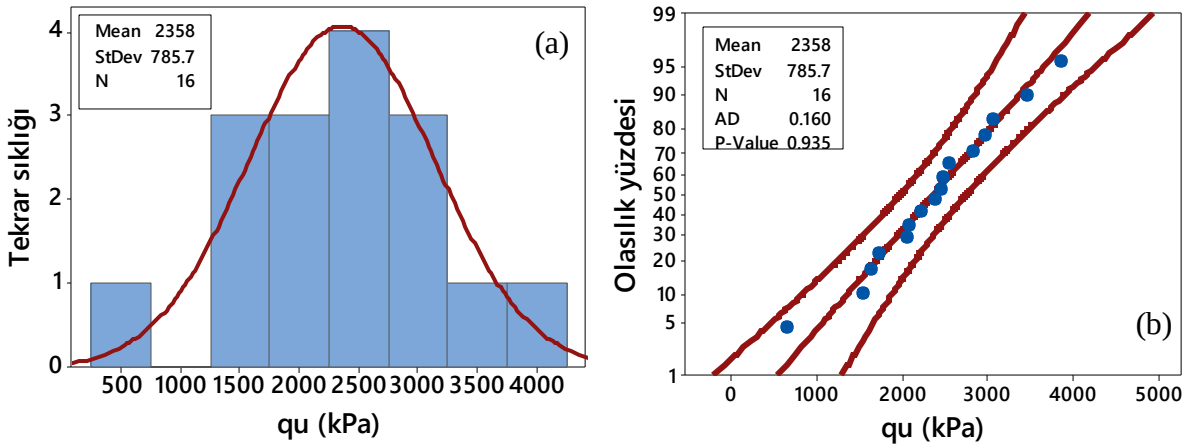
$$-RI(\%)^{-0.13766} = -0.307942 + \begin{bmatrix} -0.026667 \\ -0.002900 \\ +0.008643 \\ +0.020923 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.001610 \\ +0.004924 \\ -0.001317 \\ -0.005217 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.003905 \\ +0.003972 \\ -0.002389 \\ -0.005488 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.038626 \\ -0.016777 \\ +0.004626 \\ +0.050776 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.3.2 Kür süresi: 56 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin q_u ve RI sonuçları Tablo 4.21'de verilmiştir. Her bölgenin ortalama dayanımı parantez içerisinde yazılmıştır. Her bir kolondan alınan karot numunelerinin dayanımlarının ortalaması alınarak ortalama kolon dayanımı elde edilmiştir.

Kolonların 56 günlük ortalama dayanım (q_u) değerleri histogram grafiğine göre normal dağılıma yakındır. %95 güven aralığı için normal olasılık grafiği çizildiğinde, P değeri 0.935 olup 0.005 değerinden büyüktür. Bundan dolayı verilerin dağılımı anlamlıdır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Çizelge 4.21. Kolondan alınan karot numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
q_u (kPa) (kolon üst bölgesi)	2043.0 1902.0	2630.0 3580.0 2770.0 3290.0	1865.0 1550.0 1820.0 1821.2 2086.5 1721.0	787.8 610.7 523.4	1989.0 1588.3 1748.2 1616.3 1863.2 1969.5 1836.3	2678.0 1989.5 2130.2 2101.4 2250.0 2410.9 1716.0	4973.7 3956.6 4230.4 4542.3	1604.3 2714.0 2149.4	2080.2 1884.0 2216.2 2330.0 2867.3 1998.2	2420.0 1692.0 2526.4 2189.0 2100.0	2293.0 2883.1 2433.3 3067.3 2204.0 3231.0	3158.2 1881.4 2533.4 2161.7 4857.1 2617.4	3636.8 3430.0 3050.0 2884.0 3546.3 3443.4	4130.0 5356.0 3458.0 3242.0 3250.0 3315.0 4150.0	2635.3 4491.0 3013.3 4111.0 4319.0 3884.0 3742.3	2620.0 2466.3 3318.0 2438.3 2233.0 2712.0 1887.0
	(1972.5)	(3067.5)	(1810.6)	(641.2)	(1801.5)	(2182.3)	(4425.8)	(2155.9)	(2229.3)	(2185.5)	(2685.3)	(2918.4)	(3229.7)	(3843.0)		(2524.9)
q_u (kPa) (kolon orta bölgesi)		2120.0 3486.4 2680.0 1932.0 2168.2			1521.0 1566.0 1317.0 1745.0 1737.0	1522.1 1523.6 2934.4 1458.0 1815.0	3381.4 1934.7 4444.7 3653.7	2495.5 2832.8 2978.5	2646.0 2286.5 1851.4 2559.2 2715.1	2431.6 2741.2 3025.0 1843.0 2906.0 2296.1 3158.0	2802.0 2241.1 3624.3 2945.0 3981.0	3400.8 3252.5 4363.6 2560.0	3880.0 3718.4 4000.0 3468.0 3881.0 3579.0 2463.0	3290.0 3198.3 3280.0 4480.0 3476.0 5276.0	3386.0 2871.2 3700.0 4135.0 4092.3 4133.0	3066.2 2852.0 3119.0 2136.0 2577.0
		(2477.3)			(1577.2)	(1850.6)	(3353.6)	(2768.9)	(2411.6)	(2628.7)	(3118.7)	(3394.2)	(3569.9)	(3833.4)	(3719.6)	(2750.0)
q_u (kPa) (kolon alt bölgesi)	1600.0 1884.0 1430.0 1288.0 1230.0	854.0 1564.0 795.0 490.0 550.0	1245.0 1181.0 1418.0 1288.0 1026.0 1382.0			1831.2 2318.9	1133.0 906.4 845.4 1438.0		1863.0 2171.1 2097.0 1545.0	2112.0 1695.4	2060.0	1748.7 1640.1 1853.3 2077.2 1725.0 1499.3 1853.3	1360.0 2042.4 2141.0 2602.1 1965.0 3113.0	3500.0 4155.0	2900.0 2340.0 2395.0 2090.0	2450.0 1600.0 1866.0 1532.5
	(1486.4)	(850.6)	(1256.7)			(2075.1)	(1080.7)		(1919.0)	(1903.7)	(2060.0)	(1771.0)	(2203.9)	(3827.5)	(2431.3)	(1862.1)
N [a]	7	14	12	3	12	14	12	6	15	14	12	11	20	15	16	16
$q_{u,max}/q_{u,min}$	1.7	7.3	2.0	1.5	1.5	2.0	5.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.9	2.9	1.7	2.1	2.1
$q_{u,c}$ (kPa) (ortalama)	1625.3	1119.8	1533.6	641.2	1708.1	2048.5	2953.5	2463.0	2207.3	2366.8	2813.8	1765.0	3041.0	3837.1	3456.0	2429.6
$q_{u,s}$ (kPa)	74.8	45.9	25.0	6.9	6.9	25.0	45.9	74.8	45.9	74.8	6.9	25.0	25.0	6.9	74.8	45.9
RI (%)	2173	4499	6134	9293	24755	8194	6435	3293	4809	3164	40780	10144	12164	55610	4620	5293

Not: Her bir kolon bölgesinin ortalama dayanımı parantez içinde verilmiştir.

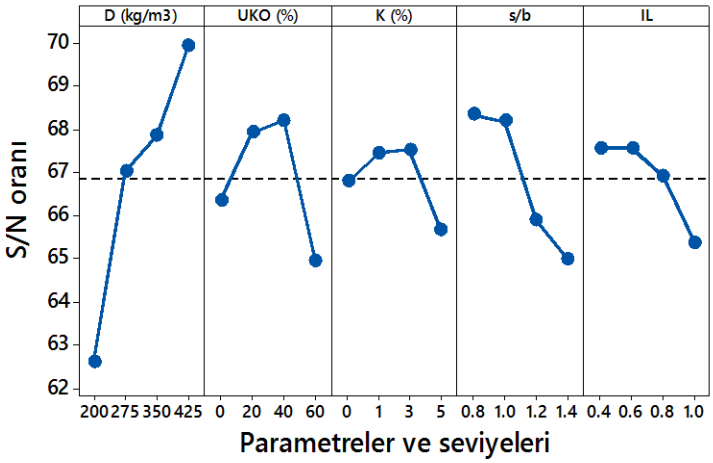
[a] Kolondan alınan karot sayısını göstermektedir.

TÜBİTAK

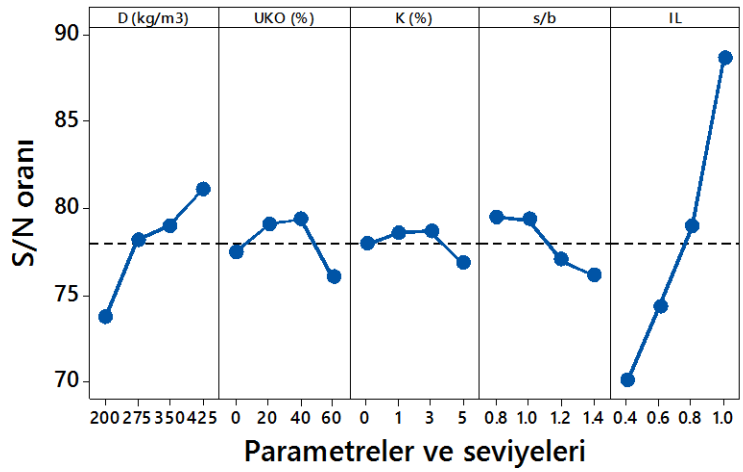
S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

q_u ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir. q_u ve RI; D arttıkça artmakta, UKO %40 ve K %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. s/b oranı arttıkça hem q_u hem de RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça kolon dayanımı azalırken, zemin iyileştirme oranı artmaktadır. Topçu ve Canbaz (2001), bağlayıcı dozajının 300-400 kg/m^3 olduğu durumlarda çimento içerisine %0-40 oranında uçucu kül katmışlar ve 60 gün sonunda optimum uçucu kül miktarını %20 olarak belirlemişlerdir. Türk vd. (2006) optimum uçucu kül miktarını %30-40 olarak belirlemişlerdir. Bu sonuçlar imalat parametrelerine bağlı olarak optimum uçucu kül miktarının değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4.21. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



Şekil 4.22. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin kolon dayanımı üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.22). Zeminin likitlik indisi (su muhtevası) zemin iyileştirme derecesi üzerinde etkili olan en önemli parametredir. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.22).

Tablo 4.22. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Kolon dayanımı, q_u (kPa)	1	62.59	66.35	66.79	**68.35**	**67.58**
	2	67.03	67.92	67.45	68.19	67.57
	3	67.86	**68.22**	**67.53**	65.89	66.92
	4	**69.96**	64.94	65.67	65.00	65.36
	Delta	7.36	3.28	1.85	3.34	2.21
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	73.73	77.49	77.92	**79.48**	70.10
	2	78.17	79.06	78.59	79.33	74.34
	3	78.99	**79.36**	**78.66**	77.03	78.96
	4	**81.09**	76.08	76.81	76.14	**88.59**
	Delta	7.36	3.28	1.85	3.34	18.49
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Kolon dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.10, %95.52 ve %74.49 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. D, UKO ve s/b için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. K için P değeri 0.189 elde edilmiştir ve 0.05 değerinden büyük olmaktadır. Katkı miktarının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olabileceği Noori (2019) tarafından da belirtilmiştir. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %65.21, uçucu kül oranı %13.92, su/bağlayıcı oranı %17.20 ve katkı miktarı %2.78 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.90 olmuştur (Tablo 4.23). Kolon dayanımı sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.23. Kolon dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	1.77E+10	65.21%	1.77E+10	5.89E+09	72.7	0.003
Uçucu kül oranı	3	3.77E+09	13.92%	3.77E+09	1.26E+09	15.52	0.025
Katkı oranı	3	7.52E+08	2.78%	7.52E+08	2.51E+08	3.1	0.189
Su/bağlayıcı	3	4.66E+09	17.20%	4.66E+09	1.55E+09	19.17	0.018
Hata	3	2.43E+08	0.90%	2.43E+08	80982840		
Toplam	15	2.71E+10	100.00%				

$$q_u^{1.46726} = 92073 + \begin{bmatrix} -45849 \\ -5630 \\ +3866 \\ +47613 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -12993 \\ +11928 \\ +18294 \\ -17229 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -9192 \\ +3629 \\ +8899 \\ -3336 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +21727 \\ +10874 \\ -20918 \\ -11683 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.25, %96.25 ve %78.69 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, zemin iyileştirme derecesi üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %82.36 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %12.42, su/bağlayıcı oranının %2.10 ve uçucu kül oranının %2.37 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelde dozaj ve likitlik indisi parametreleri için P değeri 0.05'ten küçük, diğer parametreler için büyük olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.75 olmuştur (Tablo 4.24). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.24. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	0.001123	12.42%	0.001123	0.000374	16.58	0.023
Uçucu kül oranı	3	0.000214	2.37%	0.000214	0.000071	3.16	0.185
Su/bağlayıcı oranı	3	0.00019	2.10%	0.00019	0.000063	2.81	0.209
Likitlik indisi	3	0.007442	82.36%	0.007442	0.002481	109.92	0.001
Hata	3	0.000068	0.75%	0.000068	0.000023		
Toplam	15	0.009036	100.00%				

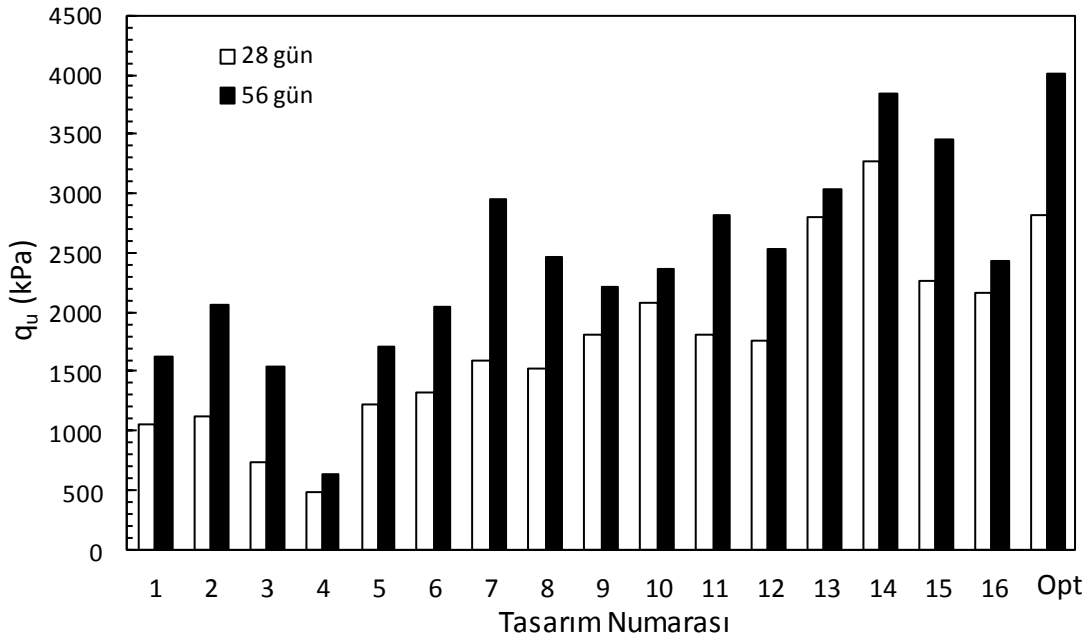
$$-RI(\%)^{-0.233688} = -0.12514 + \begin{bmatrix} -0.01351 \\ +0.00132 \\ +0.00277 \\ +0.00942 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.00211 \\ +0.00221 \\ +0.00465 \\ -0.00465 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.00301 \\ +0.00378 \\ -0.00267 \\ -0.00413 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.02685 \\ -0.01027 \\ +0.00542 \\ +0.03170 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.3.3 Serbest basınç deneyi sonuçlarının tartışılması

28 ve 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerlerine bakıldığında dayanım değerlerinin sırasıyla 491.2-3269.8 kPa ve 641.2-3837.1 kPa arasında değiştiği görülmektedir. Her iki kür süresinde dayanımın en düşük ve en yüksek olduğu tasarımlar sırasıyla 4 ve 14 numaralı tasarımlardır. 4 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı minimum (200 kg/m^3), uçucu kül oranı (%60), su/bağlayıcı oranı (1.4) ve zeminin likitlik indisi (1.0) değerlerinin maksimum olmasından dolayı dayanım minimum çıkmıştır. 14 numaralı tasarımda ise dozaj maksimum (425 kg/m^3), uçucu kül oranı %20 ve su/bağlayıcı oranının (0.8) minimum olmasından dayanım değeri maksimum çıkmıştır. Ayrıca W_T:W_b oranı 4 numaralı tasarımda maksimum iken 14 numaralı tasarımda minimum olmaktadır. 4 numaralı tasarımda, ortamda çok fazla su olduğu için boşluk oranı artmakta ve dayanım düşmektedir.

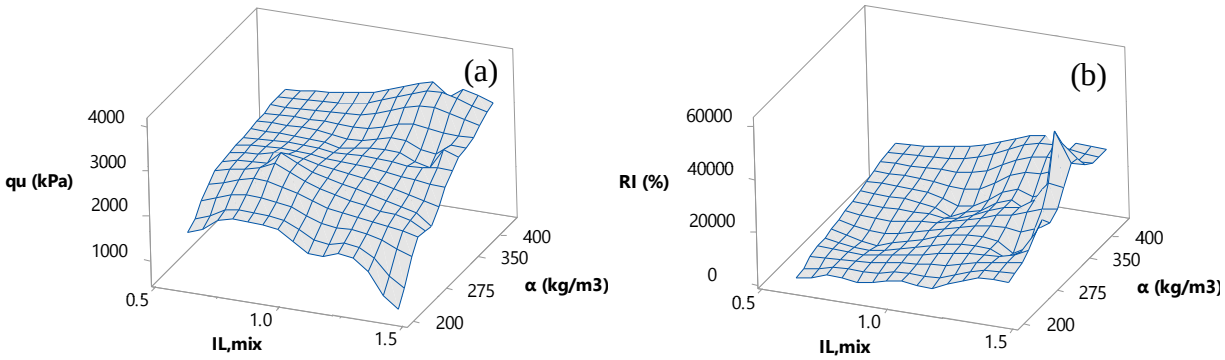
Ortamdaki fazla su nedeniyle kil mineralleri elektrostatik çekim kuvvetlerini kaybetmektedir. Bunun sonucunda çimentolanma veya pozzalanik ürünlerin oluşabileceği kil-kil temas yüzeyleri azalmaktadır (Lorenzo ve Bergado, 2005). Optimum tasarımda 28 günlük serbest basınç dayanımı 2814.5 kPa iken 56 günlük dayanım 4001.9 kPa olmuştur. Serbest basınç mukavemeti bakımından 56 günlük dayanım değerleri 28 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %40 daha büyük olmaktadır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Serbest basınç deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UCS)

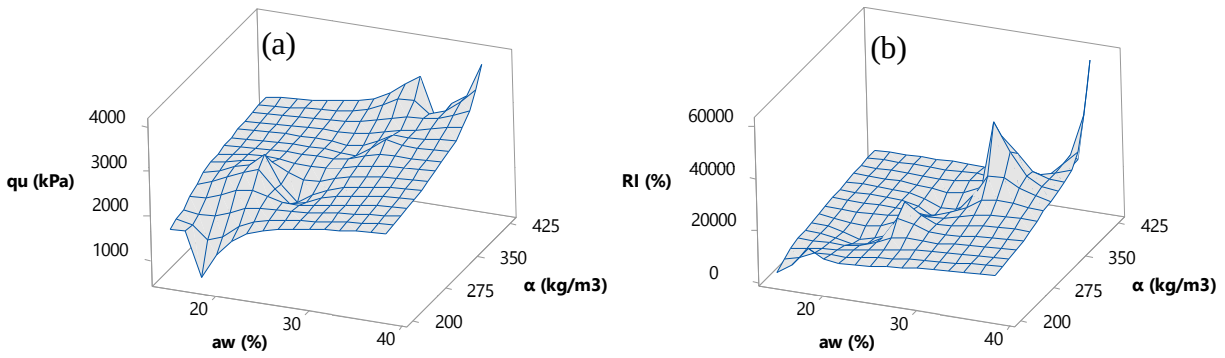
56 günlük q_u ve RI sonuçları ile imalat parametreleri arasındaki ilişkiler aşağıda değerlendirilmiştir.

56 günlük q_u ve RI değerlerinin bağlayıcı faktörü (α) ve karışımın likitlik indisi ($I_{L,mix}$) değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.24'de verilmiştir. α arttıkça q_u ve RI değerleri artmaktadır. Jacobson vd. (2002) tüm zemin türlerinde bağlayıcı dozajı ile dayanımın arttığı sonucuna varmıştır. Taki ve Yang (1990) bağlayıcı dozajındaki artışın dayanıma olan etkisinin killi zeminlerde daha az, kumlu zeminlerde daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Dayanımın maksimum olduğu durumlar; α<300 kg/m^3 iken $I_{L,mix}$=(0.8-1.0)I_L ve α>300 kg/m^3 iken $I_{L,mix}$=(1.2-1.3)I_L iken elde edilmiştir. $I_{l,mix}$ arttıkça zemin iyileştirme derecesinin sürekli arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar birçok araştırmacı tarafından idade edilmiştir (Porbaha vd., 2000; Tan vd., 2002; Matsuo vd., 1996; Miura vd., 2002; Horpibulsuk vd., 2003). Lorenzo ve Bergado (2004, 2006), $I_{L,mix}$=I_L iken dayanımın maksimum olduğunu, 1'den büyük olduğunda dayanımın azaldığını ifade etmişlerdir. Bu yönüyle elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olmaktadır.



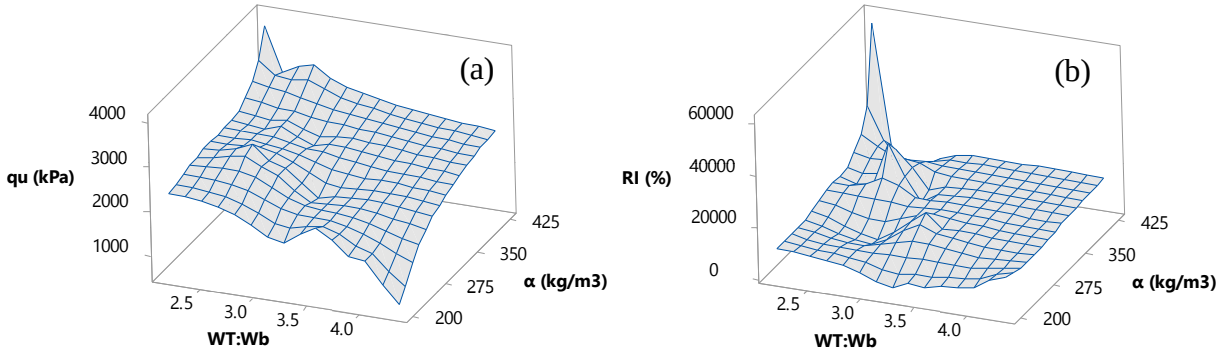
Şekil 4.24. $I_{L,mix}$ ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

56 günlük q_u ve RI değerlerinin bağlayıcı faktörü (α) ve bağlayıcı içeriği (a_w) değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.25'de verilmiştir. Genel olarak α ve a_w arttıkça hem kolon dayanımı hem de zemin iyileştirme derecesi artmaktadır. α<300 kg/m^3 iken a_w>%20 için dayanım artmakta fakat a_w>%30 olduğunda dayanımdaki artış sınırlı olmaktadır. α>300 kg/m^3 iken a_w=%30 olduğunda dayanım maksimum olmaktadır.



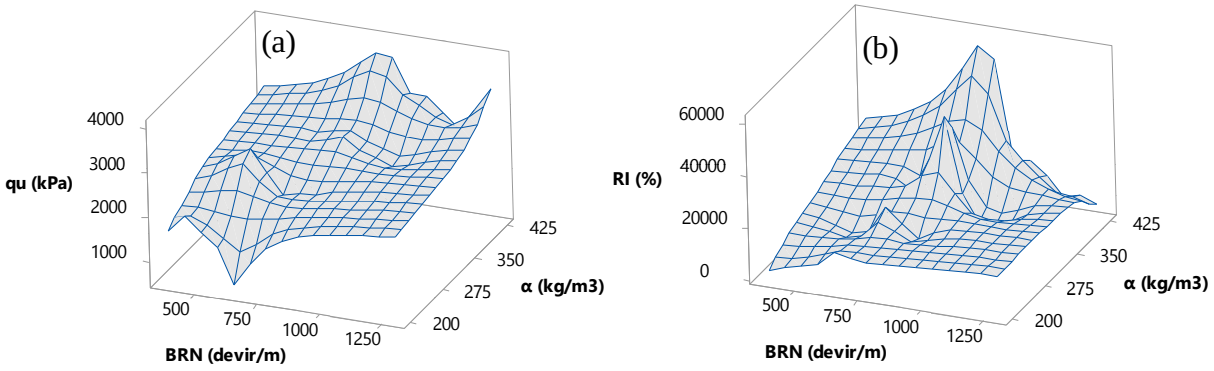
Şekil 4.25. a_w ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

56 günlük q_u ve RI değerlerinin bağlayıcı faktörü (α) ve toplam su/bağlayıcı (W_T:W_b) değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.26'da verilmiştir. Buna göre W_T:W_b azaldığında ve α arttıkça q_u artmaktadır. Benzer davranış RI için de geçerlidir. Burada elde edilen sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Miura vd., 2002; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2005).



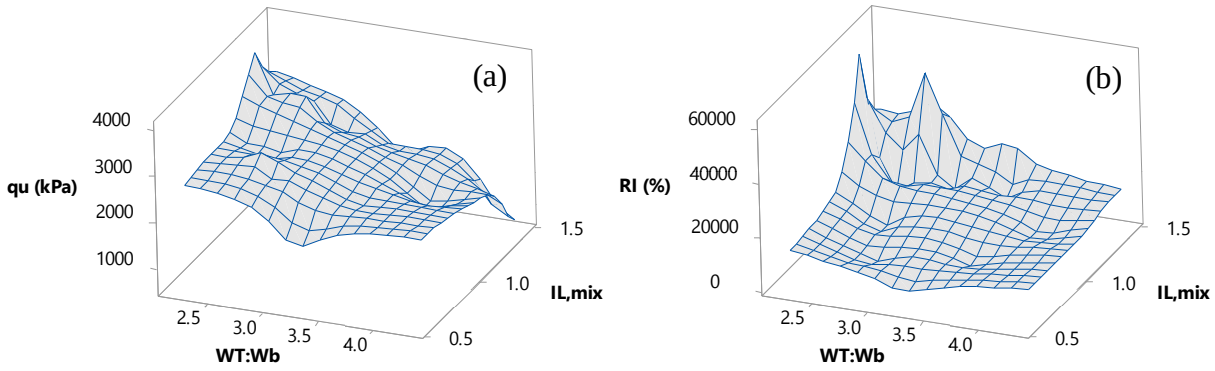
Şekil 4.26. W_T:W_b ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

56 günlük q_u ve RI değerlerinin bağlayıcı faktörü (α) ile BRN değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.27'de verilmiştir. Büyük ölçekli DKK tasarımı yapılırken optimum imalat parametreleri kullanıldığından dolayı tüm tasarımlarda homojen kolon oluşumu olmuştur. Bağlayıcı faktörü ne olursa olsun, BRN 800-900 devir/m değerine kadar q_u ve RI artmakta, 800-900 devir/m'den sonra azalmaya geçmektedir. Pye vd. (2012) iyileştirilmiş zeminin kayma dayanımını 125 kPa elde edebilmek için α=175 kg/m^3 ve BRN=200 devir/m olarak DKK imalatı yapmışlardır. Topolnicki (2009), BRN değeri 332-664 devir/m arasında DKK imalatları yapmış ve BRN sayısı arttıkça zemin-enjeksiyon karışımının homojenliğinin ve dolayısıyla dayanımın arttığını ifade etmiştir.



Şekil 4.27. BRN ve α ile a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

56 günlük q_u ve RI değerlerinin karışımın toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) ve likitlik indisi ($I_{L,mix}$) değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.28'de verilmiştir. W_T:W_b ve/veya $I_{L,mix}$ arttıkça dayanım azalmaktadır.



Şekil 4.28. W_T:W_b ile $I_{L,mix}$ a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

4.2.1.4 Üç eksenli basınç deneyi (UU)

İmal edilen derin karıştırma kolonlarından 28 ve 56 gün sonunda karot numuneleri alınmış ve bunlar üzerinde üç eksenli basınç deneyleri (UU) yapılmıştır. Genellikle kolonun alt, orta ve üst bölgelerinden 2'şer adet numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Alınan bu numuneler UU 1-1, UU 1-2, UU 2-1, UU 2-2, UU 3-1 ve UU 3-2 olarak isimlendirilmiştir. İsimlendirmedeki ilk rakam numunenin kolonun neresinden alındığını göstermektedir. İlk rakam olarak 1, 2 ve 3 karot numunesinin sırasıyla kolonun üst, orta ve alt bölgelerinden alındığını göstermektedir. İsimlendirmedeki ikinci rakam ise üç eksenli basınç deneyi yapılırken numuneye uygulanan hücre basıncını (σ_3) göstermektedir. 1 ve 2 rakamları sırasıyla 200 ve 400 kPa hücre basıncını göstermektedir. Örneğin UU 2-1 olarak isimlendirilen karot numunesi kolonun orta bölgesinden alınmış ve deney sırasında 200 kPa hücre basıncı altında yüklemeye maruz kalmıştır. UU deney sonuçları Ek-3'te verilmiş olup, hem deviatör gerilme-birim boy kısalması (σ_1-σ_3_ε) hem de kırılma zarfı grafikleri birlikte verilmiştir. Kırılma zarfı grafikleri için 200 kPa ve 400 kPa hücre basınçlarında test edilen numunelerin dayanımlarının ortalamaları alınarak ayrı ayrı çizilmiştir.

4.2.1.4.1 Kür süresi: 28 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin 28 günlük UU dayanım sonuçları (q_{uu}) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) Tablo 4.25'de verilmiştir.

Çizelge 4.25. Karot numunelerinin üç eksenli basınç dayanımları ve zemin iyileştirme derecesi (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

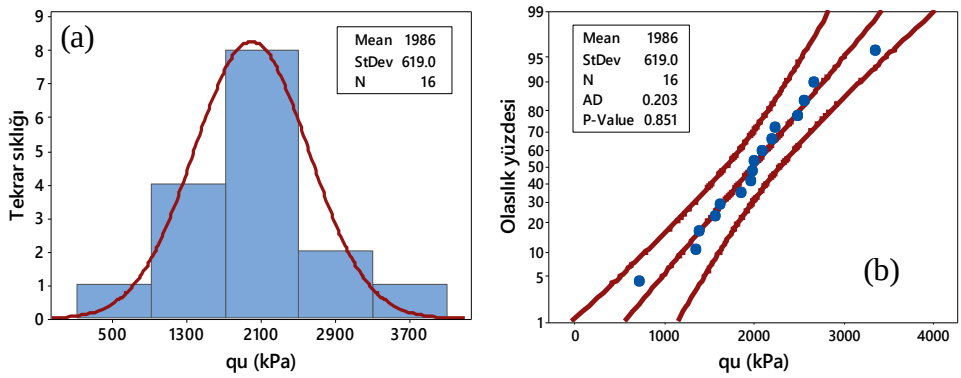
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
q_u (kPa) (kolon üst bölgesi)	2398.3	2352.0	1671.2	810.0	1430.2	1678.1	2757.0	1852.0	2378.0	2899.7	2994.5	2593.5	3370.0	4240.0	1530.0	3230.0
	3002.2	2123.0	1071.0	485.0	1576.0	1692.0	2720.0	2690.0	2563.0	2900.3	3546.6	2477.5	3161.0	2770.0	3309.0	2438.0
	(2700.3)	(2237.5)	(1371.1)	(647.5)	(1503.1)	(1685.1)	(2738.5)	(2271.0)	(2470.5)	(2900.0)	(3270.6)	(2535.5)	(3265.5)	(3505.0)	(2419.5)	(2834.0)
q_u (kPa) (kolon orta bölgesi)	708.2	1704.4		555.0	1268.0	1435.1	2620.0	1509.0	1646.0	2029.5	3707.0	1468.5	2770.0	2593.0	2998.0	1300.0
	587.1	2019.3		924.3	1398.0	1496.6	2987.5	2707.0	2387.4	3272.9	1390.3	1950.0	2920.0	3813.0	2098.0	1915.0
	(647.7)	(1861.9)		(739.7)	(1333.0)	(1465.9)	(2803.5)	(2108.0)	(2016.7)	(2651.2)	(2548.7)	(1709.3)	(2845.0)	(3203.0)	(2548.0)	(1607.5)
q_u (kPa) (kolon alt bölgesi)	1090.6	1418.2			950.0	1415.5	1948.0		1204.0	2016.0	486.0	1598.3	1608.1	3013.0	1821.0	1991.7
	1831.1	1377.1			1367.2	1607.9	1830.0		1625.0	2765.0	1161.6	1603.3	1450.0	3584.3	678.9	1076.0
	(1460.9)	(1397.7)			(1158.6)	(1511.7)	(1889.0)		(1414.5)	(2390.5)	(823.8)	(1600.8)	(1529.1)	(3298.7)	(1250.0)	(1533.9)
N [a]	6	6	2	4	6	6	6	4	6	6	6	6	6	6	6	6
$q_{u,max}/q_{u,min}$	5.1	1.7	1.6	1.9	1.7	1.2	1.6	1.8	2.1	1.6	7.6	1.8	2.3	1.6	4.9	4.1
$q_{u,c}$ (kPa) (ortalama)	1607.0	1833.0	1371.1	693.6	1331.6	1554.2	2477.0	2189.5	1967.2	2648.0	2214.5	1948.8	2546.5	3335.6	2072.5	1991.8
$q_{u,s}$ (kPa)	74.8	45.9	25.0	6.9	6.9	25.0	45.9	74.8	45.9	74.8	6.9	25.0	25.0	6.9	74.8	45.9
RI (%)	2148	3993	5484	10052	19298	6217	5397	2927	4286	3540	32094	7795	10186	48341	2771	4339

Not: Her bir kolon bölgesinin ortalama dayanımı parantez içinde verilmiştir.

[a] Kolondan alınan karot sayısını göstermektedir.

TÜBİTAK

Histogram grafiğine göre dayanım değerleri (q_{uu}) normal dağılıma yakın olmaktadır. %95 güven aralığı için normal olasılık grafiği çizildiğinde, P değeri 0.851 olup 0.005 değerinden büyüktür. Bundan dolayı verilerin anlamlı dağıldığını söyleyebiliriz (Şekil 4.29).

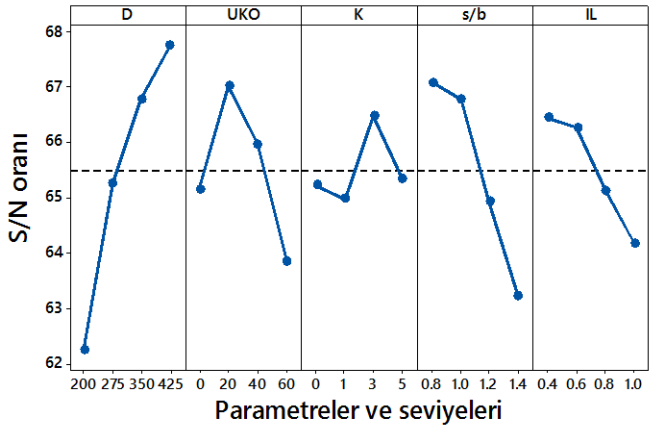


Şekil 4.29. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

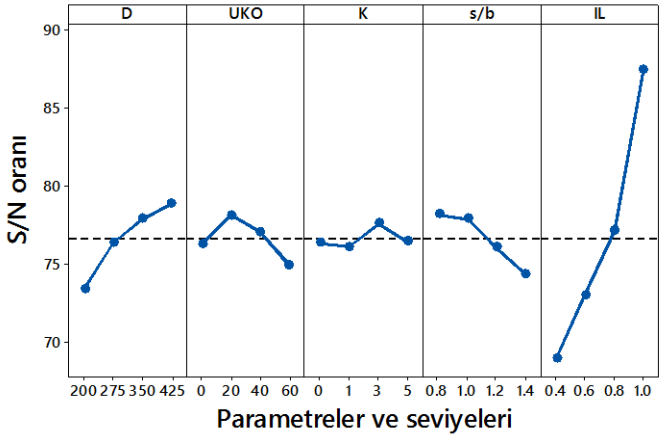
S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

q_{uu} ve RI'ya ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de verilmiştir. q_{uu} ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı (UKO) %20 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_{uu} ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça kolon dayanımı azalırken, zemin iyileştirme oranı artmaktadır. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da elde edilmiştir (Porbaha vd., 2000; Tan vd., 2002; Matsuo vd., 1996; Miura vd., 2002; Horpibulsuk vd., 2003). Tan ve İyisan (1996) ile Çakır (1999), %20 uçucu kül katkısı ile üç eksenli basınç dayanımının arttığını ifade etmiştir.



Şekil 4.30. Kolon dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



Şekil 4.31. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin q_{uu} üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.26).

Tablo 4.26. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Kolon dayanımı, q_{uu} (kPa)	1	62.24	65.15	65.21	**67.06**	**66.43**
	2	65.25	**67.00**	64.97	66.77	66.25
	3	66.76	65.96	**66.47**	64.92	65.12
	4	**67.72**	63.85	65.32	63.21	64.17
	Delta	5.49	3.15	1.5	3.85	2.26
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	73.37	76.29	76.35	**78.20**	68.95
	2	76.39	**78.14**	76.11	77.91	73.01
	3	77.90	77.10	**77.61**	76.06	77.16
	4	**78.86**	74.99	76.46	74.35	**87.39**
	Delta	5.49	3.15	1.5	3.85	18.44
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

q_{uu} sonuçları ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %97.37, %86.83 ve %25.08 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. D, UKO ve s/b için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. K parametresi için P değeri 0.05 değerinden büyük olmaktadır. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %42.17, uçucu kül oranı %17.59, su/bağlayıcı oranı %23.41 ve katkı miktarı %14.20 oranında etkili olmaktadır.

Oluşturulan modelin hata payı %2.63 olmuştur (Tablo 4.27). q_{uu} ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.27. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	4.11E+13	42.17%	4.11E+13	1.37E+13	16.01	0.024
Uçucu kül oranı	3	1.71E+13	17.59%	1.71E+13	5.71E+12	6.68	0.077
Katkı oranı	3	1.38E+13	14.20%	1.38E+13	4.61E+12	5.39	0.100
Su/bağlayıcı	3	2.28E+13	23.41%	2.28E+13	7.60E+12	8.89	0.053
Hata	3	2.57E+12	2.63%	2.57E+12	8.56E+11		
Toplam	15	9.75E+13	100.00%				

$$q_{uu}^2 = 4304865 + \begin{bmatrix} -2229014 \\ -525354 \\ +590994 \\ +2163374 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -627270 \\ +1673441 \\ -1267 \\ -1044903 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -837550 \\ -998457 \\ +1112566 \\ +723441 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +1605536 \\ +580746 \\ -646826 \\ -1539455 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.55, %97.77 ve %87.30 olarak bulunmuştur. Kurulan modelde, RI üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %87.24 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %7.32, su/bağlayıcı oranının %3.27 ve uçucu kül oranının %1.72 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelde dozaj ve likitlik indisi parametreleri için P değeri 0.05'ten küçük, diğer parametreler için büyük olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.45 olmuştur (Tablo 4.28). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.28. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	0.000858	7.32%	0.000858	0.000286	16.39	0.023
Uçucu kül oranı	3	0.000202	1.72%	0.000202	0.000067	3.86	0.148
Su/bağlayıcı	3	0.000383	3.27%	0.000383	0.000128	7.33	0.068
Likitlik indisi	3	0.010228	87.24%	0.010228	0.003409	195.39	0.001
Hata	3	0.000052	0.45%	0.000052	0.000017		
Toplam	15	0.011724	100.00%				

$$-RI(\%)^{-0.204558} = -0.16694 + \begin{bmatrix} -0.01186 \\ -0.00010 \\ +0.00486 \\ +0.00709 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.00135 \\ +0.00471 \\ +0.00154 \\ -0.00491 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.00429 \\ +0.00447 \\ -0.00129 \\ -0.00747 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.03033 \\ -0.01226 \\ +0.00427 \\ +0.03832 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.4.2 Kür süresi 56 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin 56 günlük UU dayanım sonuçları ve zemin iyileştirme derecesi Tablo 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.29. Karot numunelerinin üç eksenli basınç dayanımları ve zemin iyileştirme derecesi (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

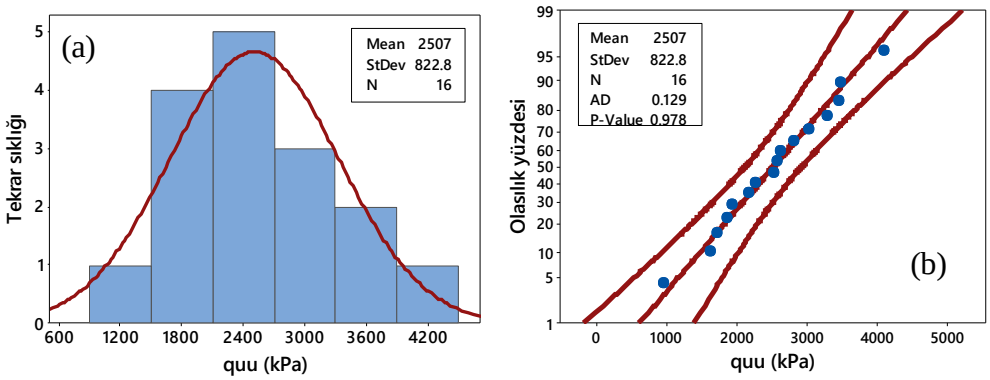
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
q_u (kPa) (kolon üst bölgesi)	2004.6 1881.0 (1942.8)	3455.0 2544.0 (2999.5)	2093.6 1314.0 (1703.8)	1120.9 764.8 (943.0)	1950.5 1958.7 (1954.6)	1915.1 2437.1 (2176.1)	3332.0 2248.1 (2790.1)	2048.5 2749.6 (2148.9)	2737.9 5046.6 (3892.3)	2722.1 2634.2 (2678.2)	3691.3 5104.6 (4398.0)	3855.2 3005.0 (3430.1)	3120.3 3842.6 (3481.5)	5312.9 4855.6 (5084.3)	3858.0 3441.9 (3650.0)	3207.0 2258.2 (2732.6)
q_u (kPa) (kolon orta bölgesi)	1357.7 2418.6 (1888.2)	1699.0 2467.0 (2083.0)	1405.3 1613.0 (1509.2)		1906.2 1100.2 (1503.2)	1515.9 2414.7 (1965.3)	2246.8 3677.1 (2962.0)	2528.3 3118.0 (2528.8)	3731.0 4921.1 (4326.1)	2538.9 2610.0 (2574.5)	4803.2 5026.2 (4914.7)	2937.0 3616.3 (3276.7)	3742.3 3402.5 (3572.4)	4563.0 4033.0 (4298.0)	4281.4 3829.0 (4055.2)	3536.0 2956.0 (3246.0)
q_u (kPa) (kolon alt bölgesi)		1397.0 1279.0 (1338.0)			1618.3 1675.4 (1646.9)	1496.2 1211.0 (1353.6)	2504.9 2748.6 (2626.8)		1039.6 1729.7 (1384.7)	2181.0 2294.0 (2237.5)	1107.1 1101.4 (1104.3)	1962.0 2679.2 (2320.6)	2630.0 2927.1 (2778.6)	3346.0 2409.0 (2877.5)	3200.0 2040.0 (2620.0)	1352.1 1968.0 (1660.1)
N [a]	4	6	4	2	6	6	6	4	6	6	6	6	6	6	6	6
$q_{u,max}/q_{u,min}$	1.8	2.7	1.6	1.5	1.8	2	1.6	1.5	4.8	1.2	4.3	1.9	1.4	2.2	2.4	2.6
$q_{u,c}$ (kPa) (ortalama)	1915.0	2140.2	1606.5	943.0	1701.6	1832.0	2792.0	2611.2	2244.7	2496.7	3472.3	3009.1	3277.5	4086.7	3441.7	2546.2
$q_{u,s}$ (kPa)	74.8	45.9	25.0	6.9	6.9	25.0	45.9	74.8	45.9	74.8	6.9	25.0	25.0	6.9	74.8	45.9
RI (%)	2560	4663	6426	13667	24661	7328	6083	3491	4890	3338	50323	12036	13110	59228	4601	5547

Not: Her bir kolon bölgesinin ortalama dayanımı parantez içinde verilmiştir.

[a] Kolondan alınan karot sayısını göstermektedir.

TÜBİTAK

56 günlük dayanım değerleri (UU) histogram grafiğine göre normal dağılıma sahiptir. %95 güven aralığı için normal olasılık grafiği çizildiğinde, P değeri 0.978 olup 0.005 değerinden büyüktür. Bundan dolayı verilerin anlamlı dağıldığını söyleyebiliriz (Şekil 4.32).

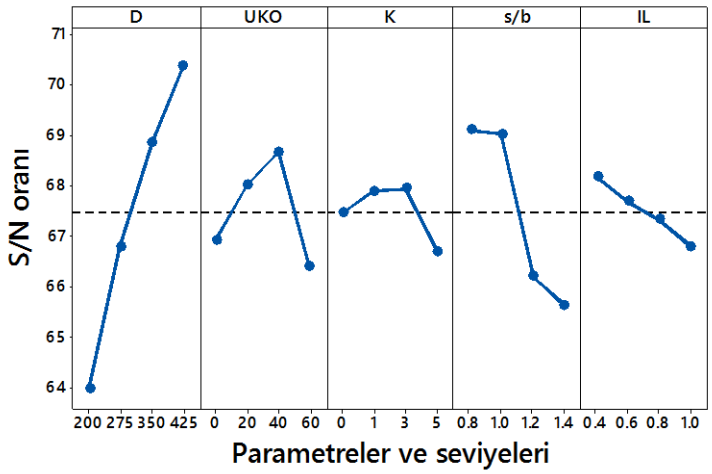


Şekil 4.32. Kolon dayanımı için elde edilen a) histogram grafiği ve b) normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

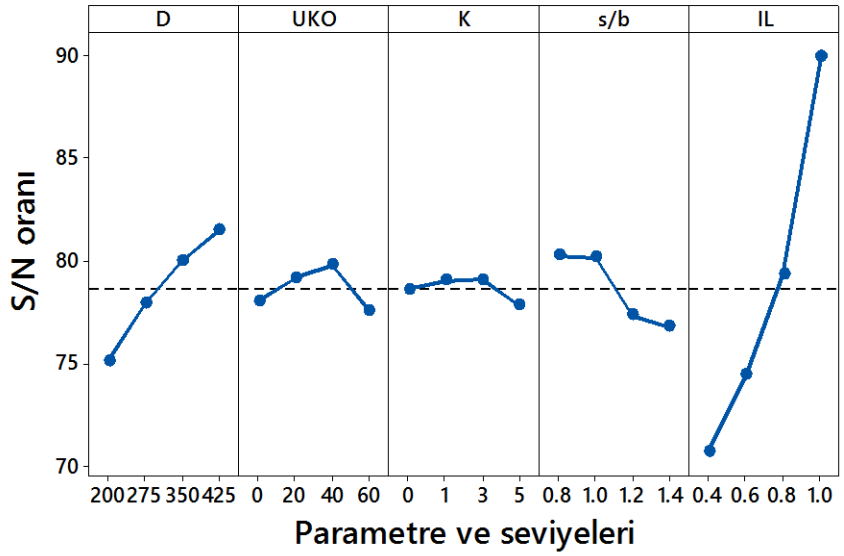
S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

56 günlük q_{uu} ve RI değerlerine ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de verilmiştir. q_{uu} ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_{uu} ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_{uu} azalırken, RI artmaktadır.



Şekil 4.33. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



Şekil 4.34. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin 56 günlük q_{uu} üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K oranı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.30).

Tablo 4.30. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Kolon dayanımı, q_{uu} (kPa)	1	63.97	66.90	67.46	**69.09**	**68.17**
	2	66.78	68.01	67.88	69.02	67.67
	3	68.84	**68.65**	**67.93**	66.20	67.31
	4	**70.35**	66.38	66.67	65.63	66.79
	Delta	6.38	2.27	1.26	3.46	1.38
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	75.10	78.04	78.60	**80.23**	70.69
	2	77.92	79.15	79.02	80.15	74.43
	3	79.98	**79.78**	**79.06**	77.34	79.36
	4	**81.49**	77.52	77.80	76.76	**90.01**
	Delta	6.38	2.27	1.26	3.46	19.32
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

56 günlük q_{uu} sonuçları ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.00, %95.00 ve %71.56 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model

kabul edilebilir. D ve s/b parametreleri için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. UKO ve K parametreleri için P değerleri 0.05 değerinden büyük olmaktadır. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %62.50, uçucu kül oranı %8.77, su/bağlayıcı oranı %26.06 ve katkı oranı %1.67 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %1 olmuştur (Tablo 4.31). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.31. Kolon dayanımı (q_{uu}) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	6346790	62.50%	6346790	2115597	62.51	0.003
Uçucu kül oranı	3	890601	8.77%	890601	296867	8.77	0.054
Katkı oranı	3	169907	1.67%	169907	56636	1.67	0.341
Su/bağlayıcı	3	2646661	26.06%	2646661	882220	26.07	0.012
Hata	3	101540	1.00%	101540	33847		
Toplam	15	10155498	100.00%				

$$q_{uu} = 2507.3 + \begin{bmatrix} -856.1 \\ -273.1 \\ +298.4 \\ +830.7 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -222.6 \\ +131.6 \\ +320.8 \\ -229.9 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -65.9 \\ +65.9 \\ +130.0 \\ -130.0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +443.4 \\ +368.0 \\ -419.5 \\ -391.9 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.66, %98.32 ve %90.43 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %86.56 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %9.01, su/bağlayıcı oranının %3.08 ve

uçucu kül oranının %1.02 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelde dozaj ve likitlik indisi parametreleri için P değeri 0.05'ten küçük, diğer parametreler için büyük olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.34 olmuştur (Tablo 4.32). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.32. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	0.001544	9.01%	0.001544	0.000515	26.8	0.011
Uçucu kül oranı	3	0.000174	1.02%	0.000174	0.000058	3.02	0.194
Su/bağlayıcı oranı	3	0.000527	3.08%	0.000527	0.000176	9.15	0.051
Likitlik indisi	3	0.014829	86.56%	0.014829	0.004943	257.39	0.000
Hata	3	0.000058	0.34%	0.000058	0.000019		
Toplam	15	0.017131	100.00%				

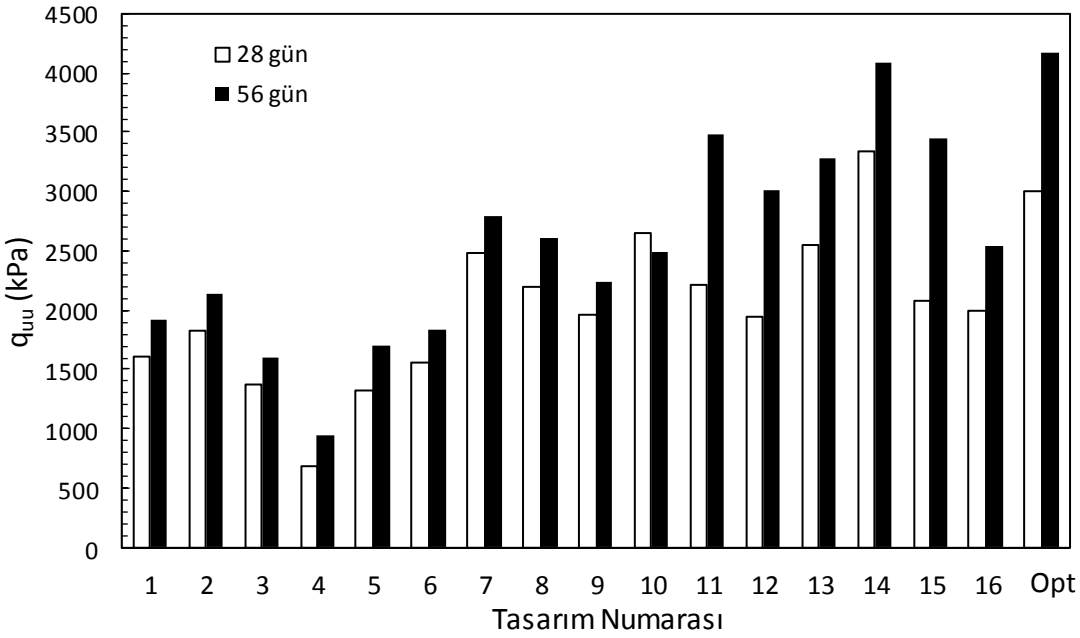
$$-RI(\%)^{-0.156123} = -0.24572 + \begin{bmatrix} -0.01469 \\ -0.00223 \\ +0.00513 \\ +0.01179 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.00252 \\ +0.00115 \\ +0.00486 \\ -0.00349 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.00553 \\ +0.00589 \\ -0.00494 \\ -0.00648 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.03510 \\ -0.01672 \\ +0.00526 \\ +0.04656 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.4.3 Üç eksenli basınç deneyi sonuçlarının tartışılması

Üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında minimum dayanımın Tasarım 4'te, maksimum dayanımın Tasarım 14'te olduğu görülmektedir. 28. günde en düşük dayanım 693.6 kPa, en büyük dayanım 3335.6 kPa olurken, 56. günde en düşük dayanım 943 kPa ve en büyük dayanım 4086.7 kPa olmuştur. Optimum tasarımda ise 28 günlük üç eksenli basınç dayanımı 3010 kPa iken 56 günlük dayanım 4166.2 kPa olmuştur. Üç eksenli basınç

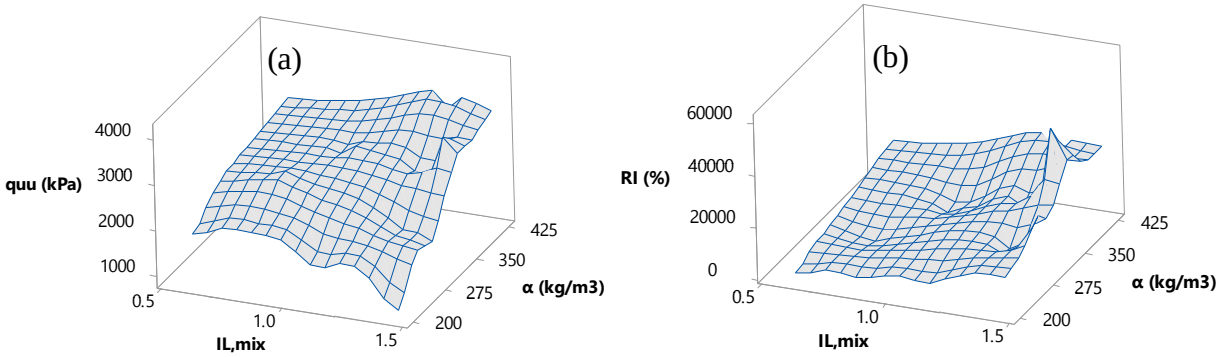
mukavemeti bakımından 56 günlük dayanım değerleri 28 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %30 daha büyük olmaktadır (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. Üç eksenli basınç deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, UU)

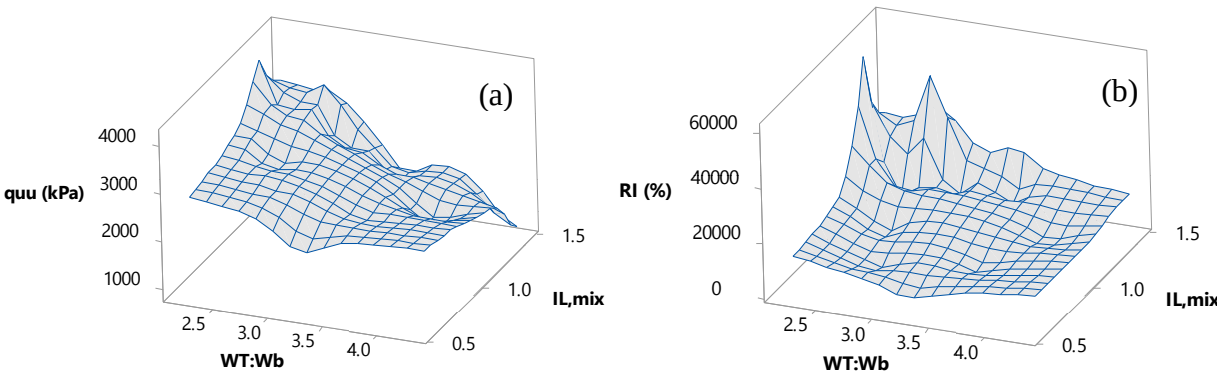
56 günlük q_{uu} ve RI sonuçları ile imalat parametreleri arasındaki ilişkiler aşağıda değerlendirilmiştir.

Bağlayıcı faktörü arttıkça 56 günlük üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi artmaktadır. Zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi 1.3 değerine kadar dayanım artarken, $I_{L,mix}$>1.3 olduğunda dayanım azaldığı görülmektedir. Bir başka açıdan bakılırsa; bağlayıcı faktörü 300 kg/m^3'ten az olduğunda en iyi karışım likit limit civarında olurken, bağlayıcı faktörü 300 kg/m^3'ten büyük olduğunda en iyi karışım 1.3$I_{L,mix}$ civarında olmaktadır. $I_{I,mix}$ arttıkça zemin iyileştirme derecesinin sürekli arttığı görülmektedir (Şekil 4.36).



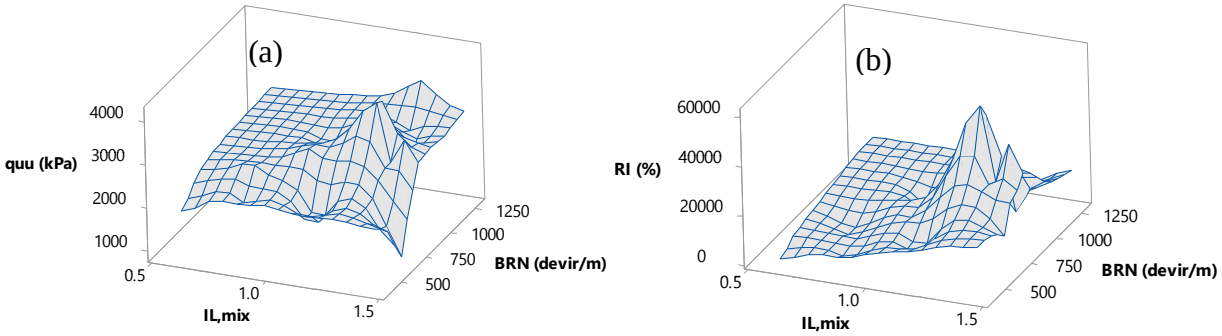
Şekil 4.36. $I_{L,mix}$ ve α ile a) q_{uu} ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ve/veya karışımın likitlik indisi arttıkça üç eksenli basınç dayanımı azalmaktadır. W_T:W_b 3'ten daha az durumda olduğunda $I_{L,mix}$ değeri 1'den fazla olduğunda dayanımın daha fazla arttığı görülmektedir. Zemin iyileştirme oranı karışımın likitlik indisi 1'in üzerinde ve toplam su/bağlayıcı 3'ten daha az olduğu durumlarda oldukça fazla olmuştur (Şekil 4.37). W_T:W_b ile dayanımın ters orantılı oluşuyla ilgili sonuç farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Miura vd., 2002; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2005).



Şekil 4.37. W_T:W_b ile $I_{L,mix}$ a) q_u ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

56 günlük üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme değerlerinin karışımın likitlik indisi ve BRN değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.38'de verilmiştir. Karışımın likitlik indisi 1.3'e kadar ve/veya BRN arttıkça dayanım artmaktadır. RI, BRN veya $I_{L,mix}$ arttıkça artmaktadır.



Şekil 4.38. BRN ve $I_{L,mix}$ ile a) q_{uu} ve b) RI arasındaki ilişki (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

4.2.1.5 Konsolidasyon deneyi

İmal edilen derin karıştırma kolonlarından alt, orta ve üst bölgelerinden karot numuneleri alınmıştır. Her bir bölgeden en az 1 adet olmak üzere konsolidasyon deneyi yapılmıştır. 50 mm çapında alınan karot numunelerinin boyları 20 mm olacak şekilde elektrikli testere ile kesilerek numuneler konsolidasyon ringi içerisine yerleştirilmiş ve deneye geçilmiştir. Deney sırasında numuneye 50-100-200-400-800 ve 1600 kPa gerilme değerlerinde yükleme yapılmış ve oturmalar bitene kadar numunedeki boy değişimleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra numune üzerindeki yük 100 kPa gerilme değerine boşaltılarak numune boyundaki artış kayıt edilmiştir. Deney sonucunda numunenin sıkışma indisi (Cc), kabarma indisi (Cs) ve boşluk oranı değişimi (Δe) parametreleri belirlenmiştir. Konsolidasyon deneyi sonuçları Ek-4'te verilmiştir.

4.2.1.5.1 Kür süresi: 28 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin 28 günlük konsolidasyon deneyi sonuçları (Cc, Cs, Δe, Δe/e) Tablo 4.33'de verilmiştir. Enjeksiyon içeriğinin (bağlayıcı dozajı, uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı ve su/bağlayıcı oranı) ve zemin kıvamının DKK konsolidasyon davranışı (28 gün) üzerindeki etkisi değerlendirilirken sadece sıkışma indisi (Cc) dikkate alınmıştır.

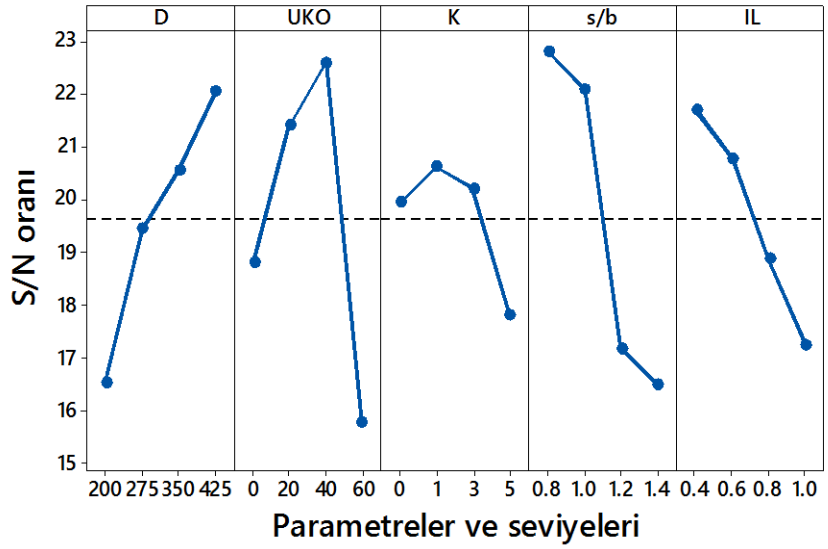
Tablo 4.33. Kolonlar için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Tasarım No	Sıkışma indisi (Cc)	Kabarma indisi (Cs)	Boşluk oranındaki değişim (Δe)	Boşluk oranındaki yüzdece değişim, % (Δe/e)
BÖ-1	0.087	0.013	0.067	5.1
BÖ-2	0.072	0.016	0.065	4.6
BÖ-3	0.145	0.017	0.120	7.4
BÖ-4	0.543	0.021	0.300	17.6
BÖ-5	0.183	0.020	0.119	7.0
BÖ-6	0.132	0.025	0.103	5.8
BÖ-7	0.058	0.013	0.051	3.8
BÖ-8	0.093	0.016	0.096	7.0
BÖ-9	0.122	0.015	0.093	5.7
BÖ-10	0.099	0.016	0.098	6.6
BÖ-11	0.064	0.016	0.073	5.0
BÖ-12	0.100	0.016	0.104	8.2
BÖ-13	0.089	0.016	0.098	5.6
BÖ-14	0.056	0.014	0.061	3.8
BÖ-15	0.057	0.011	0.050	3.8
BÖ-16	0.139	0.017	0.099	7.3

S/N analizi sonuçları

Bu kısımdaki amaç, en düşük sıkışma indisi (Cc) elde etmek olduğundan dolayı S/N analizi yapılırken "en düşük en iyi (smaller is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

28 günlük sıkışma indisine (Cc) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.39'da verilmiştir. Kolonların sıkışma indisi; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %1'e kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) ve zeminin likitlik indisi (I_L) arttıkça kolonun sıkışma indisi artmaktadır.



Şekil 4.39. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin 28 günlük sıkışma indisi (Cc) üzerindeki etki sırası UKO, s/b, D, I_L ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.34).

Tablo 4.34. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Sıkışma indisi (Cc)	1	16.54	18.81	19.95	**22.78**	**21.70**
	2	19.46	21.40	**20.62**	22.09	20.76
	3	20.53	**22.57**	20.20	17.19	18.86
	4	**22.03**	15.78	17.80	16.51	17.25
	Delta	5.49	6.79	2.82	6.27	4.45
	Sıralama	3	1	5	2	4

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Sıkışma indisi (Cc) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %98.27, %91.35 ve %50.80 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. UKO ve s/b parametreleri için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile sonuçlar arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. D ve I_L parametreleri için ise P değerleri 0.05 değerinden büyük olmaktadır. Sıkışma indisi üzerinde bağlayıcı dozajı %15.37, uçucu kül oranı %35.52, su/bağlayıcı oranı %38.47 ve zemin likitlik indisi %8.91 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %1.73 olmuştur (Tablo 4.35). Sıkışma indisi sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.35. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	50.366	15.37%	50.366	16.789	8.89	0.053
Uçucu kül oranı	3	116.401	35.52%	116.401	38.8	20.54	0.017
Su/bağlayıcı oranı	3	126.085	38.47%	126.085	42.028	22.24	0.015
Likitlik indisi	3	29.196	8.91%	29.196	9.732	5.15	0.106
Hata	3	5.668	1.73%	5.668	1.889		
Toplam	15	327.717	100.00%				

$$-C_c^{-1} = -10.816 + \begin{bmatrix} +2.286 \\ +0.507 \\ -0.130 \\ -2.663 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +1.724 \\ -1.563 \\ -3.521 \\ +3.360 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -3.401 \\ -2.046 \\ +3.407 \\ +2.040 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -1.645 \\ -0.838 \\ +1.877 \\ +0.606 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.5.2 Kür süresi: 56 gün

İmal edilen kolonların üst, orta ve alt bölgelerinden alınan karot numunelerinin 56 günlük konsolidasyon deneyi sonuçları (Cc, Cs, Δe, Δe/e) Tablo 4.36'da verilmiştir.

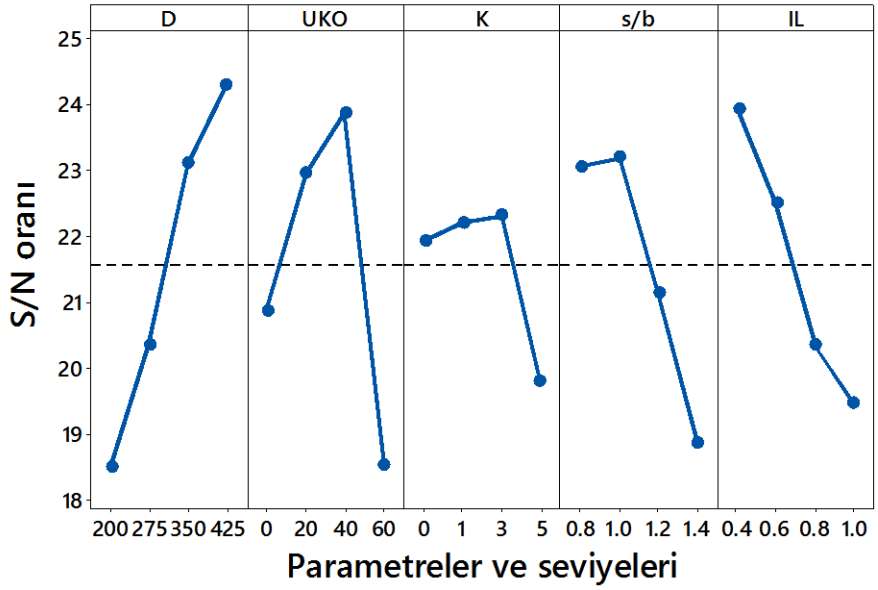
Tablo 4.36. Kolonlar için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Tasarım No	Sıkışma indisi (Cc)	Kabarma indisi (Cs)	Boşluk oranındaki değişim (Δe)	Boşluk oranındaki yüzdece değişim, % (Δe/e)
BÖ-1	0.079	0.017	0.077	6.6
BÖ-2	0.070	0.021	0.08	5.8
BÖ-3	0.101	0.021	0.136	8.3
BÖ-4	0.359	0.018	0.206	10.7
BÖ-5	0.129	0.018	0.094	5.5
BÖ-6	0.123	0.015	0.087	4.7
BÖ-7	0.068	0.017	0.063	4.6
BÖ-8	0.079	0.017	0.151	10.7
BÖ-9	0.085	0.015	0.073	4.5
BÖ-10	0.058	0.019	0.099	6.5
BÖ-11	0.054	0.009	0.05	3.3
BÖ-12	0.089	0.012	0.072	4.9
BÖ-13	0.077	0.012	0.063	3.7
BÖ-14	0.051	0.016	0.078	5.4
BÖ-15	0.045	0.012	0.073	5.1
BÖ-16	0.078	0.018	0.082	6.1

S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en düşük en iyi (smaller is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

56 günlük sıkışma indisine (Cc) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.40'da verilmiştir. Kolonların sıkışma indisi; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3 ve su/bağlayıcı oranı (s/b) 1'e kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Zeminin likitlik indisi (I_L) arttıkça kolonun sıkışma indisi artmaktadır. Araştırılan parametrelerin 56 günlük sıkışma indisi (Cc) üzerindeki etki sırası D, UKO, I_L, s/b ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.37).



Şekil 4.40. Cc için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

Tablo 4.37. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Sıkışma indisi (Cc)	1	18.49	20.88	21.94	23.06	**23.95**
	2	20.35	22.97	22.21	**23.20**	22.50
	3	23.13	**23.89**	**22.31**	21.15	20.35
	4	**24.30**	18.54	19.81	18.86	19.47
	Delta	5.81	5.35	2.5	4.34	4.47
	Sıralama	1	2	5	4	3

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Sıkışma indisi (Cc) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %97.58, %87.91 ve %31.23 olarak bulunmuştur. D ve UKO parametreleri için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. s/b ve I_L parametreleri için P 0.05 değerinden büyük olmaktadır. 56 günlük sıkışma indisi üzerinde bağlayıcı dozajı %36.88, uçucu kül oranı %30.75, su/bağlayıcı oranı %10.59 ve zemin likitlik indisi %19.36 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %2.42 olmuştur (Tablo 4.38). Sıkışma indisi sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.38. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

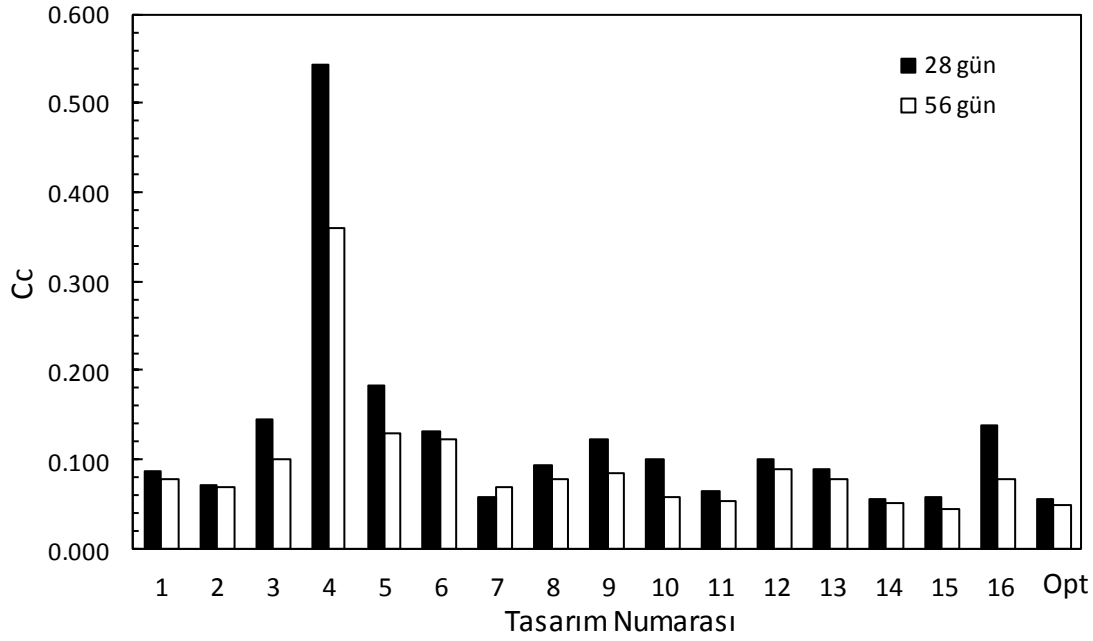
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	129.709	36.88%	129.709	43.236	15.26	0.025
Uçucu kül oranı	3	108.144	30.75%	108.144	36.048	12.72	0.033
Su/bağlayıcı oranı	3	37.231	10.59%	37.231	12.41	4.38	0.128
Likitlik indisi	3	68.098	19.36%	68.098	22.699	8.01	0.061
Hata	3	8.502	2.42%	8.502	2.834		
Toplam	15	351.685	100.00%				

$$-C_c{}^{-1} = -13.082 + \begin{bmatrix} +3.174 \\ +2.261 \\ -1.609 \\ -3.827 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +1.792 \\ -1.734 \\ -3.255 \\ +3.198 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -1.470 \\ -1.539 \\ +1.153 \\ +1.856 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -3.122 \\ -0.312 \\ +2.518 \\ +0.916 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.5.3 Konsolidasyon deney sonuçlarının tartışılması

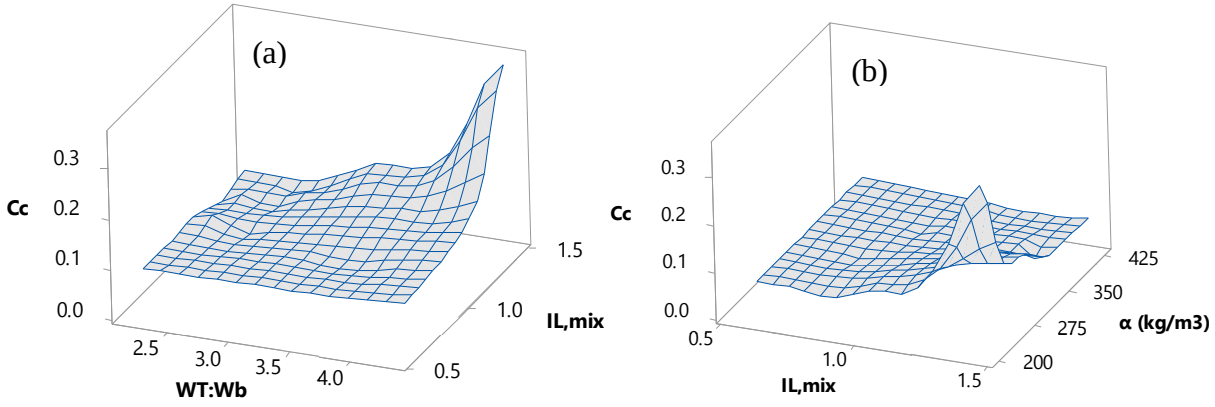
Konsolidasyon deney sonuçlarına bakıldığında sıkışma indisinin en büyük olduğu tasarım 4 olurken, en düşük olduğu tasarım 28 günde 14, 56 günde 15 numaralı tasarımlar olmaktadır. 56 günlük sıkışma indisi değerleri 28 günlük sıkışma indisi değerlerinden ortalama olarak %18 daha küçük olmaktadır (Şekil 4.41).



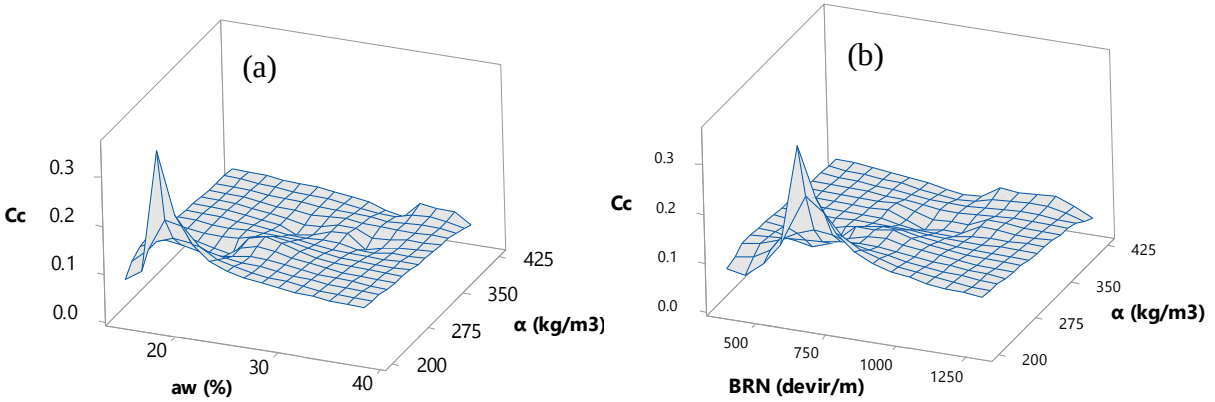
Şekil 4.41. Konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK)

56 günlük sıkışma indisi (Cc) sonuçları ile imalat parametreleri arasındaki ilişkiler aşağıda değerlendirilmiştir.

Derin karıştırma kolonlarının sıkışma indisi (Cc) hem imalat parametrelerine hem de zemin-enjeksiyon karışımının özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ve likitlik indisi attıkça sıkışma indisi artmaktadır (Şekil 4.42a). Çünkü karışım içerisinde ne kadar fazla su olursa yükleme sırasında o kadar fazla su numune içerisinden çıkmakta ve oturmalar artmaktadır. Buna bağlı olarak da sıkışma indisi artmaktadır. Bağlayıcı faktörünün fazla ve karışımın likitlik indisinin az olduğu durumlarda kolonun sıkışma indisi azalmaktadır (Şekil 4.42b). Karışımın bağlayıcı içeriği %25'den büyük olduğu durumda kolonun sıkışma indisi azalmaktadır (Şekil 4.43a). Kolon imalatı sırasında BRN değerinin 800 devir/m'den fazla olduğu durumlarda sıkışma indisinin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.43b). Bu durum, homojen zemin-enjeksiyon karışımının BRN>800 devir/m olduğu durumda sağlandığını, killi zeminin çimento ve uçucu külle temasa geçerek oturma yapma kapasitesini azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.42. Sıkışma indisinin a) W_T:W_b-$I_{L,mix}$ ve b) $I_{L,mix}$-α ile olan ilişkileri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



Şekil 4.43. Sıkışma indisinin a) a_w-α ve b) BRN-α ile olan ilişkileri (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

4.2.1.6 Permeabilite deneyi

İmal edilen kolonların geçirimlilik katsayıları ASTM D5084-10 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Permeabilite deneyi en az 5-6 saat sürdüğünden dolayı, bir kolon için çok fazla permeabilite deneyi yapılamamıştır. Genellikle kolon üst bölgesinin dayanımı yüksek, orta bölgesinin dayanımı normal ve alt bölgesinin dayanımı düşük çıkmıştır. Bu nedenle sınırlı sayıda permeabilite deneyi yapılacağından dolayı kolonun orta bölgesinden alınan 2 adet numune üzerinde permeabilite deneyleri yapılmıştır. Karot numunelerin çapı 5 cm'dir. Numune boyu ise 3 cm olacak şekilde kesilmiştir. Numune boyunun 3 cm seçilmesinin nedeni suyun drenaj mesafesini azaltarak deney süresini kısaltmaktır. Buna rağmen permeabilite deneyleri en az 5-6 saat sürmektedir. Deneyin yapılışı kısaca şu şekildedir: Deney numunesi üç eksenli basınç aletine yerleştirilerek numuneye hücre basıncı uygulanmış (genellikle 500-800 kPa arasında) ve hücre basıncından daha düşük geri basınç

uygulanarak (genellikle 450-750 kPa) numunenin içerisinden birim zamanda geçen su miktarı ölçülmüştür. Bunun sonucunda kolonun permeabilite katsayısı belirlenmiştir.

4.2.1.6.1 Kür süresi: 28 gün

İmal edilen kolonların orta bölgelerinden alınan karot numunelerinin 28 günlük permeabilite deneyi sonuçları (k) Tablo 4.39'da verilmiştir. Permeabilite katsayısı değerleri 10^{-9}-10^{-11} m/s arasında değişmektedir. O'Rourke ve McGinn (2004) arazideki DKK'ların permeabilite katsayısını 10^{-8}-10^{-9} m/s arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Bu yönüyle uçucu kül katkılı DKK'ların permeabilite katsayısı çimento katkılı DKK'lara göre daha düşük elde edilmştir.

Tablo 4.39. Permeabilite deneyi sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

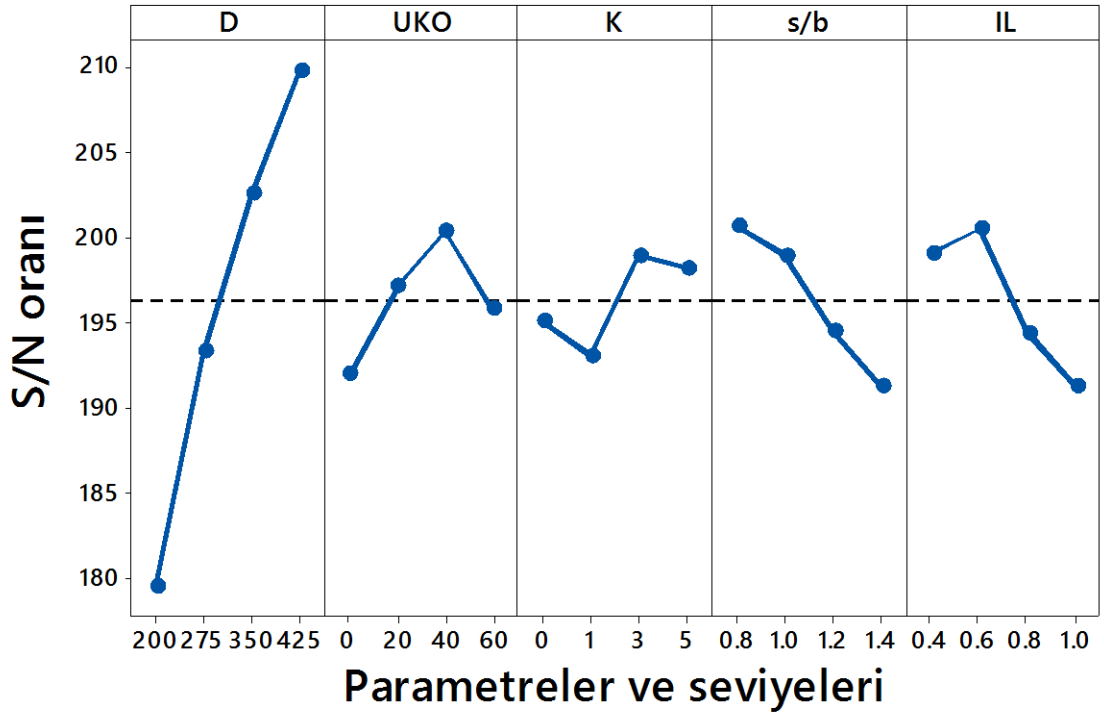
Tasarım No	Permeabilite katsayısı, k (m/s)
BÖ-1	8.758E-10
BÖ-2	6.371E-10
BÖ-3	7.537E-10
BÖ-4	2.854E-09
BÖ-5	1.135E-09
BÖ-6	5.074E-10
BÖ-7	4.105E-11
BÖ-8	9.044E-11
BÖ-9	9.985E-11
BÖ-10	4.960E-11
BÖ-11	7.124E-11
BÖ-12	8.642E-11
BÖ-13	3.983E-11
BÖ-14	2.382E-11
BÖ-15	3.848E-11
BÖ-16	3.030E-11

S/N analizi sonuçları

Bu kısımdaki amaç, geçirimsiz kolon imal etmek amacıyla en düşük permeabilite katsayısı (k) elde etmek olduğundan dolayı S/N analizi yapılırken "en düşük en iyi (smaller is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

28 günlük permeabilite katsayısına (k) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.44'de verilmiştir. Kolonların permeabilite katsayısı (k); bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3 ve zeminin likitlik indisi (I_L) 0.6'ya kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça kolonun permeabilite katsayısı (k) artmaktadır. Araştırılan parametrelerin 28 günlük permeabilite katsayısı (k) üzerindeki etki sırası D, s/b, I_L, UKO ve K şeklinde

olmaktadır (Tablo 4.40). Terashi ve Tanaka (1983) bağlayıcı içeriği arttıkça permeabilite katsayının azaldığını ifade ederken, Chew vd. (2004) numunedeki boşluk oranının bağlayıcı miktarından daha önemli olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.44. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Tablo 4.40. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Permeabilite katsayısı (k)	1	179.6	192.0	195.1	**200.7**	199.1
	2	193.3	197.1	193.1	198.9	**200.5**
	3	202.6	**200.4**	**199.0**	194.5	194.4
	4	**209.8**	195.9	198.2	191.3	191.3
	Delta	30.2	8.3	5.9	9.4	9.2
	Sıralama	1	4	5	2	3

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Permeabilite katsayısı değerleri sayısal olarak çok küçük olduğundan dolayı ANOVA analizi yapılırken sonuçların düzgün elde edilmesi için tüm sonuçlar 10^9 değeri ile çarpılarak sonuçlar aynı oranda büyütülmüştür. Permeabilite katsayısı (k) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %96.70, %83.50 ve %6.12 olarak bulunmuştur. Permeabilite katsayısı değerlerinin dağılımı düzgün olmadığından dolayı R-kare (tahmini) değeri çok düşük elde edilmiştir.

Permeabilite katsayısı (k) üzerinde bağlayıcı dozajı %72.32, uçucu kül oranı %5.28, su/bağlayıcı oranı %8.08 ve zemin likitlik indisi %8.02 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %3.30 olmuştur (Tablo 4.41). Permeabilite katsayısı (k) sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.41. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	26.967	75.32%	26.967	8.9889	22.82	0.014
Uçucu kül oranı	3	1.89	5.28%	1.89	0.63	1.6	0.355
Su/bağlayıcı oranı	3	2.893	8.08%	2.893	0.9642	2.45	0.241
Likitlik indisi	3	2.871	8.02%	2.871	0.9571	2.43	0.242
Hata	3	1.182	3.30%	1.182	0.3939		
Toplam	15	35.802	100.00%				

$$\ln(k)\cdot 10^{9} = -1.880 + \begin{bmatrix} +1.925 \\ +0.343 \\ -0.720 \\ -1.549 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.497 \\ -0.088 \\ -0.464 \\ +0.055 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.498 \\ -0.300 \\ +0.216 \\ +0.582 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.319 \\ -0.481 \\ +0.222 \\ +0.579 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.6.2 Kür süresi: 56 gün

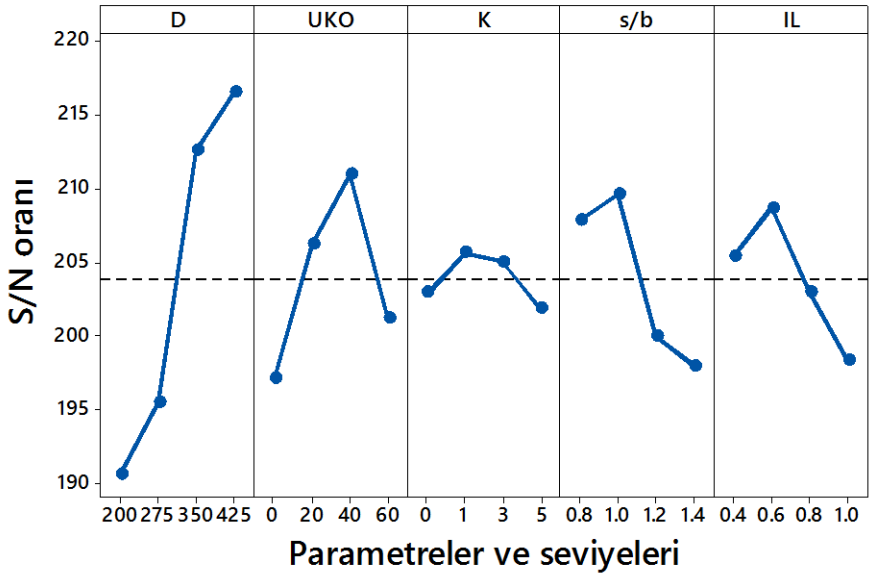
İmal edilen kolonların orta bölgelerinden alınan karot numunelerinin 56 günlük permeabilite deneyi sonuçları (k) Tablo 4.42'de verilmiştir.

Tablo 4.42. Permeabilite deneyi sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Tasarım No	Permeabilite katsayısı, k (m/s)
BÖ-1	3.738E-10
BÖ-2	5.338E-11
BÖ-3	1.972E-10
BÖ-4	1.854E-09
BÖ-5	8.789E-10
BÖ-6	3.101E-10
BÖ-7	3.380E-11
BÖ-8	8.635E-11
BÖ-9	4.985E-11
BÖ-10	2.917E-11
BÖ-11	1.124E-11
BÖ-12	1.830E-11
BÖ-13	2.343E-11
BÖ-14	1.182E-11
BÖ-15	8.848E-12
BÖ-16	2.030E-11

S/N analizi sonuçları

56 günlük permeabilite katsayısına (k) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.45'de verilmiştir. Kolonların permeabilite katsayısı (k); bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40 ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %1, su/bağlayıcı oranı (s/b) 1'e ve zeminin likitlik indisi (I_L) 0.6'ya kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Araştırılan parametrelerin 56 günlük permeabilite katsayısı (k) üzerindeki etki sırası D, UKO, s/b, I_L ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.43).



Şekil 4.45. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Tablo 4.43. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Permeabilite katsayısı (k)	1	190.7	197.1	202.9	207.8	205.4
	2	195.5	206.2	**205.6**	**209.6**	**208.7**
	3	212.6	**210.9**	205.0	199.9	202.9
	4	**216.5**	201.1	201.8	198.0	198.3
	Delta	25.8	13.8	3.8	11.6	10.4
	Sıralama	1	2	5	3	4

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Permeabilite katsayısı değerleri sayısal olarak çok küçük olduğundan dolayı ANOVA analizi yapılırken sonuçların düzgün elde edilmesi için tüm sonuçlar 10^9 değeri ile çarpılarak sonuçlar aynı oranda büyütülmüştür. Permeabilite katsayısı (k) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %98.76, %93.82 ve %64.85 olarak bulunmuştur. D, UKO ve s/b parametreleri için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile sonuçlar arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Zeminin likitlik indisi için P değerleri 0.05 değerinden büyük olmaktadır. Permeabilite katsayısı (k) üzerinde bağlayıcı dozajı %63.74, uçucu kül oranı %14.39, su/bağlayıcı oranı %13.04 ve zemin likitlik indisi %7.60 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %1.24 olmuştur (Tablo 4.44). Permeabilite katsayısı (k) sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş, elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4.44. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

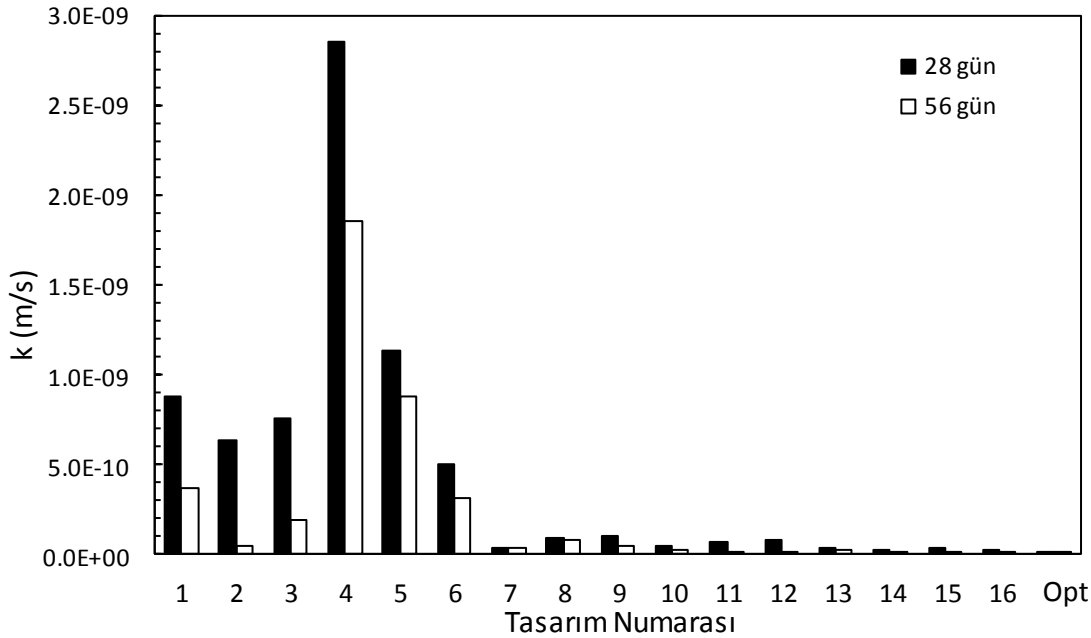
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	25.4724	63.74%	25.4724	8.4908	51.58	0.004
Uçucu kül oranı	3	5.7498	14.39%	5.7498	1.9166	11.64	0.037
Su/bağlayıcı oranı	3	5.2105	13.04%	5.2105	1.7368	10.55	0.042
Likitlik indisi	3	3.0364	7.60%	3.0364	1.0121	6.15	0.085
Hata	3	0.4939	1.24%	0.4939	0.1646		
Toplam	15	39.963	100.00%				

$$\ln(k)\cdot 10^{9} = -2.744 + \begin{bmatrix} +1.513 \\ +0.959 \\ -1.012 \\ -1.461 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.777 \\ -0.275 \\ -0.813 \\ +0.311 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.459 \\ -0.662 \\ +0.447 \\ +0.673 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.180 \\ -0.560 \\ +0.106 \\ +0.634 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.1.6.3 Permeabilite deney sonuçlarının tartışılması

Permeabilite deney sonuçlarına bakıldığında permeabilite katsayısının en büyük olduğu tasarım 4 olurken, en düşük olduğu tasarım 28 günde 14, 56 günde 15 olmaktadır. 56 günlük permeabilite katsayısı değerleri 28 günlük permeabilite katsayısı değerlerinden ortalama olarak %50 daha küçük olmaktadır (Şekil 4.46).

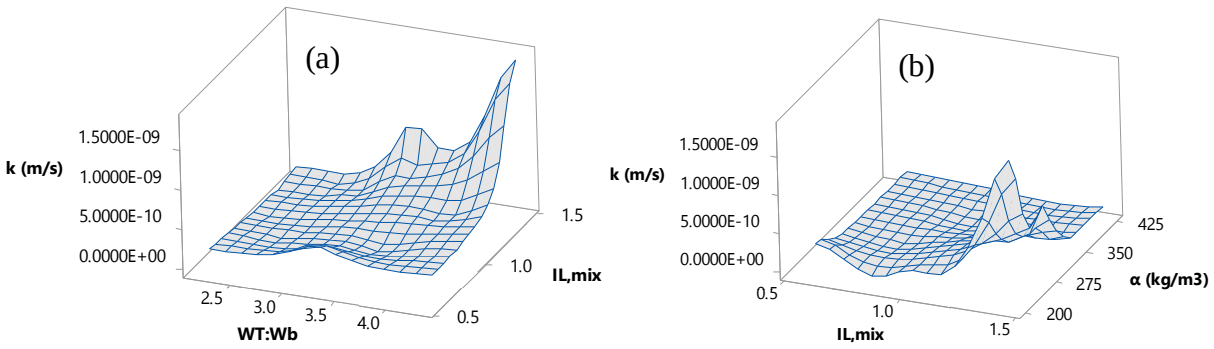


Şekil 4.46. Permeabilite deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK)

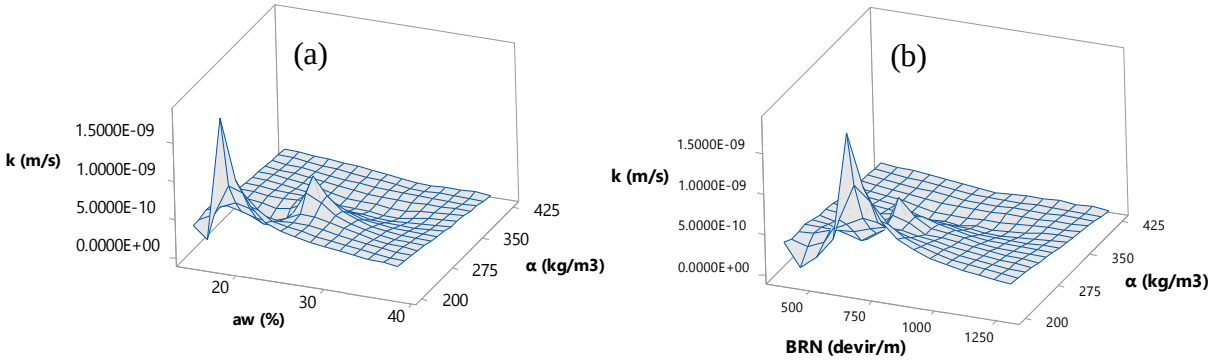
56 günlük permeabilite katsayısı (k) sonuçları ile imalat parametreleri arasındaki ilişkiler aşağıda değerlendirilmiştir.

Derin karıştırma kolonlarının permeabilite katsayısı (k) hem imalat parametrelerine hem de zemin-enjeksiyon karışımının özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ve likitlik indisi attıkça permeabilite katsayısı artmaktadır (Şekil 4.47a). Karışım içerisindeki su miktarının fazla olması boşluk oranının fazla olduğunu göstermektedir. Bu durumda numune içerisinden birim zamanda çıkan suyun miktarı artmakta ve permeabilite katsayısı büyümekte, kolonun geçirimliliği artmaktadır. Kil-bağlayıcı karışımında kil mineralleri etrafında oluşan çimentolanma ürünleri mikro yapıdaki boşlukları azaltmaktadır (Nagaraj vd., 1990; Yamadera, 1999; Nagaraj ve Miura, 2001). Fakat karışımın likitlik indisi 1'den büyük olduğunda mikroyapıdaki boşlukların arttığı Horpibulsuk vd. (2005) tarafından da ifade edilmiştir.

Bağlayıcı faktörünün fazla ve karışımın likitlik indisinin az olduğu durumlarda kolonun permeabilite katsayısı azalmaktadır (Şekil 4.47b). Karışımın bağlayıcı içeriği %25'den büyük olduğu durumda kolonun permeabilite katsayısı azalmaktadır (Şekil 4.48a). Kolon imalatı sırasında BRN değerinin 800 devir/m'den fazla olduğu durumlarda permeabilite katsayısının azaldığı görülmektedir (Şekil 4.48b). Bu durumda homojen zemin-enjeksiyon karışımının BRN>800 devir/m olduğu durumda sağlandığını, killi zeminin çimento ve uçucu külle temasa geçerek kolonun geçirimliliğini azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.47. Permeabilite katsayısının a) W_T:W_b-$I_{L,mix}$ ve b) $I_{L,mix}$-α ile olan ilşkileri



Şekil 4.48. Permeabilite katsayısının a) a_w-α ve b) BRN-α ile olan ilşkileri

4.2.2 Küçük ölçekli DKK (laboratuvar mikseri ile imalat)

Projenin bu aşamasına kadar sahadaki uygulamayla birebir aynı özelliklerde (imalat yöntemi ve aşamaları olarak) derin karıştırma kolonları (DKK) imal edilerek bunların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Buraya kadar yapılan deneysel çalışmalar (derin karıştırma makinesiyle yapılan kolon imalatı) "büyük ölçekli DKK" olarak isimlendirilmiştir.

Projenin bundan sonraki aşamasında yapılan çalışmalar "küçük ölçekli DKK" olarak isimlendirilmiştir. Bu kısımda yapılan deneysel çalışmalar ve araştırma konusu büyük ölçekli DKK ile aynıdır. Her iki araştırma alanında da iyileştirilecek zeminin kıvamı dikkate alınarak uçucu kül katkılı DKK davranışı incelenmiştir.

Bu bölümde yapılan çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir: Yüksek plastisiteli killi zemin, çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı ve su (malzemelerin miktarları her tasarım için farklıdır) laboratuvar mikseri ile uygun şartlarda karıştırıldıktan sonra PVC kalıplara yerleştirilmiştir. Hazırlanan zemin-enjeksiyon numunelerinin 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda serbest basınç, üç eksenli basınç (UU), konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Her tür deney grubunda ve tüm kür süreleri için ayrı ayrı optimizasyon çalışması yapılmıştır.

4.2.2.1 Gözlem sonuçları

Küçük ölçekli DKK karışım numunelerinin kıvamı ve kalıba yerleştirilme durumları ile ilgili gözlemler Tablo 4.45'te verilmiştir.

Tablo 4.45. Zemin-bağlayıcı karışımlarının kıvam ve kalıba yerleştirilme durumları

Tasarım No	Kıvam	Kalıba Yerleştirme Şekli
KÖ-1	Yarı katı kıvamda, mikserle homojen karışım sağlanmadı, el ile karıştırmaya devam edildi	Kalıba 5 tabaka halinde yerleştirildi. Her tabaka 25 kez şişlendi ve 1kg ağırlığındaki tokmakla 25 kez statik olarak sıkıştırıldı. Su kaybı yok.
KÖ-2	Likit kıvama çok yakın, mikserle homojen karışım sağlandı.	Kalıba 5 tabaka halinde yerleştirildi. Her tabaka 25 kez şişlendi. Önce 20-30 kez tezgâha vuruldu sonra plastik tokmakla kalıp kenarına 30-40 kez sertçe vuruldu.
KÖ-3	Likit kıvamın üzerinde, mikserle homojen karışım sağlandı. Kalıba bardakla döküldü.	Kalıba 5 tabaka halinde yerleştirildi. Her tabaka 25 kez şişlendi ve plastik tokmakla kalıp kenarına 30 kez yavaşça vuruldu.
KÖ-4	Likit kıvamın üstünde, Tasarım 3'ten biraz daha cıvık. Kalıba bardakla döküldü.	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-5	Tasarım 4 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-6	Tasarım 4 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-7	Likit kıvamın biraz altında, Tasarım 1'den daha yumuşak. Mikserle homojen karışım sağlandı.	Yerleşim Tasarım 2 ile aynı.
KÖ-8	Tasarım 2 ile aynı	Yerleşim Tasarım 2 ile aynı.
KÖ-9	Sulu karışım, mikserle homojen karışım sağlandı. Kalıba bardakla döküldü.	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-10	Likit kıvamın üstünde, Tasarım 3'ten daha cıvık. Kalıba bardakla döküldü.	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-11	Tasarım 4 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-12	Tasarım 3 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-13	Tasarım 4 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-14	Tasarım 4 ile aynı	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-15	Çok sulu karışım, kum taneleri kâsenin dibine çöküyor.	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.
KÖ-16	Çok sulu karışım, kum taneleri kâsenin dibine çöküyor.	Yerleşim Tasarım 3 ile aynı.

Elde edilen karışımların kıvamına (su içeriğine) göre kalıba yerleştirilme şekilleri arasında birtakım farklılıklar mevcuttur. Karışımların kalıba yerleştirilme durumlarının belirlenmesi zemin-enjeksiyon karışımının kıvamına göre belirlenmektedir (Grisolia vd., 2012, 2013; Marzano vd., 2012). Kitazume vd. (2015) karışımın likitlik indisi 1'den büyükse şişleme ve yere vurma, 0.5-1 arasında ise şişleme, 0.5'den küçükse şişleme ve dinamik kompaksiyon tekniklerine göre kalıplama yapılmasını önermektedir. 1, 2, 7 ve 14 numaralı tasarımların toplam likitlik indisi 0.5-1 arasında iken, diğer tasarımlarda 1'den büyüktür (Tablo 4.46).

Hazırlanan karışımlar biraz sertleşene kadar açık havada bekletilmiş, daha sonra poşetlenerek küre bırakılmıştır. Bu esnada katı karışımlarda boy kısalması olmaz iken, su muhtevası fazla olan karışımlarda boy kısalması olmuştur. Yani sulu/çok sulu karışımlar kalıba doldurulduktan 1-2 saat sonra içerisindeki suyun bir kısmını bırakarak boyları kısalmıştır. Numunedeki su muhtevası değişimleri karışım içerisindeki bağlayıcı dozajını etkileyeceğinden dolayı her aşamada numunenin ağırlığı, çapı ve boyu kayıt altına alınmıştır. Numune kalıba yerleştirildiği anda ve kür süresi sonunda numunenin çap, yükseklik, ağırlık bilgileri ölçülmüştür. Poşetlenen numuneler kür süresi boyunca suyla dolu bir tankın içerisinde muhafaza edilmiştir. Kür süresi sonunda numuneler hidrolik kriko yardımıyla kalıptan çıkarılarak ilgili deneyler yapılmıştır.

4.2.2.2 Fiziksel özellikler

Küçük ölçekli DKK tasarımında, kolon imalatı sırasında olduğu gibi karışımın yoğunluğu, bağlayıcı faktörü, bağlayıcı içeriği, toplam su/çimento oranı, karışımın su muhtevası ve hacim oranı gibi özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Büyük ölçekli DKK tasarımında kolon imalatı sırasında bağlayıcı faktörü ve bağlayıcı dozajı aynı olmaktadır. Çünkü kolon imalatı sırasında oluşacak kolon hacmi düşünülürse burada imalat öncesinde doğal zemin varken, imalat sonrasında zemin-enjeksiyon karışımı olmaktadır. Başka bir deyişle, karışım hacmiyle (kolon hacmi) iyileştirilmemiş zemin hacmi aynıdır. Fakat küçük ölçekli DKK tasarımında, hazırlanan zemin-enjeksiyon karışımı kalıba dökülerek imalat yapılmaktadır. Bu nedenle kalıp hacminin bir kısmını iyileştirilmemiş zemin, bir kısmını ise enjeksiyon oluşturmaktadır. Bu durumda karışım hacmi kalıp hacmine eşit olurken, iyileştirilmemiş zemin hacmi kalıp hacminden küçük olmaktadır. Bunun sonucunda da bağlayıcı faktörü her zaman bağlayıcı dozajından büyük olmaktadır. Bağlayıcı dozajı 200-425 kg/m^3 arasında değişirken, bağlayıcı faktörü 257-1760 kg/m^3 arasında değişmektedir (Tablo 4.46).

Çalışmanın bu bölümünde enjeksiyon içerisinde çimento ve uçucu kül olduğundan dolayı bağlayıcı içeriği ve hacim oranı bağlayıcı dozajına göre sabit olmamakta ve her tasarım için farklı olmaktadır. Çimento ve uçucu külün yoğunlukları farklı olduğu için bunların farklı oranlarda karıştırılması ve her tasarım için su/bağlayıcı oranının değişkenlik göstermesi nedenlerinden dolayı bu parametreler değişken olmuştur. Bağlayıcı dozajı 200-400 kg/m^3 arasında olduğunda, bağlayıcı içeriği %18.7-128 arasında, hacim oranı ise %29-314 arasında değişmektedir. Hacim oranı enjeksiyon hacminin iyileştirilmemiş zemin hacmine bölünmesiyle bulunmaktadır. Zemin-enjeksiyon karışımında toplam su/bağlayıcı oranı 1.48-3.22 arasında değişkenlik göstermektedir (Tablo 4.46).

Tablo 4.46. Küçük ölçekli DKK tasarımında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri

Tasarım numarası	$\alpha_{in\text{-}place}$ (kg/m^3)	α (kg/m^3)	a_w (%)	W_T:W_b	VR (%)	$I_{L,mix}$
KÖ-1	200	257	18.7	2.67	29	0.55
KÖ-2	200	274	21.3	2.88	37	0.83
KÖ-3	200	294	24.4	3.05	47	1.19
KÖ-4	200	318	28.5	3.22	59	1.57
KÖ-5	275	473	42.4	2.43	72	1.45
KÖ-6	275	528	43.7	2.43	92	1.52
KÖ-7	275	414	32.2	2.04	51	0.88
KÖ-8	275	454	33.0	2.06	65	1.01
KÖ-9	350	896	69.6	1.97	156	1.50
KÖ-10	350	790	57.4	1.81	126	1.29
KÖ-11	350	675	60.6	1.86	93	1.48
KÖ-12	350	609	50.4	1.69	74	1.10
KÖ-13	425	1007	83.3	1.54	137	1.01
KÖ-14	425	847	76.0	1.48	99	0.90
KÖ-15	425	1760	128.0	1.67	314	1.46
KÖ-16	425	1340	104.2	1.58	215	1.53

Zemin, enjeksiyon ve zemin-enjeksiyon karışımlarına ait yoğunluk ve su muhtevası bilgileri hem hesaplama sonucunda hem de kür başında ve sonundaki ölçümler neticesinde elde edilmiştir (Tablo 4.47). Zemin yoğunluğu 1.706-1.854 g/cm^3, enjeksiyon yoğunluğu ise 1.322-1.618 g/cm^3 arasında değişmektedir. Zemin enjeksiyon karışımlarının yoğunluk değerleri hesaplama sonucunda 1.472-1.803 g/cm^3, kür edilmeden önce (imalattan hemen sonra) 1.464-1.761 g/cm^3 ve kür süresi sonunda 1.526-1.756 g/cm^3 arasında değişmektedir. Hesaplama ile kür edilmeden önceki yoğunluk sonuçları arasındaki farklılık yok denecek kadar azdır, çünkü karışım içerisindeki tüm malzemelerin yoğunluğu bilinmektedir. Kür öncesinde ve sonunda ölçülen yoğunluk değerlerindeki farklılık ise numunelerin su muhtevalarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Kür süresi sonunda karışımın su muhtevası kür edilmeden önceki duruma göre %2-20 azalmaktadır (Tablo 4.47).

Zemin enjeksiyonla karıştığı zaman su muhtevası tasarım parametrelerine bağlı olarak %5-60 artmaktadır. Doğal zeminin su muhtevası %35-52 arasında iken karışımın son durumdaki su muhtevası (kür öncesi) %42.1-93.9 arasında değişmektedir. (Tablo 4.47).

Tablo 4.47. Küçük ölçekli DKK tasarımında zemin-enjeksiyon karışımlarının özellikleri

Tasarım numarası	Zemin	Enjeksiyon	Zemin-enjeksiyon karışımı					
			Hesaplama		Ölçüm sonuçları			
					Kür öncesi		Kür sonu	
	ρ (g/cm³)	ρ (g/cm³)	ρ (g/cm³)	w (%)	ρ (g/cm³)	w (%)	ρ (g/cm³)	w (%)
KÖ-1	1.854	1.618	1.803	42.1	1.761	42.1	1.756	38.9
KÖ-2	1.794	1.485	1.716	50.5	1.694	50.5	1.698	47.1
KÖ-3	1.741	1.391	1.636	59.7	1.629	59.7	1.641	57.5
KÖ-4	1.706	1.322	1.556	71.5	1.559	71.5	1.567	68.6
KÖ-5	1.706	1.452	1.593	72.3	1.601	72.3	1.601	65.1
KÖ-6	1.741	1.376	1.572	73.9	1.578	73.9	1.595	67.1
KÖ-7	1.794	1.513	1.704	49.7	1.676	49.7	1.681	48.5
KÖ-8	1.854	1.415	1.682	51.1	1.654	51.1	1.644	52.2
KÖ-9	1.794	1.396	1.554	81.0	1.575	81.0	1.613	66.5
KÖ-10	1.854	1.414	1.610	66.0	1.611	66.0	1.633	60.5
KÖ-11	1.706	1.454	1.579	70.1	1.574	70.1	1.591	66.0
KÖ-12	1.741	1.488	1.640	56.7	1.653	56.7	1.646	54.9
KÖ-13	1.741	1.508	1.611	70.0	1.626	70.0	1.675	52.3
KÖ-14	1.706	1.561	1.628	64.1	1.629	64.1	1.667	49.2
KÖ-15	1.854	1.350	1.472	93.9	1.464	93.9	1.548	65.5
KÖ-16	1.794	1.369	1.506	80.8	1.497	80.8	1.526	67.7

4.2.2.3 Serbest basınç deneyi (UCS)

7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda zemin-bağlayıcı numuneleri üzerindeki serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D2166/D2166M-16 ve ASTM D5102−09 standartlarına göre yapılmıştır. Her tasarım için kür süreleri sonunda en az iki adet serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda her bir numuneye ait gerilme-birim deformasyon grafikleri ile kırılma zarfı grafikleri çizilerek numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Küçük ölçekli DKK tasarımlarına ait serbest basınç deneyi sonuçları Ek-5'te verilmiştir.

4.2.2.3.1 Kür süresi: 7 gün

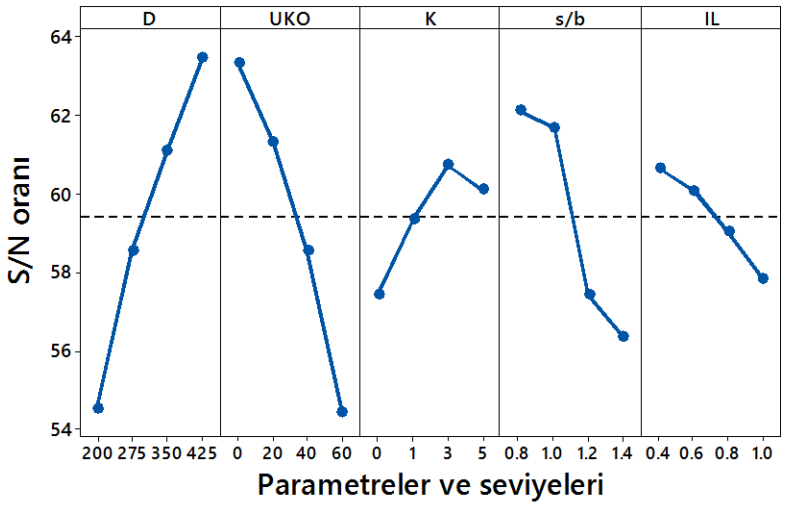
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 7 günlük serbest basınç dayanımı (q_u) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) sonuçları Tablo 4.48'de verilmiştir.

Tablo 4.48. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 7 gün)

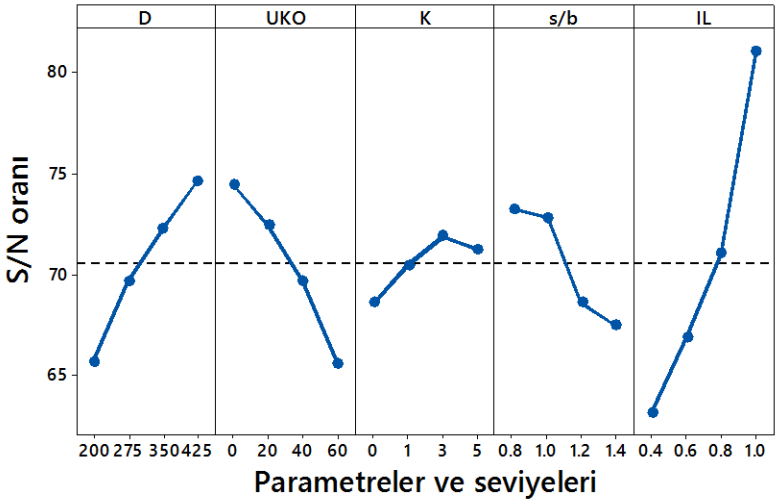
Tasarım numarası	q_u (kPa)	q_s (kPa)	RI (%)
KÖ-1	1050.5	74.8	1404
KÖ-2	926.7	45.9	2019
KÖ-3	429.9	25	1719
KÖ-4	191.7	6.9	2778
KÖ-5	879.5	6.9	12746
KÖ-6	567.9	25	2272
KÖ-7	1229.1	45.9	2678
KÖ-8	836.6	74.8	1118
KÖ-9	1585.0	45.9	3453
KÖ-10	1415.6	74.8	1892
KÖ-11	893.6	6.9	12951
KÖ-12	831.0	25	3324
KÖ-13	3160.0	25	12640
KÖ-14	2479.0	6.9	35928
KÖ-15	1091.6	74.8	1459
KÖ-16	579.0	45.9	1261

S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. q_u ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de verilmiştir. q_u ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Uçucu kül oranı (UKO) ve su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_u ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_u azalırken, RI artmaktadır.



Şekil 4.49. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



Şekil 4.50. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

Araştırılan parametrelerin q_u üzerindeki etki sırası D, UKO, s/b, K ve I_L şeklinde olmaktadır. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, UKO, s/b ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.49).

Tablo 4.49. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Serbest basınç dayanımı, q_u (kPa)	1	54.52	**63.33**	57.45	**62.12**	**60.66**
	2	58.55	61.33	59.34	61.70	60.10
	3	61.11	58.56	**60.75**	57.46	59.03
	4	**63.47**	54.44	60.11	56.37	57.86
	Delta	8.95	8.89	3.3	5.75	2.8
	Sıralama	1	2	4	3	5
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	65.66	**74.46**	68.58	**73.26**	63.19
	2	69.69	72.47	70.48	72.84	66.86
	3	72.25	69.70	**71.89**	68.59	71.08
	4	**74.61**	65.57	71.25	67.51	**81.08**
	Delta	8.95	8.89	3.3	5.75	17.9
	Sıralama	2	3	5	4	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

7 günlük q_u sonuçları ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.64, %98.18 ve %89.66 olarak bulunmuştur. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. q_u üzerinde bağlayıcı dozajı %36.27, uçucu kül oranı %32.96, katkı oranı %13.04 ve su/bağlayıcı oranı

%17.36 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.36 olmuştur (Tablo 4.50). Regresyon denklemi Denklem 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.50. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 7 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	18022.8	36.27%	18022.8	6007.6	99.8	0.002
Uçucu kül oranı	3	16377.2	32.96%	16377.2	5459.08	90.69	0.002
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	6480	13.04%	6480	2159.99	35.88	0.008
Su/bağlayıcı oranı	3	8623.5	17.36%	8623.5	2874.52	47.75	0.005
Hata	3	180.6	0.36%	180.6	60.19		
Toplam	15	49684.1	100.00%				

$$q_u^{0.694416} = 127.09 + \begin{bmatrix} -40.56 \\ -17.25 \\ +7.79 \\ +50.02 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +40.97 \\ +17.51 \\ -15.11 \\ -43.37 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -26.58 \\ -11.86 \\ +15.09 \\ +23.35 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +22.70 \\ +23.72 \\ -23.27 \\ -23.15 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %97.95, %89.73 ve %41.58 olarak bulunmuştur. Kurulan modelde, RI üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %59.81 oranında etkili çıkmıştır (Tablo 4.51). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.17'de, verilmiştir.

Tablo 4.51. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	2.3346	14.71%	2.3346	0.7782	7.16	0.070
Uçucu kül oranı	3	2.3591	14.86%	2.3591	0.7864	7.24	0.069
Su/bağlayıcı oranı	3	1.3601	8.57%	1.3601	0.4534	4.17	0.136
Likitlik indisi	3	9.4946	59.81%	9.4946	3.1649	29.12	0.010
Hata	3	0.326	2.05%	0.326	0.1087		
Toplam	15	15.8744	100.00%				

$$\ln(RI) = 8.1225 + \begin{bmatrix} -0.563 \\ -0.099 \\ +0.195 \\ +0.467 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.450 \\ +0.221 \\ -0.098 \\ -0.573 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.312 \\ +0.263 \\ -0.225 \\ -0.350 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.848 \\ -0.425 \\ +0.060 \\ +1.213 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.2.3.2 Kür süresi: 28 gün

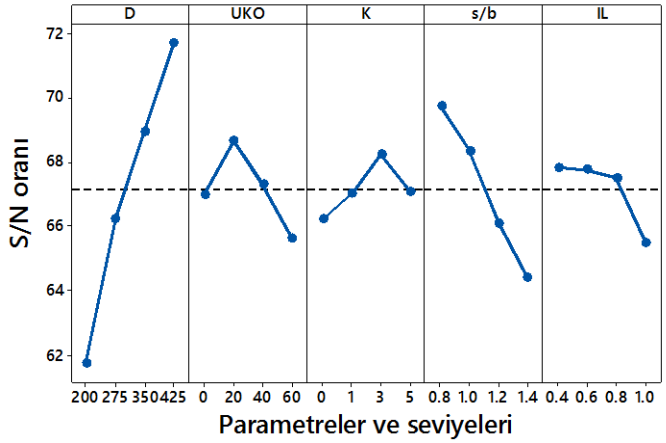
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 28 günlük dayanım (q_u) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) sonuçları Tablo 4.52'de verilmiştir.

S/N analizi sonuçları

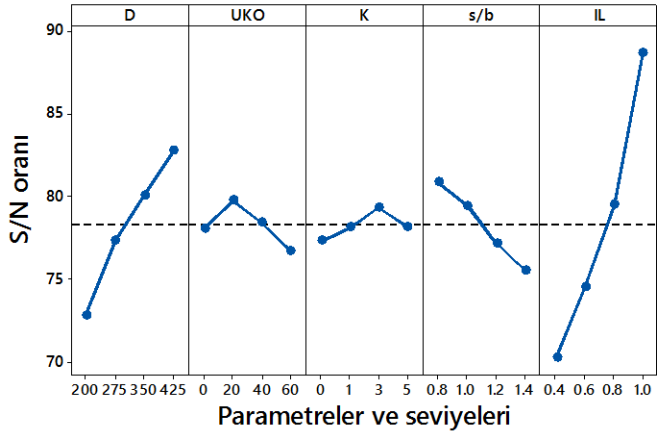
28 günlük q_u ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de verilmiştir. q_u ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı (UKO) %20, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_u ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_u azalırken, RI artmaktadır. Yılmaz (2006) killi zeminlerin 28 gün sonundaki en yüksek dayanımının %25 uçucu kül katkısıyla elde edildiğini belirtmişlerdir.

Tablo 4.52. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Tasarım numarası	q_u (kPa)	q_s (kPa)	RI (%)
KÖ-1	1568.8	74.8	2097
KÖ-2	1771.7	45.9	3860
KÖ-3	1306.2	25	5225
KÖ-4	613.1	6.9	8886
KÖ-5	1445.0	6.9	20942
KÖ-6	1667.7	25	6671
KÖ-7	3000.0	45.9	6536
KÖ-8	2425.0	74.8	3242
KÖ-9	2435.0	45.9	5305
KÖ-10	3149.6	74.8	4211
KÖ-11	2433.1	6.9	35262
KÖ-12	3250.0	25	13000
KÖ-13	4480.0	25	17920
KÖ-14	5757.5	6.9	83442
KÖ-15	3057.0	74.8	4087
KÖ-16	2760.0	45.9	6013



Şekil 4.51. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



Şekil 4.52. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin q_u üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.53).

Tablo 4.53. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Serbest basınç dayanımı, q_u (kPa)	1	61.74	66.97	66.22	**69.72**	**67.82**
	2	66.22	**68.64**	67.03	68.35	67.76
	3	68.91	67.32	**68.24**	66.08	67.51
	4	**71.69**	65.63	67.07	64.41	65.47
	Delta	9.95	3.02	2.01	5.32	2.35
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	72.87	78.10	77.36	**80.86**	70.34
	2	77.36	**79.78**	78.16	79.49	74.53
	3	80.05	78.46	**79.37**	77.21	79.55
	4	**82.83**	76.76	78.21	75.54	**88.69**
	Delta	9.95	3.02	2.01	5.32	18.35
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

28 günlük serbest basınç dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.71, %98.53 ve %91.64 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %64.44, uçucu kül oranı %6.33, katkı oranı %7.85 ve su/bağlayıcı oranı %21.08 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.29 olmuştur (Tablo 4.54). Regresyon denklemi Denklem 4.18'de verilmiştir.

Tablo 4.54. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	15639605	64.44%	15639605	5213202	219.38	0.001
Uçucu kül oranı	3	1536327	6.33%	1536327	512109	21.55	0.016
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	1906128	7.85%	1906128	635376	26.74	0.011
Su/bağlayıcı oranı	3	5115506	21.08%	5115506	1705169	71.76	0.003
Hata	3	71291	0.29%	71291	23764		
Toplam	15	24268856	100.00%				

$$q_u = 2570 + \begin{bmatrix} -1255 \\ -435.6 \\ +246.9 \\ +1443.6 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -87.8 \\ +516.6 \\ -120.9 \\ -308 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -462.6 \\ -189.1 \\ +410.9 \\ +240.7 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +824.1 \\ +207.5 \\ -404.8 \\ -626.8 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.33, %96.64 ve %80.90 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %72.77 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %20.69, su/bağlayıcı oranının %4.72 ve uçucu kül oranının %1.15 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.67 olmuştur (Tablo 4.55). Regresyon denklemi Denklem 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.55. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	0.004019	20.69%	0.004019	0.00134	30.82	0.009
Uçucu kül oranı	3	0.000223	1.15%	0.000223	0.000074	1.71	0.336
Su/bağlayıcı oranı	3	0.000917	4.72%	0.000917	0.000306	7.03	0.072
Likitlik indisi	3	0.014138	72.77%	0.014138	0.004713	108.4	0.001
Hata	3	0.00013	0.67%	0.00013	0.000043		
Toplam	15	0.019427	100.00%				

$$-RI^{-0.144964} = -0.27319 + \begin{bmatrix} -0.02400 \\ -0.00307 \\ +0.00839 \\ +0.01868 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.00096 \\ +0.00499 \\ +0.00127 \\ -0.00531 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.00905 \\ +0.00499 \\ -0.00355 \\ -0.01048 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.03621 \\ -0.01521 \\ +0.00740 \\ +0.04402 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.2.3.3 Kür süresi: 56 gün

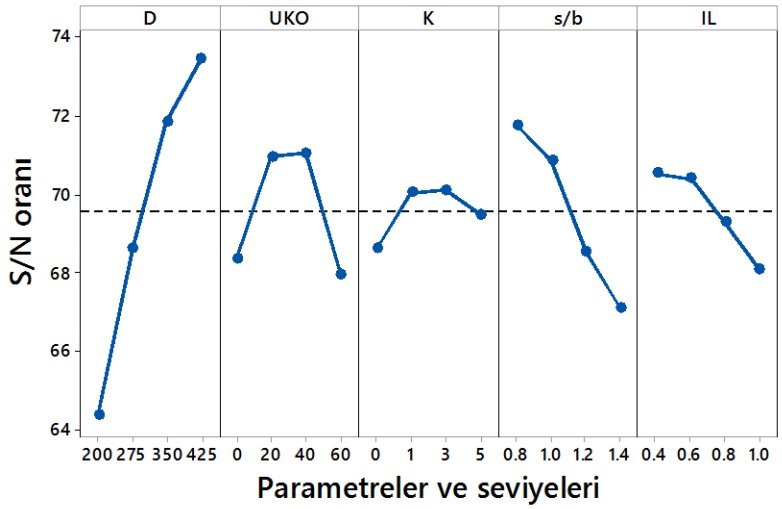
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 56 günlük serbest basınç dayanımı (q_u) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) sonuçları Tablo 4.56'da verilmiştir.

Tablo 4.56. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin serbest basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

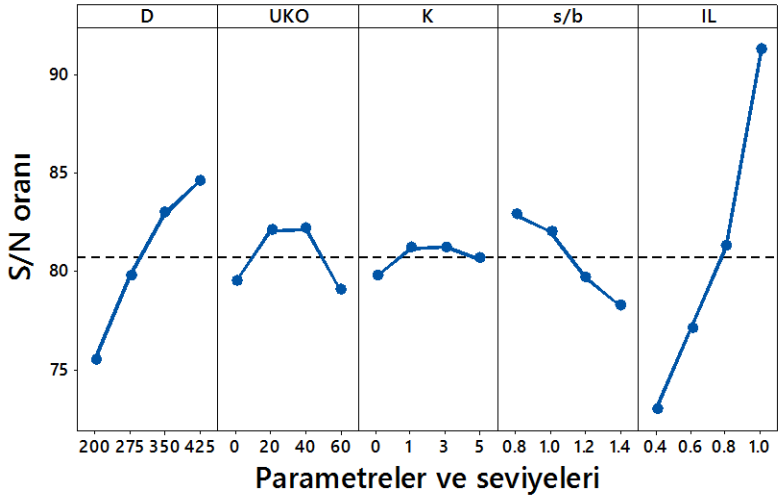
Tasarım numarası	q_u (kPa)	q_s (kPa)	RI (%)
KÖ-1	1852.0	74.8	2476
KÖ-2	2615.0	45.9	5697
KÖ-3	1790.2	25	7161
KÖ-4	864.9	6.9	12534
KÖ-5	1852.7	6.9	26851
KÖ-6	2076.2	25	8305
KÖ-7	4475.2	45.9	9750
KÖ-8	3085.0	74.8	4124
KÖ-9	2988.0	45.9	6510
KÖ-10	4500.0	74.8	6016
KÖ-11	4060.0	6.9	58841
KÖ-12	4248.4	25	16993
KÖ-13	4550.0	25	18200
KÖ-14	6363.5	6.9	92225
KÖ-15	4945.5	74.8	6612
KÖ-16	3425.0	45.9	7462

S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en yüksek en iyi (larger is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. 56 günlük q_u ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'de verilmiştir. q_u ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça hem q_u hem de RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_u azalırken, RI artmaktadır.



Şekil 4.53. Serbest basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



Şekil 4.54. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin q_u sonuçları üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO I_L ve K şeklinde olmaktadır. RI sonuçları üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.57).

Tablo 4.57. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Serbest basınç dayanımı, q_u (kPa)	1	64.37	68.34	68.64	**71.75**	**70.52**
	2	68.63	70.96	70.04	70.87	70.39
	3	71.83	**71.03**	**70.11**	68.54	69.28
	4	**73.45**	67.95	69.49	67.12	68.08
	Delta	9.08	3.09	1.47	4.63	2.44
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	75.51	79.48	79.78	**82.89**	73.04
	2	79.76	82.10	81.18	82.00	77.16
	3	82.96	**82.17**	**81.24**	79.68	81.32
	4	**84.59**	79.08	80.63	78.26	**91.31**
	Delta	9.08	3.09	1.47	4.63	18.26
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

56 günlük serbest basınç dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %98.78, %93.90 ve %65.32 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Süper akışkanlaştırıcı dışında tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Kolon dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %64.31, uçucu kül oranı %12.30, katkı oranı %4.38 ve su/bağlayıcı oranı %17.80 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %1.22 olmuştur (Tablo 4.58). Regresyon denklemi Denklem 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4.58. Serbest basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	20856561	64.31%	20856561	6952187	52.75	0.004
Uçucu kül oranı	3	3987914	12.30%	3987914	1329305	10.09	0.045
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	1419381	4.38%	1419381	473127	3.59	0.161
Su/bağlayıcı oranı	3	5771406	17.80%	5771406	1923802	14.6	0.027
Hata	3	395397	1.22%	395397	131799		
Toplam	15	32430658	100.00%				

$$q_u = 3355.7 + \begin{bmatrix} -1575 \\ -483 \\ +593 \\ +1465 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -545 \\ +533 \\ +462 \\ -450 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -502 \\ +60 \\ +201 \\ +242 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +879 \\ +222 \\ -464 \\ -637 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

burada, D, UKO, K ve s/b I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.46, %97.30 ve %84.66 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI sonuçları üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %72.13, bağlayıcı dozajı %18.83, su/bağlayıcı oranı %5.29 ve uçucu kül oranı %3.22 etkilidir. Oluşturulan modelin hata payı %0.54 olmuştur (Tablo 4.59). Regresyon denklemi Denklem 4.21'de, verilmiştir.

Tablo 4.59. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

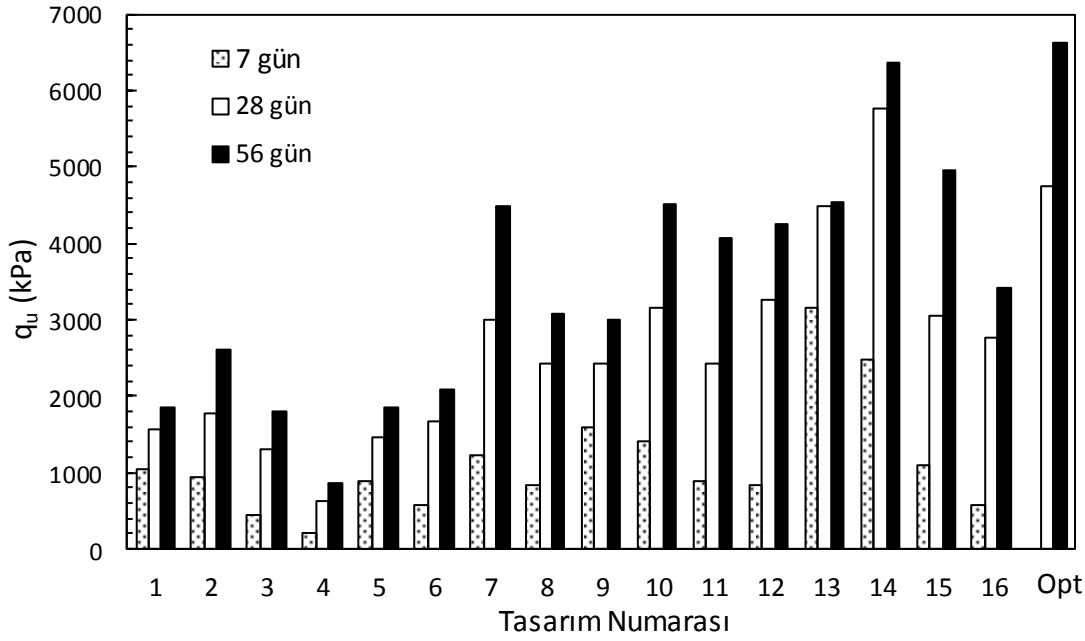
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	2.5477	18.83%	2.54765	0.84922	34.9	0.008
Uçucu kül oranı	3	0.4351	3.22%	0.43514	0.14505	5.96	0.088
Su/bağlayıcı oranı	3	0.7159	5.29%	0.71594	0.23865	9.81	0.046
Likitlik indisi	3	9.7608	72.13%	9.7608	3.2536	133.72	0.001
Hata	3	0.073	0.54%	0.07299	0.02433		
Toplam	15	13.5325	100.00%				

$$\ln(RI) = 9.2918 + \begin{bmatrix} -0.5981 \\ -0.1087 \\ +0.2598 \\ +0.4470 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1411 \\ +0.1598 \\ +0.1683 \\ -0.1870 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.2512 \\ +0.1492 \\ -0.1182 \\ -0.2822 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.8823 \\ -0.4090 \\ +0.0709 \\ +1.2204 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

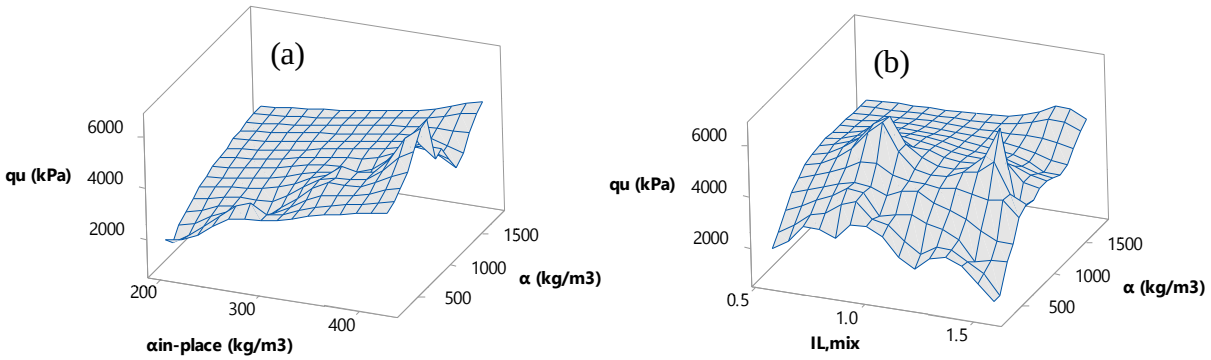
4.2.2.3.4 Serbest basınç deney sonuçlarının tartışılması

Küçük ölçekli DKK tasarımlarında 7, 28 ve 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri sırasıyla 191.7-3160 kPa, 613.1-5757.5 kPa ve 864.9-6363.5 kPa arasında değişmektedir. Tüm kür sürelerinde en düşük dayanım tasarım 4'te, en büyük dayanım tasarım 14'te elde edilmiştir. 4 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı minimum (200 kg/m^3), uçucu kül oranı (%60), su/bağlayıcı oranı (1.4) ve zeminin likitlik indisi (1.0) değerlerinin maksimum olmasından dolayı dayanım minimum çıkmıştır. 14 numaralı tasarımda ise dozaj maksimum (425 kg/m^3), uçucu kül oranı %20 ve su/bağlayıcı oranının (0.8) minimum olmasından 28 ve 56 günlük dayanım değerleri maksimum çıkmıştır. 7 günlük maksimum dayanım Tasarım 13'te elde edilmiştir. Çünkü uçucu kül 7 günde etkisini gösterememiştir ve 13 numaralı tasarımda dozaj maksimum iken uçucu kül yoktur. Optimum tasarımda ise 28 günlük serbest basınç dayanımı 4752.5 kPa iken 56 günlük dayanım 6615 kPa olmuştur. Serbest basınç mukavemeti bakımından 28 günlük dayanım değerleri 7 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %150, 56 günlük dayanım değerleri ise 28 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %34 daha büyük olmaktadır (Şekil 4.55).

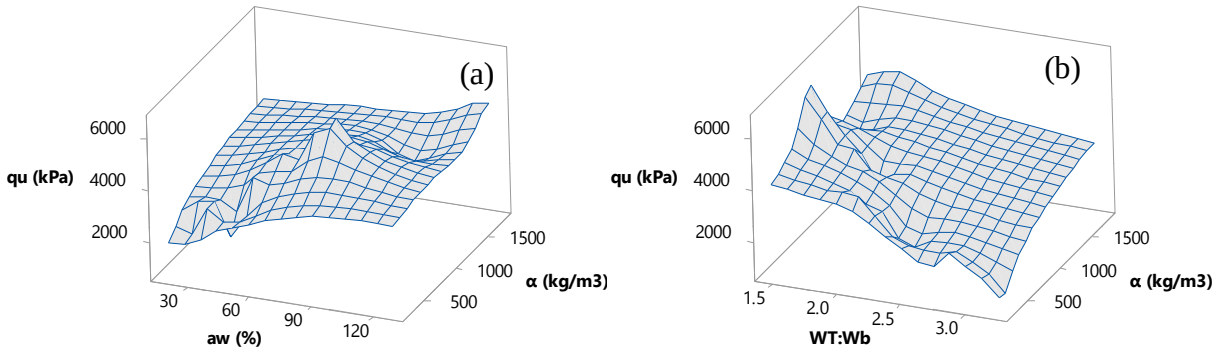


Şekil 4.55. Serbest basınç deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)

Küçük ölçekli DKK tasarımında 56 gün kür süresi sonundaki serbest basınç dayanımı ve bir takım imalat parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de verilmiştir. Buradaki ilişkilere göre genel eğilim α, $\alpha_{in\text{-}place}$ ve a_w arttıkça dayanımın arttığı yönündedir. Fakat $\alpha_{in\text{-}place}$ ve α dayanım üzerinde aynı etkiyi yapmamıştır. Özellikle $I_{L,mix}$ 1.1'den küçük olduğunda ve α 1000 kg/m^3'ten büyük olduğunda dayanım değerlerinde değişim yok denecek kadar azdır. Zemin-enjeksiyon karışımlarının dayanımları $I_{L,mix}$ değeri 1.3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı arttığında dayanımın azaldığı görülmektedir. Burada elde edilen sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Miura vd., 2002; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2005).



Şekil 4.56. Serbest basınç dayanımının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



Şekil 4.57. Serbest basınç dayanımının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

4.2.2.4 Üç eksenli basınç deneyi (UU)

İmal edilen zemin-enjeksiyon karışımları için 7, 28 ve 56 gün sonunda üç eksenli basınç deneyleri (UU) yapılmıştır. Her kür süresi için 2 numune 200 kPa, 2 numune de 400 kPa hücre basıncı altında deneye tabi tutulmuştur. UU deney sonuçları için hem deviatör gerilme-birim boy kısalması (σ_1-σ_3_ε) hem de kırılma zarfı grafikleri birlikte verilmiştir (Ek-6). Kırılma zarfı grafikleri 200 kPa ve 400 kPa hücre basınçlarında test edilen numunelerin dayanımlarının ortalamaları alınarak ayrı ayrı çizilmiştir.

4.2.2.4.1 Kür süresi: 7 gün

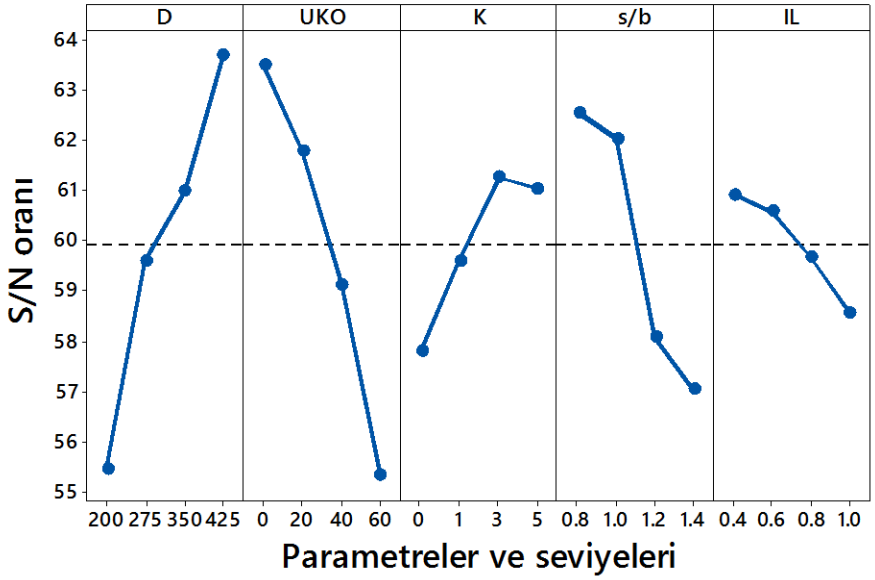
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 7 günlük üç eksenli dayanım (q_{uu}) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) sonuçları Tablo 4.60'da verilmiştir.

S/N analizi sonuçları

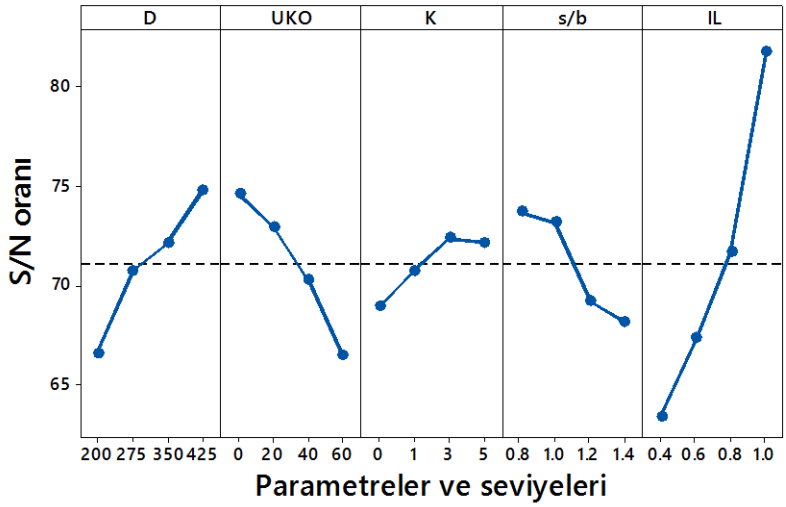
7 günlük q_{uu} ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da verilmiştir. q_{uu} ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Uçucu kül 7 günlük dayanım üzerinde olumlu bir katkı yapmamıştır ve uçucu kül oranı arttıkça q_{uu} ve RI düşmektedir. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_{uu} ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_{uu} azalırken, RI artmaktadır.

Tablo 4.60. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

Tasarım numarası	1. Grup		2. Grup		σ_1-σ_3 (kPa)	RI (%)
	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa		
KÖ-1	915.0	1059.0	1125.0	1150.1	1062.3	1420.2
KÖ-2	850.0	1075.0	1009.6	956.0	972.7	2119.1
KÖ-3	487.9	475.8	527.5	487.8	494.8	1979.0
KÖ-4	248.0	250.0	238.8	238.9	243.9	3535.1
KÖ-5	864.0	1016.0	950.0	979.8	952.5	13803.6
KÖ-6	597.0	670.1	653.2	667.7	647.0	2588.0
KÖ-7	1368.0	1525.7	1457.9	1368.1	1429.9	3115.3
KÖ-8	969.1	1069.5	865.4	832.6	934.2	1248.9
KÖ-9	1430.0	1465.0	1610.0	1575.0	1520.0	3311.5
KÖ-10	1365.0	1413.0	1390.0	1535.0	1425.8	1906.1
KÖ-11	934.5	864.0	862.6	810.0	867.8	12576.4
KÖ-12	840.0	790.0	805.0	907.0	835.5	3342.0
KÖ-13	3070.0	3280.0	3550.0	3020.0	3230.0	12920.0
KÖ-14	2580.0	2550.0	2671.4	2370.0	2542.9	36852.9
KÖ-15	800.5	1313.5	1190.0	1017.8	1080.5	1444.5
KÖ-16	630.0	567.3	661.1	600.0	614.6	1339.0



Şekil 4.58. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



Şekil 4.59. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

Araştırılan parametrelerin 7 günlük üç eksenli basınç dayanımı üzerindeki etki sırası D, UKO, s/b, K ve I_L şeklinde olmaktadır. RI üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, UKO, s/b ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.61).

Tablo 4.61. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Üç eksenli basınç dayanımı, q_{uu} (kPa)	1	55.48	**63.48**	57.82	**62.54**	**60.92**
	2	59.58	61.79	59.61	62.03	60.57
	3	60.98	59.11	**61.26**	58.08	59.68
	4	**63.68**	55.34	61.03	57.07	58.55
	Delta	8.20	8.14	3.44	5.48	2.37
	Sıralama	1	2	4	3	5
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	66.62	**74.62**	68.96	**73.68**	63.44
	2	70.71	72.93	70.75	73.17	67.33
	3	72.12	70.25	**72.40**	69.22	71.72
	4	**74.82**	66.48	72.17	68.21	**81.77**
	Delta	8.20	8.14	3.44	5.48	18.33
	Sıralama	2	3	5	4	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

7 günlük üç eksenli basınç dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.58, %97.90 ve %88.04 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Üç

eksenli basınç dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %33.85, uçucu kül oranı %31.85, katkı oranı %15.04 ve su/bağlayıcı oranı %18.85 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.42 olmuştur (Tablo 4.62). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.62. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 7 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	7978.6	33.85%	7978.55	2659.52	80.47	0.002
Uçucu kül oranı	3	7506.9	31.85%	7506.92	2502.31	75.72	0.003
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	3544.3	15.04%	3544.26	1181.42	35.75	0.008
Su/bağlayıcı oranı	3	4444.4	18.85%	4444.4	1481.47	44.83	0.005
Hata	3	99.1	0.42%	99.15	33.05		
Toplam	15	23573.3	100.00%				

$$q_{uu}^{0.653063} = 97.51 + \begin{bmatrix} -28.05 \\ -7.82 \\ +2.08 \\ +33.80 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +27.07 \\ +12.52 \\ -9.71 \\ -29.88 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -19.40 \\ -8.94 \\ +10.41 \\ +17.93 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +17.01 \\ +16.30 \\ -15.84 \\ -17.47 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

burada, D, UKO, K ve s/b IL parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %91.83, %88.86 ve %81.07 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI sonuçları üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %67.59 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %7.01, su/bağlayıcı oranının %4.33 ve uçucu kül oranının %12.90 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %8.17 olmuştur (Tablo 4.63). RI sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki

regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.23'de, verilmiştir.

Tablo 4.63. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	4	0.000748	91.83%	0.000748	0.000187	30.91	0.000
Bağlayıcı Dozajı	1	0.000057	7.01%	0.000057	0.000057	9.44	0.011
Uçucu kül oranı	1	0.000105	12.90%	0.000105	0.000105	17.37	0.002
Su/bağlayıcı	1	0.000035	4.33%	0.000035	0.000035	5.83	0.034
Likitlik indisi	1	0.000551	67.59%	0.000551	0.000551	91	0.000
Hata	11	0.000067	8.17%	0.000067	0.000006		
Toplam	15	0.000815	100.00%				

$$-RI^{-0.5} = -0.03317 + 0.000023 \cdot D - 0.000115 \cdot UKO - 0.00664 \cdot (s/b) + 0.02624 \cdot I_L \quad (4.23)$$

burada, D, UKO, s/b, I_L parametreleri göstermektedir.

4.2.2.4.2 Kür süresi: 28 gün

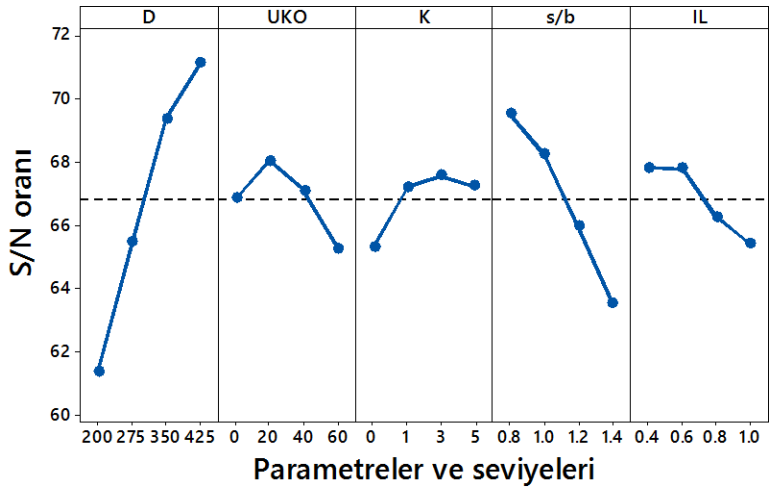
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 28 günlük üç eksenli dayanım sonuçları ve zemin iyileştirme derecesi Tablo 4.64'de verilmiştir.

Tablo 4.64. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

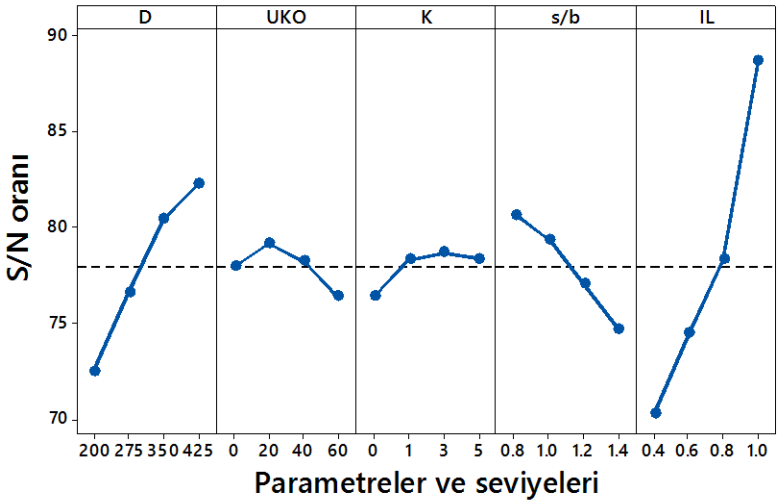
Tasarım numarası	1. Grup		2. Grup		σ_1-σ_3 (kPa)	RI (%)
	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa		
KÖ-1	1108.6	1671.2	1505.3	1024.0	1505.3	2012.4
KÖ-2	1880.0	1823.2	1720.0	1957.3	1845.1	4019.9
KÖ-3	1160.0	1059.2	1115.0	1137.3	1117.9	4471.5
KÖ-4	663.9	570.0	600.0	553.4	596.8	8649.6
KÖ-5	1555.0	1450.0	1505.0	1550.6	1515.2	21958.7
KÖ-6	1093.2	1090.7	1178.3	1296.7	1164.7	4658.9
KÖ-7	3200.0	3350.0	3100.0	3203.3	3100.0	6753.8
KÖ-8	2200.0	2238.7	2247.9	2271.7	2239.6	2994.1
KÖ-9	2315.0	2606.3	2290.0	2590.0	2450.3	5338.4
KÖ-10	3010.0	3150.0	3000.0	2910.0	3585.0	4792.8
KÖ-11	2370.0	2623.0	2465.4	2645.7	2526.0	36609.1
KÖ-12	3200.0	3204.3	3340.0	3351.7	3274.0	13096.0
KÖ-13	4440.0	4250.0	4170.0	3850.0	4177.5	16710.0
KÖ-14	5645.0	4920.0	4580.0	5780.5	5231.4	75817.0
KÖ-15	2836.1	3484.7	3080.0	2512.6	2978.4	3981.8
KÖ-16	2705.6	3004.1	2650.9	3082.4	2550.9	5557.5

S/N analizi sonuçları

28 günlük q_{uu} ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.60 ve Şekil 4.61'de verilmiştir. q_{uu} ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı %20'ye, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_{uu} ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_{uu} azalırken, RI artmaktadır.



Şekil 4.60. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



Şekil 4.61. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin 28 günlük üç eksenli basınç dayanımı üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. Zemin iyileştirme derecesi üzerinde etkili olan

parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.65).

Tablo 4.65. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Üç eksenli basınç dayanımı, q_u (kPa)	1	61.34	66.84	65.26	**69.51**	**67.78**
	2	65.44	**68.03**	67.18	68.20	67.77
	3	69.31	67.08	**67.53**	65.95	66.25
	4	**71.10**	65.24	67.21	63.53	65.39
	Delta	9.76	2.79	2.27	5.99	2.39
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	72.48	77.98	76.40	**80.65**	70.30
	2	76.58	**79.16**	78.32	79.34	74.53
	3	80.44	78.22	**78.67**	77.09	78.29
	4	**82.24**	76.38	78.35	74.66	**88.61**
	Delta	9.76	2.79	2.27	5.99	18.31
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

28 günlük üç eksenli basınç dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.86, %99.30 ve %96.00 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Üç eksenli basınç dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %61.56, uçucu kül oranı %6.35, katkı oranı %10.10 ve su/bağlayıcı oranı %21.84 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.14 olmuştur (Tablo 4.66). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.24'de verilmiştir.

Tablo 4.66. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	1.27E+08	61.56%	1.27E+08	42359095	437.49	0.000
Uçucu kül oranı	3	13116804	6.35%	13116804	4372268	45.16	0.005
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	20850791	10.10%	20850791	6950264	71.78	0.003
Su/bağlayıcı oranı	3	45085323	21.84%	45085323	15028441	155.22	0.001
Hata	3	290467	0.14%	290467	96822		
Toplam	15	2.06E+08	100.00%				

$$q_{uu}^{1.12606} = 6784.3 + \begin{bmatrix} -3636 \\ -1506 \\ +1335 \\ +3807 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -258 \\ +1479 \\ -236 \\ -985 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -1719 \\ -329 \\ +861 \\ +1187 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +2417 \\ +570 \\ -925 \\ -2062 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %98.81, %94.03 ve %66.02 olarak bulunmuştur. Kurulan modelde, RI sonuçları üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %68.54 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %21.03, su/bağlayıcı oranının %7.73 ve uçucu kül oranının %1.5 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %1.19 olmuştur (Tablo 4.67). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.25'de, verilmiştir.

Tablo 4.67. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	2.9926	21.03%	2.9926	0.99753	17.61	0.021
Uçucu kül oranı	3	0.2133	1.50%	0.2133	0.07109	1.25	0.428
Su/bağlayıcı oranı	3	1.1004	7.73%	1.1004	0.36681	6.47	0.080
Likitlik indisi	3	9.7511	68.54%	9.7511	3.25035	57.37	0.004
Hata	3	0.17	1.19%	0.17	0.05665		
Toplam	15	14.2273	100.00%				

$$\ln(RI) = 8.9725 + \begin{bmatrix} -0.628 \\ -0.156 \\ +0.289 \\ +0.496 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.005 \\ +0.142 \\ +0.033 \\ -0.179 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.313 \\ +0.161 \\ -0.097 \\ -0.377 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.879 \\ -0.392 \\ +0.041 \\ +1.229 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

burada, D, UKO, K ve s/b I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.2.4.3 Kür süresi: 56 gün

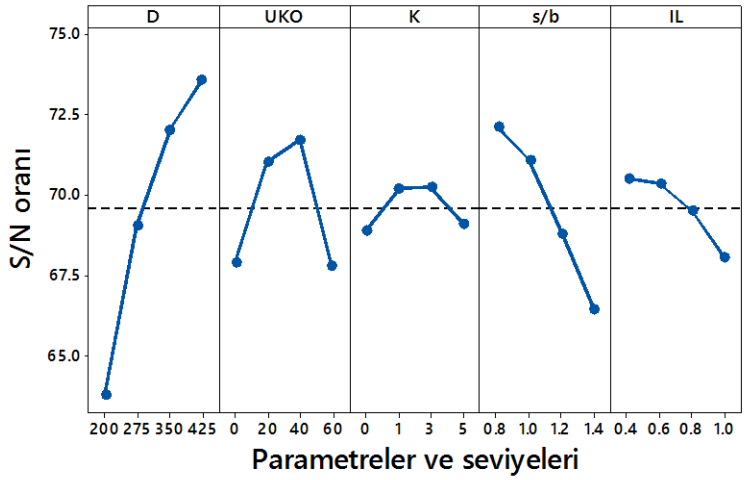
Zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin 56 günlük üç eksenli dayanım sonuçları ve zemin iyileştirme derecesi Tablo 4.68'de verilmiştir.

Tablo 4.68. Zemin-bağlayıcı karışım numunelerinin üç eksenli basınç dayanımı ve zemin iyileştirme derecesi (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

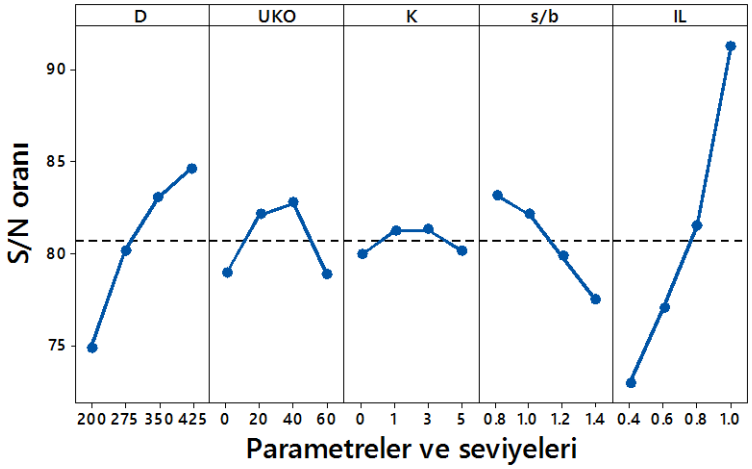
Tasarım numarası	1. Grup		2. Grup		σ_3-σ_1 (kPa)	RI (%)
	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa	σ_3=200 kPa	σ_3=400 kPa		
KÖ-1	1830.0	1562.3	1732.0	1820.0	1736.1	2321.0
KÖ-2	2300.0	2490.0	2532.9	2725.2	2512.0	5472.8
KÖ-3	1670.0	1907.9	1665.0	1686.3	1907.9	7631.6
KÖ-4	693.0	747.8	643.0	669.0	688.2	9973.9
KÖ-5	2017.8	1772.6	1819.4	1975.7	1896.4	27483.7
KÖ-6	2326.4	2170.0	1820.0	2133.5	2112.5	8449.9
KÖ-7	4380.6	4831.9	5051.2	5462.7	4931.6	10744.2
KÖ-8	3063.3	2860.0	3227.9	2622.5	3227.9	4315.4
KÖ-9	2855.0	2700.0	2420.0	2690.0	2666.3	5808.8
KÖ-10	4360.0	4500.0	4357.3	4590.8	4452.0	5951.9
KÖ-11	4679.1	4874.1	4183.7	4734.3	4617.8	66924.6
KÖ-12	4550.0	4640.0	4650.0	4370.0	4552.5	18210.0
KÖ-13	4300.0	4345.7	3728.0	4923.8	4324.4	17297.5
KÖ-14	5862.0	7081.6	6700.0	7400.0	6760.9	97984.1
KÖ-15	4940.0	5016.6	4790.0	5252.0	4999.7	6684.0
KÖ-16	3572.1	3753.5	3121.6	3660.0	3526.8	7683.7

S/N analizi sonuçları

56 günlük q_{uu} ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'de verilmiştir. q_{uu} ve RI; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça artmakta, uçucu kül oranı %40'ye, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) arttıkça q_{uu} ve RI azalmaktadır. Ayrıca zeminin likitlik indisi (I_L) veya su muhtevası arttıkça q_{uu} azalırken, RI artmaktadır.



Şekil 4.62. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



Şekil 4.63. Zemin iyileştirme derecesi için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin 56 günlük üç eksenli basınç dayanımı üzerindeki etki sırası D, s/b, UKO, I_L ve K şeklinde olmaktadır. Zemin iyileştirme derecesi üzerinde etkili olan parametrelerin önem derecesine göre sıralaması I_L, D, s/b, UKO ve K şeklinde olmaktadır (Tablo 4.69).

Tablo 4.69. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Üç eksenli basınç dayanımı, q_{uu} (kPa)	1	63.79	67.90	68.88	**72.10**	**70.48**
	2	69.02	71.02	70.18	71.05	70.33
	3	71.99	**71.68**	**70.23**	68.77	69.50
	4	**73.56**	67.76	69.08	66.44	68.05
	Delta	9.77	3.92	1.35	5.67	2.43
	Sıralama	1	3	5	2	4
Zemin iyileştirme derecesi, RI (%)	1	74.93	79.03	80.02	**83.24**	73.00
	2	80.16	82.15	81.31	82.18	77.10
	3	83.12	**82.82**	**81.36**	79.91	81.54
	4	**84.70**	78.90	80.21	77.57	**91.27**
	Delta	9.77	3.92	1.35	5.67	18.27
	Sıralama	2	4	5	3	1

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

56 günlük üç eksenli basınç dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.21, %96.03 ve %77.40 olarak bulunmuştur. Süper akışkanlaştırıcı katkı dışındaki tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Üç eksenli basınç dayanımı üzerinde bağlayıcı dozajı %58.94, uçucu kül oranı %15.89, katkı oranı %2.73 ve su/bağlayıcı oranı %21.65 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.79 olmuştur (Tablo 4.70). Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.70. Üç eksenli basınç dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı dozajı	3	22748494	58.94%	22748494	7582831	74.18	0.003
Uçucu kül oranı	3	6134826	15.89%	6134826	2044942	20	0.017
Süper akışkanlaştırıcı oranı	3	1051854	2.73%	1051854	350618	3.43	0.169
Su/bağlayıcı oranı	3	8354621	21.65%	8354621	2784874	27.24	0.011
Hata	3	306676	0.79%	306676	102225		
Toplam	15	38596470	100.00%				

$$q_{uu} = 3432.1 + \begin{bmatrix} -1721 \\ -390 \\ +640 \\ +1471 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -776 \\ +527 \\ +682 \\ -433 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -434 \\ +58 \\ +209 \\ +167 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +1063 \\ +238 \\ -486 \\ -815 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

burada, D, UKO, K ve s/b parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.45, %97.23 ve %84.23 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Kurulan modelde, RI sonuçları üzerinde zeminin likitlik indisi (su muhtevası) %67.57 oranında etkili çıkmıştır. Sonuçlar üzerinde bağlayıcı dozajının %20.29, su/bağlayıcı oranının %6.97 ve uçucu kül oranının %4.62 etkisi bulunmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.55 olmuştur (Tablo 4.71). Zemin iyileştirme oranı sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.27'de, verilmiştir.

Tablo 4.71. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	2.9415	20.29%	2.94147	0.98049	36.6	0.007
Uçucu kül oranı	3	0.6699	4.62%	0.6699	0.2233	8.34	0.058
Su/bağlayıcı oranı	3	1.0102	6.97%	1.01022	0.33674	12.57	0.033
Likitlik indisi	3	9.7954	67.57%	9.79541	3.26514	121.88	0.001
Hata	3	0.0804	0.55%	0.08037	0.02679		
Toplam	15	14.4974	100.00%				

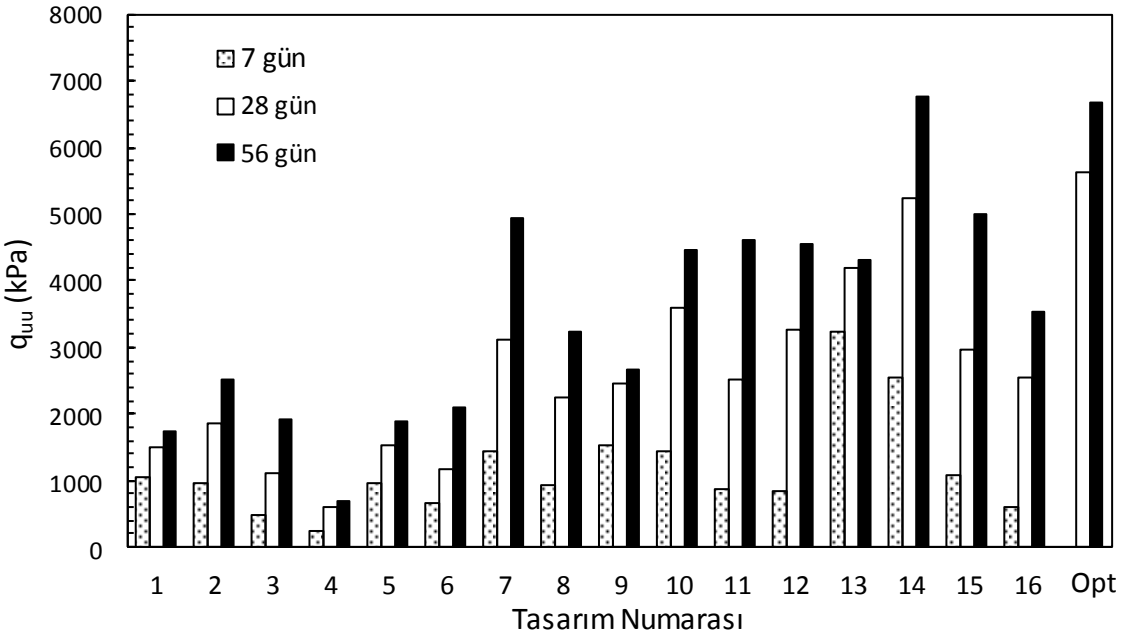
$$\ln(RI) = 9.2941 + \begin{bmatrix} -0.6678 \\ -0.0652 \\ +0.2758 \\ +0.4572 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1949 \\ +0.1643 \\ +0.2412 \\ -0.2105 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.2895 \\ +0.1677 \\ -0.0941 \\ -0.3630 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.8894 \\ -0.4182 \\ +0.0934 \\ +1.2142 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

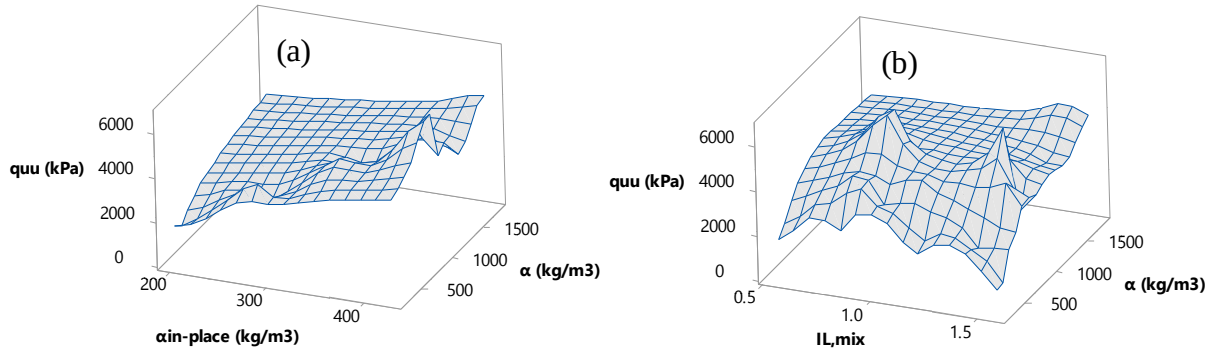
4.2.2.4.4 Üç eksenli basınç deneyi sonuçlarının tartışılması

Üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında minimum ve maksimum dayanımın görüldüğü yerler serbest basınç deneylerinde olduğu gibidir. 7, 28 ve 56 gün kür sürelerinde elde edilen en düşük ve en büyük dayanım sonuçları sırasıyla 243.9-3230 kPa, 596.8 kPa-5231.4 kPa ve 688.2-6760.9 kPa olmuştur. Optimum tasarımda ise 28 günlük üç eksenli basınç dayanımı 5614.8 kPa iken 56 günlük dayanım 6673 kPa olmuştur. Üç eksenli basınç mukavemeti bakımından 28 günlük dayanım değerleri 7 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %130, 56 günlük dayanım değerleri ise 28 günlük dayanım değerlerinden ortalama olarak %39 daha büyük olmaktadır (Şekil 4.64).

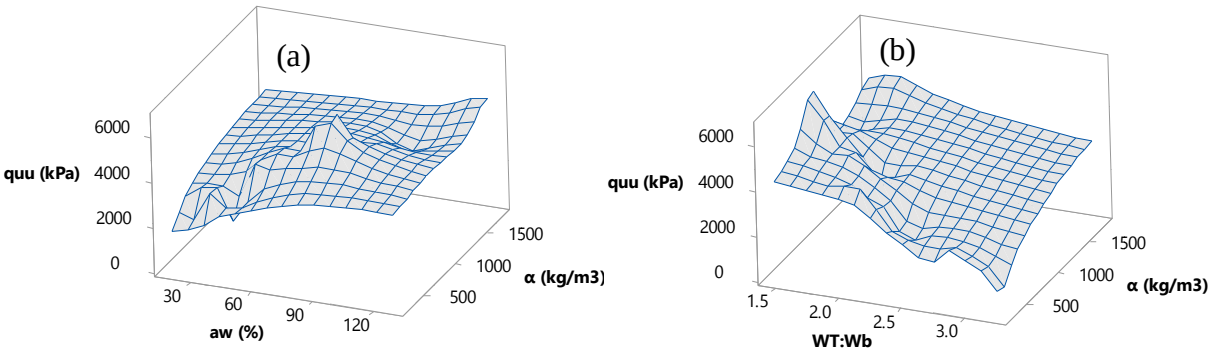
Küçük ölçekli DKK tasarımında 56 gün kür süresi sonundaki üç eksenli basınç dayanımı ve bir takım imalat parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da verilmiştir. Buradaki ilişkilere göre genel eğilim α, $\alpha_{in\text{-}place}$ ve a_w attıkça dayanımın arttığı yönündedir. Fakat $\alpha_{in\text{-}place}$ ve α dayanım üzerinde aynı etkiyi yapmamıştır. Özellikle $I_{L,mix}$ 1.1'den küçük olduğunda ve α 1000 kg/m^3'ten büyük olduğunda dayanım değerlerinde değişim yok denecek kadar azdır. Zemin-enjeksiyon karışımlarının dayanımları $I_{L,mix}$ değeri 1.3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı arttığında dayanımın azaldığı görülmektedir. Burada elde edilen sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da ortaya konmuştur (Miura vd., 2002; Filz vd., 2005; Jacobson vd., 2005).



Şekil 4.64. Üç eksenli basınç deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)



Şekil 4.65. Üç eksenli basınç dayanımının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



Şekil 4.66. Üç eksenli basınç dayanımının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

4.2.2.5 Konsolidasyon deneyi

Küçük ölçekli DKK tasarımında her bir zemin-bağlayıcı karışımından en az 1 adet olmak üzere konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Hazırlanan karışımlar 50 mm çapında ve 20 mm boyundaki konsolidasyon ringlerine yerleştirilerek 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sırasında numuneye 50-100-200-400-800 ve 1600 kPa gerilme değerlerinde yükleme yapılmış ve oturmalar bitene kadar numunedeki boy değişimleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra numune üzerindeki yük 100 kPa gerilme değerine boşaltılarak numune boyundaki artış kayıt edilmiştir. Deney sonucunda numunenin sıkışma indisi (Cc), kabarma indisi (Cs) ve boşluk oranı değişimi (Δe) parametreleri belirlenmiştir. Küçük ölçekli DKK tasarımlarında yapılan konsolidasyon deneylerinin sonuçları EK-7'de verilmiştir.

4.2.2.5.1 Kür süresi: 28 gün

Küçük ölçekli DKK tasarımında 28 günlük konsolidasyon deneyi sonuçları (Cc, Cs, Δe, Δe/e) Tablo 4.72'de verilmiştir.

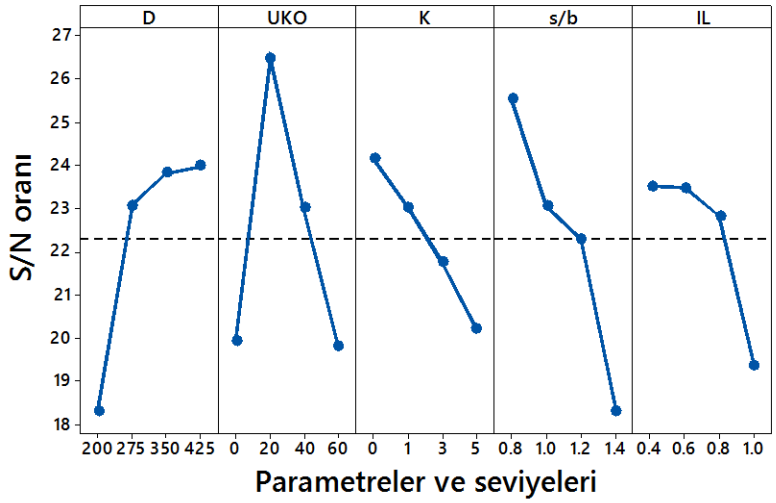
Tablo 4.72. Zemin-bağlayıcı karışımları için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Tasarım No	Sıkışma indisi (Cc)	Kabarma indisi (Cs)	Boşluk oranındaki değişim (Δe)	Boşluk oranındaki yüzdece değişim, % (Δe/e)
KÖ-1	0.077	0.014	0.072	6.0
KÖ-2	0.055	0.013	0.059	4.4
KÖ-3	0.112	0.016	0.080	5.3
KÖ-4	0.457	0.027	0.251	13.5
KÖ-5	0.119	0.011	0.100	5.2
KÖ-6	0.052	0.015	0.064	4.4
KÖ-7	0.049	0.015	0.062	2.8
KÖ-8	0.079	0.018	0.075	5.6
KÖ-9	0.124	0.018	0.160	8.4
KÖ-10	0.044	0.015	0.073	4.8
KÖ-11	0.061	0.013	0.062	3.6
KÖ-12	0.051	0.014	0.054	4.0
KÖ-13	0.091	0.014	0.088	5.6
KÖ-14	0.040	0.012	0.059	4.2
KÖ-15	0.074	0.014	0.067	4.9
KÖ-16	0.059	0.013	0.067	5.1

S/N analizi sonuçları

Bu kısımdaki amaç, en düşük sıkışma indisi (Cc) elde etmek olduğundan dolayı S/N analizi yapılırken "en düşük en iyi (smaller is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

Sıkışma indisi (Cc) sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.67'de verilmiştir. Numunelerin sıkışma indisi; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %20'ye kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b), süper akışkanlaştırıcı katkı oranı ve zeminin likitlik indisi (I_L) arttıkça numunelerin sıkışma indisi artmaktadır.



Şekil 4.67. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin 28 günlük sıkışma indisi (Cc) üzerindeki etki sırası su/bağlayıcı oranı, uçucu kül oranı, bağlayıcı dozajı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası) ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.73).

Tablo 4.73. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Sıkışma indisi (Cc)	1	18.30	19.91	**24.17**	**25.54**	**23.51**
	2	23.08	**26.48**	23.01	23.05	23.48
	3	23.83	23.01	21.78	22.28	22.82
	4	**23.98**	19.79	20.22	18.32	19.37
	Delta	5.68	6.69	3.95	7.22	4.14
	Sıralama	3	2	5	1	4

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Sıkışma indisi (Cc) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.12, %95.59 ve %74.91 olarak bulunmuştur. Likitlik indisi dışındaki tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Sıkışma indisi üzerinde bağlayıcı dozajı %14.65, uçucu kül oranı %56.99, su/bağlayıcı oranı %26.86 ve zemin likitlik indisi %0.62 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.88 olmuştur (Tablo 4.74). Sıkışma indisi sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.28'de verilmiştir.

Tablo 4.74. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	68624	14.65%	68624	22874.8	16.61	0.023
Uçucu kül oranı	3	266906	56.99%	266906	88968.8	64.61	0.003
Su/bağlayıcı oranı	3	125794	26.86%	125794	41931.4	30.45	0.010
Likitlik indisi	3	2885	0.62%	2885	961.7	0.7	0.612
Hata	3	4131	0.88%	4131	1376.9		
Toplam	15	468341	100.00%				

$$-C_c^{-2} = -251.85 + \begin{bmatrix} +107.2 \\ -0.8 \\ -55.2 \\ -51.2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +146.1 \\ -207.6 \\ +16.9 \\ +44.7 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -144.5 \\ +33.9 \\ +14.5 \\ +96.0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -5.0 \\ -19.6 \\ +14.2 \\ +10.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

4.2.2.5.2 Kür süresi: 56 gün

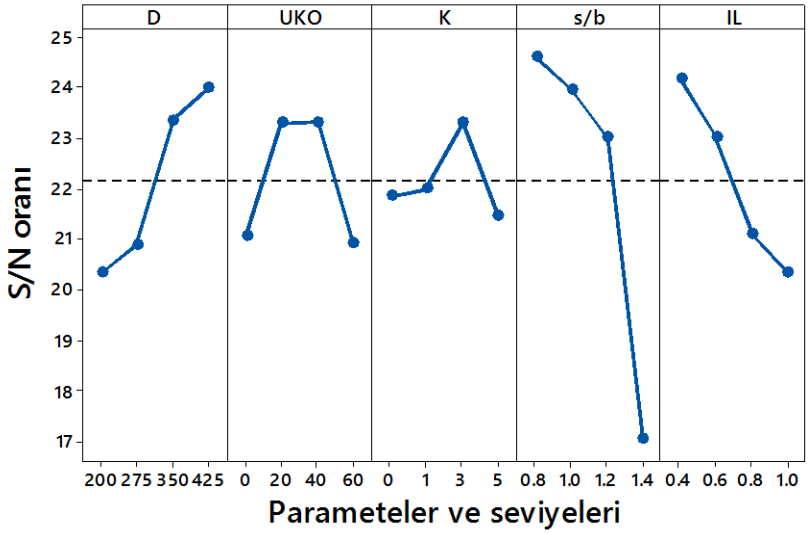
Küçük ölçekli DKK tasarımında 56 günlük konsolidasyon deneyi sonuçları (Cc, Cs, Δe, Δe/e) Tablo 4.75'de verilmiştir.

Tablo 4.75. Zemin-bağlayıcı karışımları için elde edilen konsolidasyon parametreleri (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

Tasarım No	Sıkışma indisi (Cc)	Kabarma indisi (Cs)	Boşluk oranındaki değişim (Δe)	Boşluk oranındaki yüzdece değişim, % (Δe/e)
KÖ-1	0.067	0.022	0.080	6.9
KÖ-2	0.063	0.006	0.042	3.1
KÖ-3	0.075	0.015	0.070	4.7
KÖ-4	0.266	0.018	0.120	6.6
KÖ-5	0.116	0.020	0.110	5.6
KÖ-6	0.166	0.016	0.123	6.6
KÖ-7	0.058	0.018	0.060	4.5
KÖ-8	0.059	0.018	0.058	4.4
KÖ-9	0.110	0.024	0.110	5.8
KÖ-10	0.046	0.010	0.067	4.1
KÖ-11	0.061	0.015	0.076	4.5
KÖ-12	0.068	0.018	0.096	7.5
KÖ-13	0.071	0.026	0.119	7.2
KÖ-14	0.045	0.016	0.091	5.8
KÖ-15	0.080	0.028	0.293	13.6
KÖ-16	0.062	0.018	0.073	3.6

S/N analizi sonuçları

56 günlük sıkışma indisine (Cc) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.68'de verilmiştir. Küçük ölçekli numunelerin sıkışma indisi; bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmakta, uçucu kül oranı (UKO) %40'a ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3'e kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı (s/b) ve zeminin likitlik indisi (I_L) arttıkça numunelerin sıkışma indisi artmaktadır.



Şekil 4.68. Sıkışma indisi (Cc) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin 56 günlük sıkışma indisi (Cc) üzerindeki etki sırası su/bağlayıcı oranı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası), bağlayıcı dozajı, uçucu kül oranı ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.76).

Tablo 4.76. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Sıkışma indisi (Cc)	1	20.36	21.08	21.87	**24.62**	**24.19**
	2	20.92	23.31	22.01	23.96	23.02
	3	23.37	**23.33**	**23.31**	23.02	21.11
	4	**24.01**	20.93	21.47	17.06	20.35
	Delta	3.64	2.41	1.84	7.56	3.84
	Sıralama	3	4	5	1	2

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Sıkışma indisi (Cc) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %97.11, %85.54 ve %17.73 olarak bulunmuştur. Su/bağlayıcı oranı dışındaki tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten büyük olduğu için bu parametreler ile sonuçlar arasında anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır. Sıkışma indisi üzerinde bağlayıcı dozajı %15.33, uçucu kül oranı %10.53, su/bağlayıcı oranı %57.61 ve zemin likitlik indisi %13.63 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %2.89 olmuştur (Tablo 4.77). Sıkışma indisi sonuçları ile araştırılan parametreler

arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.29'da verilmiştir.

Tablo 4.77. Cc için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon, 56 gün)

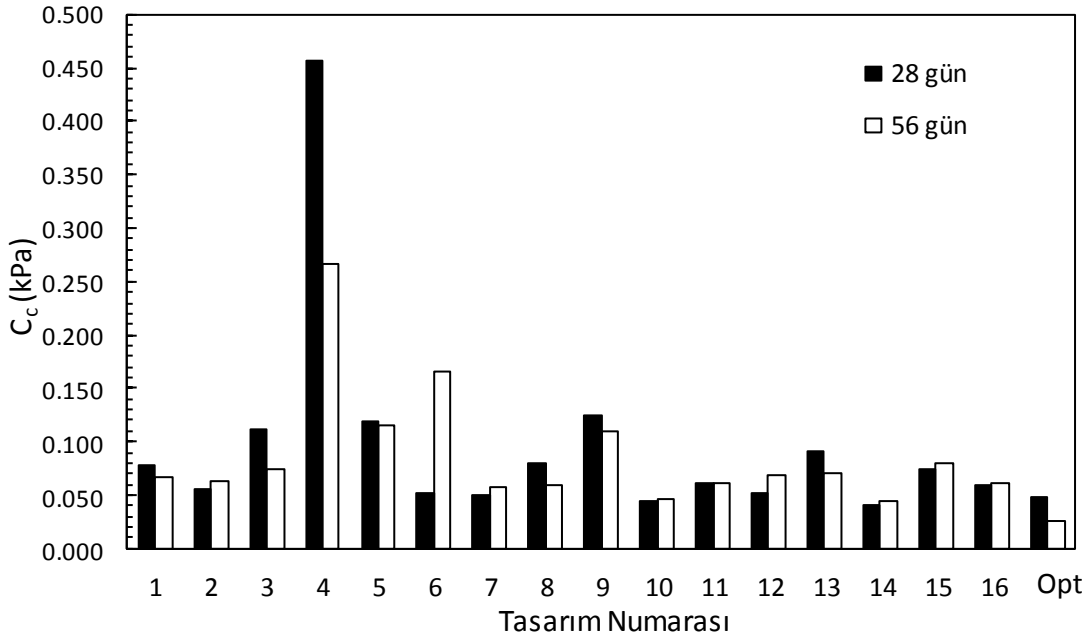
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	1.2829	15.33%	1.2829	0.42763	5.3	0.102
Uçucu kül oranı	3	0.8811	10.53%	0.8811	0.2937	3.64	0.158
Su/bağlayıcı oranı	3	4.8199	57.61%	4.8199	1.60664	19.92	0.017
Likitlik indisi	3	1.1403	13.63%	1.1403	0.3801	4.71	0.118
Hata	3	0.242	2.89%	0.242	0.08066		
Toplam	15	8.3662	100.00%				

$$-C_c{}^{-0.5} = -3.6663 + \begin{bmatrix} +0.309 \\ +0.249 \\ -0.219 \\ -0.340 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.275 \\ -0.285 \\ -0.173 \\ +0.183 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.473 \\ -0.309 \\ -0.148 \\ +0.930 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.378 \\ -0.125 \\ +0.243 \\ +0.260 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

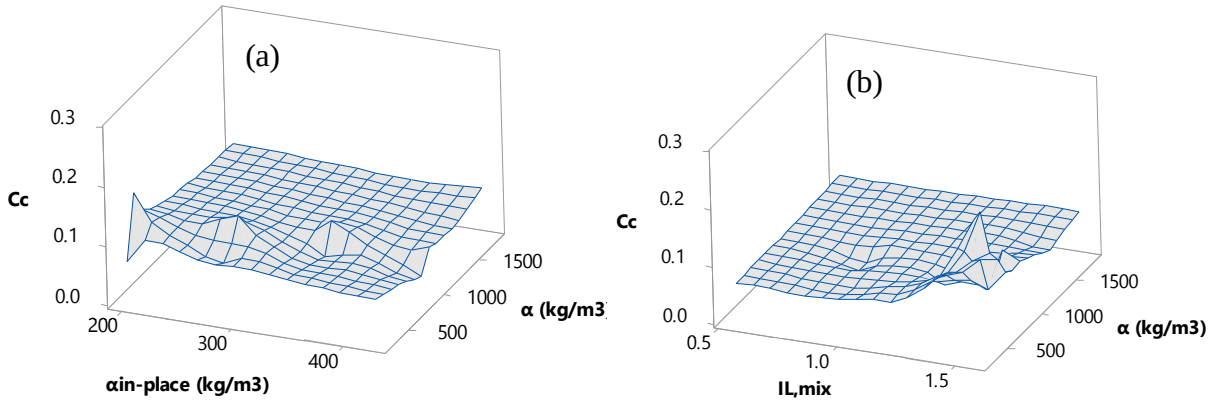
4.2.2.5.3 Konsolidasyon deneyi sonuçlarının tartışılması

Konsolidasyon deney sonuçlarına bakıldığında da sıkışma indisinin en büyük olduğu tasarım 4 olurken, en düşük olduğu tasarım 14 olmaktadır. 56 günlük sıkışma indisi değerleri 28 günlük sıkışma indisi değerlerinden ortalama olarak %7 daha küçük olmaktadır (Şekil 4.69).

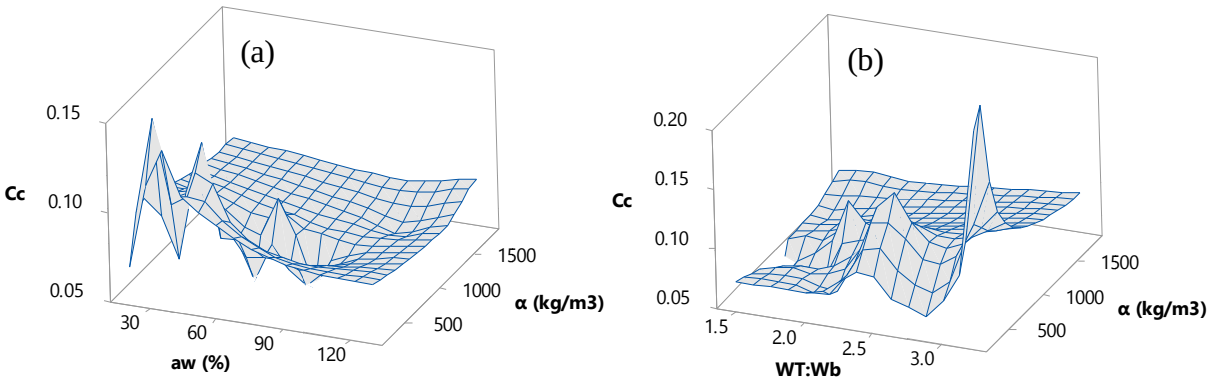


Şekil 4.69. Konsolidasyon deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)

Küçük ölçekli DKK tasarımında 56 gün kür süresi sonundaki sıkışma indisi ve bir takım imalat parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'de verilmiştir. Buradaki ilişkilere göre genel eğilim α, $\alpha_{in\text{-}place}$ ve a_w attıkça sıkışma indisinin azaldığı yönündedir. Fakat $\alpha_{in\text{-}place}$ ve α sıkışma indisi üzerinde aynı etkiyi yapmamıştır. Özellikle $I_{L,mix}$ 1.1'den küçük olduğunda ve α 1000 kg/m^3'ten büyük olduğunda sıkışma indisi değerlerinde değişim yok denecek kadar azdır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı arttığında sıkışma indisinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.70. Sıkışma indisinin a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)



Şekil 4.71. Sıkışma indisinin a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

4.2.2.6 Permeabilite deneyi

4.2.2.6.1 Kür süresi: 28 gün

İmal edilen küçük ölçekli DKK numunelerinin 28 günlük permeabilite deneyi sonuçları (k) Tablo 4.78'de verilmiştir.

Tablo 4.78. Permeabilite deneyi sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

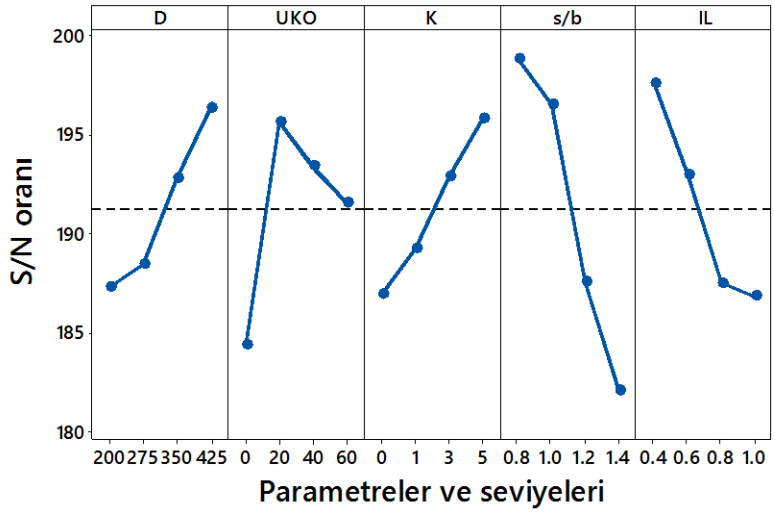
Tasarım No	Permeabilite katsayısı, k (m/s)
KÖ-1	3.116E-10
KÖ-2	1.441E-10
KÖ-3	6.503E-10
KÖ-4	1.149E-09
KÖ-5	2.627E-09
KÖ-6	1.619E-09
KÖ-7	5.944E-11
KÖ-8	7.866E-11
KÖ-9	9.707E-10
KÖ-10	5.937E-11
KÖ-11	2.629E-10
KÖ-12	1.771E-10
KÖ-13	1.643E-10
KÖ-14	5.231E-11
KÖ-15	2.041E-10
KÖ-16	2.995E-10

S/N analizi sonuçları

S/N analizi yapılırken "en düşük en iyi (smaller is better)" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.

28 günlük permeabilite katsayısına (k) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.72'de verilmiştir. Küçük ölçekli DKK numunelerinin permeabilite katsayısı (k); bağlayıcı

dozajı (D) ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) arttıkça azalmaktadır. Uçucu kül oranı (UKO) %20'ye kadar permeabilite katsayısı azalırken bundan sonra artışa geçmektedir. Su/bağlayıcı oranı (s/b) ve zeminin likitlik indisi (I_L) arttıkça numunelerin permeabilite katsayısı (k) artmaktadır.



Şekil 4.72. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Araştırılan parametrelerin 28 günlük permeabilite katsayısı (k) üzerindeki etki sırası su/bağlayıcı oranı, uçucu kül oranı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası), bağlayıcı dozajı ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.79).

Tablo 4.79. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, permeabilite, 28 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Permeabilite katsayısı (k)	1	187.4	184.4	187.0	**198.8**	**197.6**
	2	188.5	**195.7**	189.3	196.6	193.0
	3	192.9	193.4	192.9	187.6	187.6
	4	**196.4**	191.6	**195.9**	182.2	186.9
	Delta	9	11.3	8.9	16.7	10.7
	Sıralama	4	2	5	1	3

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Permeabilite katsayısı değerleri sayısal olarak çok küçük olduğundan dolayı ANOVA analizi yapılırken sonuçların düzgün elde edilmesi için tüm sonuçlar 10^9 değeri ile çarpılarak sonuçlar aynı oranda büyütülmüştür. Permeabilite katsayısı (k) ve tasarım parametreleri

arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %79.61, %72.19 ve %54.60 olarak bulunmuştur. Permeabilite katsayısı (k) üzerinde bağlayıcı dozajı %11.58, uçucu kül oranı %10.71, su/bağlayıcı oranı %40.72 ve zemin likitlik indisi %16.60 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %20.39 olmuştur (Tablo 4.80). Permeabilite katsayısı (k) sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.30'da verilmiştir.

Tablo 4.80. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	4	18.006	79.61%	18.006	4.5016	10.73	0.001
Bağlayıcı Dozajı	1	2.618	11.58%	2.618	2.6184	6.24	0.030
Uçucu kül oranı	1	2.423	10.71%	2.423	2.4229	5.78	0.035
Su/bağlayıcı oranı	1	9.211	40.72%	9.211	9.2111	21.96	0.001
Likitlik indisi	1	3.754	16.60%	3.754	3.7539	8.95	0.012
Hata	11	4.613	20.39%	4.613	0.4194		
Toplam	15	22.619	100.00%				

$$\ln(k)\cdot 10^{9} = -4.58 - 0.0482\cdot D - 0.2026\cdot K + 3.393\cdot (s/b) + 2.166\cdot I_L \qquad (4.30)$$

burada, D, K, s/b, I_L parametreleri göstermektedir.

4.2.2.6.2 Kür süresi: 56 gün

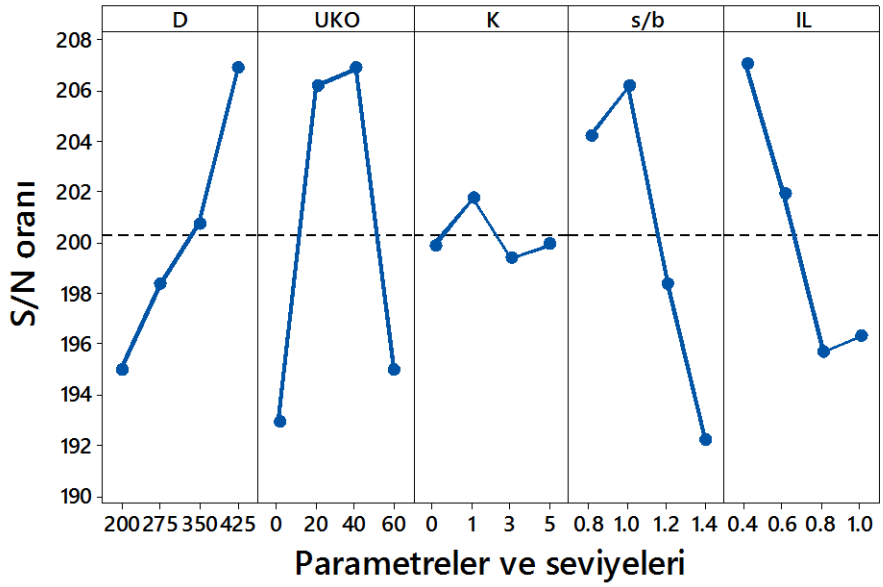
İmal edilen küçük ölçekli DKK numunelerinin 56 günlük permeabilite deneyi sonuçları (k) Tablo 4.81'de verilmiştir.

S/N analizi sonuçları

56 günlük permeabilite katsayısına (k) ait S/N oranları için ana etki grafiği Şekil 4.73'de verilmiştir. Küçük ölçekli DKK numunelerinin permeabilite katsayısı (k); bağlayıcı dozajı (D) arttıkça azalmaktadır. Uçucu kül oranı (UKO) %40'a, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K) %1'e ve su/bağlayıcı oranı (s/b) 1'e kadar permeabilite katsayısı azalırken bundan sonra artışa geçmektedir. Zeminin likitlik indisi (I_L) 0.8'e kadar permeabilite katsayısı artarken bundan sonra azalmaya geçmiştir.

Tablo 4.81. Permeabilite deneyi sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

Tasarım No	Permeabilite katsayısı, k (m/s)
KÖ-1	1.241E-10
KÖ-2	3.125E-11
KÖ-3	1.920E-10
KÖ-4	1.346E-09
KÖ-5	4.553E-10
KÖ-6	2.694E-10
KÖ-7	3.057E-11
KÖ-8	5.615E-11
KÖ-9	4.890E-10
KÖ-10	2.730E-11
KÖ-11	3.541E-11
KÖ-12	1.519E-10
KÖ-13	9.244E-11
KÖ-14	2.495E-11
KÖ-15	2.041E-11
KÖ-16	8.775E-11



Şekil 4.73. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

Araştırılan parametrelerin 56 günlük permeabilite katsayısı (k) üzerindeki etki sırası su/bağlayıcı oranı, uçucu kül oranı, bağlayıcı dozajı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası) ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı şeklinde olmaktadır (Tablo 4.82).

Tablo 4.82. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK, permeabilite,56 gün)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler				
		D	UKO	K	s/b	I_L
Permeabilite katsayısı (k)	1	195.0	193.0	199.9	204.2	**207.1**
	2	198.4	206.2	**201.8**	**206.2**	201.9
	3	200.7	**206.9**	199.4	198.4	195.7
	4	**206.9**	195.0	199.9	192.2	196.3
	Delta	11.9	13.9	2.4	14	11.4
	Sıralama	3	2	5	1	4

Not: **Kalın** olarak yazılan değerlerdeki parametre seviyeleri optimum seviyeyi göstermektedir.

ANOVA (varyans analizi) sonuçları

Permeabilite katsayısı değerleri sayısal olarak çok küçük olduğundan dolayı ANOVA analizi yapılırken sonuçların düzgün elde edilmesi için tüm sonuçlar 10^9 değeri ile çarpılarak sonuçlar aynı oranda büyütülmüştür. Permeabilite katsayısı (k) ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %99.26, %96.32 ve %79.07 olarak bulunmuştur. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametre ile permeabilite katsayısı sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Permeabilite katsayısı (k) üzerinde bağlayıcı dozajı %17.09, uçucu kül oranı %36.07, su/bağlayıcı oranı %26.89 ve zemin likitlik indisi %19.22 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %0.74 olmuştur (Tablo 4.83). Permeabilite katsayısı (k) sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.31'de verilmiştir.

Tablo 4.83. Permeabilite katsayısı (k) için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

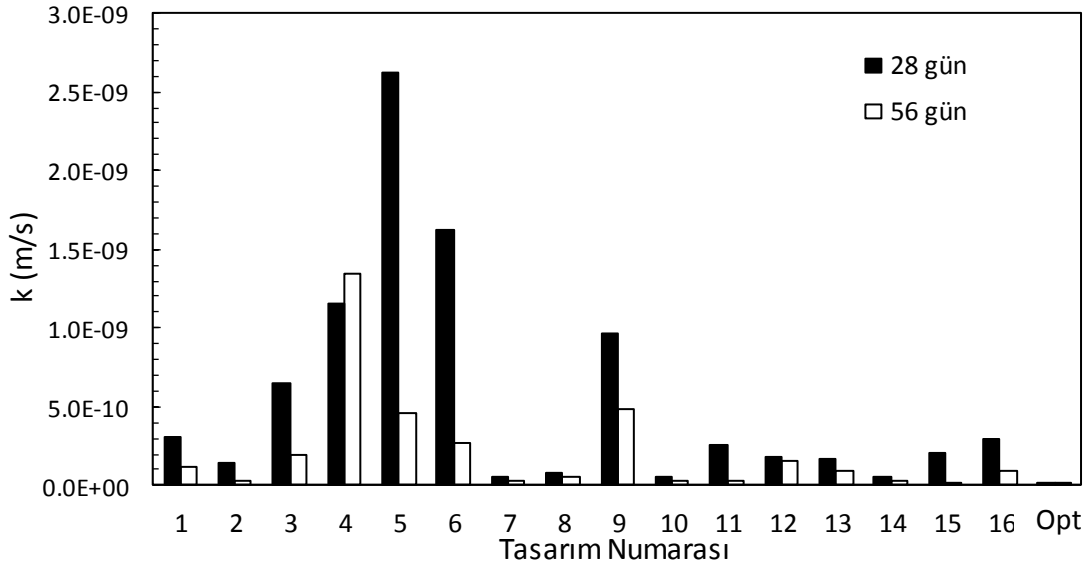
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Dozajı	3	4.0196	17.09%	4.0196	1.33987	23.22	0.014
Uçucu kül oranı	3	8.4854	36.07%	8.4854	2.82847	49.01	0.005
Su/bağlayıcı oranı	3	6.3245	26.89%	6.3245	2.10816	36.53	0.007
Likitlik indisi	3	4.5202	19.22%	4.5202	1.50675	26.11	0.012
Hata	3	0.1731	0.74%	0.1731	0.05771		
Toplam	15	23.5228	100.00%				

$$\ln(k)\cdot 10^{9} = -2.3318 + \begin{bmatrix} +0.605 \\ +0.215 \\ -0.053 \\ -0.767 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.839 \\ -0.685 \\ -0.761 \\ +0.607 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.456 \\ -0.685 \\ +0.214 \\ +0.927 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.783 \\ -0.194 \\ +0.525 \\ +0.452 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

burada, D, UKO, s/b ve I_L parametreleri, alt indisler parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine karşılık gelen katsayı ile işlem yapılmalıdır.

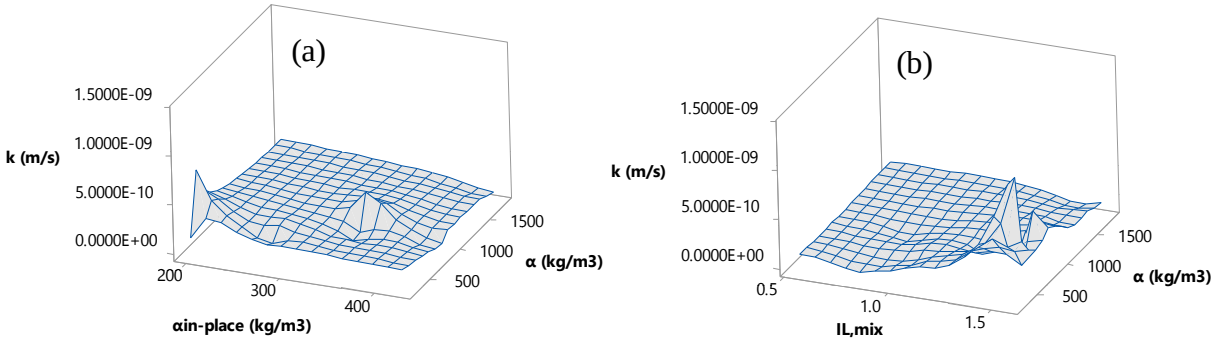
4.2.2.6.3 Permeabilite deneyi sonuçlarının tartışılması

Permeabilite deney sonuçlarına bakıldığında da permeabilite katsayısının en büyük olduğu tasarım 4 olurken, en düşük olduğu tasarım 28 günde 14, 56 günde 15 numaralı tasarımlar olmaktadır. 56 günlük permeabilite katsayısı değerleri 28 günlük permeabilite katsayısı değerlerinden ortalama olarak %55 daha küçük olmaktadır (Şekil 4.74).

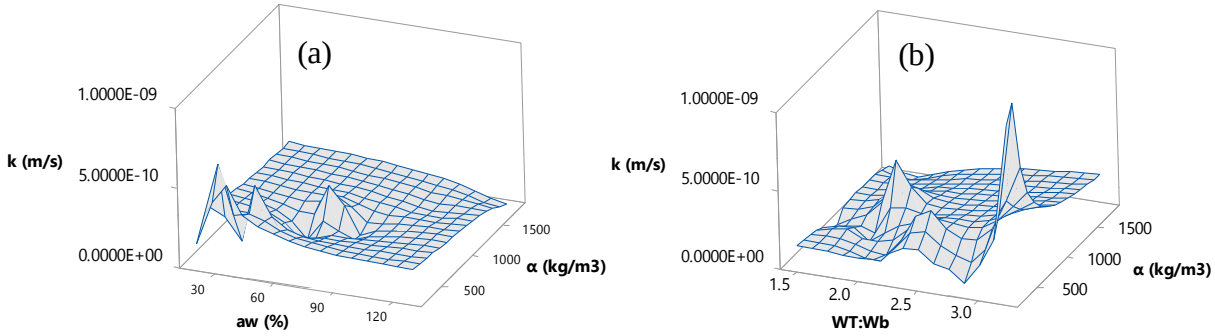


Şekil 4.74. Permeabilite deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK)

Küçük ölçekli DKK tasarımında 56 gün kür süresi sonundaki permeabilite katsayısı ve bir takım imalat parametreleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.75 ve Şekil 4.76'da verilmiştir. Buradaki ilişkilere göre genel eğilim α, $\alpha_{in\text{-}place}$ ve a_w attıkça permeabilite katsayısının azaldığı yönündedir. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı arttığında permeabilite katsayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.75. Permeabilite katsayısının a) $\alpha_{in\text{-}place}$-α ve b) $I_{L,mix}$-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)



Şekil 4.76. Permeabilite katsayısının a) a_w-α ve b) W_T:W_b-α arasındaki ilişkiler (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

4.3 Uçucu Kül Katkılı Optimum DKK Tasarımı

Uçucu kül katkılı DKK tasarımında; bağlayıcı dozajı (D), uçucu kül oranı (UKO), süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (K), su/bağlayıcı oranı (s/b) ve zeminin likitlik indisi (I_L) olmak üzere 5 parametre dikkate alınmıştır.

Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında, farklı kür sürelerine ve deney türlerine göre elde edilen optimum parametre seviyeleri sırasıyla Tablo 4.84 ve Tablo 4.85'te verilmiştir.

Çizelge 4.84. Büyük ölçekli DKK tasarımında farklı deney ve kür süreleri için elde edilen optimum parametre seviyeleri

Parametreler	Optimum parametre seviyeleri											
	Serbest basınç deneyi				Üç eksenli basınç deneyi				Konsolidasyon deneyi		Permeabilite deneyi	
	q_u (kPa)		RI (%)		σ_1-σ_3 (kPa)		RI (%)		Cc		k (m/s)	
	28 gün	56 gün	28 gün	56 gün	28 gün	56 gün	28 gün	56 gün	28 gün	56 gün	28 gün	56 gün
D (kg/m^3)	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425
UKO (%)	20	40	20	40	20	40	20	40	40	40	40	40
K (%)	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	1
s/b	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.8	1.0
I_L	0.4	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4	0.6	0.6

Çizelge 4.85. Küçük ölçekli DKK tasarımında farklı deney ve kür süreleri için elde edilen optimum parametre seviyeleri

Parametreler	Optimum parametre seviyeleri															
	Serbest basınç deneyi								Üç eksenli basınç deneyi						Konsolidasyon deneyi		Permeabilite deneyi	
	q_u (kPa)			RI (%)					σ_1-σ_3 (kPa)				RI (%)		Cc		k (m/s)	
	7 gün	28 gün	56 gün	7 gün	28 gün	56 gün			7 gün	28 gün	56 gün		7 gün	28 gün	56 gün		28 gün	56 gün
D (kg/m^3)	425	425	425	425	425	425			425	425	425		425	425	425		425	425
UKO (%)	0	20	40	0	20	40			0	20	40		0	20	40		20	40
K (%)	3	3	3	3	3	3			3	3	3		3	3	3		5	1
s/b	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8			0.8	0.8	0.8		0.8	0.8	0.8		0.8	1.0
I_L	0.4	0.4	0.4	1.0	1.0	1.0			0.4	0.4	0.4		1.0	1.0	1.0		0.4	0.4

Küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarındaki tüm kür sürelerinde maksimum dayanım, minimum sıkışabilirlik ve minimum geçirimlilik elde edebilmek için gerekli optimum

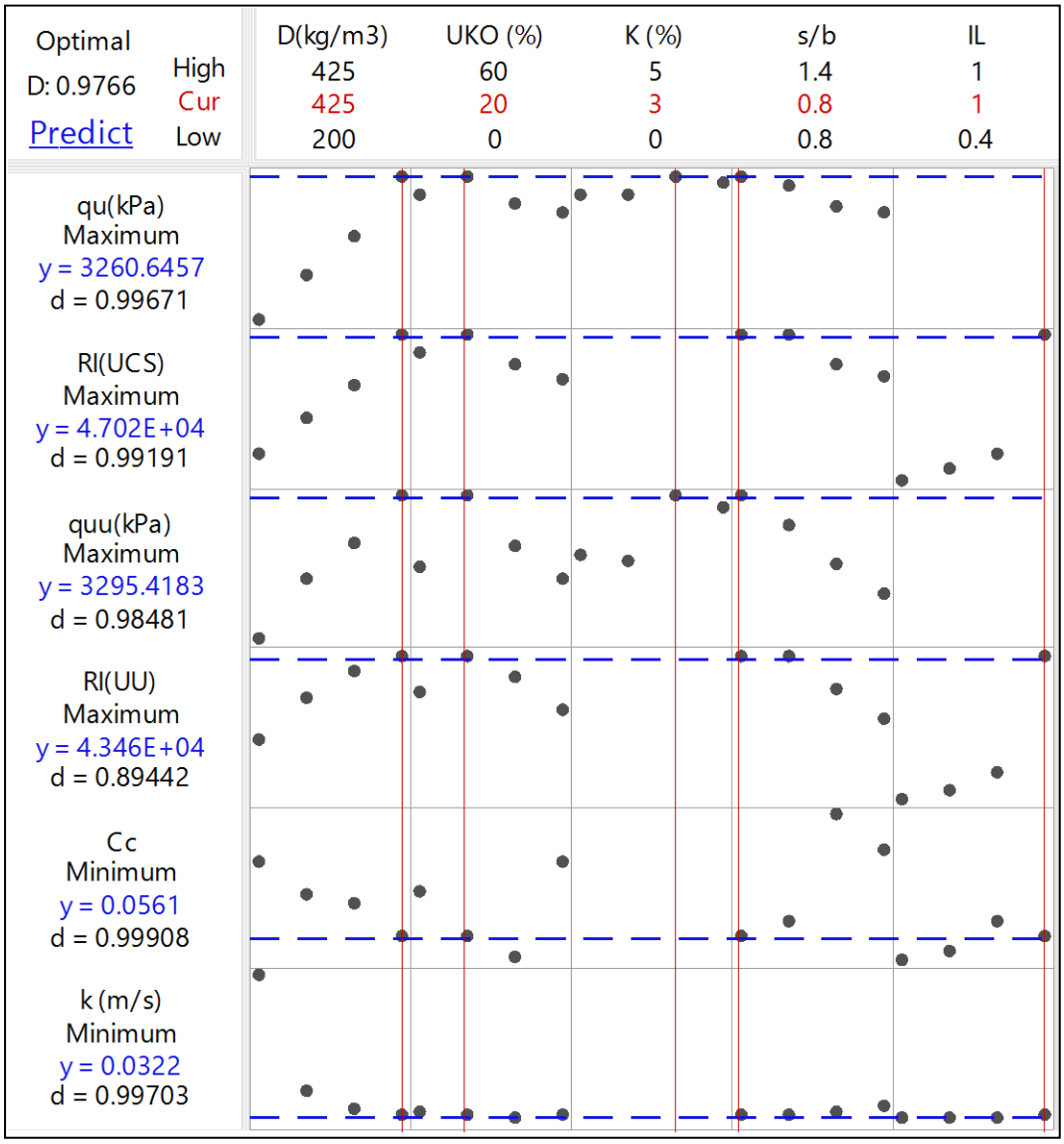
bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Optimum uçucu kül miktarı 7, 28 ve 56 gün kür sürelerinde sırasıyla %0, %20 ve %40 elde edilmiştir. Sadece büyük ölçekli DKK tasarımında minimum sıkışma indisi için optimum UKO %40 olarak elde edilmiştir. %3 süper akışkanlaştırıcı oranı kolon veya zemin-bağlayıcı numunelerin dayanımını iyileştirmek için optimum miktar olarak ortaya çıkmaktadır. Konsolidasyon ve permeabilite deneylerinde optimum süper akışkanlaştırıcı oranının %3'ten farklı çıktığı durumlar olmuştur. Optimum su/bağlayıcı oranı genel olarak 0.8 olarak belirlenmiştir. Optimum su/bağlayıcı oranı; büyük ölçekli DKK tasarımında 56 günlük konsolidasyon ve permeabilite deneylerinde ve küçük ölçekli DKK tasarımında 56 günlük permeabilite deneylerinde 1 olarak elde edilmiştir. Maksimum dayanım, minimum sıkışabilirlik ve minimum geçirimlilik I_L=0.4 olan zemin ortamında elde edilirken, maksimum zemin iyileştirme oranı I_L=1 olan zemin ortamında elde edilmiştir. Sadece büyük ölçekli DKK tasarımında permeabilite deney sonuçlarında optimum I_L=0.6 olarak elde edilmiştir (Tablo 4.84 ve Tablo 4.85).

Görüldüğü üzere uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarları, su/bağlayıcı oranı ve zeminin likitlik indisi değerleri için elde edilen optimum değerler DKK'nın bazı performans özellikleri için farklı bulunmuştur. *Alt başlık 4.2*'de farklı kriterlere göre elde edilen optimum koşulların DKK performans özelliklerinin hepsini kapsayacak şekilde optimize edilmesi daha iyi olacaktır.

Hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli DKK tasarımında temel amacımız kolon veya zemin-bağlayıcı numunelerinin performansını üst düzeye çıkarmaktır. Bu bağlamda istatistiki analizler yapılırken serbest basınç dayanımı (q_u), üç eksenli basınç dayanımı (q_{uu}) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) maksimize edilmiştir. Bu nedenle S/N analizleri yapılırken "en büyük en iyi" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Derin karıştırma kolonu veya zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin konsolidasyon ve permeabilite özellikleri ise minimize edilmiştir. Bu bağlamda sıkışma indisini (Cc) ve permeabilite katsayısını (k) minimum yapacak parametre seviyeleri belirlenmiştir. Bunun için S/N analizleri yapılırken "en küçük en iyi" durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra ANOVA ve regresyon analizleri ile parametreler ve bunların seviyeleri arasında ilişkiler kurulmuş, son olarak da optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon çalışmaları sırasında, *alt başlık 4.2*'de yapılan ANOVA ve regresyon analizi sonuçları kullanılmıştır. Küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarında, serbest basınç dayanımı (q_u), üç eksenli basınç dayanımı (q_{uu}) ve bunlardan elde edilen zemin iyileştirme dereceleri (RI-UCS, RI-UU) maksimize edilmiş, sıkışma indisi (Cc) ve permeabilite katsayısı (k) minimize edilmiştir. Optimizasyon yapılırken tüm parametrelerin önem derecesi ve ağırlığı eşit alınmıştır.

4.3.1 Büyük ölçekli optimum DKK tasarımı

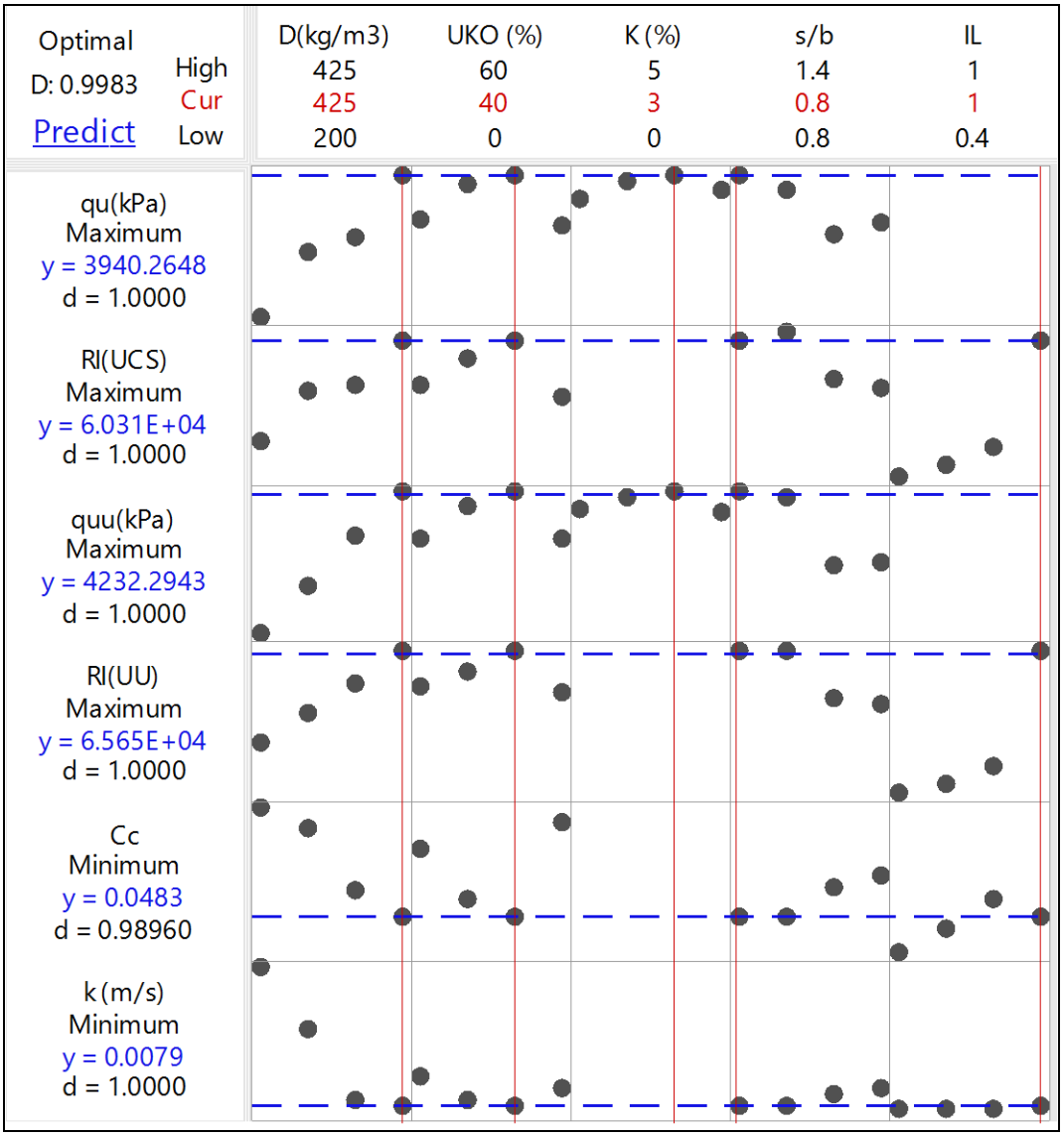
28 gün kür süresi için yapılan optimizasyon çalışması sonucunda optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %20, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.77). Optimizasyon sonuçlarının istenebilirlik derecesi 0.9766 olmuştur, yani %97 oranında güvenilirdir.



Şekil 4.77. Optimizasyon grafiği (Büyük ölçekli DKK, 28 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.

56 gün kür süresi için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %40, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin

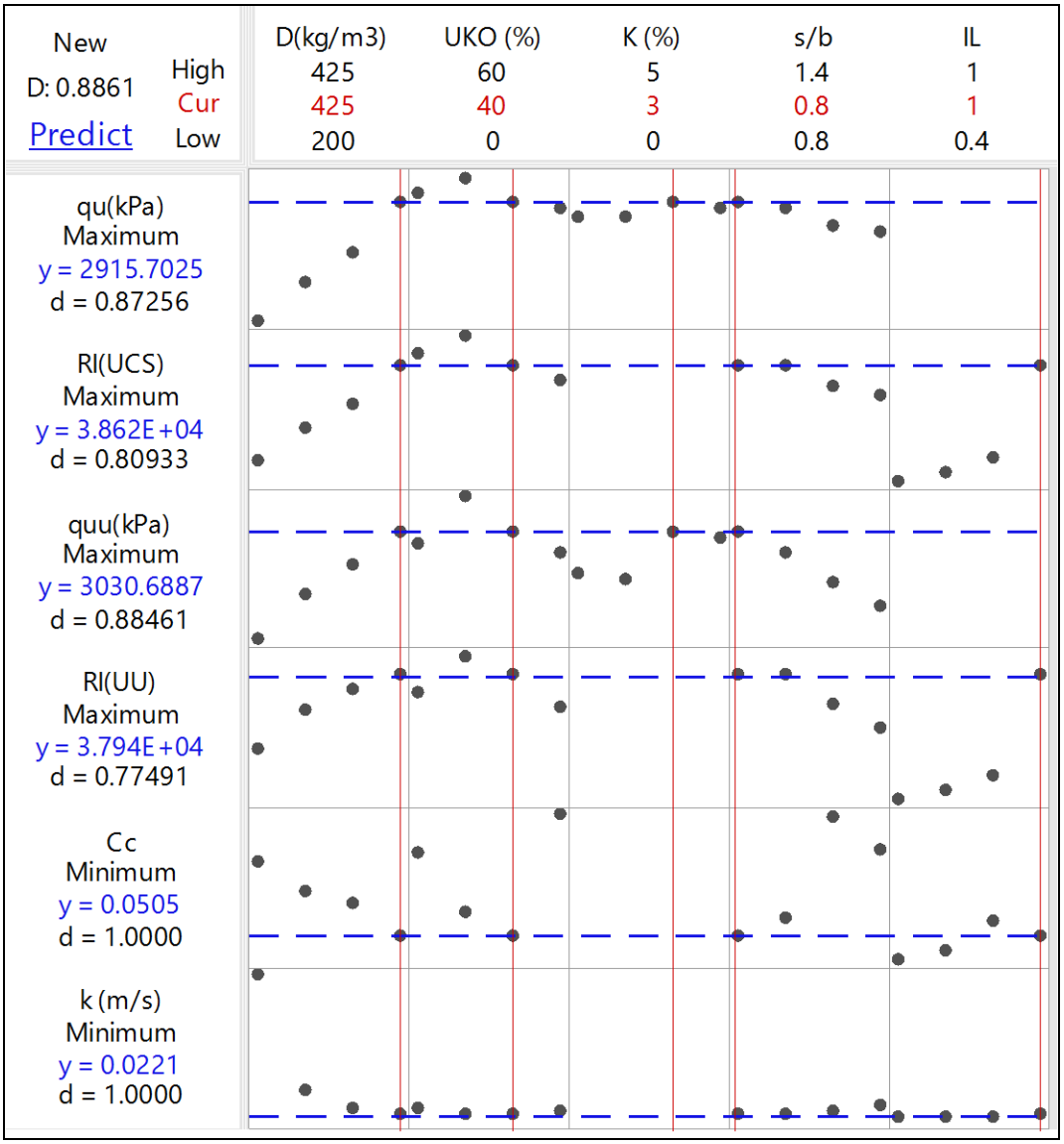
likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir. Bu durumda DKK'nın performasn değerleri q_u=3940.3 kPa, RI (UCS)=%60310, q_{uu}=4232.3 kPa, RI (UU)=%65650, Cc=0.048 ve k=0.79x10^{-11} m/s olarak tahmin edilmektedir. DKK'nın performans özelliklerinin optimizasyonunda istenebilirlik (d) 0.9983 olmaktadır, yani optimizasyonun güven derecesi %99.8 olmaktadır (Şekil 4.78).



Şekil 4.78. Optimizasyon grafiği (Büyük ölçekli DKK, 56 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.

Büyük ölçekli DKK tasarımında diğer parametreler aynı olmakla birlikte optimum uçucu kül miktarı 28 gün için %20, 56 gün için %40 olarak belirlenmiştir. Uzun vadeli etkiler dikkate alınarak, DKK imalatında optimum uçucu kül oranı %40 kullanılmıştır. Bu nedenle UKO=%40 için 28 günlük optimizasyon sonuçlarının elde edilip, doğrulama deneylerinde bunlarla kıyaslama yapılması gerekmektedir. UKO=%40 olduğu durumda DKK'nın 28 günlük performasn değerleri q_u=2915.7 kPa, RI (UCS)=%38620, q_{uu}=3030.7 kPa, RI (UU)=%37940,

Cc=0.051 ve k=2.21x10^{-11} m/s olarak tahmin edilmektedir. DKK'nın 28 günlük performans değerlerinin tahmininde istenebilirlik (d) 0.8861 olmaktadır, yani optimizasyonun güven derecesi %88.6 olmaktadır (Şekil 4.79).



Şekil 4.79. UKO=%40 için 28 günlük performans değerlerinin tahmini için optimizasyon grafiği (Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.)

4.3.1.1 Kolon imalatı

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımında optimum koşullar 56 gün kür süresi için dikkate alınmıştır. Buna göre D=425 kg/m^3, UKO=%40, K=%3, s/b=0.8 ve I_L=1 olduğu durumda kolon imalatı yapılmıştır.

Kolon imalatı sırasında ilk taramadan itibaren homojen karışmış zemin-enjeksiyon karışımı elde edilmiştir. Kolon imalatından 28 gün sonra tank açılarak kolon çıkarılmış ve kolonun boyu 80 cm, çapı 32.6 cm olarak ölçülmüştür. Kolonun yarısından 28. günde karot numuneleri alınmış, daha sonra kolonun kalan kısmı poşetlenerek tekrar küre bırakılmıştır. Kolonun diğer yarısından ise 56. günde karot numuneleri alınmıştır (Şekil 4.80). Her kür süresi için karot numuneleri üzerinde serbest basınç, üç eksenli basınç, konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

Şekil 4.80. Büyük ölçekli DKK, optimum tasarım: a) imal edilen kolon, b) 28 ve c) 56 günlük karot numuneleri, d) 28 ve e) 56 günlük kayma yüzeyleri

Kolon imalatı sırasında bağlayıcı dozajı ($\alpha_{in\text{-}place}$) ve bağlayıcı faktörü (α) 425 kg/m^3, bağlayıcı içeriği (a_w) %37.9, toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_c) 2.2 ve hacim oranı (VR) %51.2 olmaktadır.

Kolon imalatı sonrasında zemin-enjeksiyon karışımıyla ilgili ölçülen veya hesaplanan fiziksel özellikler şu şekildedir: İyileştirilmemiş zeminin yoğunluğu 1.706 g/cm^3, enjeksiyonun yoğunluğu 1.520 g/cm^3'tür. Zemin enjeksiyon karışımının yoğunluğu hesaplama ile 1.643 g/cm^3 olmasına rağmen, yaş zemin-enjeksiyon karışımının yoğunluğu 1.668 g/cm^3, kür

sonundaki numunelerin yoğunluğu ise 1.674 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Yaş zemin-enjeksiyon karışımının su muhtevası %64.5 olarak belirlenmiştir.

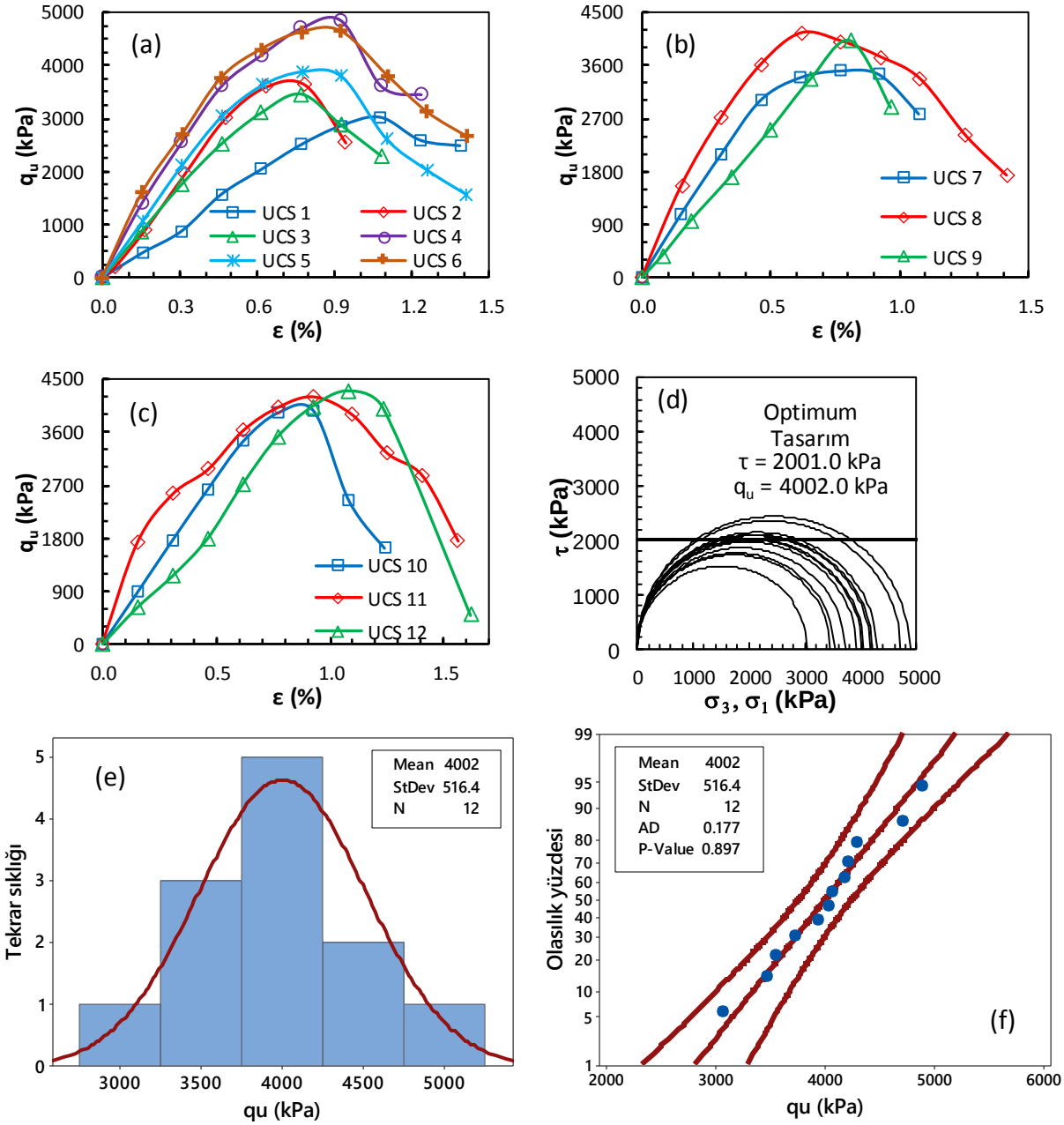
4.3.1.2 Doğrulama deneyleri

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımında parametrelerin optimum seviyeleri kolonun 56 günlük fiziksel ve mekanik özelliklerine göre belirlendiği için dayanım, konsolidasyon ve permeabilite deney sonuçları 56 gün kür süresi için doğrulanmış, 28. gün için ise kolon özelliklerinin yeterli olup olmadığı araştırılmıştır.

4.3.1.2.1 Serbest basınç deneyi (UCS)

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımından 56. günde alınan karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 4.81'de verilmiştir. Kolondan alınan karot dayanımları incelendiğinde kolonun üst, orta ve alt bölgelerinin ortalama dayanımları sırasıyla 3959.4 kPa, 3906.7 kPa ve 4182.3 kPa olmaktadır. Dayanım değerlerine bakıldığında kolonun her yerinin homojen karıştığı söylenebilir. Kolonun ortalama dayanımı ise 4002.0 kPa olmaktadır. 12 adet karot numunesi incelendiğinde en büyük ve en küçük dayanım arasındaki oran 1.6 olmaktadır. Bu nedenle verilerin standart sapması çok düşük çıkmıştır. Tüm verilerin histogram grafiği normal dağılıma çok yakın olmuştur. Ayrıca bu verilerin olasılık grafiği üzerindeki dağılımı %95 güven aralığı içerisinde kalmakla birlikte P değeri 0.897 olup 0.005 değerinden büyüktür (Şekil 4.81).

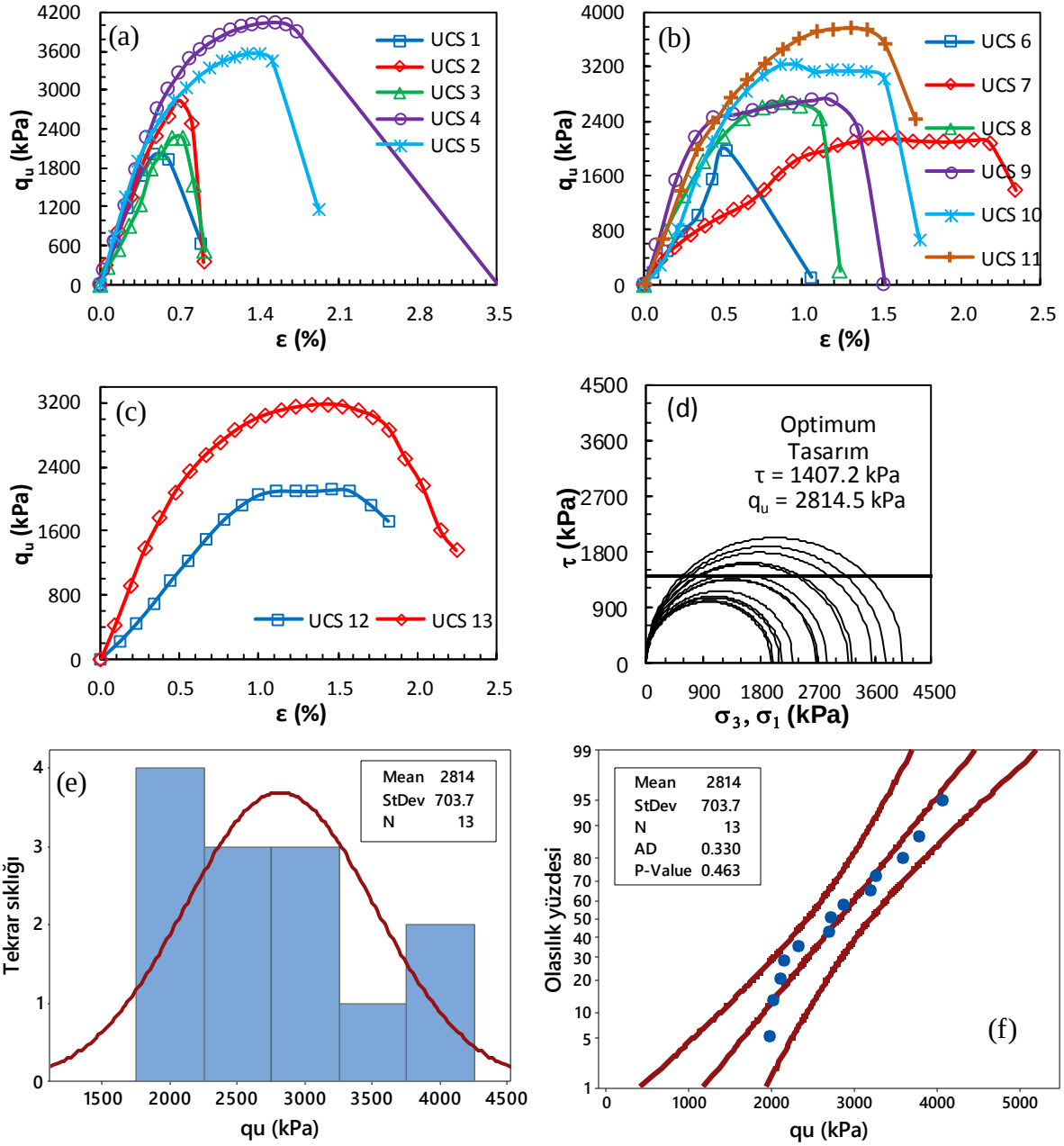
Optimum kolon imalatında 56 günlük serbest basınç dayanımı 4002.0 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %58000 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise kolonun serbest basınç dayanımı 3940.3 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %60310 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre serbest basınç dayanımı bakımından %1.5 fazla, zemin iyileştirmesi yönünden %3.8 düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.81. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımından 28. günde alınan karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 4.82'de verilmiştir. Kolondan alınan karot dayanımları incelendiğinde kolonun üst, orta ve alt bölgelerinin ortalama dayanımları sırasıyla 2958.0 kPa, 2752.4 kPa ve 2641.8 kPa bulunmuştur. Dayanım değerlerine bakıldığında kolonun her yerinin homojen karıştığı söylenebilir. Kolonun ortalama dayanımı ise 2814.5 kPa olmaktadır. 13 adet karot numunesi incelendiğinde en büyük ve en küçük dayanım arasındaki oran 2.1 olmaktadır. Tüm verilerin histogram grafiği normal dağılıma

yakın olmuştur. Ayrıca bu verilerin olasılık grafiği üzerindeki dağılımı %95 güven aralığı içerisinde kalmakla birlikte P değeri 0.463 olup 0.005 değerinden büyüktür (Şekil 4.82).



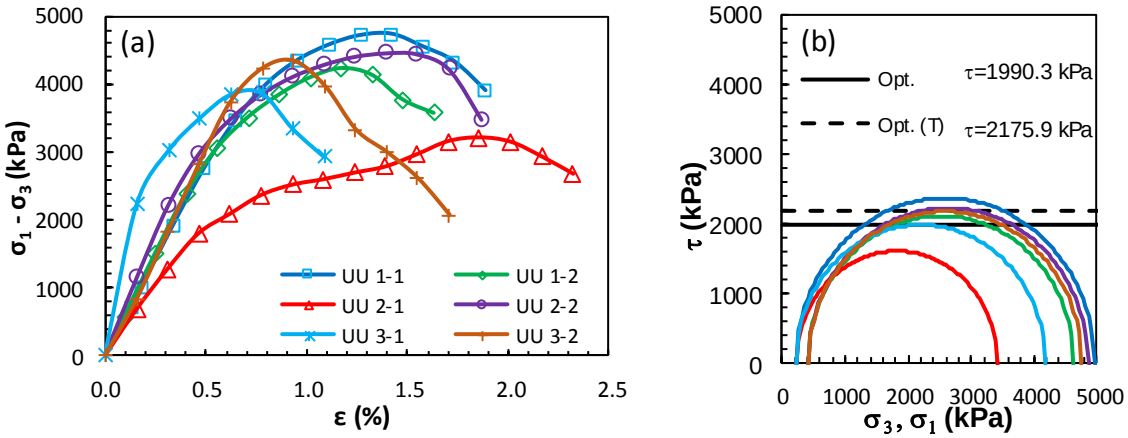
Şekil 4.82. Optimum tasarıma ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

Optimum kolon imalatında 28 günlük serbest basınç dayanımı 2814.5 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %40790 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise kolonun serbest basınç dayanımı 2915.7 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %38620 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre serbest basınç dayanımı bakımından %3.5 daha düşük, zemin iyileştirmesi yönünden %5.6

daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir. 28 günlük serbest basınç deneyinden optimum uçucu kül yüzdesi %20 çıkmıştır fakat 56 günlük etkiler düşünülerek %40 uçucu kül kullanılmıştır. 28. günde optimum uçucu külden daha fazla uçucu kül kullanılması 28 günlük dayanıma olumsuz etki edecektir. Fakat dayanım sonuçlarına bakıldığında %40 uçucu kül içeren optimum tasarımın 28 günlük serbest basınç dayanımı 2814.5 kPa olmuştur. Sahada imal edilen DKK dayanımlarının 0.5-2 MPa arasında değiştiği farklı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Yang vd., 2001; Lambrechts vd., 2003; Shiells vd., 2003; McGinn ve O'Rourke, 2003). FHWA (2013), uygulamadaki çoğu projede derin karıştırma kolonlarının proje dayanımı için 1 MPa (1000 kPa) dayanımın yeterli olduğunu söylemektedir. Buradan hareketle %40 uçucu kül içeren optimum DKK tasarımının 28. gündeki dayanımı bu kıstasın çok üstündedir.

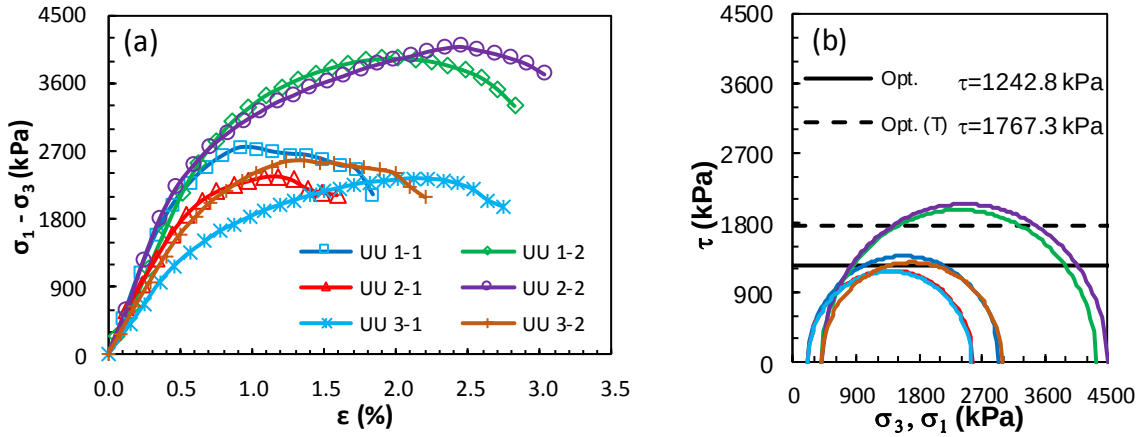
4.3.1.1.2 Üç eksenli basınç deneyi (UU)

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımından 56. günde alınan karot numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 4.83'de verilmiştir. Kolondan alınan karot dayanımları incelendiğinde kolonun üst, orta ve alt bölgelerinin ortalama dayanımları sırasıyla 4491.5 kPa, 3839.5 kPa ve 4167.6 kPa olmaktadır. Dayanım değerlerine bakıldığında kolonun her yerinin homojen karıştığı söylenebilir. Kolonun ortalama dayanımı 4166.2 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %60380 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise kolonun üç eksenli basınç dayanımı 4232.3 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %65650 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre üç eksenli basınç dayanımı bakımından %1.6, zemin iyileştirmesi yönünden %8 daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.83. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

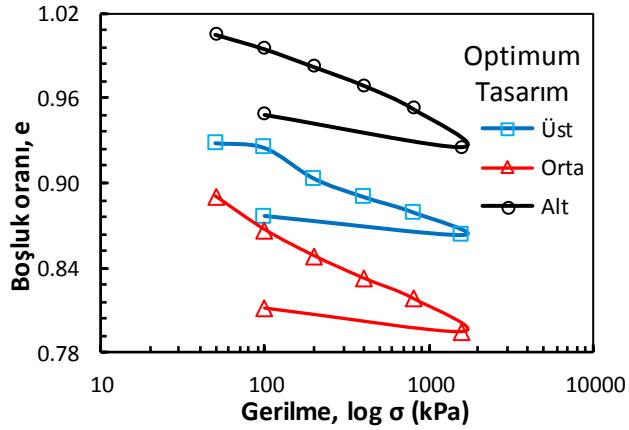
Büyük ölçekli optimum DKK tasarımından 28. günde alınan karot numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 4.84'de verilmiştir. Kolondan alınan karot dayanımları incelendiğinde kolonun üst, orta ve alt bölgelerinin ortalama dayanımları sırasıyla 3339.4 kPa, 3229.0 kPa ve 2461.8 kPa olmaktadır. Dayanım değerlerine bakıldığında kolonun her yerinin homojen karıştığı söylenebilir. Kolonun ortalama dayanımı 3010.0 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %43623 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise kolonun üç eksenli basınç dayanımı 3030.7 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %37940 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre üç eksenli basınç dayanımı bakımından %0.7 daha düşük, zemin iyileştirmesi yönünden %15 daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.84. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

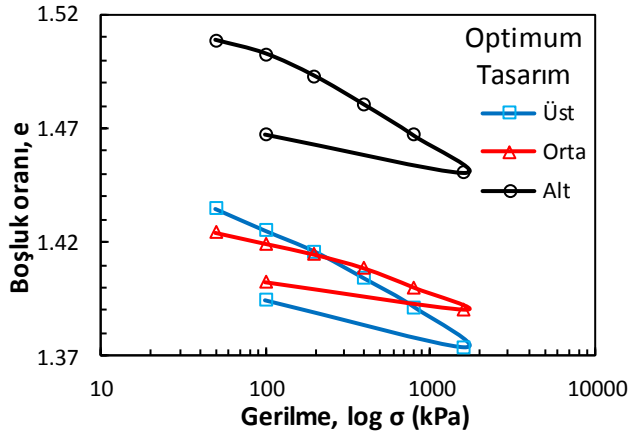
4.3.1.1.3 Konsolidasyon deneyi

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımından 28. günde alınan karot numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil 4.85'de verilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi (Cc) 0.055, kabarma indisi (Cs) 0.015, boşluk oranındaki değişim (Δe) 0.089 ve boşluk oranındaki yüzdece değişim (Δe/e) %9.4 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise sıkışma indisi (Cc) 0.051 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %7.8 daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.85. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

56. günde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil 4.86'da verilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi (Cc) 0.048, kabarma indisi (Cs) 0.014, boşluk oranındaki değişim (Δe) 0.060 ve boşluk oranındaki yüzdece değişim (Δe/e) %4.1 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda sıkışma indisi (Cc) 0.048 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlar birebir aynı çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.86. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

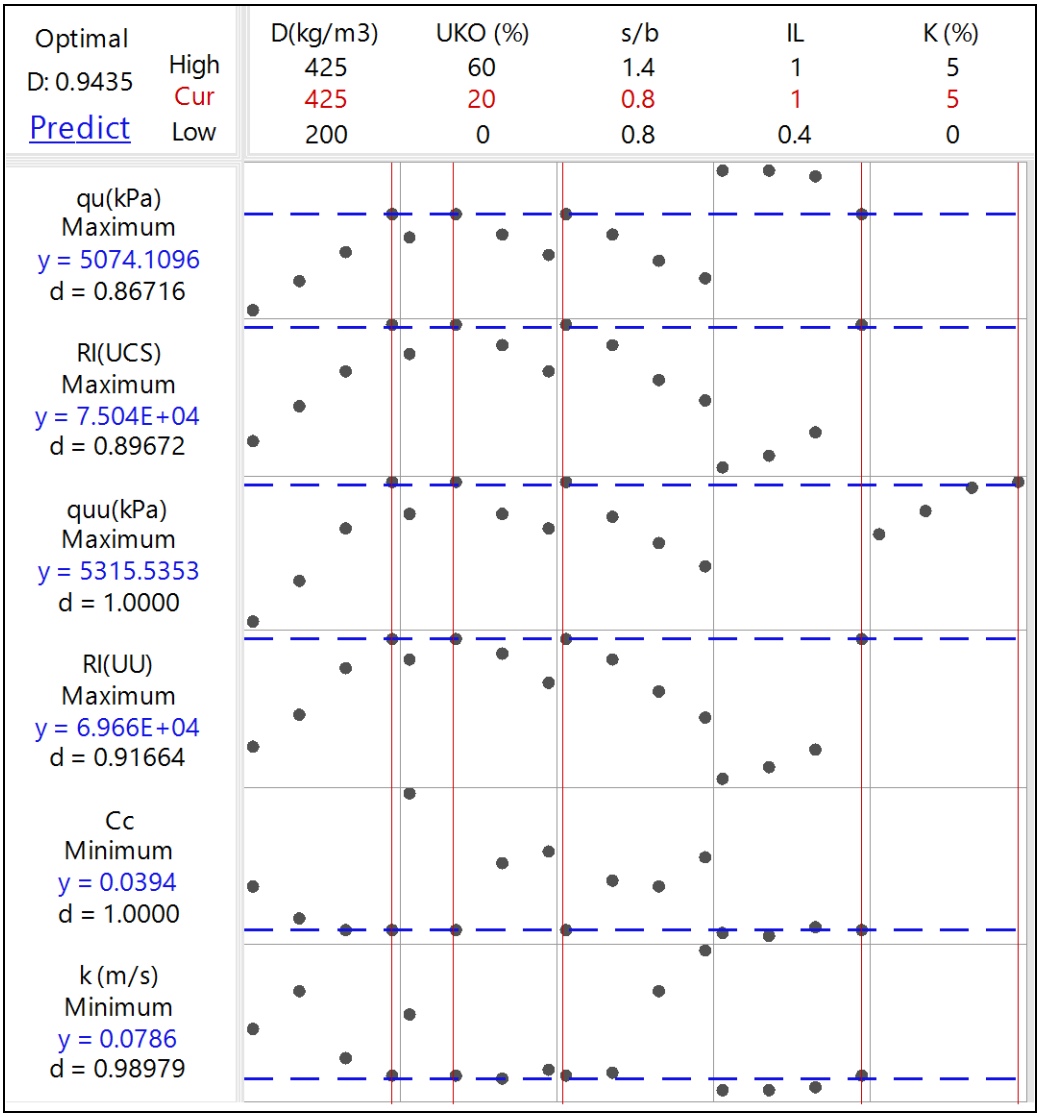
4.3.1.1.4 Permeabilite deneyi

Büyük ölçekli optimum DKK tasarımında 28. günde yapılan permeabilite deneyi sonuçlarına göre kolonun permeabilite katsayısı 1.612×10^{-11} m/s bulunmuştur. Bu sonuç göstermektedir ki doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %27 daha düşük çıkmıştır. Yani kolonun permeabilite katsayısı tahmin edilenden daha düşük çıkarak daha geçirimsiz bir kolon imalatı yapılmıştır.

56. günde yapılan permeabilite deneyi sonuçlarına göre kolonun permeabilite katsayısı 0.849x10^{-11} m/s bulunmuştur. Bu sonuç göstermektedir ki doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %7.5 daha fazla çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.

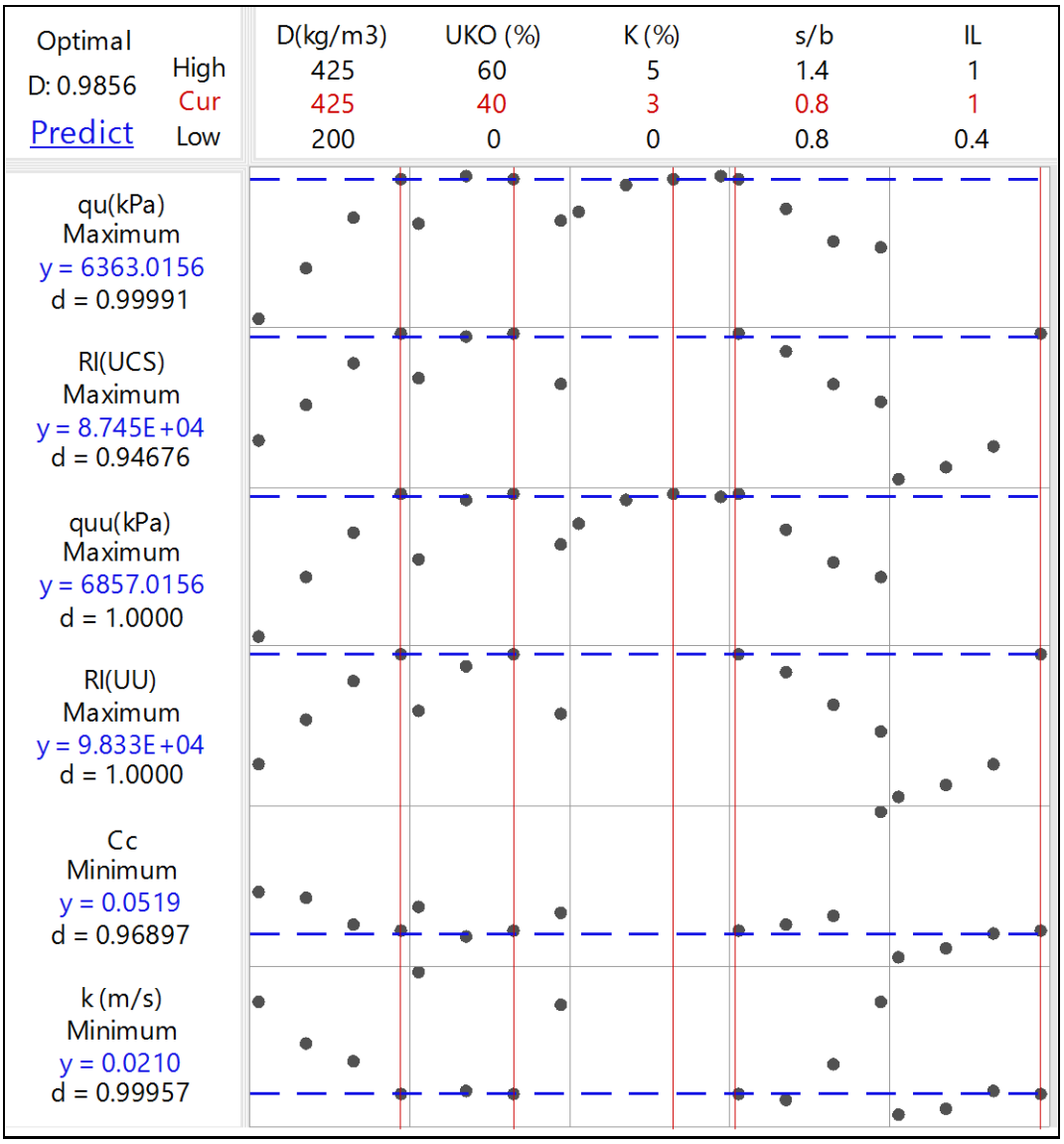
4.3.2 Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı

28 gün kür süresi için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %20, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %5, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.87).



Şekil 4.87. Optimizasyon grafiği (Küçük ölçekli DKK, 28 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.

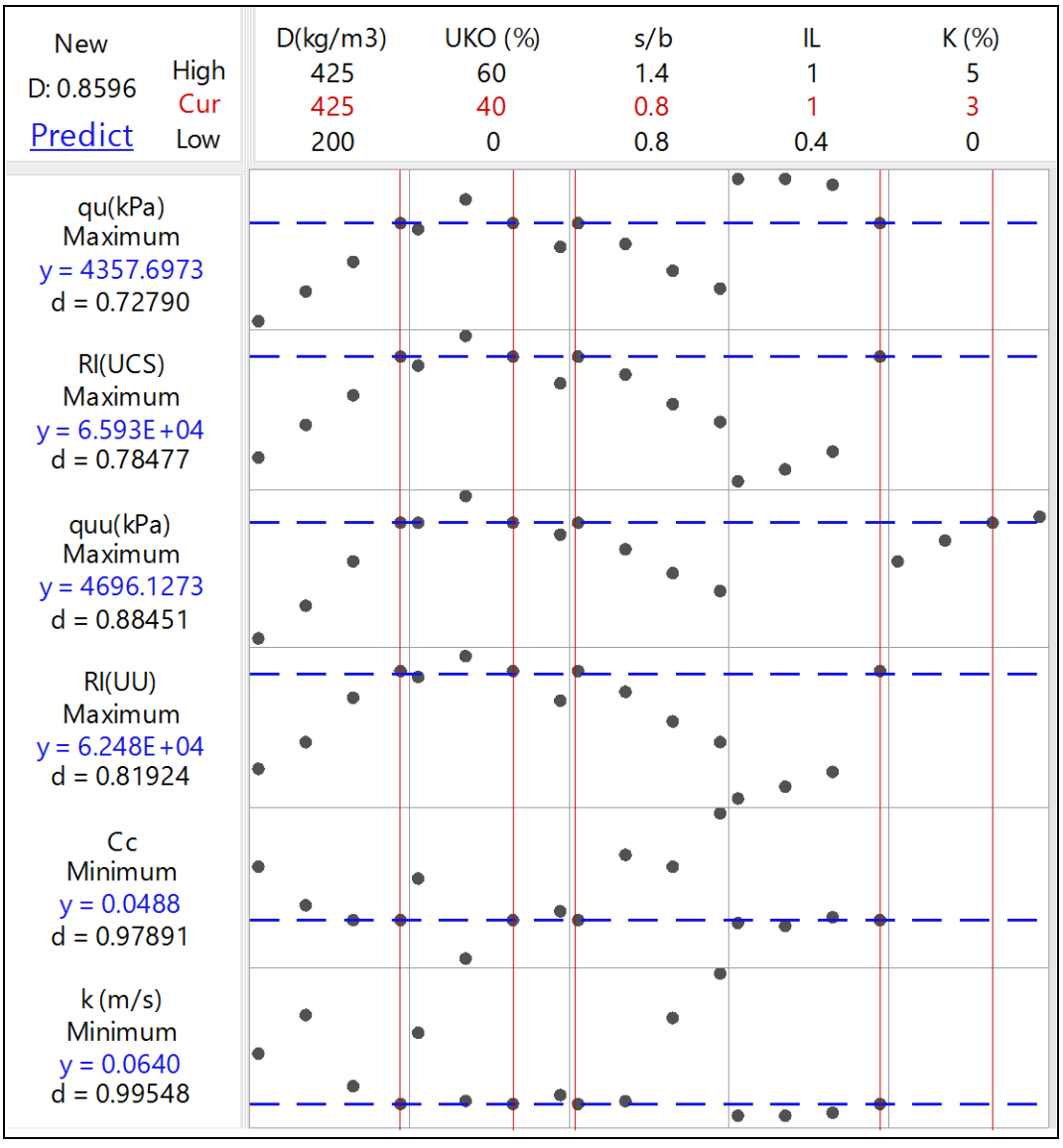
56 gün kür süresi için DKK'nın performans özelliklerinin optimizasyonunda istenebilirlik (d) 0.9856 olmaktadır. Bir başka deyişle yapılan optimizasyonun güven derecesi %98.6 olmaktadır. Optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %40, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir. Bu durumda DKK'nın performasn özellikleri q_u=6363 kPa, RI (UCS)=%87450, q_{uu}=6857 kPa, RI (UU)=%98330, Cc=0.052 ve k=2.10x10^{-11} m/s olarak tahmin edilmektedir (Şekil 4.88).



Şekil 4.88. Optimizasyon grafiği (Küçük ölçekli DKK, 56 gün) Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.

Küçük ölçekli DKK tasarımında diğer parametreler aynı olmakla birlikte optimum uçucu kül miktarları 28 ve 56 gün kür süreleri için %20 ve %40, katkı miktarları sırasıyla %5

ve %3 olarak belirlenmiştir. Uzun vadeli etkiler dikkate alınarak, DKK imalatında uçucu kül ve katkı oranları sırasıyla %40 ve %3 kullanılmıştır. Bu nedenle UKO=%40 ve K=%3 için 28 günlük optimizasyon sonuçlarının elde edilip, doğrulama deneylerinde bunlarla kıyaslama yapılması gerekmektedir. UKO=%40 ve K=%3 olduğu durumda DKK'nın 28 günlük performasn değerleri q_u=4357.7 kPa, RI (UCS)=%65930, q_{uu}=4696.1 kPa, RI (UU)=%62480, Cc=0.049 ve k=6.40x10^{-11} m/s olarak tahmin edilmektedir. DKK'nın 28 günlük performans değerlerinin tahmininde istenebilirlik (d) 0.8596 olmaktadır, yani optimizasyonun güven derecesi %86 olmaktadır (Şekil 4.89).



Şekil 4.89. UKO=%40 ve K=%3 için 28 günlük performans değerlerinin tahmini için optimizasyon grafiği (Not: k değeri 10^{-9} ile çarpılmalıdır.)

4.3.2.1 Numunelerin fiziksel özellikleri

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımında D=425 kg/m^3, UKO=%40, K=%3, s/b=0.8 ve I_L=1 olduğu durumda zemin-bağlayıcı karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 28 ve 56 gün boyunca kür edilmiş, kür süreleri sonunda serbest basınç, üç eksenli basınç, konsolidasyon ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

Optimum tasarım numunelerinin bağlayıcı dozajı ($\alpha_{in\text{-}place}$) 425 kg/m^3, bağlayıcı faktörü (α) 870 kg/m^3, bağlayıcı içeriği (a_w) %78.1, toplam su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) 1.47 ve hacim oranı (VR) %105 olmaktadır.

Zemin-enjeksiyon karışımıyla ilgili ölçülen veya hesaplanan fiziksel özellikler şu şekildedir: İyileştirilmemiş zeminin yoğunluğu 1.706 g/cm^3, enjeksiyonun yoğunluğu 1.520 g/cm^3'tür. Zemin enjeksiyon karışımının yoğunluğu hesaplama ile 1.605 g/cm^3 olmasına rağmen, yaş zemin-enjeksiyon karışımının yoğunluğu 1.625 g/cm^3, kür sonundaki numunelerin yoğunluğu ise 1.637 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Yaş zemin-enjeksiyon karışımının su muhtevası %61.1 olarak belirlenmiştir.

4.3.2.1 Doğrulama deneyleri

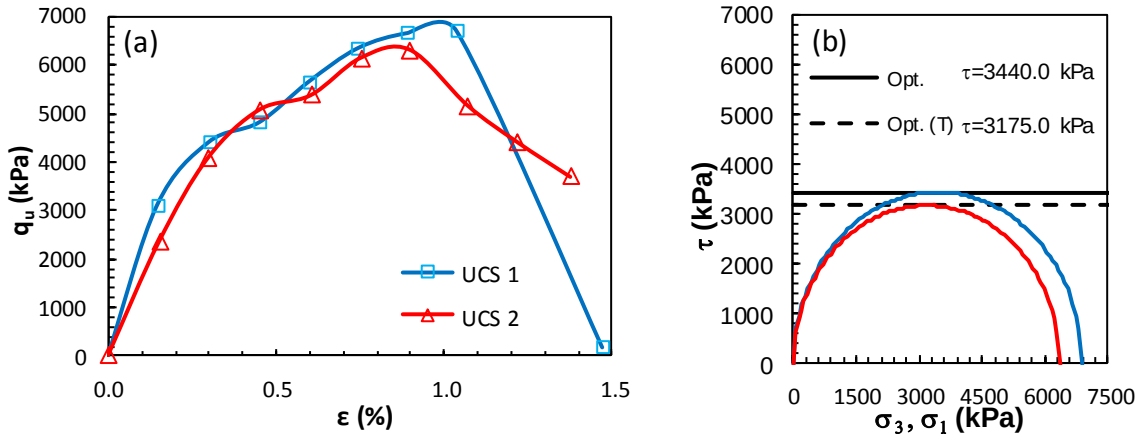
Küçük ölçekli optimum DKK tasarımında parametrelerin optimum seviyeleri 56 günlük fiziksel ve mekanik özelliklere göre belirlendiği için dayanım, konsolidasyon ve permeabilite deney sonuçları 56 gün kür süresi için doğrulanmış, 28. gün için ise DKK özelliklerinin yeterli olup olmadığı araştırılmıştır.

4.3.2.1.1 Serbest basınç deneyi (UCS)

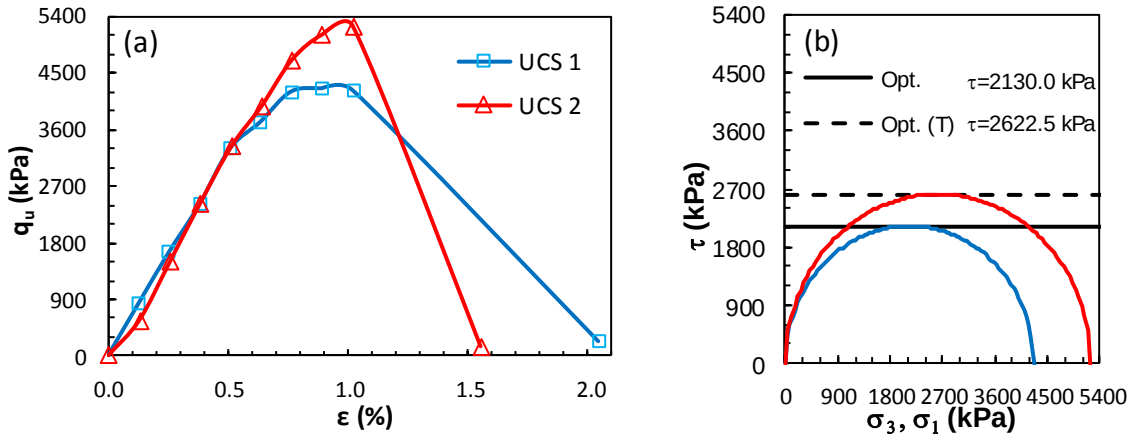
Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı için 56. günde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 4.90'da verilmiştir. Zemin-bağlayıcı karışımlarının ortalama serbest basınç dayanımı deney sonucunda 6615 kPa, zemin iyileştirme derecesi %95870 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise numunenin serbest basınç dayanımı 6363 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %87450 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre serbest basınç dayanımı bakımından %3.9, zemin iyileştirmesi yönünden %9.6 daha büyük çıkmıştır.

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı için 28. günde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 4.91'de verilmiştir. Zemin-bağlayıcı karışımlarının ortalama serbest basınç dayanımı deney sonucunda 4752.5 kPa, zemin iyileştirme derecesi %68877 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise numunenin serbest basınç dayanımı

4357.7 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %65930 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre serbest basınç dayanımı bakımından %9.1, zemin iyileştirmesi yönünden %4.5 daha büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.90. Optimum tasarıma ait a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

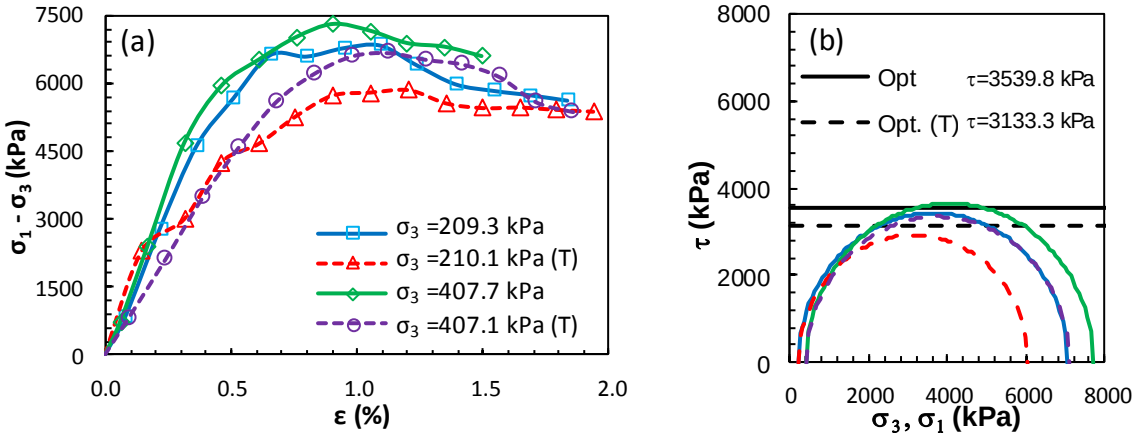


Şekil 4.91. Optimum tasarıma ait a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

4.3.2.1.2 Üç eksenli basınç deneyi (UU)

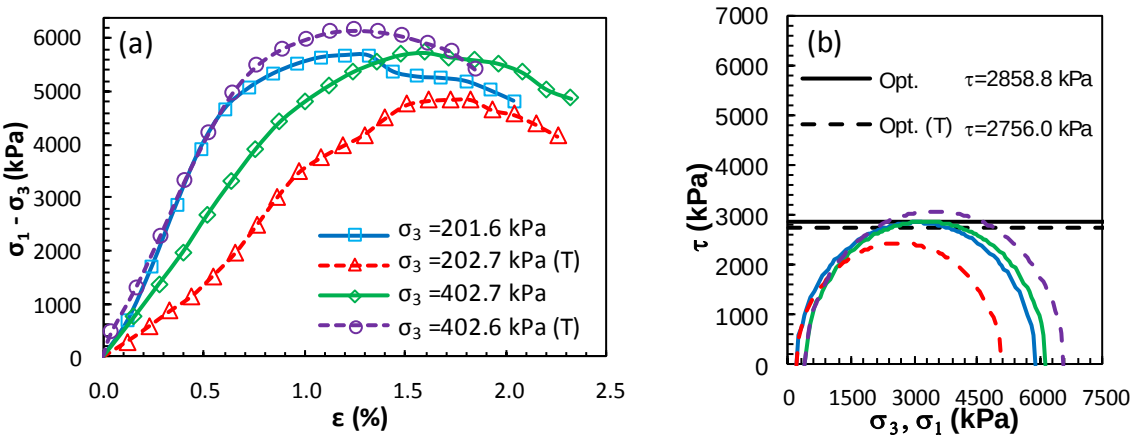
Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı için 56. günde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 4.92'de verilmiştir. Zemin-bağlayıcı karışımlarının ortalama üç eksenli basınç dayanımı 6673.1 kPa, zemin iyileştirme derecesi %96712 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise numunenin üç eksenli basınç dayanımı 6857 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %98330 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden

elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre üç eksenli basınç dayanımı bakımından %2.7, zemin iyileştirmesi yönünden %1.6 daha küçük çıkmıştır.



Şekil 4.92. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

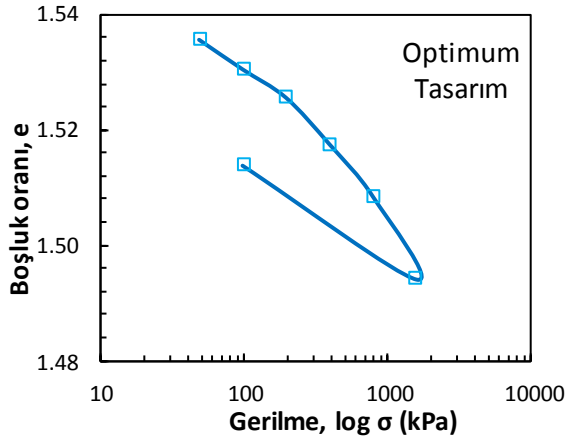
Küçük ölçekli optimum DKK tasarımı için 28. günde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 4.93'de verilmiştir. Zemin-bağlayıcı karışımlarının ortalama üç eksenli basınç dayanımı 5614.8 kPa, zemin iyileştirme derecesi %81374 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise numunenin üç eksenli basınç dayanımı 4696.1 kPa ve zemin iyileştirme derecesi %62480 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre üç eksenli basınç dayanımı bakımından %19.6, zemin iyileştirmesi yönünden %30.2 daha büyük çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir. Daha önceki sonuçlara nazaran deney ve optimizasyon sonuçları arasındaki fark büyük çıkmıştır. Fakat dayanım değerlerinin deneylerde daha büyük çıkması avantajlı bir durumdur.



Şekil 4.93. Optimum tasarıma ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

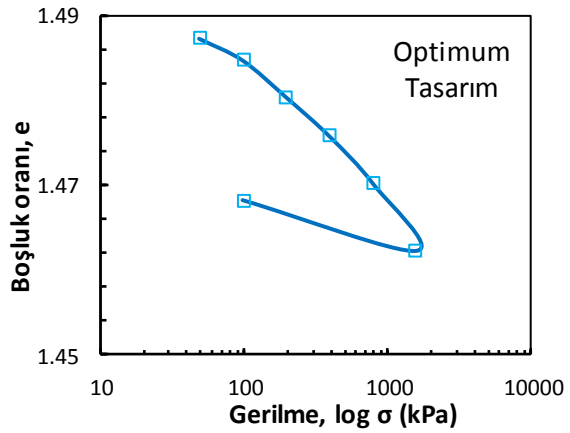
4.3.2.1.3 Konsolidasyon deneyi

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımından 28. günde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil 4.94'de verilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi (Cc) 0.048, kabarma indisi (Cs) 0.016, boşluk oranındaki değişim (Δe) 0.052 ve boşluk oranındaki yüzdece değişim (Δe/e) %3.4 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise sıkışma indisi (Cc) 0.049 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %2 daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.94. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımından 56. günde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil 4.95'de verilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi (Cc) 0.026, kabarma indisi (Cs) 0.005, boşluk oranındaki değişim (Δe) 0.028 ve boşluk oranındaki yüzdece değişim (Δe/e) %0.5 olmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise sıkışma indisi (Cc) 0.052 olarak tahmin edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %50 daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.95. Optimum tasarıma ait konsolidasyon deney sonuçları (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

4.3.2.1.4 Permeabilite deneyi

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımında zemin-enjeksiyon numunesinin 28. gündeki permeabilite katsayısı 2.17×10^{-11} m/s olarak bulunmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise permeabilite katsayısı (k) 6.40×10^{-11} m/s olarak tahmin edilmiştir. Bu sonuç göstermektedir ki doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %66 daha düşük çıkmıştır.

56. günde yapılan zemin-enjeksiyon numunesinin permeabilite katsayısı 4.56×10^{-12} m/s olarak bulunmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ise permeabilite katsayısı (k) 2.10×10^{-11} m/s olarak tahmin edilmiştir. Bu sonuç göstermektedir ki doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiki sonuçlara göre %78 daha düşük çıkmıştır. 28 ve 56 gün kür sürelerinde kolonun permeabilite katsayısı tahmin edilenden daha düşük çıkarak daha geçirimsiz bir kolon imalatı yapılmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmaların ve istatistiki analizlerin güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir.

4.4 Küçük ve Büyük Ölçekli DKK Tasarımlarının Karşılaştırılması

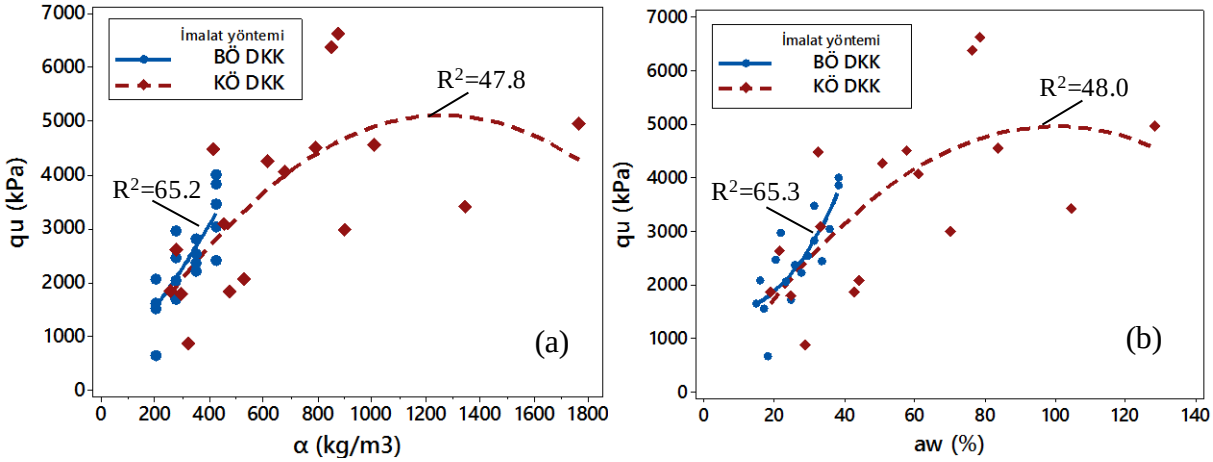
Küçük ve büyük ölçek olarak imal edilen tüm tasarımlarda iyileştirilecek zemin özellikleri (kıvamı, su muhtevası) ve enjeksiyon içeriği (bağlayıcı dozajı, uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı, su/bağlayıcı oranı) aynı olmasına rağmen DKK numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri farklı olmuştur. Bu farklılıklar α, a_w, W_T:W_b ve $I_{L,mix}$ parametrelerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

- Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında $\alpha_{in\text{-}place}$ aynı olmasına rağmen α ve a_w küçük ölçekte daha fazladır. Büyük ölçekte α ve a_w değerleri sırasıyla 200-425 kg/m^3 ve %14.6-37.9 aralıklarında değişmektedir. Küçük ölçekte α ve a_w değerleri sırasıyla 257-1760 kg/m^3 ve %18.7-128 aralıklarındadır.
- Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında W_T:W_b sırasıyla 2.17-4.32 ve 1.48-3.22 aralıklarında değişmektedir. Zemin-enjeksiyon karışımının toplam su/bağlayıcı oranı büyük ölçekte daha fazla olmuştur.
- Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında $I_{L,mix}$ sırasıyla 0.52-1.15 ve 0.55-1.57 aralıklarında değişmektedir. Zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi küçük ölçekte daha fazla olmuştur.

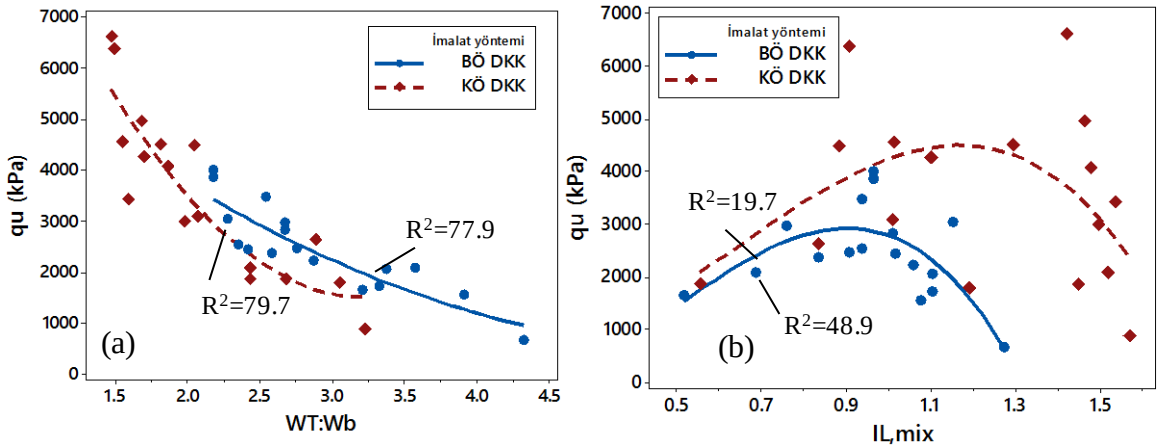
Zemin-enjeksiyon karışımlarının fiziksel özelliklerindeki bu farklılıklar küçük ve büyük ölçekli DKK performansı üzerinde etkili olmaktadır.

Serbest basınç dayanımı yönünden küçük ölçekli DKK (KÖ-DKK) dayanımı büyük ölçekli DKK (BÖ-DKK) dayanımından 28 gün kür süresinde ortalama %50, 56 gün kür süresinde ise ortalama %40 daha fazla olmuştur. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda arazideki DKK dayanımı mikser karışımlarından %20-30 daha düşük bulunmuştur (Bhadrıraju vd., 2007; Madhyannapu vd., 2010). O'Rourke ve McGinn (2004) tarafından yapılan çalışmalarda bu oran %50 olmuştur. EuroSoilStab (2002) BÖ-DKK dayanımının KÖ-DKK dayanımından %20-50 daha düşük olabileceğini söylerken, CDIT (2002) bu oranın %20-100 arasında olabileceğini söylemiştir.

DKK performansı düşünüldüğünde, genel eğilim α ve a_w arttıkça dayanımın arttığı yönündedir (Şekil 4.96). KÖ-DKK tasarımında a_w %90 değerinden fazla olduğunda DKK performansının çok değişmediği hatta olumsuz etkilendiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak α ve a_w değerleri küçük ölçekte büyük ölçeğe göre daha fazla olduğundan dolayı KÖ-DKK performansı BÖ-DKK'ya göre daha yüksek olmaktadır. W_T:W_b arttığında serbest basınç dayanımı azalmaktadır. Bununla birlikte W_T:W_b, BÖ-DKK tasarımlarında KÖ-DKK'ya göre daha büyük olduğu için büyük ölçekteki dayanım daha küçük olmaktadır (Şekil 4.97a). BÖ-DKK tasarımında $I_{L,mix}$=0.9I_L, KÖ-DKK tasarımında ise $I_{L,mix}$=1.2I_L değerine kadar serbest basınç dayanımı artmakta, bu değerden sonra azalmaktadır (Şekil 4.97b). BÖ-DKK tasarımlarında $I_{L,mix}$ KÖ-DKK'ya göre daha küçük olmasına rağmen dayanım KÖ-DKK'da daha büyük elde edilmiştir. Bu sonuç dayanım üzerinde W_T:W_b parametresinin $I_{L,mix}$ parametresine göre daha baskın olduğunu göstermektedir.

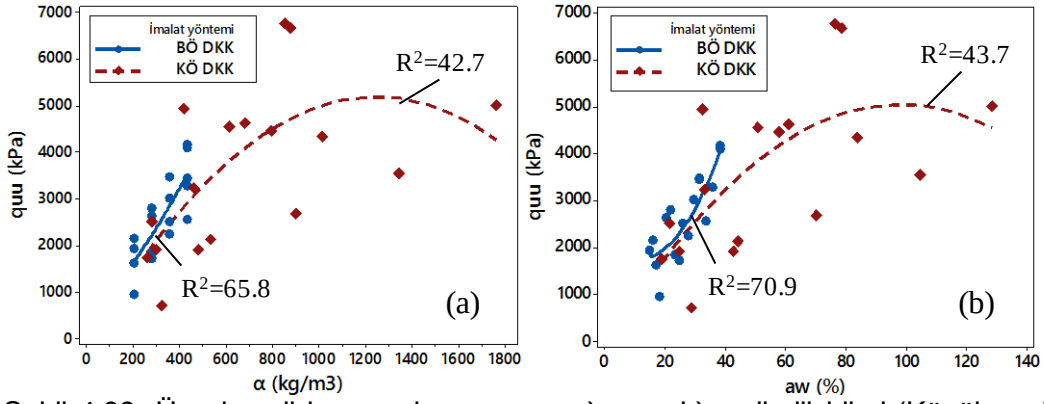


Şekil 4.96. Serbest basınç dayanımının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

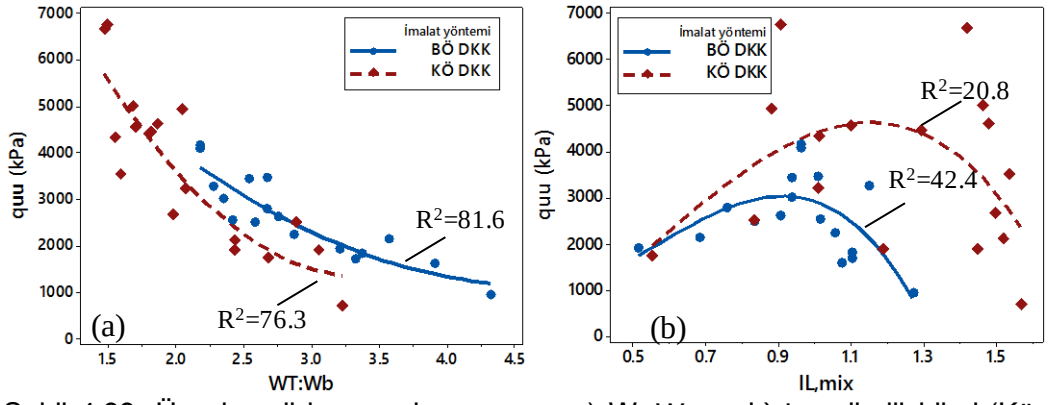


Şekil 4.97. Serbest basınç dayanımının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Üç eksenli basınç dayanımı yönünden KÖ-DKK dayanımı BÖ-DKK dayanımından 28 ve 56 gün kür sürelerinde ortalama %30 daha fazla olmuştur. Masike (2019) BÖ-DKK dayanımını KÖ-DKK dayanımının %55-85'i olarak belirlemiştir. İmalat yöntemine göre üç eksenli basınç dayanımındaki değişimin α (Şekil 4.98a), a_w (Şekil 4.98b), W_T:W_b (Şekil 4.99a) ve $I_{L,mix}$ (Şekil 4.99b) ile olan ilişkileri serbest basınç dayanımı ile aynıdır.



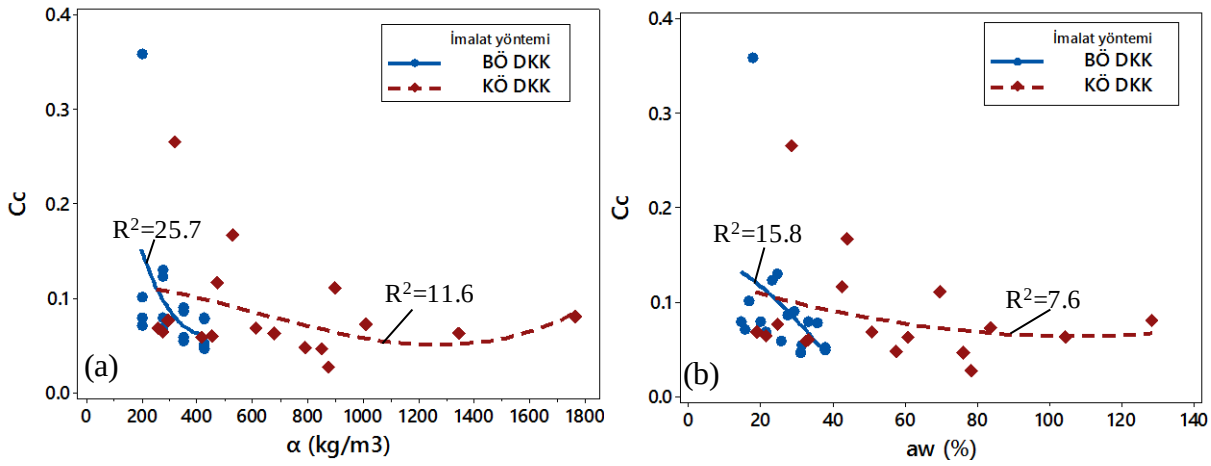
Şekil 4.98. Üç eksenli basınç dayanımının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)



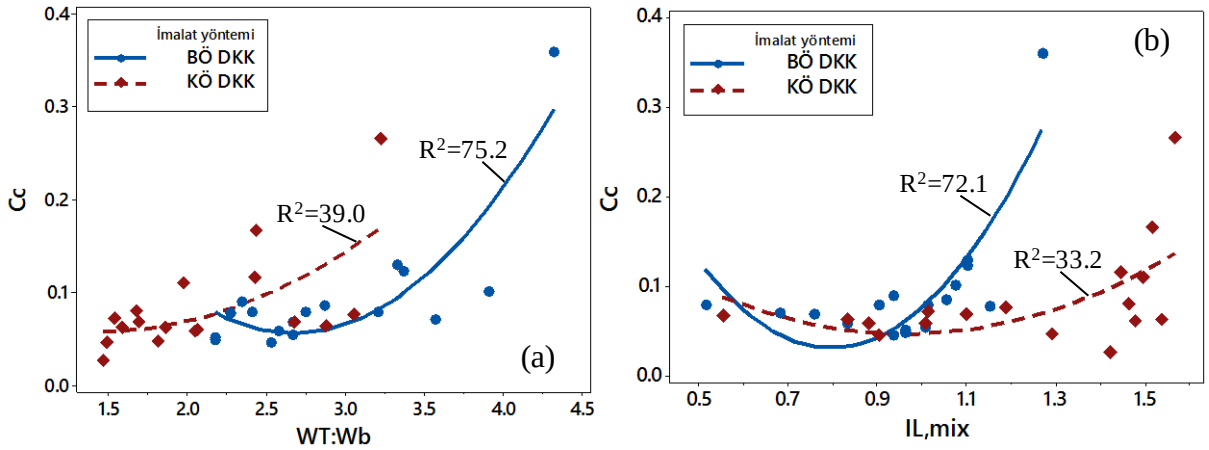
Şekil 4.99. Üç eksenli basınç dayanımının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Konsolidasyon deneyi sonuçlarına bakıldığında, KÖ-DKK'ların sıkışma indisi BÖ-DKK'dan 28 gün kür süresinde ortalama %20, 56 gün kür süresinde ise ortalama %6 daha az olmuştur. Küçük ve büyük ölçekli DKK'ların sıkışma indisleri arasındaki fark dayanım sonuçlarına göre oldukça düşük kalmıştır. Çünkü her iki imalat yönteminde de numuneler maksimum kayma gerilmelerinin çok altında bir yük ile konsolide edilmiştir. Bu nedenle her iki imalat yönteminden elde edilen sıkışma indisleri hem sayısal değer olarak hem de kıyaslama oranı olarak düşük elde edilmiştir. Sıkışma indisini düşük elde edilmesiyle ilgili benzer sonuç Horpibulsuk vd. (2005) tarafından da ifade edilmiştir. Masike (2019) BÖ-DKK için elde edilen sıkışma indisinin KÖ-DKK'nın %63-99'u olduğunu ifade etmiştir.

DKK'nın konsolidasyon davranışı düşünüldüğünde, genel eğilim α ve a_w arttıkça sıkışma indisinin azaldığı yönündedir (Şekil 4.100). KÖ-DKK tasarımında a_w %90 değerinden fazla olduğunda sıkışma indisinin çok değişmediği hatta olumsuz etkilendiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, α ve a_w değerleri küçük ölçekte büyük ölçeğe göre daha fazla olduğundan dolayı KÖ-DKK'nın sıkışma indisi BÖ-DKK'ya göre daha az olmaktadır. W_T:W_b arttığında sıkışma indisinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte W_T:W_b, BÖ-DKK tasarımlarında KÖ-DKK'ya göre daha büyük olduğu için büyük ölçekteki sıkışma indisi daha fazla olmaktadır (Şekil 4.101a). BÖ-DKK tasarımında $I_{L,mix}=0.8I_L$, KÖ-DKK tasarımında ise $I_{L,mix}=I_L$ değerine kadar sıkışma indisi azalmakta, bu değerden sonra artmaktadır (Şekil 4.101b).

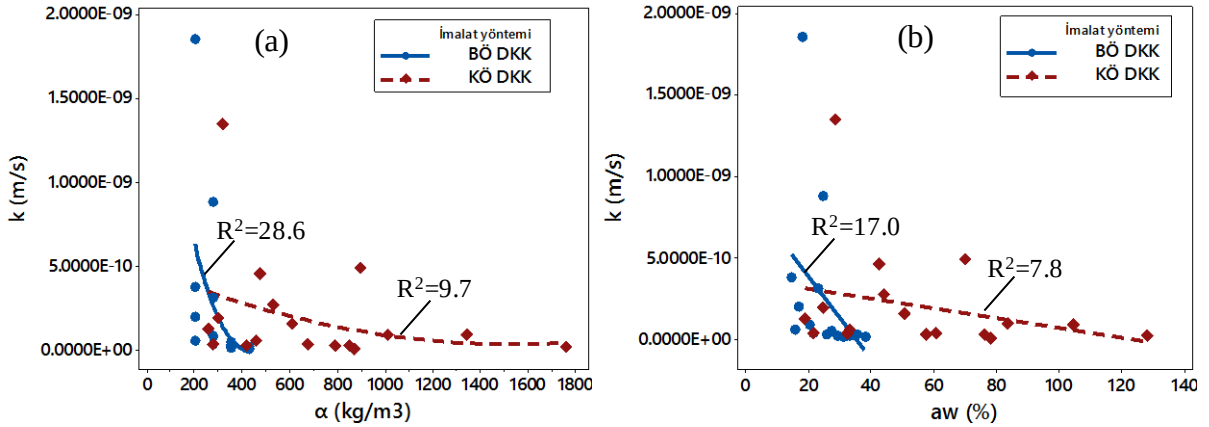


Şekil 4.100. Sıkışma indisinin a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

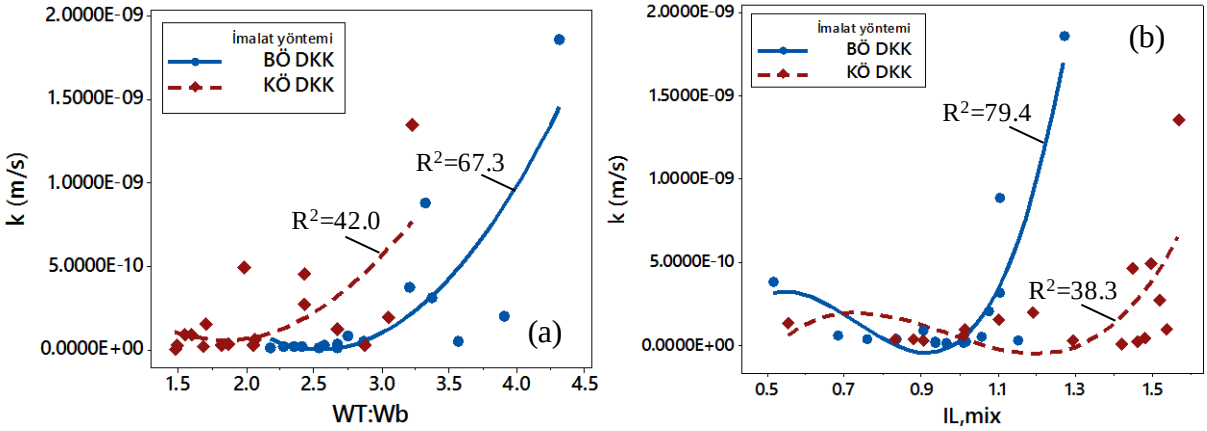


Şekil 4.101. Sıkışma indisinin a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Permeabilite deneyi sonuçlarına bakıldığında, KÖ-DKK'ların permeabilite katsayıları BÖ-DKK'dan 28 gün kür süresinde ortalama %180 daha fazla, 56 gün kür süresinde ise ortalama %45 daha az olmuştur. Bu durum optimum tasarımda 28 gün kür süresinde ortalama %30 daha fazla, 56 gün kür süresinde ise ortalama %45 daha az olmuştur. İmalat yöntemine göre permeabilite katsayısındaki değişimin α (Şekil 4.102a), a_w (Şekil 4.102b) ve W_T:W_b (Şekil 4.103a) ile olan ilişkileri sıkışma indisi ile aynıdır. BÖ-DKK tasarımında $I_{L,mix}$=I_L, KÖ-DKK tasarımında ise $I_{L,mix}$=1.2I_L değerine kadar permeabilite katsayısı azalmakta, bu değerden sonra artmaktadır (Şekil 4.103b).



Şekil 4.102. Permeabilite katsayısının a) α ve b) a_w ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

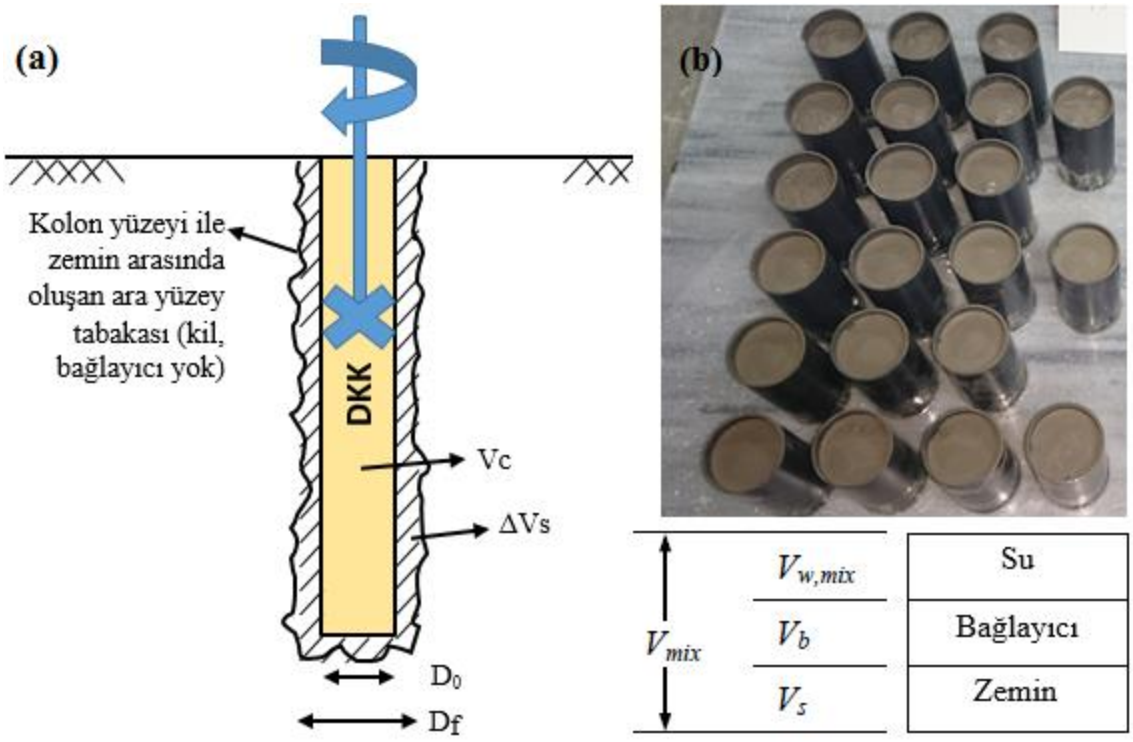


Şekil 4.103. Permeabilite katsayısının a) W_T:W_b ve b) $I_{L,mix}$ ile ilişkileri (Küçük ve büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki farklılığın temel sebebi imalat yönteminin ve kür koşullarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumlar şu şekilde açıklanabilir:

1) BÖ-DKK tasarımında belirli bir kıvamdaki killi zemin derin karıştırma makinesiyle karıştırılmaktadır (80 devir/dk). DKK imalatı sırasında kolon bölgesinde yaklaşık 85-90 kg killi zemin bulunmaktadır ve karıştırma işlemi 10-15 dk sürmektedir. KÖ-DKK tasarımında ise kurutulmuş, 2mm elekten elenmiş ve öğütülmüş killi zemin (yaklaşık 1-2 kg) enjeksiyonla karıştırılmaktadır. Karıştırma işlemi mikser ile 15 dk boyunca devam etmektedir (140 devir/dk). Her iki imalat yöntemi düşünüldüğünde, küçük ölçekli DKK tasarımında büyük ölçeğe göre çok daha homojen bir karışım elde edilmiş olmaktadır. Bu nedenle küçük ölçekli tasarımlarda tüm kil taneleri çimento ve uçucu külle temasa geçerek performansı daha yüksek DKK imal edilmiş olmaktadır.
2) İmalat yönteminden kaynaklanan bir diğer farklılık; küçük ve büyük ölçekli DKK karışımlarında yerinde bağlayıcı faktörü ($\alpha_{in\text{-}place}$) aynı olmasına rağmen, bağlayıcı faktörü (α) ve bağlayıcı içeriğinin (a_w) farklı olmasından kaynaklanmaktadır. BÖ-DKK imalatında, kolon bölgesi sınırları içinde imalat öncesinde zemin varken imalat sonrasında zemin+enjeksiyon karışımı olmaktadır. Bu nedenle BÖ-DKK tasarımında $\alpha=\alpha_{in\text{-}place}$ olmaktadır. Fakat imalat sırasında karıştırma bıçakları dönerken kolon bölgesindeki zeminin bir kısmını (ΔVs) kenarlara ittirmektedir (Şekil 4.104a). ΔVs, kolon ile zemin arasında oluşan arayüzey tabakasının hacmi hesaplanarak bulunabilir. Fakat ΔVs'yi hesaplamak çok kolay değildir, çünkü bıçaklar döndükçe kenarlara ittirilen zemini sıştırmaktadır ve bu zeminin yoğunluğu değişmektedir. ΔVs'yi kabaca hesaplamak istersek şu yapılabilir: Büyük ölçekli DKK imalatlarında 30 cm çapında (D_0) kolon imal edilmek istense de oluşan kolon çapı (D_f), imalat parametrelerine bağlı olarak 31-33 cm arasında değişmektedir. Buradan hareketle kenarlara ittirilen zemin hacmi (ΔVs), kolon

bölgesindeki zemin hacminin %6.7-21 arasında olmaktadır. Bu durumun bağlayıcı faktörünü etkileyip etkilemeyeceği tartışmalı olabilir, fakat bağlayıcı içeriğinin (a_w) gerçek durumda düşünülenden %6.7-21 daha fazla olma ihtimali yüksektir. Buna rağmen büyük ölçekli DKK imalatında a_w küçük ölçeğe göre çok daha az olmaktadır. KÖ-DKK tasarımında, zemin-enjeksiyon karışımı kalıplara yerleştirilmektedir. Kalıbın bir kısmını zemin, kalan kısmını bağlayıcı ve su oluşturmaktadır (Şekil 4.104b). Bunun sonucunda $\alpha > \alpha_{in\text{-}place}$ olmaktadır. Ayrıca küçük ölçekli tasarımlarda bağlayıcı içeriği büyük ölçeğe göre fazla olmaktadır. KÖ-DKK performansının büyük ölçeğe göre daha fazla elde edilmesinin nedenlerinden bir tanesi de budur.



Şekil 4.104. İmalat sırasındaki farklılıklar: a) büyük ve b) küçük ölçekli DKK tasarımları

Yukarıda bahsedilen imalat yöntemleri arasındaki farklılıklar ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen tecrübeler ışığında birtakım formüller üretilmiştir. KÖ-DKK tasarımında, imalat aşamasında kalıbın zemin ve enjeksiyonla doldurulabilmesi için gerekli zemin hacmi,

$$V_{n,s} = V_T \cdot VR \tag{4.32}$$

olmaktadır. Burada; $V_{n,s}$=doğal zeminin hacmi, V_T=karışımın toplam hacmi ve VR=hacim oranıdır. KÖ-DKK imalatında zemin hacminde VR kadar bir azaltma

yapılmaktadır. Fakat BÖ-DKK imalatında kolon bölgesindeki zeminin ne kadarının (ΔVs) dışa itildiği karıştırma süresine ve bıçakların dönme hızına bağlıdır. Bu bilindiği takdirde BÖ-DKK tasarımındaki bağlayıcı içeriği (a_w) hesaplanabilir. Küçük ve büyük ölçekli tasarımlardaki bağlayıcı içeriği arasındaki ilişki, kolon imalatı sırasında ara yüzey tabakasının oluşmadığı ve oluştuğu durumlar için sırasıyla Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'te verilmiştir.

$$a_w(B\ddot{O} - DKK) = a_w(K\ddot{O} - DKK) \cdot VR \tag{4.33}$$

$$a_w(B\ddot{O} - DKK) = a_w(K\ddot{O} - DKK) \cdot VR \cdot \frac{1}{(1 - \frac{\Delta V_s}{V_c})} \tag{4.34}$$

burada, a_w=bağlayıcı içeriği, VR=hacim oranı, ΔV_s=ara yüzey tabakasındaki zemin hacmi, V_c=kolon hacmidir.

3) Büyük ölçekli DKK imalatında, kolon zemin içerisinde gömülü vaziyette kür edildiği için zemin-enjeksiyon karışımındaki su kolon bölgesinde kalmaktadır. Küçük ölçekli DKK imalatında, hazırlanan karışım kalıplara doldurulduğunda bazı tasarımlarda fazla suyun bir kısmı kalıp üstünde toplanmaktadır. Bunun sonucunda karışım prizini alana kadar fazla su buharlaşarak ortamdan ayrılmaktadır. Sonuç olarak büyük ölçekli tasarımlarda karışımdaki su ortamı terk etmediğinden karışımın su/bağlayıcı oranı (W_T:W_b) küçük ölçeğe göre daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte KÖ-DKK ve BÖ-DKK tasarımlarındaki bağlayıcı miktarı ve enjeksiyon hacmi aynı olmasına rağmen, imalat yöntemindeki farklılıktan dolayı KÖ-DKK tasarımındaki zemin hacmi BÖ-DKK'dan daha az olduğu için küçük ölçekte su muhtevası ve likitlik indisi daha fazladır. Tüm etkilerin sonucunda büyük ölçekli DKK performansı küçük ölçeğe göre daha düşük olmaktadır.

4.5 DKK Dayanımı: 7 Parametreli Faktöriyel Tasarım

Projenin buraya kadarki kısımlarında, DKK performansını etkileyen parametreler her bir kür süresi için ayrı ayrı optimize edilmiş ve parametreler arasındaki ilişkiler regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu başlık altında uçucu kül katkılı DKK'nın dayanım değerlerleri; imalat parametreleri, kür süresi ve hücre basıncı dikkate alınarak incelenmiştir. İmalat parametreleri olarak bağlayıcı dozajı (D), uçucu kül oranı (UKO), süper akışkanlaştırıcı oranı (K), su/bağlayıcı oranı (s/b) ve zeminin likitlik indisi (I_L) dikkate alınmıştır. DKK dayanımları kür süresinin (t) 7, 28 ve 56 gün sürelerinde belirlenmiştir. DKK dayanımı serbest basınç

deneyi ile belirlenirken numuneye uygulanan hücre basıncı (σ_3) 0 kPa iken, üç eksenli basınç deneylerinde hücre basınçları 200 ve 400 kPa olarak seçilmişti. İmalat parametreleri, kür süreleri ve hücre basınçları dikkate alındığında, DKK dayanımı üzerinde 7 adet parametrenin etkisi bulunmaktadır. Parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 4.86'da verilmiştir.

Tablo 4.86. Faktöriyel tasarımda kullanılan parametreler ve bunların seviyeleri

Seviye	Parametreler ve bunların seviyeleri						
	D (kg/m^3)	UKO (%)	K (%)	s/b	I_L	t * (gün)	σ_3 (kPa)
1	200	0	0	0.8	0.4	7	0
2	275	20	1	1.0	0.6	28	200
3	350	40	3	1.2	0.8	56	400
4	425	60	5	1.4	1.0		

* Kür süresi KÖ-DKK için 7, 28 ve 56 gün iken BÖ-DKK için 28 ve 56 gündür.

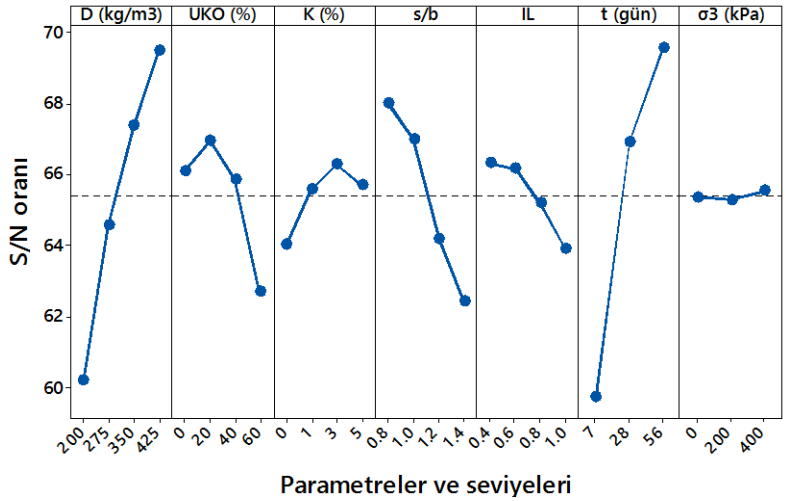
DKK dayanımına etki eden imalat parametreleri araştırılırken 5 parametre ve bunların 4 seviyesi bulunduğu için Taguchi'nin L16 tasarım tablosuna göre deneyler yürütülmüştür. 5 parametreye ilave olarak kür süresi ve hücre basıncı eklendiğinde toplamda 7 parametre olmaktadır. Hücre basıncının 3 adet seviyesi bulunmaktadır. Kür süresinin KÖ-DKK tasarımında 3 adet, BÖ-DKK tasarımında 2 adet seviyesi bulunmaktadır. Bu nedenle KÖ-DKK tasarımında, L16 tablosu 3x3=9 kez tekrarlanarak 144 deney sonucu kullanılmıştır. BÖ-DKK tasarımında, L16 tablosu 3x2=6 kez tekrarlanarak 96 deney sonucu kullanılmıştır.

4.5.1 Küçük ölçekli DKK

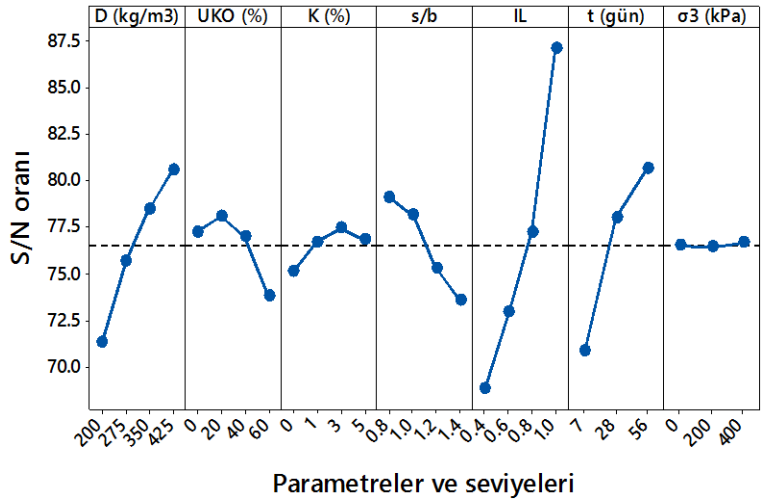
7, 28 ve 56 gün kür sürelerinde yapılan serbest ve üç eksenli basınç deney sonuçları (Tablo 4.48, Tablo 4.52, Tablo 4.56, Tablo 4.60, Tablo 4.64 ve Tablo 4.68) kullanılarak faktöriyel tasarım yapılmıştır. Sonuç parametresi olarak hem DKK dayanımı (σ_1-σ_3) hem de zemin iyileştirme derecesi (RI) dikkate alınmıştır.

S/N analizi

σ_1-σ_3 ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.105 ve Şekil 4.106'da verilmiştir. σ_1-σ_3 ve RI; UKO %20'ye, K %3'e kadar artıp daha sonra azalırken, D ve t arttıkça sürekli artmaktadır. I_L arttıkça σ_1-σ_3 azalırken, RI artmaktadır. σ_3, σ_1-σ_3 ve RI üzerinde çok etkili olmamıştır. Parametrelerin σ_1-σ_3 üzerindeki etki sırası t, D, s/b, UKO, I_L, K ve σ_3 olurken; RI üzerindeki etki sırası I_L, t, D, s/b, UKO, K ve σ_3 olmaktadır (Tablo 4.87).



Şekil 4.105. σ_1-σ_3 için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK)



Şekil 4.106. RI için elde edilen S/N grafiği (Küçük ölçekli DKK)

Tablo 4.87. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Küçük ölçekli DKK)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler						
		D	UKO	K	s/b	I_L	t	σ_3
Kolon dayanımı, σ_1-σ_3 (kPa)	1	60.20	66.12	64.02	67.99	66.33	59.75	65.37
	2	64.56	66.95	65.59	67.00	66.17	66.91	65.29
	3	67.37	65.85	66.30	64.18	65.18	69.54	65.54
	4	69.47	62.69	65.70	62.44	63.93	-	-
	Delta	9.27	4.26	2.28	5.55	2.4	9.79	0.24
	Sıralama	2	4	6	3	5	1	7
Zemin iyileştirme oranı, RI (%)	1	71.34	77.25	75.16	79.13	68.85	70.89	76.51
	2	75.70	78.09	76.73	78.14	72.94	78.05	76.43
	3	78.51	76.98	77.44	75.32	77.23	80.68	76.68
	4	80.61	73.83	76.84	73.57	87.15	-	-
	Delta	9.27	4.26	2.28	5.55	18.3	9.79	0.24
	Sıralama	3	5	6	4	1	2	7

ANOVA sonuçları

Küçük ölçekli DKK dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %93.37, %92.36 ve %91.06 elde edilmiştir. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. σ_3 dışındaki tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. σ_1-σ_3 üzerinde bağlayıcı dozajı %30.08, uçucu kül %5.86, katkı %1.97, su/bağlayıcı oranı %11.78, likitlik indisi %1.73, kür süresi %41.93 ve hücre basıncı %0.03 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %6.63 olmuştur (Tablo 4.88). Küçük ölçekli DKK dayanımında hücre basıncının etkisiz olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç klasik zemin mekaniğinde yer alan konsolidasyonsuz-drenajsız yükleme koşullarındaki teoriyi desteklemektedir. Numuneye uygulanan hücre basıncı (σ_3) $\Delta\sigma_3$ kadar arttığında, boşluk suyu basıncında (u) Δu_c kadar artış olmaktadır. Su drenajının olmadığı durumda $\Delta\sigma_3=\Delta u_c$ olur. Bu durumda numuneye etkiyen normal (σ_3) ve efektif (σ_3') küçük asal gerilmeler birbirine eşittir. Yükleme sırasında ise deviatör gerilme (σ_1-σ_3) arttığında boşluk suyu basıncı Δu_d kadar artmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış hem küçük hem de büyük asal gerilmeye aynı oranda etki etmektedir. Bunun sonucunda yükleme sırasında toplam ve efektif gerilmeler arasındaki ilişki $\sigma_3 - \Delta u_d = \sigma_3'$ ve $\sigma_1 - \Delta u_d = \sigma_1'$ şeklindedir. Sonuç olarak hücre basıncındaki veya deviatör gerilmedeki artış sonucunda oluşan boşluk suyu basıncındaki artış deviatör gerilmede artışa neden olmamaktadır (Skempton, 1954; Das, 2005).

Tablo 4.88. Dayanım değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK)

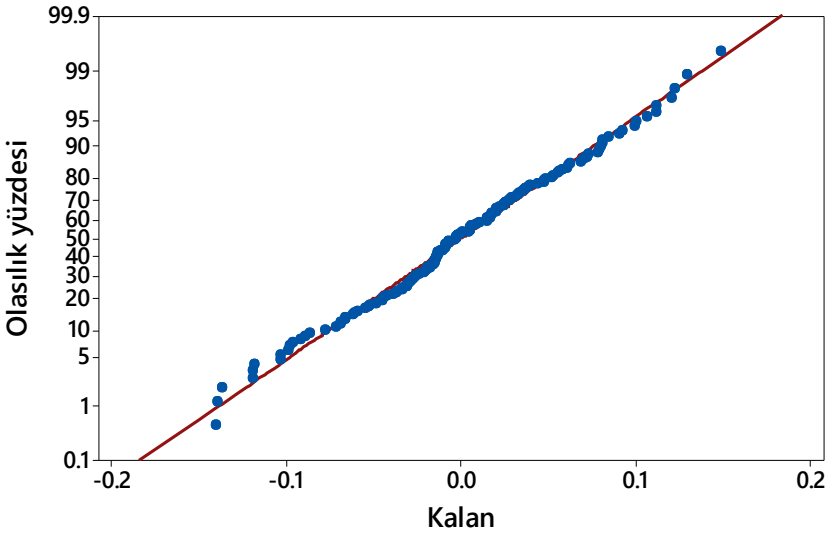
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
D	3	2.29148	30.08%	2.29148	0.76383	187.55	0.000
UKO	3	0.44627	5.86%	0.44627	0.14876	36.53	0.000
K	3	0.15036	1.97%	0.15036	0.05012	12.31	0.000
s/b	3	0.89787	11.78%	0.89787	0.29929	73.49	0.000
I_L	3	0.13148	1.73%	0.13148	0.04383	10.76	0.000
t	2	3.19437	41.93%	3.19437	1.59718	392.17	0.000
σ_3	2	0.00219	0.03%	0.00219	0.00109	0.27	0.765
Hata	124	0.50502	6.63%	0.50502	0.00407		
Toplam	143	7.61904	100.00%				

Dayanım sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş ve elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.35'de verilmiştir. Regresyon modelinin uyumluluğunu belirlemek için modeldeki hataların normal olasık ve histogram grafikleri sırasıyla Şekil 4.107 ve Şekil 4.108'de verilmiştir. Normal olasılık grafiğinde verilerin büyük çoğunluğu düz bir çizgi üzerinde bulunmakta, histogram grafiğinde de hataların normal

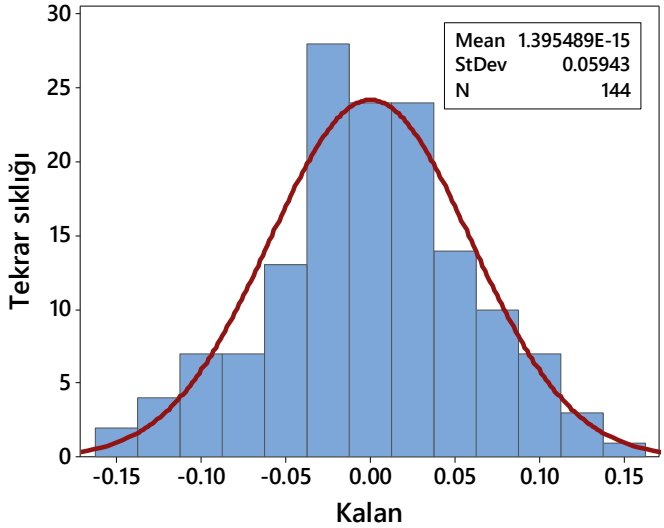
dağılıma çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle oluşturulan modelin geçerliliği yüksektir.

$$(\sigma_1-\sigma_3)^{0.124525} = 2.56455 + \begin{bmatrix}-0.18608\\-0.03492\\+0.06934\\+0.15166\end{bmatrix}\begin{pmatrix}D_1\\D_2\\D_3\\D_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}+0.02036\\+0.05621\\+0.01598\\-0.09256\end{bmatrix}\begin{pmatrix}UKO_1\\UKO_2\\UKO_3\\UKO_4\end{pmatrix}$$
$$+ \begin{bmatrix}-0.05312\\+0.00341\\+0.03220\\+0.01751\end{bmatrix}\begin{pmatrix}K_1\\K_2\\K_3\\K_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}+0.09457\\+0.05546\\-0.04615\\-0.10388\end{bmatrix}\begin{pmatrix}s/b_1\\s/b_2\\s/b_3\\s/b_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}+0.02971\\+0.02389\\-0.00728\\-0.04632\end{bmatrix}\begin{pmatrix}I_{L,1}\\I_{L,2}\\I_{L,3}\\I_{L,4}\end{pmatrix} \quad (4.35)$$
$$+ \begin{bmatrix}-0.20244\\+0.05085\\+0.15160\end{bmatrix}\begin{pmatrix}t_1\\t_2\\t_3\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}-0.00076\\-0.00435\\+0.00511\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_{3,1}\\\sigma_{3,2}\\\sigma_{3,3}\end{pmatrix}$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri, alt indisler ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine uygun olan katsayı ile matematiksel işlem yapılmalıdır.



Şekil 4.107. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Küçük ölçekli DKK)



Şekil 4.108. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Küçük ölçekli DKK)

ANOVA analizinden elde edilen Denklem 4.35 parametrelerin seviyesine bağlı olmakta ve daha çok bu çalışmaya özel kalmaktadır. Daha genel bir denklem lineer regresyon analiziyle elde edilebilir. Lineer regresyon analizine göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %85.24, %84.48 ve %83.28 elde edilmiştir (Denklem 36).

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^{0.334662} = 9.845 + 0.01968 \cdot D - 0.02142 \cdot UKO + 0.2050 \cdot K - 4.477 \cdot (s/b) - 1.298 \cdot I_L + 0.09150 \cdot t + 0.000197 \cdot \sigma_3 \quad (4.36)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri göstermektedir.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %96.87, %96.40 ve %95.79 elde edilmiştir. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. σ_3 dışındaki tüm parametreler için P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile RI sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. RI üzerinde bağlayıcı dozajı %13.95, uçucu kül %3.02, katkı %0.82, su/bağlayıcı oranı %5.65, likitlik indisi %53.61, kür süresi %19.81 ve hücre basıncı %0.01 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %3.13 olmuştur (Tablo 4.89).

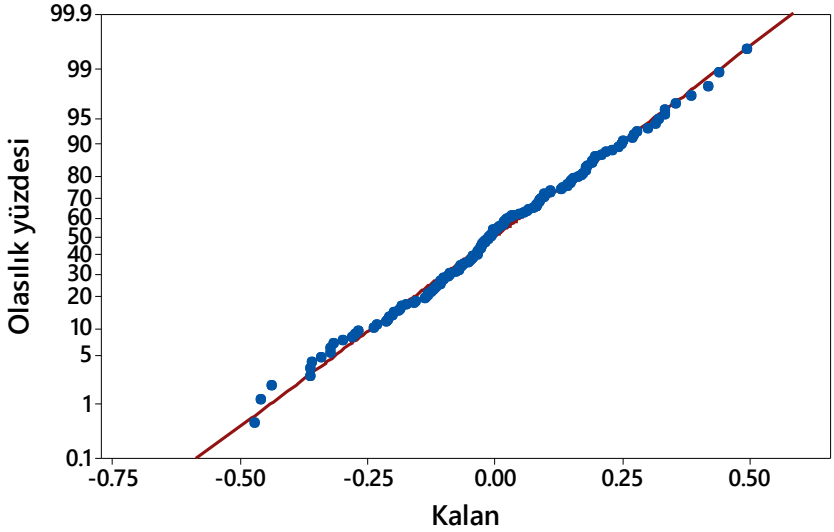
Tablo 4.89. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Küçük ölçekli DKK)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
D	3	22.997	13.95%	22.9973	7.6658	184.49	0.000
UKO	3	4.984	3.02%	4.9838	1.6613	39.98	0.000
K	3	1.351	0.82%	1.3506	0.4502	10.83	0.000
s/b	3	9.322	5.65%	9.3219	3.1073	74.78	0.000
I_L	3	88.379	53.61%	88.3792	29.4597	709.01	0.000
t	2	32.656	19.81%	32.6564	16.3282	392.97	0.000
σ_3	2	0.02	0.01%	0.0198	0.0099	0.24	0.788
Hata	124	5.152	3.13%	5.1522	0.0416		
Toplam	143	164.861	100.00%				

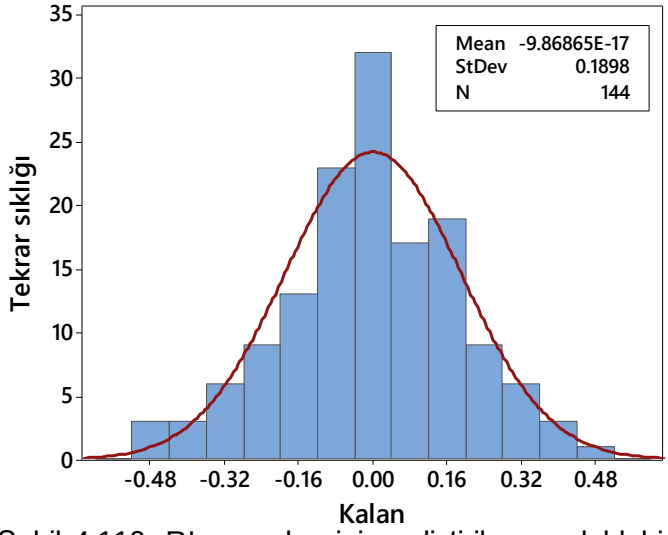
RI sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki regresyon denklemi Denklem 4.37'de verilmiştir. Regresyon modelinin uyumluluğunu belirlemek için modeldeki hataların normal olasık ve histogram grafikleri sırasıyla Şekil 4.109 ve Şekil 4.110'da verilmiştir. Normal olasılık grafiğinde verilerin büyük çoğunluğu düz bir çizgi üzerinde bulunmakta, histogram grafiğinde de hataların normal dağılıma çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle oluşturulan modelin geçerliliği yüksektir.

$$\ln(RI) = 8.8120 + \begin{bmatrix} -0.5987 \\ -0.0968 \\ +0.2271 \\ +0.4684 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} +0.0821 \\ +0.1785 \\ +0.0512 \\ -0.3118 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1589 \\ +0.0216 \\ +0.1032 \\ +0.0340 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix}$$
$$+ \begin{bmatrix} +0.2977 \\ +0.1842 \\ -0.1405 \\ -0.3415 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.8856 \\ -0.4150 \\ +0.0790 \\ +1.2216 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.6503 \\ +0.1733 \\ +0.4769 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0032 \\ -0.0125 \\ +0.0157 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} \sigma_{3,1} \\ \sigma_{3,2} \\ \sigma_{3,3} \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri, alt indisler ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine uygun olan katsayı ile matematiksel işlem yapılmalıdır.



Şekil 4.109. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Küçük ölçekli DKK)



Şekil 4.110. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Küçük ölçekli DKK)

ANOVA analizinden elde edilen Denklem 4.37 parametrelerin seviyesine bağlı olmakta ve daha çok bu çalışmaya özel kalmaktadır. Daha genel bir denklem lineer regresyon analiziyle elde edilebilir. Lineer regresyon analizine göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %89.49, %88.95 ve %88.17 elde edilmiştir (Denklem 4.38).

$$(-RI)^{-0.0877696} = -0.59363 + 0.000182 \cdot D - 0.000256 \cdot UKO + 0.001569 \cdot K - 0.04111 \cdot (s/b) + 0.13492 \cdot I_L + 0.000917 \cdot t + 0.000002 \cdot \sigma_3 \quad (4.38)$$

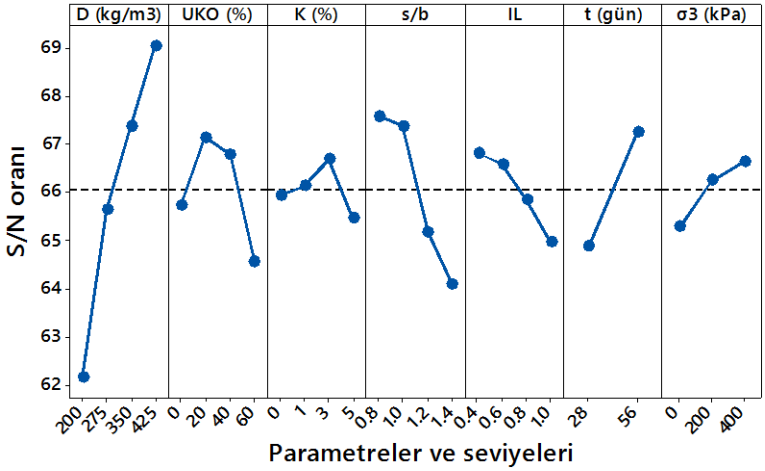
burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri göstermektedir.

4.5.2 Büyük ölçekli DKK

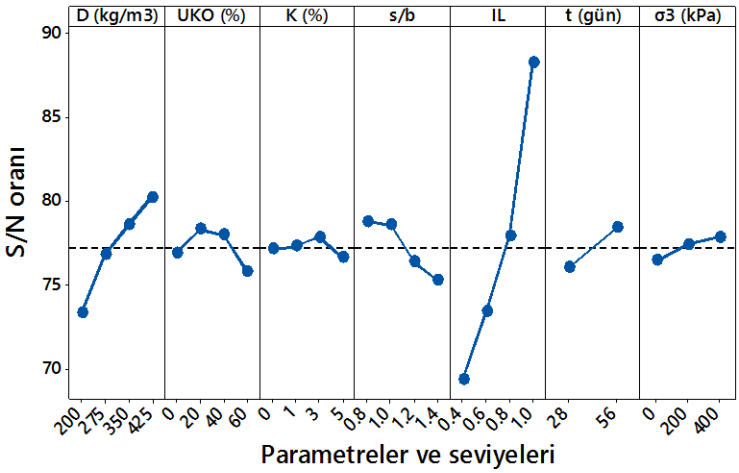
28 ve 56 gün kür sürelerinde yapılan serbest ve üç eksenli basınç deney sonuçları (Tablo 4.17, Tablo 4.21, Tablo 4.25 ve Tablo 4.29) kullanılarak faktöriyel tasarım yapılmıştır. Sonuç parametresi olarak hem DKK dayanımı (σ_1-σ_3) hem de zemin iyileştirme derecesi (RI) dikkate alınmıştır.

S/N analizi

σ_1-σ_3 ve RI sonuçlarına ait S/N oranları için ana etki grafikleri sırasıyla Şekil 4.111 ve Şekil 4.112'de verilmiştir. σ_1-σ_3 ve RI; UKO %20'ye, K %3'e kadar artıp daha sonra azalırken, D, t ve σ_3 arttıkça sürekli artmaktadır. σ_1-σ_3 ve RI; s/b arttıkça hem numune dayanımı hem de zemin iyileştirme derecesi azalmaktadır. I_L arttıkça σ_1-σ_3 azalırken, RI artmaktadır. σ_3, σ_1-σ_3 ve RI üzerinde çok etkili olmamıştır. Parametrelerin σ_1-σ_3 üzerindeki etki sırası t, D, s/b, UKO, I_L, K ve σ_3 olurken; RI üzerindeki etki sırası I_L, t, D, s/b, UKO, K ve σ_3 olmaktadır (Tablo 4.90).



Şekil 4.111. σ_1-σ_3 için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK)



Şekil 4.112. RI için elde edilen S/N grafiği (Büyük ölçekli DKK)

Tablo 4.90. S/N analizinden elde edilen cevap tablosu (Büyük ölçekli DKK)

Araştırma alanı	Seviye	Parametreler						
		D	UKO	K	s/b	I_L	t	σ_3
σ_1-σ_3 (kPa)	1	62.16	65.72	65.94	67.58	66.81	64.87	65.27
	2	65.64	67.15	66.13	67.38	66.58	67.24	66.25
	3	67.37	66.79	66.68	65.17	65.85	-	66.65
	4	69.05	64.57	65.47	64.09	64.98	-	-
	Delta	6.89	2.58	1.21	3.49	1.83	2.38	1.37
	Sıralama	1	3	7	2	5	4	6
RI (%)	1	73.30	76.85	77.08	78.72	69.33	76.01	76.41
	2	76.78	78.28	77.27	78.51	73.34	78.38	77.38
	3	78.51	77.93	77.82	76.31	77.89	-	77.79
	4	80.19	75.71	76.61	75.23	88.20	-	-
	Delta	6.89	2.58	1.21	3.49	18.87	2.38	1.37
	Sıralama	2	4	7	3	1	5	6

ANOVA sonuçları

Büyük ölçekli DKK dayanımı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %90.03, %87.70 ve %84.51 elde edilmiştir. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametrelerin P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için parametreler ve dayanım sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. σ_1-σ_3 üzerinde bağlayıcı dozajı %49.53, uçucu kül %7.11, katkı %1.27, su/bağlayıcı oranı %16.07, likitlik indisi %1.79, kür süresi %11.99 ve hücre basıncı %2.28 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %9.97 olmuştur (Tablo 4.91).

Tablo 4.91. Dayanım değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK)

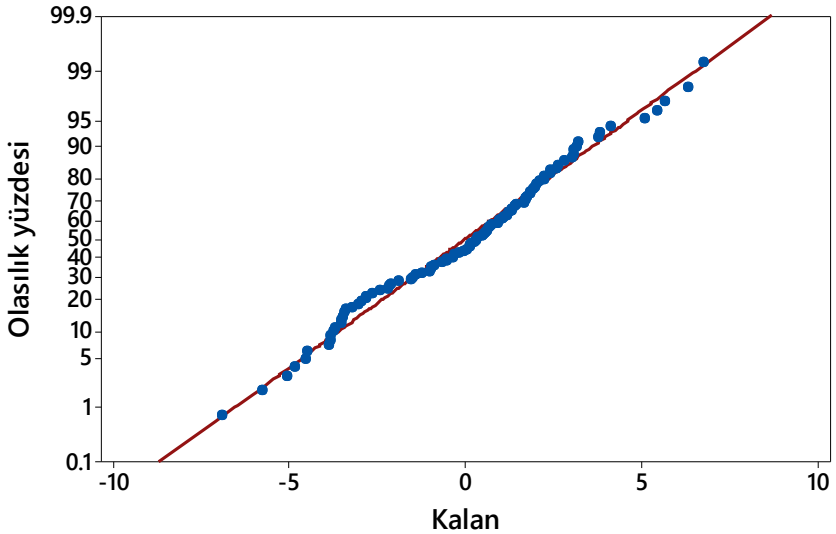
Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
D	3	3736.05	49.53%	3736.05	1245.35	127.54	0.000
UKO	3	536.51	7.11%	536.51	178.84	18.32	0.000
K	3	96.1	1.27%	96.1	32.03	3.28	0.025
s/b	3	1211.86	16.07%	1211.86	403.95	41.37	0.000
I_L	3	134.92	1.79%	134.92	44.97	4.61	0.005
t	1	904.35	11.99%	904.35	904.35	92.62	0.000
σ_3	2	171.72	2.28%	171.72	85.86	8.79	0.000
Hata	77	751.85	9.97%	751.85	9.76		
Toplam	95	7543.36	100.00%				

Dayanım sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş ve elde edilen regresyon denklemi Denklem 4.39'da verilmiştir. Regresyon modelinin uyumluluğunu belirlemek için modeldeki hataların normal olasık ve histogram

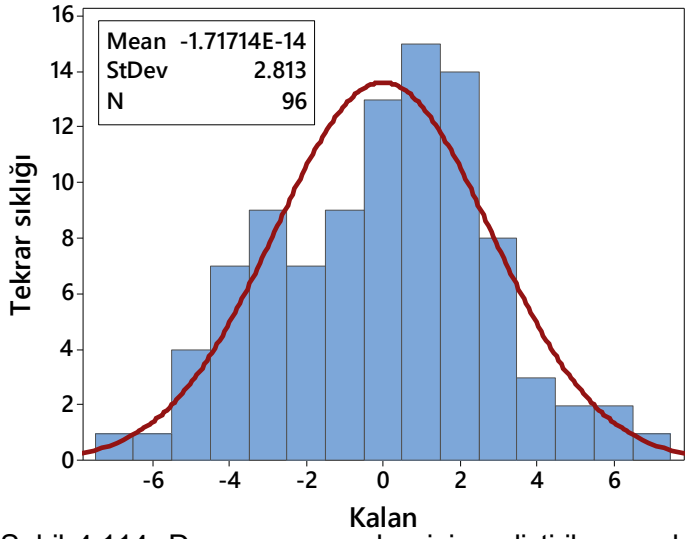
grafikleri sırasıyla Şekil 4.113 ve Şekil 4.114'de verilmiştir. Normal olasılık grafiğinde verilerin büyük çoğunluğu düz bir çizgi üzerinde bulunmakta, histogram grafiğinde de hataların normal dağılıma çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle oluşturulan modelin geçerliliği yüksektir.

$$(\sigma_1-\sigma_3)^{0.5} = 45.756 + \begin{bmatrix}-9.141\\-1.563\\+2.864\\+7.840\end{bmatrix}\begin{pmatrix}D_1\\D_2\\D_3\\D_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}-1.275\\+2.666\\+1.820\\-3.211\end{bmatrix}\begin{pmatrix}UKO_1\\UKO_2\\UKO_3\\UKO_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}-0.788\\-0.186\\+1.686\\-0.711\end{bmatrix}\begin{pmatrix}K_1\\K_2\\K_3\\K_4\end{pmatrix}$$
$$+ \begin{bmatrix}+3.928\\+3.049\\-2.644\\-4.334\end{bmatrix}\begin{pmatrix}s/b_1\\s/b_2\\s/b_3\\s/b_4\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}+1.542\\+0.696\\-0.760\\-1.477\end{bmatrix}\begin{pmatrix}I_{L,1}\\I_{L,2}\\I_{L,3}\\I_{L,4}\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}-3.069\\+3.069\end{bmatrix}\begin{pmatrix}t_1\\t_2\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}-1.778\\+0.331\\+1.447\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_{3,1}\\\sigma_{3,2}\\\sigma_{3,3}\end{pmatrix} \quad (4.39)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri, alt indisler ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine uygun olan katsayı ile matematiksel işlem yapılmalıdır.



Şekil 4.113. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK)



Şekil 4.114. Dayanım sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Büyük ölçekli DKK)

ANOVA analizinden elde edilen Denklem 4.39 parametrelerin seviyesine bağlı olmakta ve daha çok bu çalışmaya özel kalmaktadır. Daha genel bir denklem lineer regresyon analiziyle elde edilebilir. Lineer regresyon analizine göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %80.24, %78.67 ve %76.27 elde edilmiştir (Denklem 40).

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^{0.5} = 33.1 + 0.07383 \cdot D - 0.0333 \cdot UKO + 0.089 \cdot K - 15.24 \cdot (s/b) - 5.26 \cdot I_L + 0.2192 \cdot t + 0.00806 \cdot \sigma_3 \quad (4.40)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri göstermektedir.

RI ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %98.00, %97.53 ve %96.89 elde edilmiştir. Bu çok yüksek regresyon yüzdelerine göre oluşturulan model kabul edilebilir. Tüm parametrelerin P değerleri 0.05'ten küçük olduğu için bu parametreler ile RI sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. RI üzerinde bağlayıcı dozajı %10.43, uçucu kül %1.62, katkı %0.30, su/bağlayıcı oranı %3.49, likitlik indisi %79.36, kür süresi %2.26 ve hücre basıncı %0.53 oranında etkili olmaktadır. Oluşturulan modelin hata payı %2 olmuştur (Tablo 4.92).

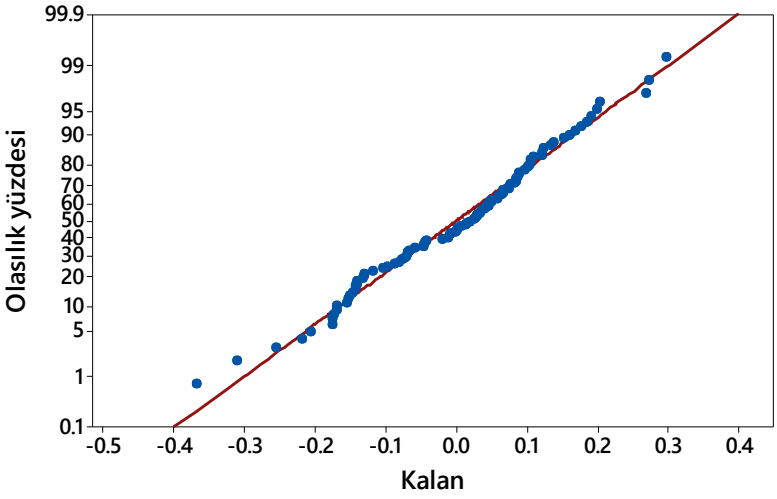
Tablo 4.92. RI için elde edilen ANOVA sonuçları (Büyük ölçekli DKK)

Kaynak	Df	Seq SS	Katkı yüzdesi	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
D	3	8.2871	10.43%	8.2871	2.7624	133.86	0.000
UKO	3	1.2908	1.62%	1.2908	0.4303	20.85	0.000
K	3	0.2404	0.30%	0.2404	0.0801	3.88	0.012
s/b	3	2.7725	3.49%	2.7725	0.9242	44.78	0.000
I_L	3	63.0759	79.36%	63.0759	21.0253	1018.87	0.000
t	1	1.7974	2.26%	1.7974	1.7974	87.1	0.000
σ_3	2	0.4232	0.53%	0.4232	0.2116	10.25	0.000
Hata	77	1.589	2.00%	1.589	0.0206		
Toplam	95	79.4762	100.00%				

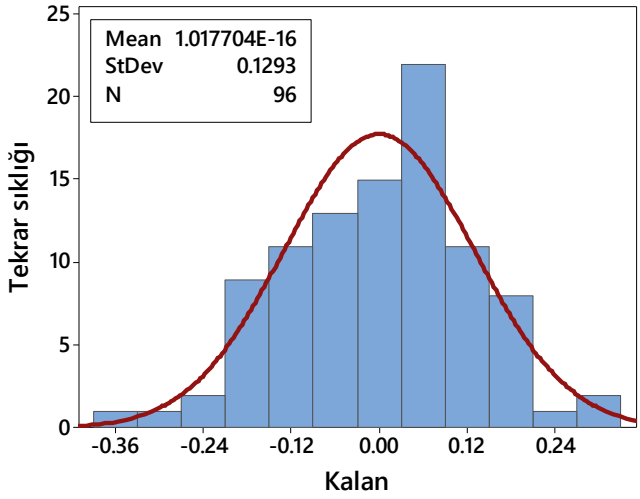
RI sonuçları ile araştırılan parametreler arasındaki regresyon denklemi Denklem 4.41'de verilmiştir. Regresyon modelinin uyumluluğunu belirlemek için modeldeki hataların normal olasık ve histogram grafikleri sırasıyla Şekil 4.115 ve Şekil 4.116'da verilmiştir. Normal olasılık grafiğinde verilerin büyük çoğunluğu düz bir çizgi üzerinde bulunmakta, histogram grafiğinde de hataların normal dağılıma çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle oluşturulan modelin geçerliliği yüksektir.

$$\ln(RI) = 8.8872 + \begin{bmatrix} -0.4486 \\ -0.0478 \\ +0.1518 \\ +0.3446 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0392 \\ +0.1254 \\ +0.0849 \\ -0.1712 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} UKO_1 \\ UKO_2 \\ UKO_3 \\ UKO_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0132 \\ +0.0087 \\ +0.0721 \\ -0.0676 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix}$$
$$+ \begin{bmatrix} +0.1759 \\ +0.1519 \\ -0.1017 \\ -0.2261 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} s/b_1 \\ s/b_2 \\ s/b_3 \\ s/b_4 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.9049 \\ -0.4431 \\ +0.0806 \\ +1.2674 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \\ I_{L,4} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1368 \\ +0.1368 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0900 \\ +0.0218 \\ +0.0682 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} \sigma_{3,1} \\ \sigma_{3,2} \\ \sigma_{3,3} \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri, alt indisler ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Denklem kullanılırken ilgili parametrenin seviyesine uygun olan katsayı ile matematiksel işlem yapılmalıdır.



Şekil 4.115. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların normal olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK)



Şekil 4.116. RI sonuçları için geliştirilen modeldeki hataların histogram grafiği (Büyük ölçekli DKK)

ANOVA analizinden elde edilen Denklem 4.41 parametrelerin seviyesine bağlı olmakta ve daha çok bu çalışmaya özel kalmaktadır. Daha genel bir denklem lineer regresyon analiziyle elde edilebilir. Lineer regresyon analizine göre, R-kare, R-kare (düzeltilmiş) ve R-kare (tahmini) değerleri sırasıyla %93.28, %92.75 ve %91.97 elde edilmiştir (Denklem 4.42).

$$(-RI)^{-0.355468} = -0.09578 + 0.000047 \cdot D - 0.000009 \cdot UKO + 0.000139 \cdot K - 0.00623 \cdot (s/b) + 0.05075 \cdot I_L + 0.000154 \cdot t + 0.000007 \cdot \sigma_3 \quad (4.42)$$

burada, D, UKO, K, s/b, I_L, t ve σ_3 parametreleri göstermektedir.

4.6 DKK Tasarımlarının Mineralojik ve Morfolojik Yapısı

DKK tasarımlarında enjeksiyon malzemesi içerinde çimento ve uçucu kül bulunmaktadır. Çimento, uçucu kül ve yüksek plastisiteli killi zemin arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda zemin-enjeksiyon karışımlarının hem mikro ölçekteki görüntüsü hem de mineralojik bileşimi değişmektedir (Collins, 1984; Terrei vd., 1984; Push, 1979; Mitchell, 1993; Türköz, 2009). Çimento, uçucu kül ve killi zemin arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir. Buna göre çimentodan gelen C_3S, C_2S, C_3A ve C_4AF bileşikleri ortamdaki suyla ve/veya kalsiyum sülfatla (alçı taşı, $CaSO_4$) birleşerek C-S-H (tobermorit) jeli, portlandit (C-H) ve etrenjit oluşmaktadır. Çimentonun hidratlanması sonucu ortamın pH değeri yükselerek, $Ca(OH)_2$ içerisindeki Ca^{++} çözülerek kil minerallerinin topaklanmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan portlandit, zemin veya uçucu külden gelen Al_2O_3 veya SiO_2 ile tepkimeye girerek yeni C-S-H jelleri ve/veya C-A-H jelleri ortaya çıkmaktadır (Diamond ve Kinter, 1965; Bergado vd., 1996; Porbaha vd., 2000).

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (4.43)$$

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow \underbrace{C_3S_2H_3}_{\text{(Tobermorit jeli)}} + \underbrace{Ca(OH)_2}_{\text{(Portlandit)}} \quad (4.44)$$

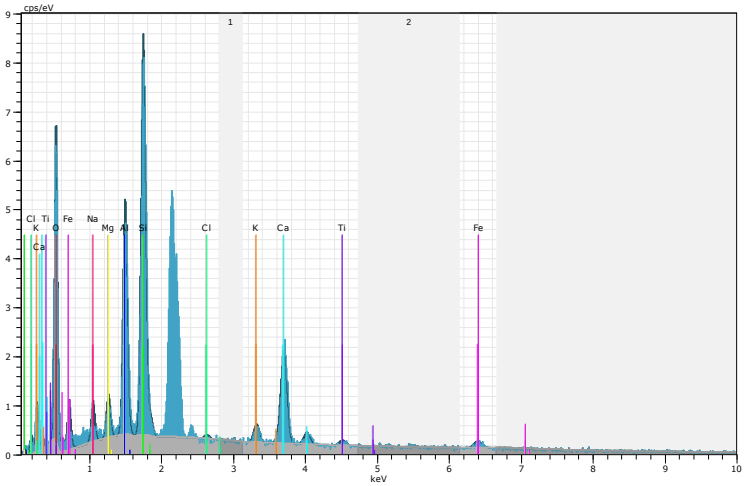
$$C_3A + CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow \underbrace{C_3A.3CaSO_4.32H_2O}_{\text{(Etrenjit)}} \quad (4.45)$$

$$C_4AF + CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow C_3(AF).3CaSO_4.32H_2O \quad (4.46)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \text{ veya } SiO_2 \rightarrow \begin{matrix} 4CaO.Al_2O_3.13H_2O \\ 2CaO.SiO_2.\ Al_2O_3.8H_2O \\ 3CaO.Al_2O_3.CaCO_3.11H_2O \\ CaO.SiO_2.nH_2O \\ \text{(C-S-H, C-A-H)} \end{matrix} \quad (4.47)$$

Zemin-enjeksiyon karışımlarının mineralojik ve morfolojik yapısındaki değişiklikler bağlayıcı türü, bağlayıcı dozajı, karışımdaki su miktarı ve kür süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle DKK tasarımlarından seçilen bazı numunelerin SEM görüntüleri alınmış ve EDX alan analizleri yapılmıştır. Bu analizler hem küçük hem de büyük ölçekli DKK tasarımlarında, 28 ve 56 gün kür süreleri için performansın en düşük (tasarım 4) ve en büyük (tasarım 14) olduğu tasarımlar ile optimum tasarım üzerinde yapılmıştır. Bu analizler ayrıca yüksek plastisiteli killi zemin, çimento ve uçucu kül için de yapılmıştır.

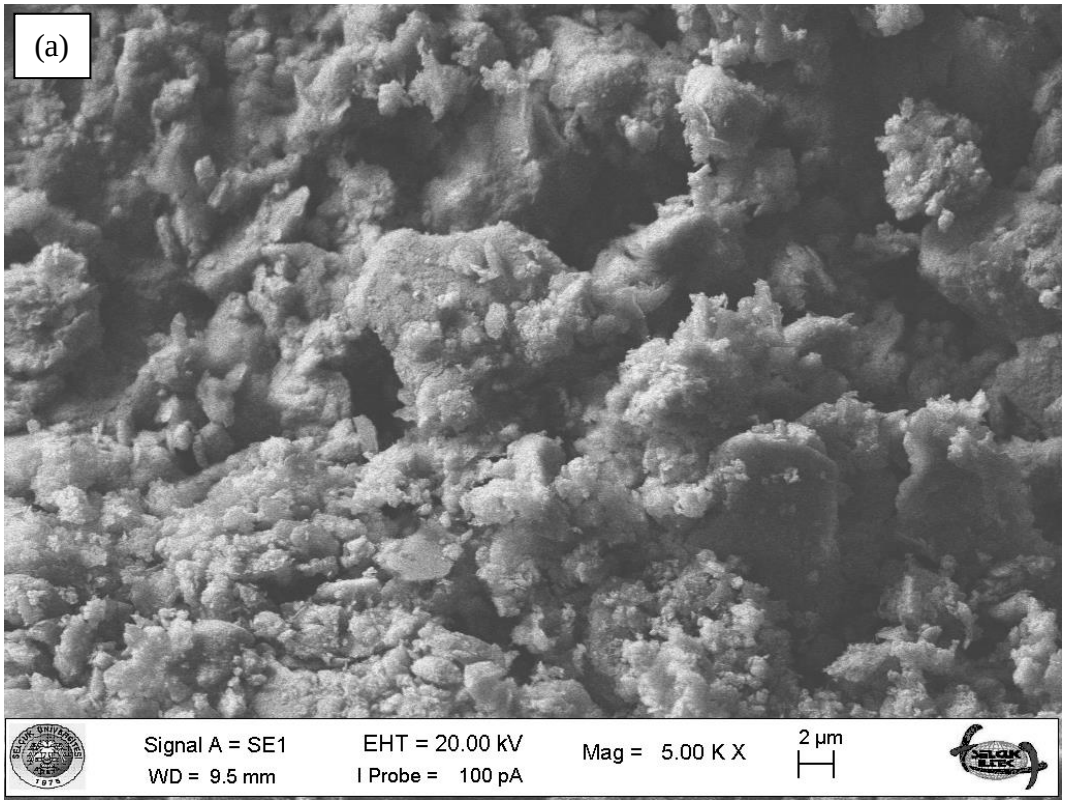
Zemin içerisinde puzzolanik reaksiyonlara katılabilecek oksijen (%83.71), kalsiyum (%2.98), silikon (%5.8) ve alüminyum (%4.11) elementlerinin yüzdeleri EDX alan analizi ile belirlenmiştir (Şekil 4.117 ve Tablo 4.93). Yüksek plastisiteli kile ait SEM görüntüleri incelendiğinde kil minerallerine ait tabakalı yapı, diğer formlardaki zemin tanecikleri ve boşluklar görülmektedir (Şekil 4.118).

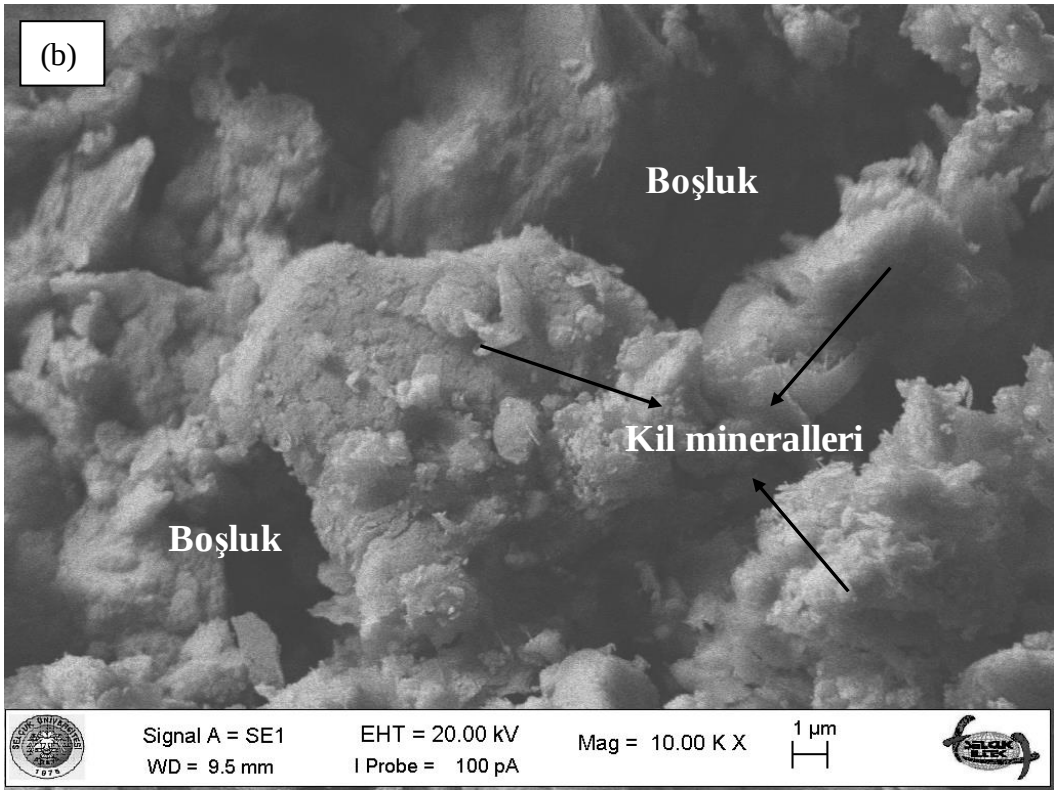


Şekil 4.118. Yüksek plastisiteli kile ait EDX analiz sonucu

Tablo 4.93. Killi zemin ve uçucu külün element bileşimleri (EDX analizi sonucu)

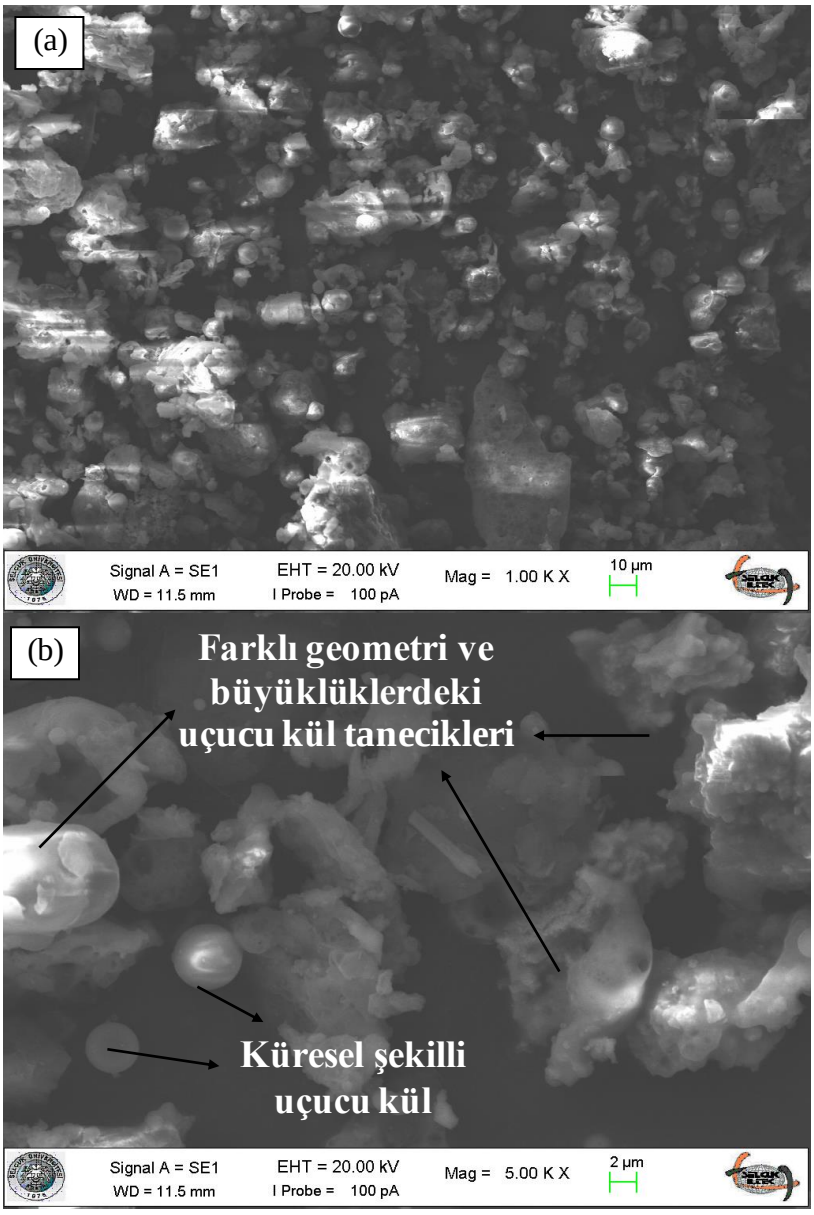
Elementler	Kil	Uçucu kül
Oksijen	83.71	47.64
Kalsiyum	2.98	2.75
Silikon	5.80	21.77
Aluminyum	4.11	10.94
Demir	0.42	7.17
Magnezyum	0.91	2.61
Potasyum	0.49	2.33
Klorin	0.08	-
Titanyum	0.24	0.50
Sodyum	1.27	0.94
Karbon	-	2.31
Sülfür	-	1.04



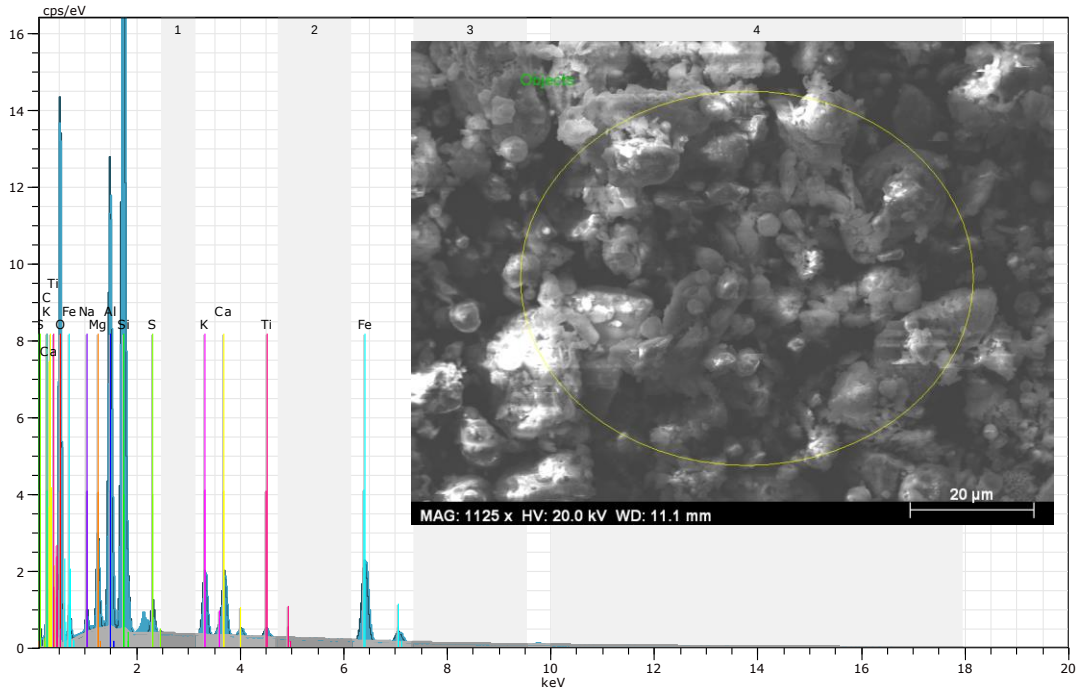


Şekil 4.117. Yüksek plastisiteli kile ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000

Uçucu küle ait SEM görüntüleri incelendiğinde farklı geometrilere ve büyüklüklere sahip taneciklerin mevcut olduğu görülmektedir (Şekil 4.119). Özellikle 10 µm çapından küçük taneciklerin küresel şekilli oldukları, bu boyuttan büyük taneciklerin ise farklı geometrilere sahip oldukları görülmektedir. Benzer sonuç Türker vd. (2009) tarafından da belirtilmiştir. Yapılan EDX analizi sonucunda uçucu kül içerisinde %47.64 oksijen, %2.75 kalsiyum, %21.77 silikon, %10.94 aluminyum ve %1.04 sülfür bulunmaktadır (Şekil 4.120 ve Tablo 4.93). SiO_2 ve Al_2O_3 miktarları sırasıyla %54.49 ve %20.58 olmaktadır. Uçucu kül alüminyum ve silikon bakımından zengin görünmektedir. Uçucu külün element bileşimine göre, kil-uçucu kül-çimento arasında C-S-H, CH, C-A-H ve etrenjit bileşiklerinin oluşma ihtimali bulunmaktadır.

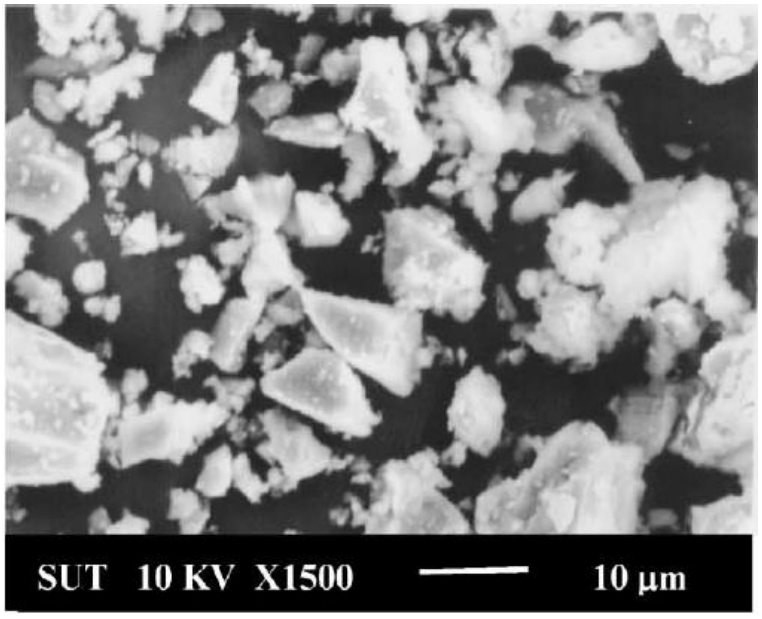


Şekil 4.119. Uçucu küle ait SEM görüntüleri: a) x1000, b) x5000

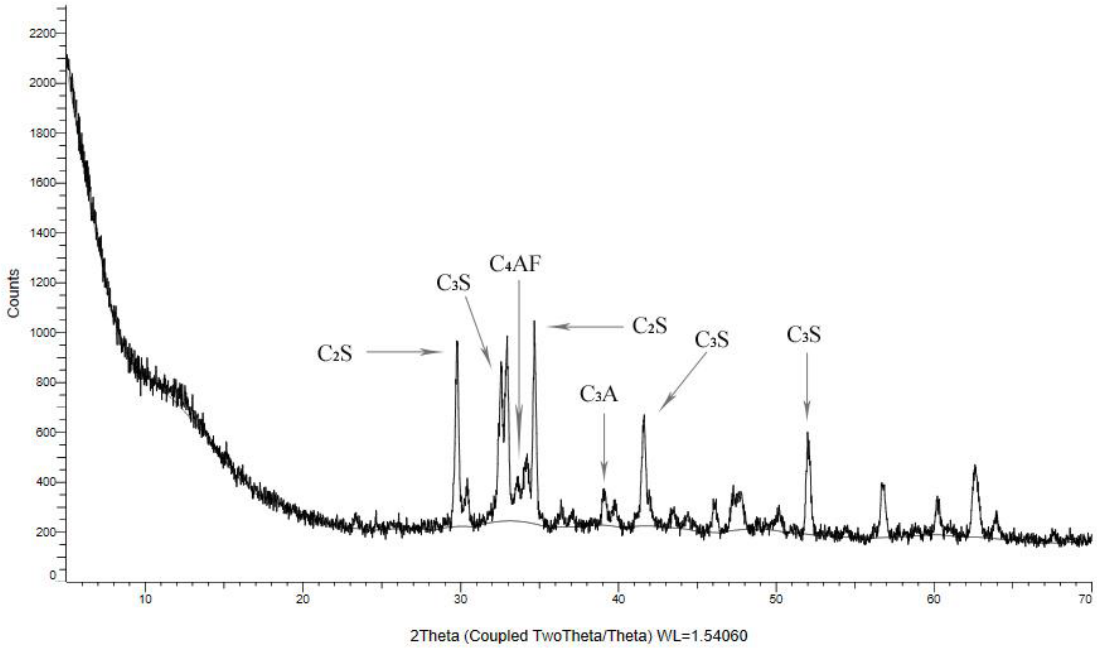


Şekil 4.120. Uçucu küle ait EDX analiz sonucu

CEM 1 42.5 R çimentosuna ait SEM görüntüsü Şekil 4.121'de verilmiştir. XRD analiz sonuçlarına bakıldığında çimento içerisinde C_2S, C_3S, C_3A ve C_4AF bileşikleri bulunmaktadır (Şekil 4.122).



Şekil 4.121. CEM 1 42.5 R çimentosunun SEM görüntüsü



Şekil 4.122. CEM 1 42.5 R çimentosunun XRD analizi sonucu

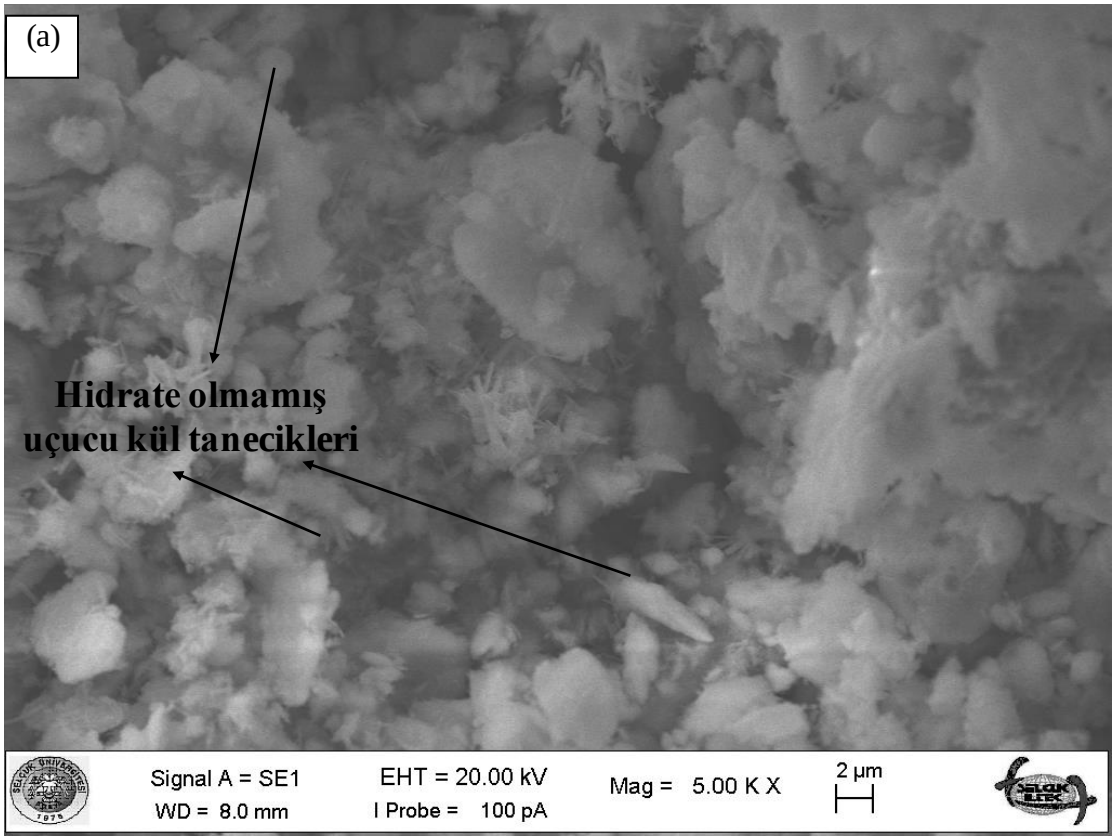
4.6.1 Küçük ölçekli DKK

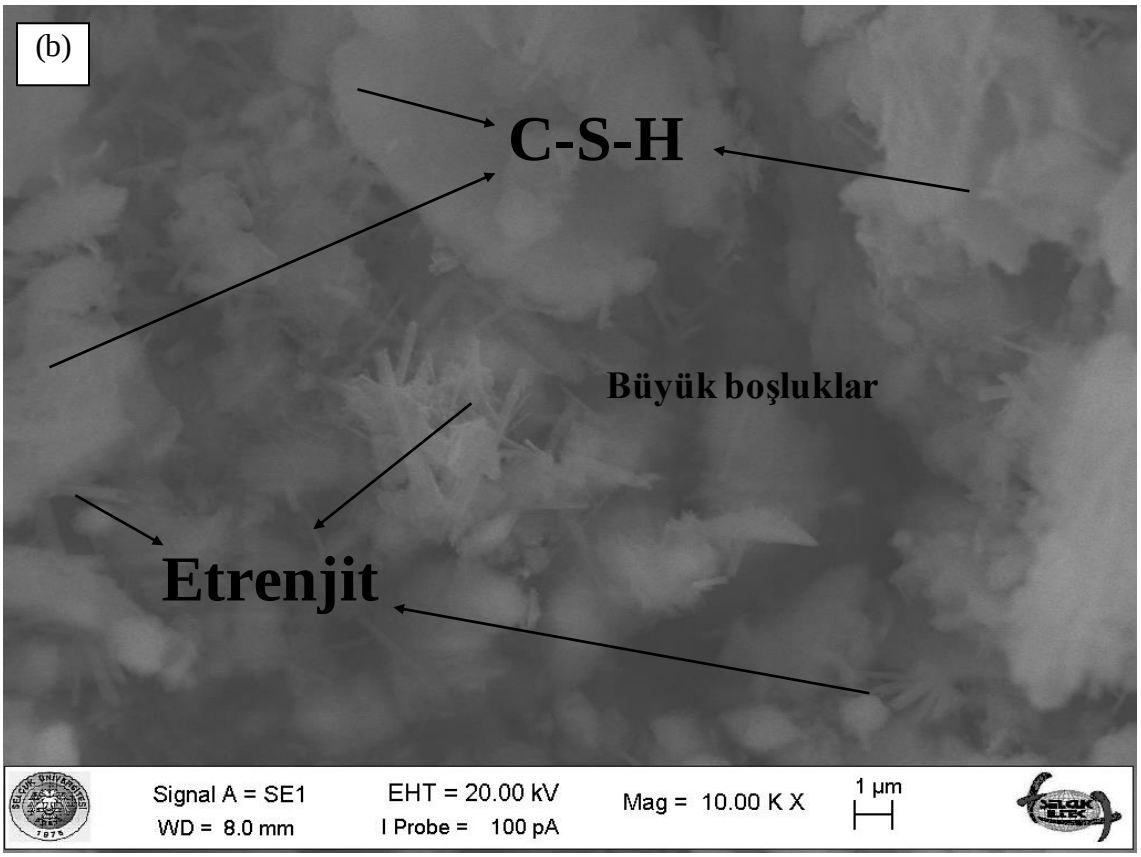
Küçük ölçekli DKK tasarımında, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda performansın en kötü olduğu tasarım 4 numaralı tasarım olmuştur. Bu tasarımdaki imalat parametreleri; D=200 kg/m^3, UKO=%60, K=%5, s/b=1.4 ve I_L=1'dir. 28 gün sonunda DKK'nın serbest basınç dayanımı (q_u) 613.1 kPa, üç eksenli basınç dayanımı (q_{uu}) 596.8 kPa, sıkışma indisi (Cc) 0.457 ve permeabilite katsayısı (k) 1.346x10^{-9} m/s olarak bulunmuştur. 56 gün sonunda q_u=864.9 kPa, q_{uu}=688.2 kPa, Cc=0.266 ve k=1.149x10^{-9} m/s olarak bulunmuştur. 4 numaralı tasarımda performansın en düşük olmasının nedenleri; karışımdaki bağlayıcı dozajının az, uçucu kül ve su miktarlarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. İmalat parametrelerindeki bu durum DKK numunelerinin mineralojik ve morfolojik yapısına da yansımıştır. 4 numaralı tasarıma ait 28 ve 56 günlük SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.123 ve Şekil 4.124'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde numune yapısında kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu görülmektedir.

Etrenjit morfolojisi, su/bağlayıcı oranına, oluştuğu boşluk boyutuna ve yapısına, sülfat konsantrasyonuna, oluşum zamanına, ortam sıcaklığı ve nem durumuna bağlıdır (Tosun, 2007). DKK numunelerinde oluşan etrenjit, kil-çimento-uçucu kül arasında gerçekleşen hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşmuştur. Etrenjit oluşumu zemin-bağlayıcı karışımı prizini almadan önce ve herhangi bir dış etki olmadan oluştuğu için sertleşmiş DKK numunelerine bir zararı yoktur (Tosun, 2007; Demiral, 2017). Fakat DKK sülfatlı su ile temas

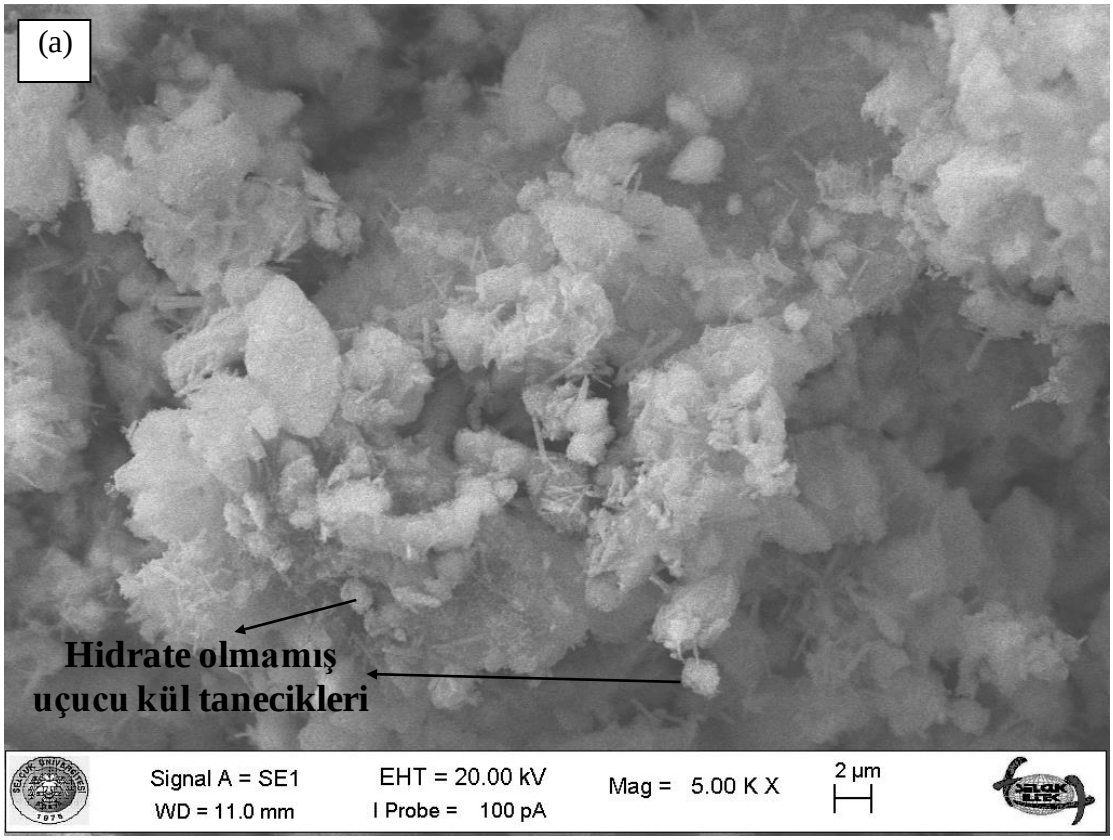
ederse, sülfat iyonları DKK içerisine nüfuz ederek yeni etrenjit minerallerinin oluşumuna neden olur. Bu durumda kolon hacmi artarak kolonda bozulmalara ve çatlamalara neden olabilmektedir.

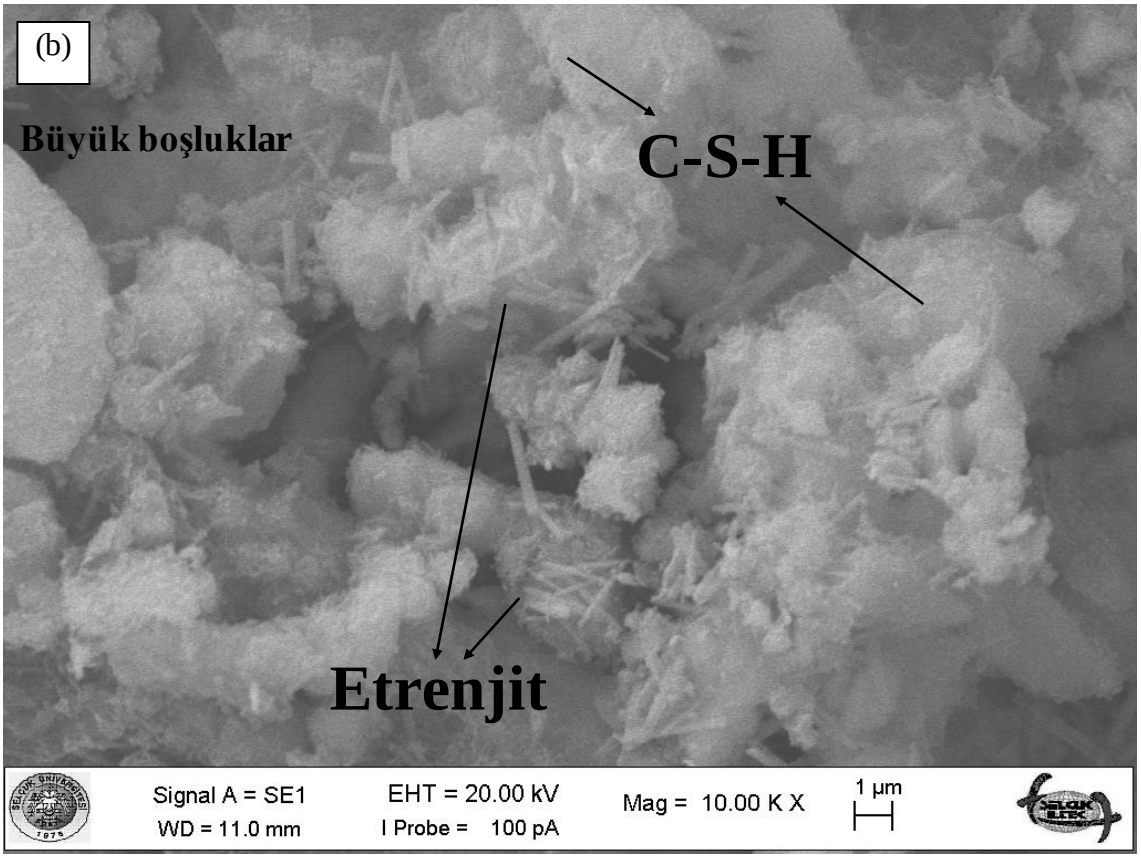
C-S-H jelleri DKK performansı üzerindeki en önemli bileşiktir. Oluşan C-S-H yoğunluğu ve DKK'nın mikro yapısındaki boşluklar DKK'nın dayanımını, konsolidasyon davranışını ve geçirimlilik özelliğini etkilemektedir. 28 ve 56 günlük SEM görüntülerinde C-S-H jel yoğunluğu fazla değildir ve katı kütleler arasında büyük boşlukların varlığı görülmektedir (Şekil 4.123 ve Şekil 4.124). 4 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı az olduğu için C-S-H jel yoğunluğu da az olmuştur. Karışımdaki uçucu kül oranı çok fazla (%60) olduğundan ve buna karşılık çimento miktarı azaldığından (%40) dolayı tüm uçucu kül taneleri çimento veya zeminle reaksiyona girememiştir. Reaksiyona girmeyen uçucu kül taneleri belki zemin tanesi gibi davranarak boşlukların bir kısmını doldurabilir fakat dayanıma herhengi bir etkisi yoktur. Karışım içerisindeki su miktarı fazla olduğu için (s/b=1.4, I_L=1, $I_{L,mix}$=1.57) ortamda hidratasyon reaksiyonları için gerek duyulandan çok fazla su bulunmaktadır. Bu nedenle oluşan hidratasyon ürünleri su içerisinde yüzebilmekte, tüm taneler birbiriyle bağ kuramamakta ve boşluklu bir yapı meydana gelmektedir. Bunun sonucunda dayanım düşük olurken, sıkışma indisi ve permemabilite katsayısı yüksek olmaktadır. 56 günlük SEM görüntüsünde 28 güne göre daha fazla C-S-H jel oluşumu vardır ve zamanla hidratasyon reaksiyonlarının devam ettiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.123 ve Şekil 4.124). Bunun sonucunda dayanım artmış, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı azalmıştır. Mallela vd. (2004) dayanımdaki artışın, kil mineralojisine ve ortamdaki silika, alümin ve karbonat miktarlarına bağlı olduğunu ifade etmiştir.





Şekil 4.123. Tasarım 4'e ait SEM görüntüsü: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)





Şekil 4.124. Tasarım 4'e ait SEM görüntüsü: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

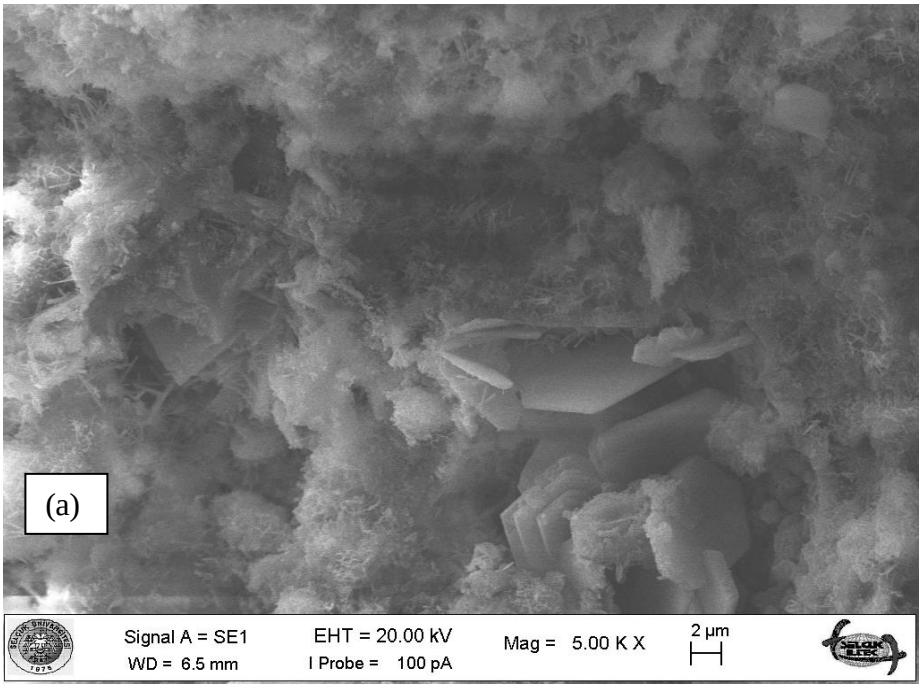
Küçük ölçekli DKK tasarımında, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda performansın en iyi olduğu tasarım 14 numaralı tasarım olmuştur. Bu tasarımdaki imalat parametreleri; D=425 kg/m^3, UKO=%20, K=%3, s/b=0.8 ve I_L=1'dir. 28 gün sonunda DKK'nın serbest basınç dayanımı (q_u) 5757.5 kPa, üç eksenli basınç dayanımı (q_{uu}) 5231.4 kPa, sıkışma indisi (Cc) 0.04 ve permeabilite katsayısı (k) $5.231x10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 56 gün sonunda q_u=6363.5 kPa, q_{uu}=6760.9 kPa, Cc=0.045 ve k=$2.495x10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 14 numaralı tasarımda performansın en yüksek olmasının nedenleri; karışımdaki bağlayıcı dozajının fazla, uçucu kül miktarının yeterli ve su miktarının az olmasından kaynaklanmaktadır. İmalat parametrelerindeki bu durum DKK numunelerinin mineralojik ve morfolojik yapısına da yansımıştır. 14 numaralı tasarıma ait 28 ve 56 günlük SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.125 ve Şekil 4.126'da verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde numune yapısında kalsiyum silikat hidrat jelleri (C-S-H), portlandit (CH) plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu görülmektedir. Sha vd. (2018) %15 uçucu kül kullanıldığında numune yapısındaki mikro boşlukların azaldığını, etrenjit iğneleriyle birlikte oldukça yoğun C-S-H jeli oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

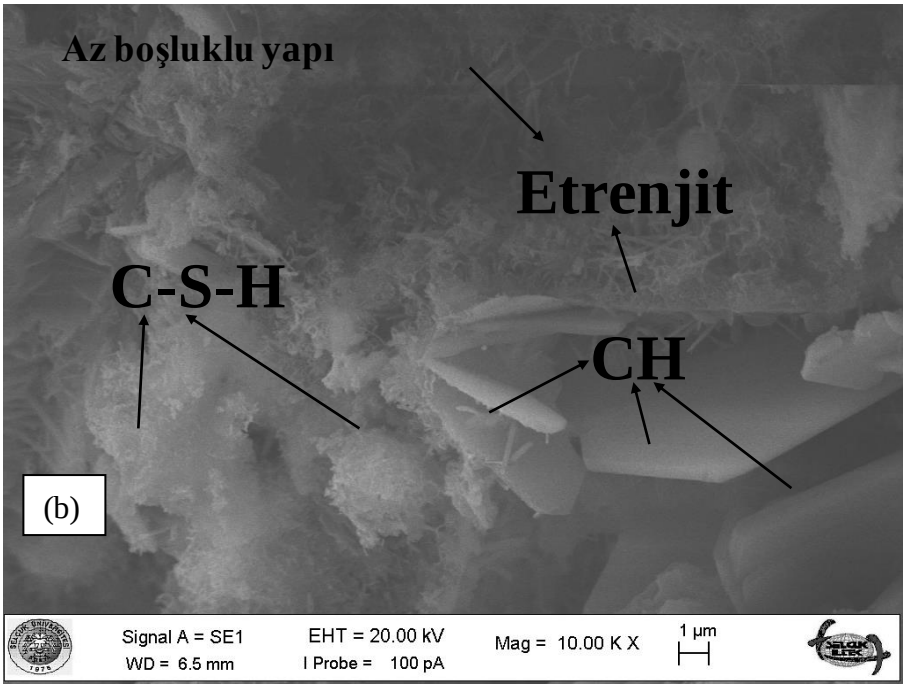
Etrenjit oluşumu zemin-bağlayıcı karışımı prizini almadan önce ve herhangi bir dış etki olmadan oluştuğu için sertleşmiş DKK numunelerine bir zararı yoktur (Tosun, 2007; Demiral, 2017).

C-S-H jelleri ve CH plakaları DKK performansı üzerindeki en önemli bileşiktir. Oluşan C-S-H ve CH yoğunlukları ve DKK'nın mikro yapısındaki boşluklar DKK'nın dayanımını, konsolidasyon davranışını ve geçirimlilik özelliğini etkilemektedir. 28 ve 56 günlük SEM görüntülerinde C-S-H jel yoğunluğu fazla olmuştur ve yer yer CH plakaları mevcuttur. DKK numunelerinin az boşluku bir yapıya sahip oldukları görülmektedir (Şekil 4.125 ve Şekil 4.126). 14 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı yüksek olduğu için C-S-H jel yoğunluğu da fazla olmuştur. Karışımdaki uçucu kül oranı normal seviyede (%20) olduğundan ve buna karşılık ortamda yeterli miktarda çimento (%80) olduğundan dolayı tüm uçucu kül taneleri çimento veya zeminle reaksiyona girmiştir. 14 numaralı tasarımdaki karışımlarda portlandit (CH) tabakalarının varlığı, ortama Al_2O_3 veya SiO_2 bileşikleri geldiğinde yeni C-S-H jellerinin oluşmasını sağlayacaktır. Yani 14 numaralı tasarım için uçucu kül miktarı artırılabilir. Optimum tasarımda uçucu kül oranının %40 elde edilmesi de bu olayı kanıtlamaktadır.

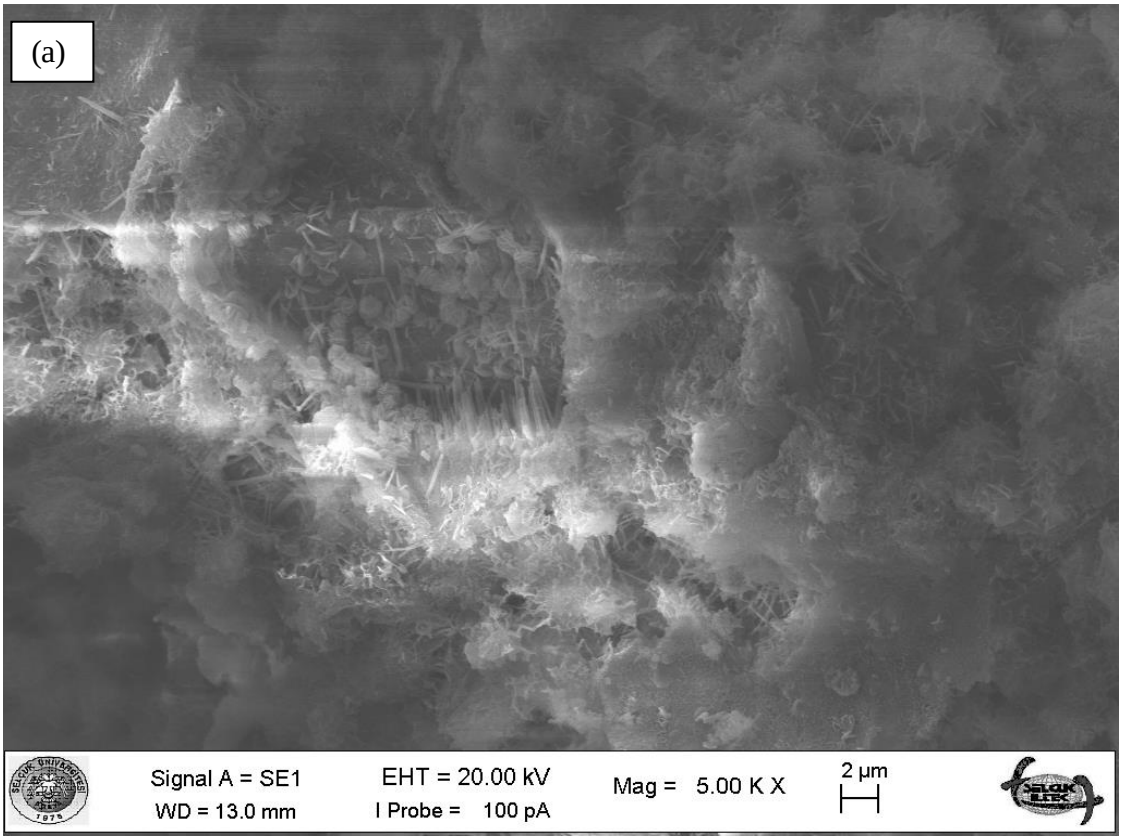
Karışım içerisindeki su miktarı yeterli seviyede olduğu için (s/b=0.8, I_L=1 ve $I_{L,mix}$=0.9) ortamdaki suyun büyük çoğunluğu hidratasyon reaksiyonları için kullanılmıştır. Bunun sonucunda az boşluklu bir yapı meydana gelmiş ve dayanım yüksek olurken, sıkışma indisi ve permemabilite katsayısı düşük olmaktadır. 56 günlük SEM görüntüsünde 28 güne göre CH plakalarının boyutu azalmış ve daha fazla C-S-H jeli oluşmuştur. Zamanla CH plakalarının uçucu kül ile tepkimeye girdiği ve hidratasyon reaksiyonlarının devam ettiği

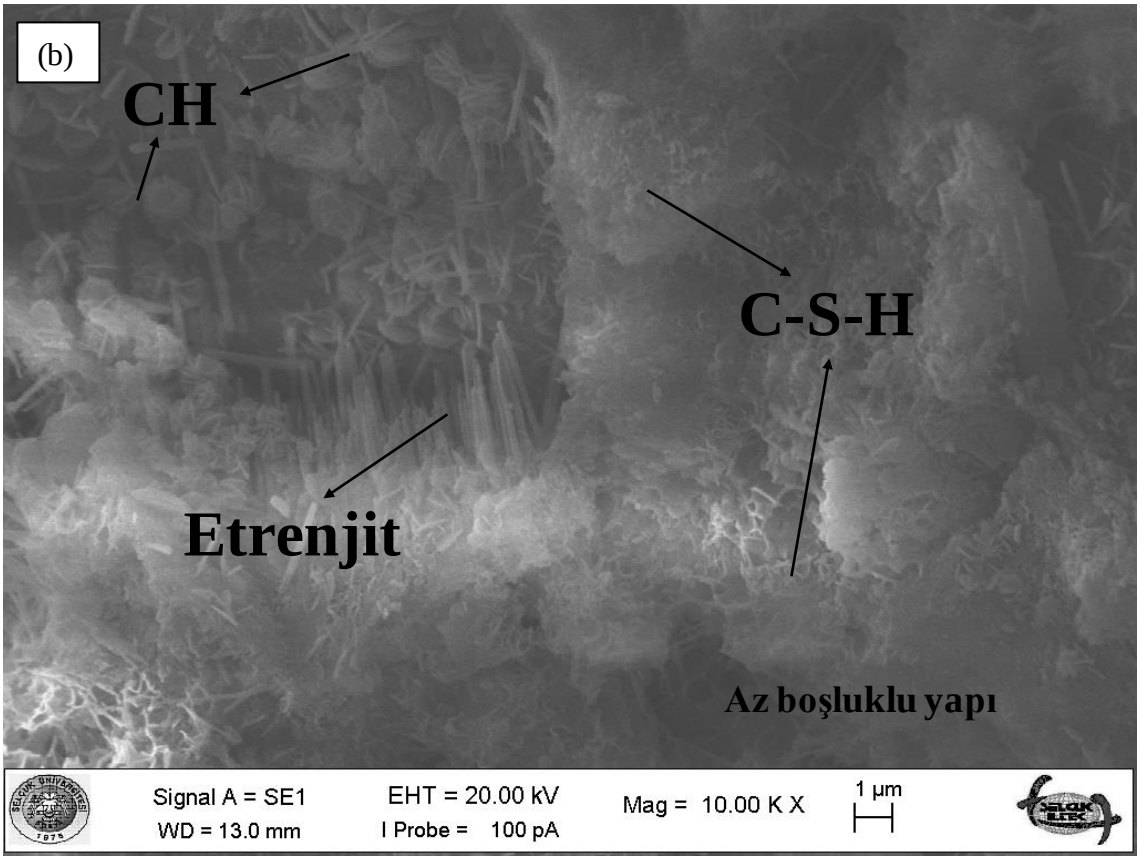
görülmektedir (Şekil 4.125 ve Şekil 4.126). Bunun sonucunda dayanım artmış, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı azalmıştır. Tabet (2015) SEM görüntülerinde zamanla hidratasyon ürünlerinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca 1 gün kür edilmiş numunelerde etrenjit oluşumuna rastlamazken, 7 ve 28 gün kür edilmiş numunelerde etrenjit oluşumunu gözlemlemiştir.





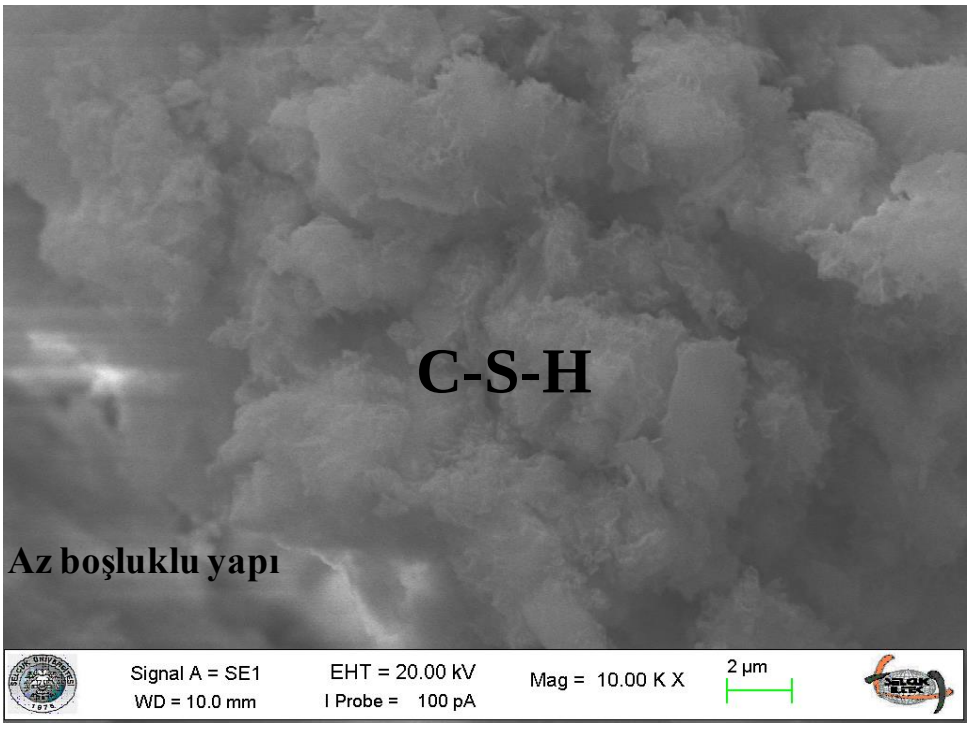
Şekil 4.125. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)



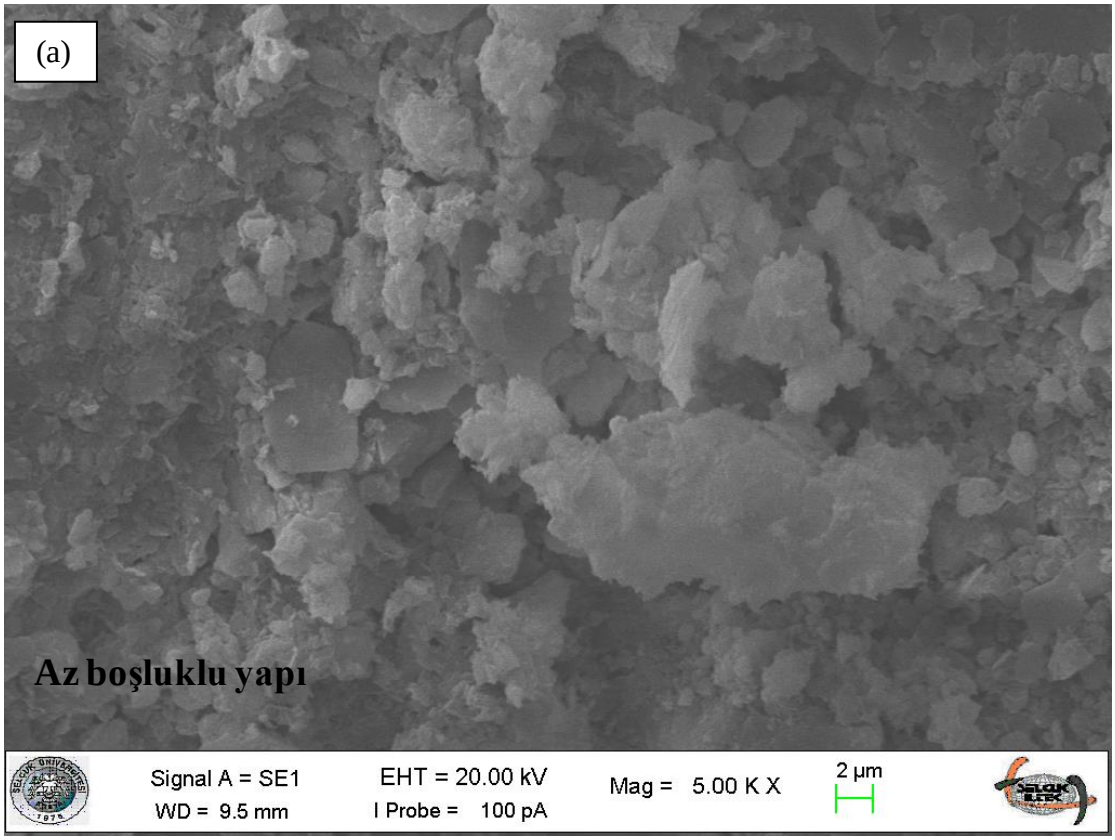


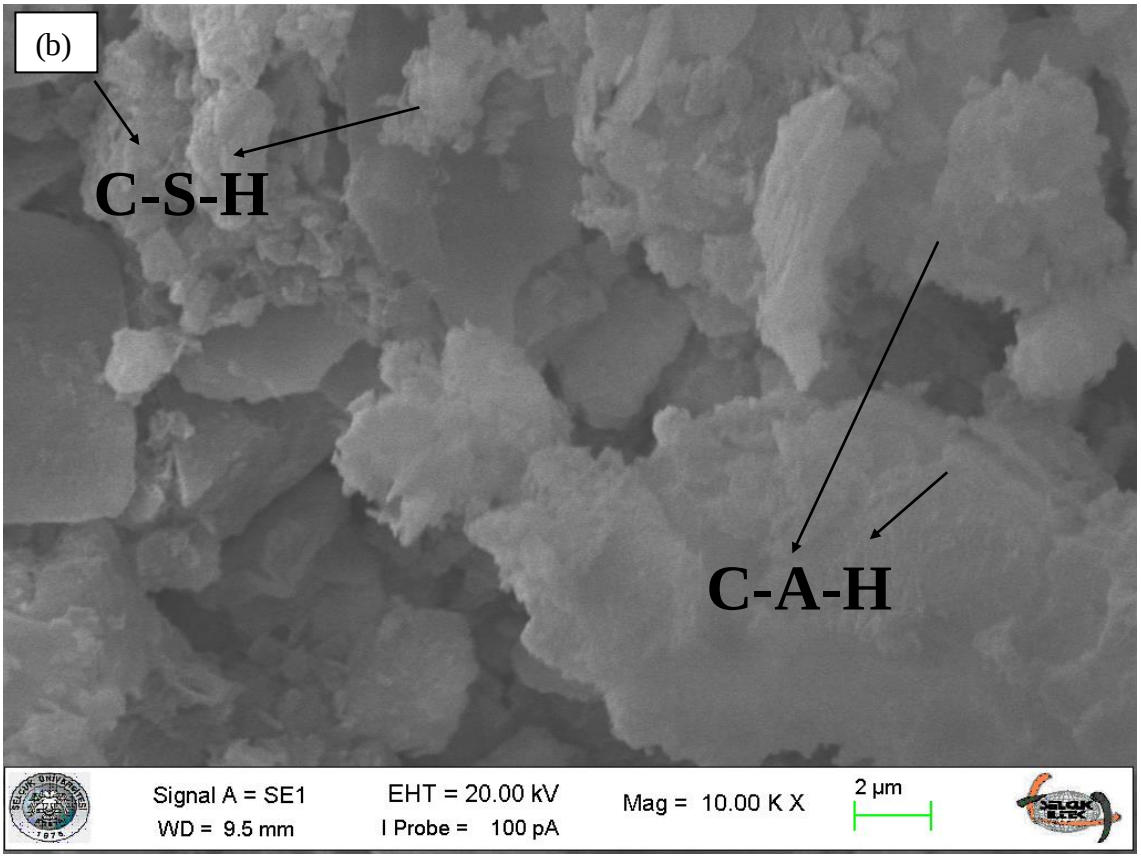
Şekil 4.126. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

Küçük ölçekli optimum DKK tasarımındaki imalat parametreleri; D=425 kg/m^3, UKO=%40, K=%3, s/b=0.8 ve I_L=1'dir. 28 gün sonunda DKK'nın serbest basınç dayanımı (q_u) 4752.5 kPa, üç eksenli basınç dayanımı (q_{uu}) 5614.8 kPa, sıkışma indisi (Cc) 0.048 ve permeabilite katsayısı (k) 2.170x10^{-11} m/s olarak bulunmuştur. 56 gün sonunda q_u=6615 kPa, q_{uu}=6673 kPa, Cc=0.026 ve k=0.456x10^{-11} m/s olarak bulunmuştur. Optimum imalat parametrelerinin kullanılması sonucunda optimum tasarımın performans değerleri 14 numaralı tasarımdan daha iyi elde edilmiştir. İmalat parametrelerindeki bu durum DKK numunelerinin mineralojik ve morfolojik yapısına da yansımıştır. Optimum tasarıma ait 28 ve 56 günlük SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.127 ve Şekil 4.128'de verilmiştir. 28 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde numune yapısında oldukça yoğun kalsiyum silikat hidrat jellerinin (C-S-H) oluştuğu ve az boşluklu bir yapının ortaya çıktığı görülmektedir. 56 günlük SEM görüntülerinde oldukça yoğun C-S-H ve C-A-H jellerinin oluştuğu ve az boşluklu bir yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Optimum tasarıma ait SEM görüntülerinde etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır. Optimum tasarımda portlandit (CH) plakalarının oluşmaması da ortamda optimum miktarda uçucu külün olduğunu ve tüm kalsiyum hidroksit bileşiklerinin (CH) Al_2O_3 veya SiO_2 ile tepkimeye girerek C-S-H ve C-A-H jellerini oluşturduğunu göstermektedir. Bu nedenle dayanım, sıkışma ve geçirimlilik yönünden yüksek performanslı DKK imalatı yapılmıştır.



Şekil 4.127. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)



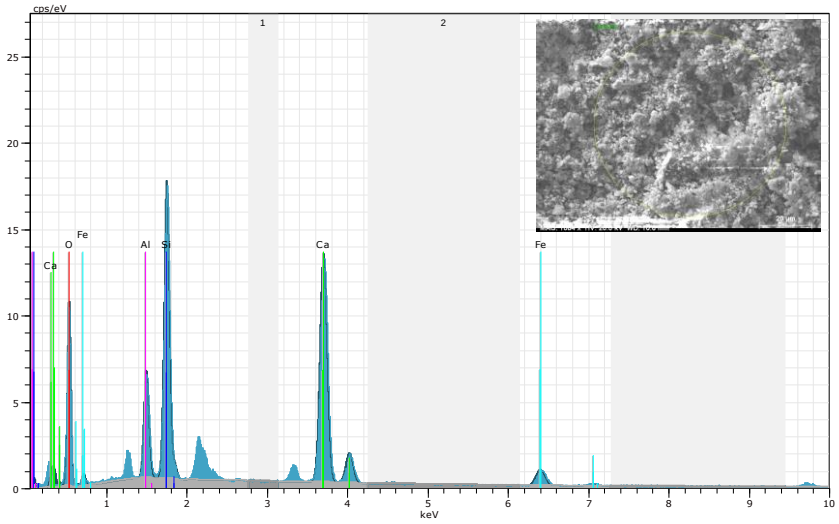


Şekil 4.128. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

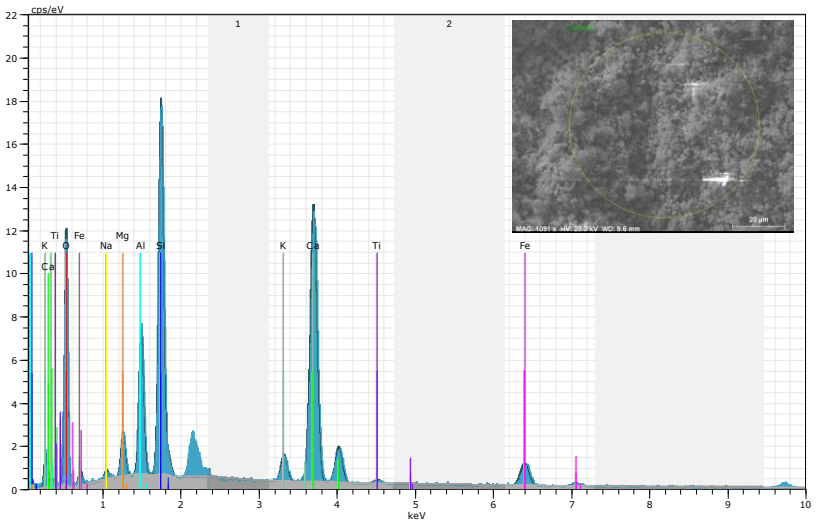
Küçük ölçekli DKK tasarımlarının SEM görüntüleri alınırken, zemin-bağlayıcı numunelerinin içerisinde bulunan elementlerin kütlece yüzdeleri de belirlenmiştir (Tablo 4.94, Şekil 4.129-Şekil 4.134). Analiz yapılan numunelerde %85-90 oranında oksijen, kalsiyum ve silikon bulunmaktadır. Bunların haricinde az miktarlarda alüminyum, demir, magnezyum, potasyum, klorin, titanyum ve sodyum bulunmaktadır. Numunelerin içerisinde kalsiyum, silisyum ve alüminyum elementlerinin bulunması hidratasyon ürünlerinin oluştuğunu göstermektedir. 4 ve 14 numaralı tasarımlar ile optimum tasarım içerisinde çimento, uçucu kül, katkı, su ve zemin farklı oranlarda bulunmaktadır. Tüm tasarımlarda aynı maddelerin karışımı sonucunda ortamda bulunan elementler de aynı olmuştur. DKK numunelerinin imalatında kullanılan maddeler farklı oranlarda karıştırılsa bile ortaya çıkan elementlerin yüzdeleri birbirine çok yakın olmuştur (Tablo 4.94). Bu nedenle EDX alan analizi sonuçları kullanılarak DKK tasarımlarındaki zemin-enjeksiyon karışımlarının performansı hakkında yorum yapmak mümkün olmamıştır. Burada önemli olan element yüzdelerinden ziyade bu elementlerin birleşimi sonucu ortaya çıkan hidratasyon ürünleridir. Bunları belirleyebilmek için XRD veya XRF analizlerinin yapılması gerekmektedir. Proje kapsamında bu analizler yapılmamıştır.

Tablo 4.94. Küçük ölçekli DKK numunelerindeki elementlerin kütlece yüzdeleri

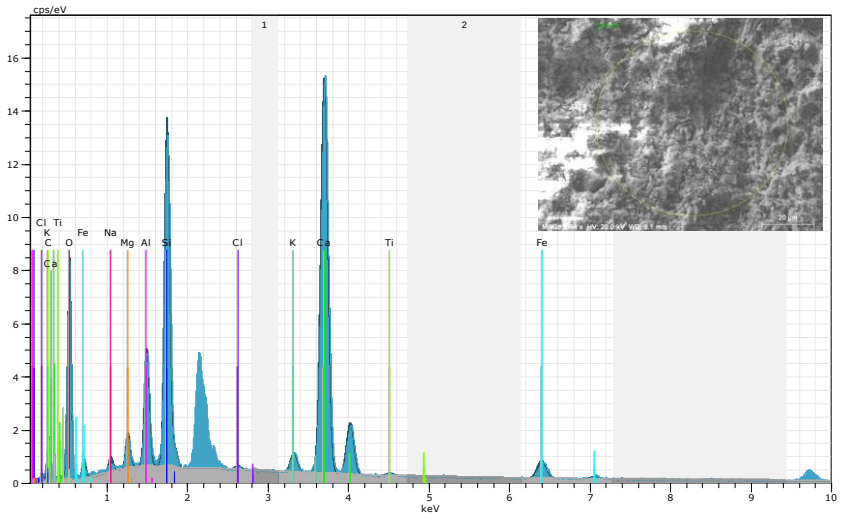
Elementler	TA-4 (28 gün)	TA-4 (56 gün)	TA-14 (28 gün)	TA-14 (56 gün)	Optimum tasarım (28 gün)	Optimum tasarım (56 gün)
Oksijen	52.55	57.11	55.43	56.00	53.83	55.55
Kalsiyum	19.83	19.72	22.47	23.06	22.85	19.93
Silikon	12.02	10.37	8.82	9.55	8.94	10.20
Demir	3.20	3.68	2.55	2.62	2.72	2.67
Aluminyum	5.15	4.82	3.59	4.34	4.70	3.99
Magnezyum	1.86	1.73	1.28	1.73	1.52	1.41
Potasyum	1.37	1.55	0.85	0.94	0.97	1.35
Klorin	0.17	-	0.14	0.25	0.17	0.08
Titanyum	0.35	0.42	0.25	0.31	0.22	0.99
Sodyum	0.65	0.60	0.83	1.20	0.89	1.09
Karbon	2.85	-	3.78	-	3.19	2.77



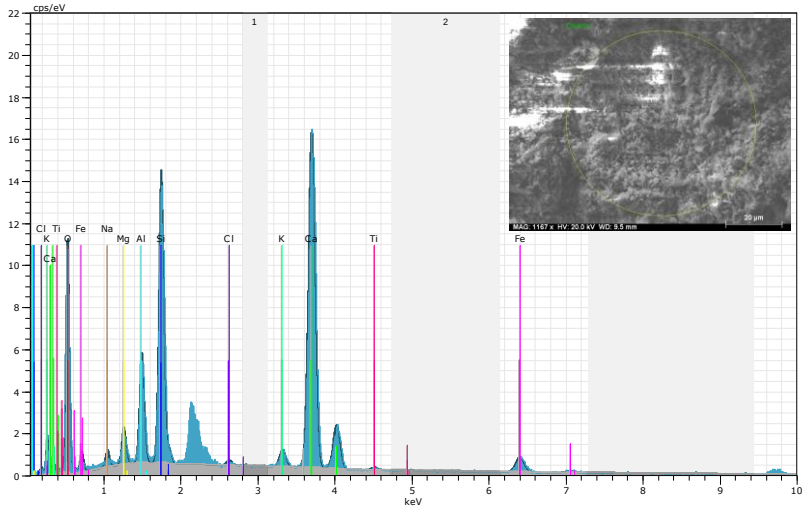
Şekil 4.129. Tasarım 4'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)



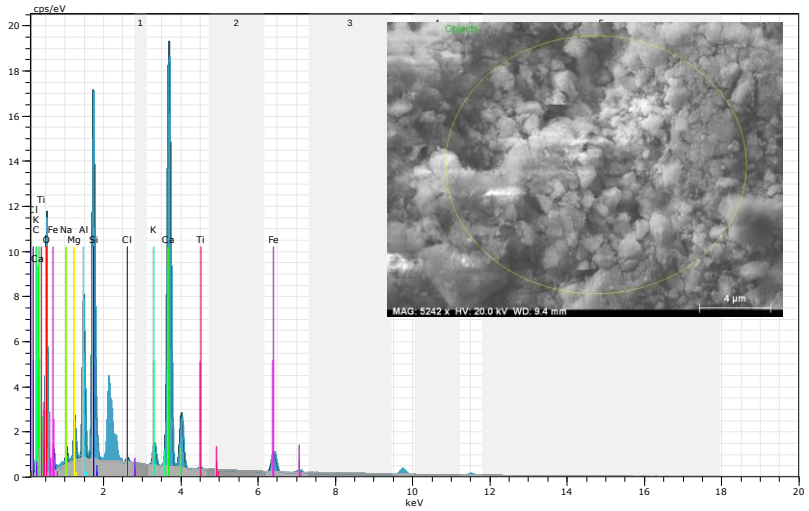
Şekil 4.130. Tasarım 4'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)



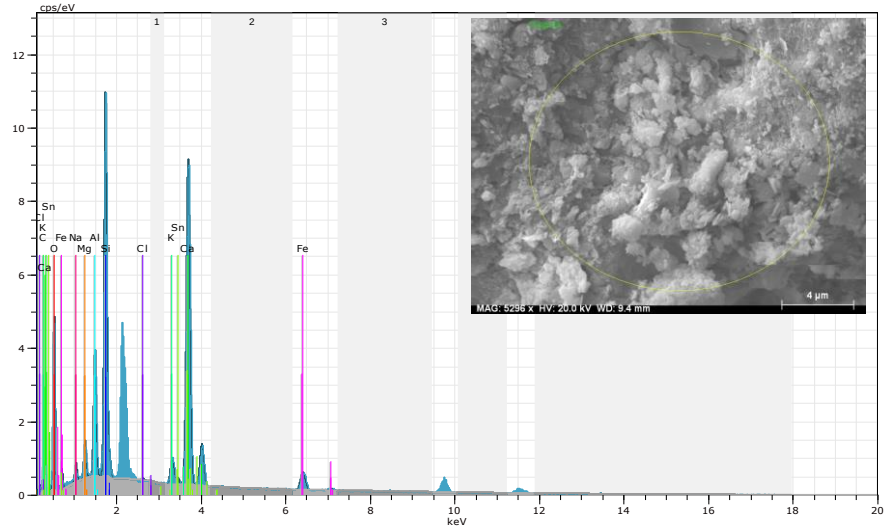
Şekil 4.131. Tasarım 14'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)



Şekil 4.132. Tasarım 14'e ait EDX analizi sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)



Şekil 4.133. Optimum tasarıma ait EDX sonucu (Küçük ölçekli DKK, 28 gün)



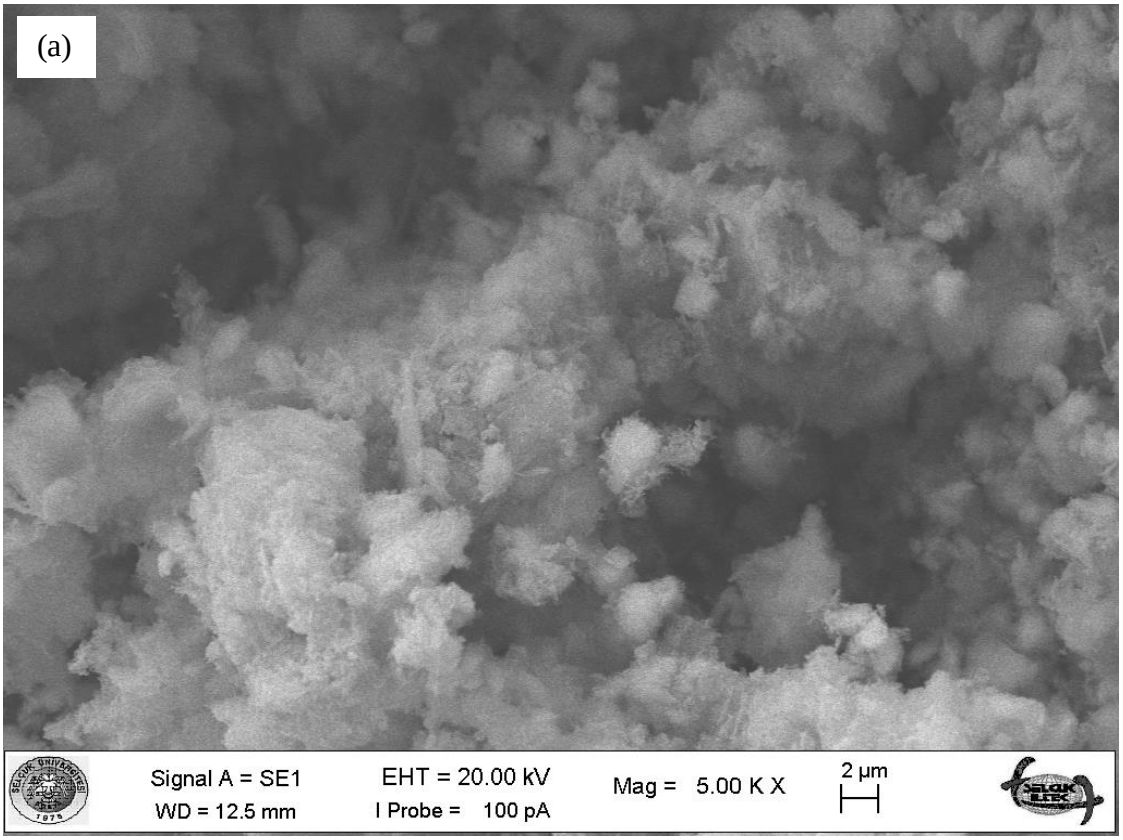
Şekil 4.134. Optimum tasarıma ait EDX sonucu (Küçük ölçekli DKK, 56 gün)

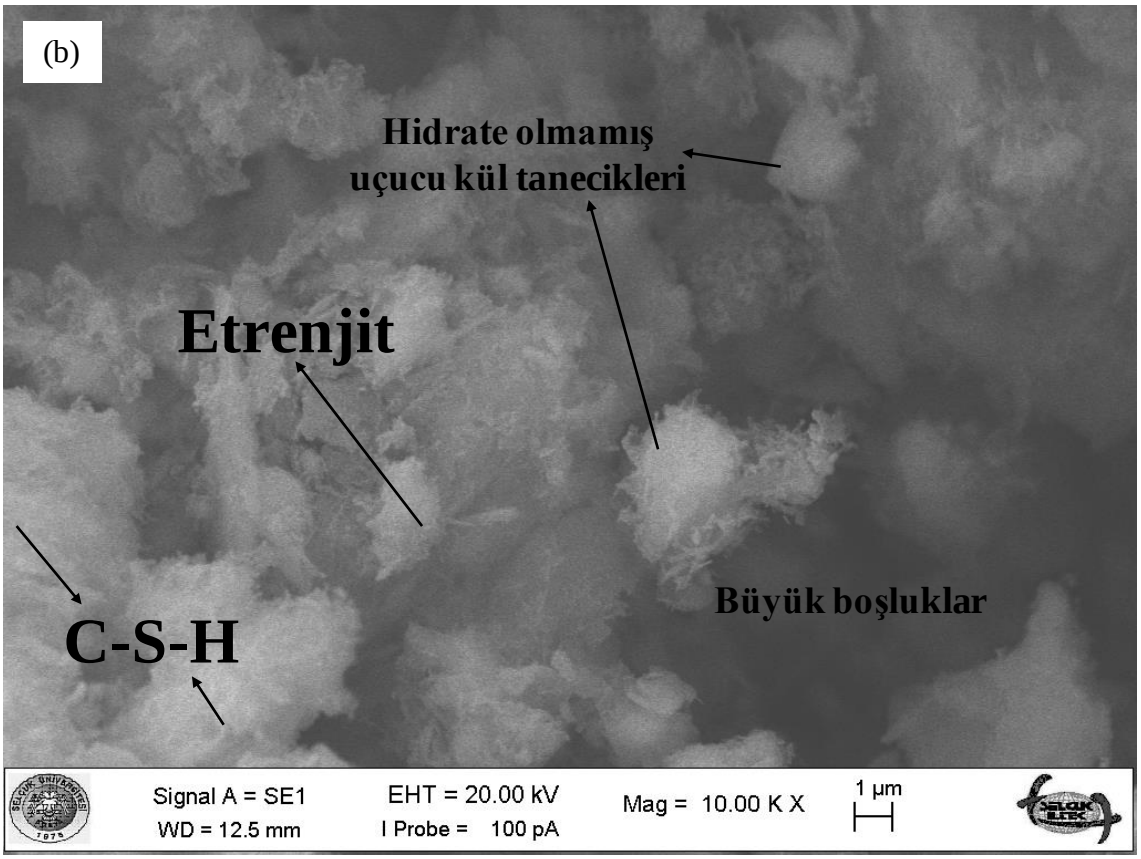
4.6.2 Büyük ölçekli DKK

Büyük ölçekli DKK tasarımları için küçük ölçekte olduğu gibi performansın en kötü (tasarım 4), en iyi (tasarım 14) ve optimum olduğu durumlar SEM görüntüleriyle incelenmiştir. Bahsedilen tasarımlar için numunelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ortaya çıkan hidratasyon ürünleri küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarında aynı olmuştur. Bu nedenle SEM görüntüleriyle ilgili detaylı açıklamalar *alt başlık 4.6.1*'de verilmiş olup, bu başlık altında küçük ve büyük ölçekli DKK arasındaki farklılıklar açıklanmıştır.

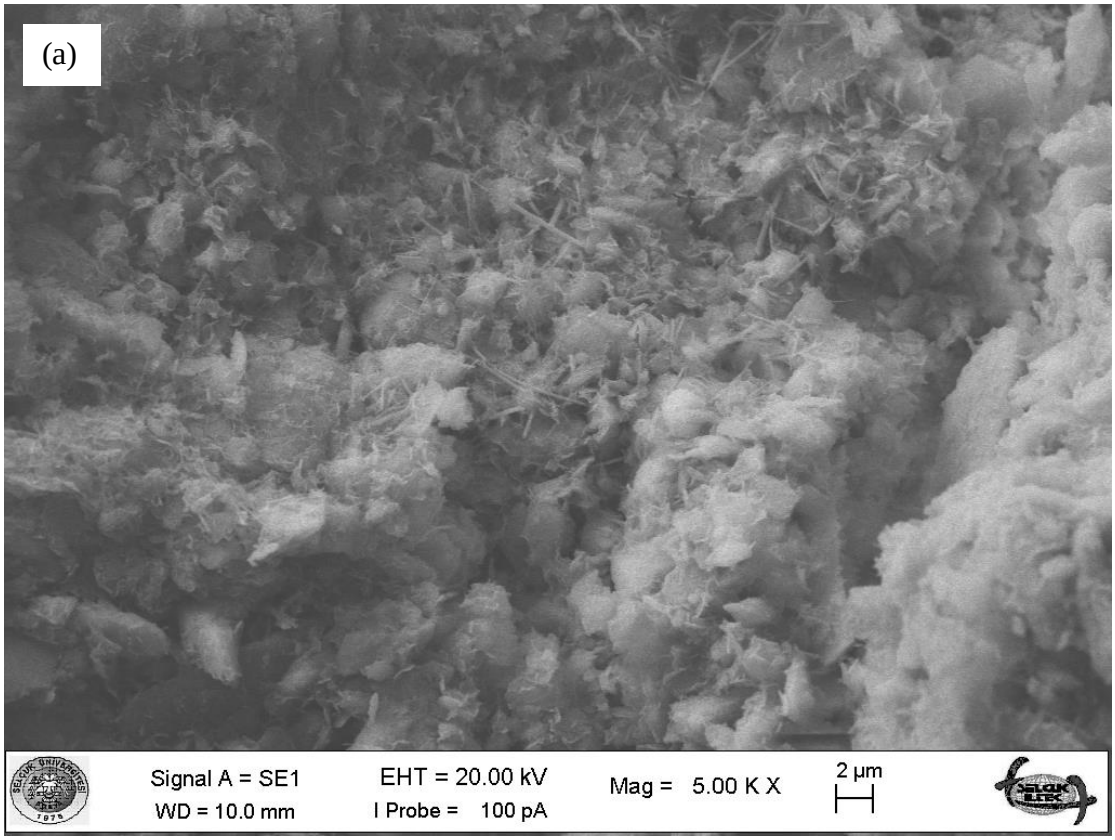
4 numaralı tasarıma ait 28 ve 56 gün sürelerndeki SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.135 ve Şekil 4.136'da verilmiştir. DKK numunelerinin içyapısında C-S-H jeli ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca hidrate olmamış uçucu kül tanecikleri ve katı kütleler arasında büyük boşlukların oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle dayanım düşük olurken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı büyük olmaktadır. 4 numaralı tasarımda, büyük ölçekli DKK'nın dayanımı küçük ölçeğe göre %20 az olurken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla %25 ve %40 fazla olmuştur. Büyük ölçekli DKK'da C-S-H jel yoğunluğu küçük ölçeğe göre daha az olurken, numune yapısındaki boşluk hacmi daha fazla olmuştur. Bu nedenle büyük ölçekli DKK performansı küçük ölçeğe göre daha kötü olmaktadır.

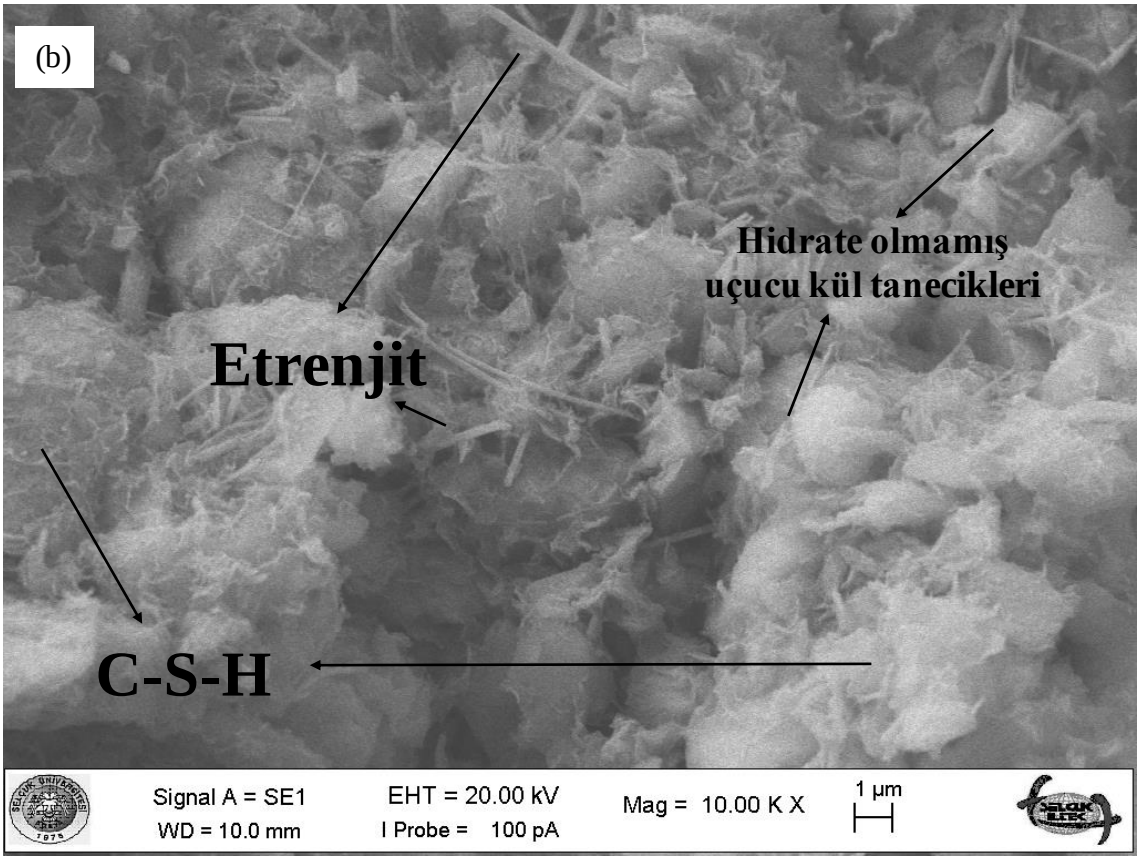
14 numaralı tasarıma ait 28 ve 56 gün sürelerindeki SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.137 ve Şekil 4.138'de verilmiştir. DKK numunelerinin içyapısında C-S-H ve C-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu görülmektedir. Uçucu kül taneciklerinin hepsi hidrate olmuştur. Numunelerin az boşluklu bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle dayanım yüksek olurken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı düşük olmaktadır. 14 numaralı tasarımda, büyük ölçekli DKK'nın dayanımı ve permeabilite katsayısı küçük ölçeğe göre sırasıyla %40 ve %50 fazla olurken, sıkışma indisi %25 düşük olmuştur. Büyük ölçekli DKK'da C-S-H jel yoğunluğu küçük ölçeğe göre daha az olurken, numune yapısındaki boşluk hacmi daha fazla olmuştur. Bu nedenle büyük ölçekli DKK performansı küçük ölçeğe göre daha kötü olmaktadır.



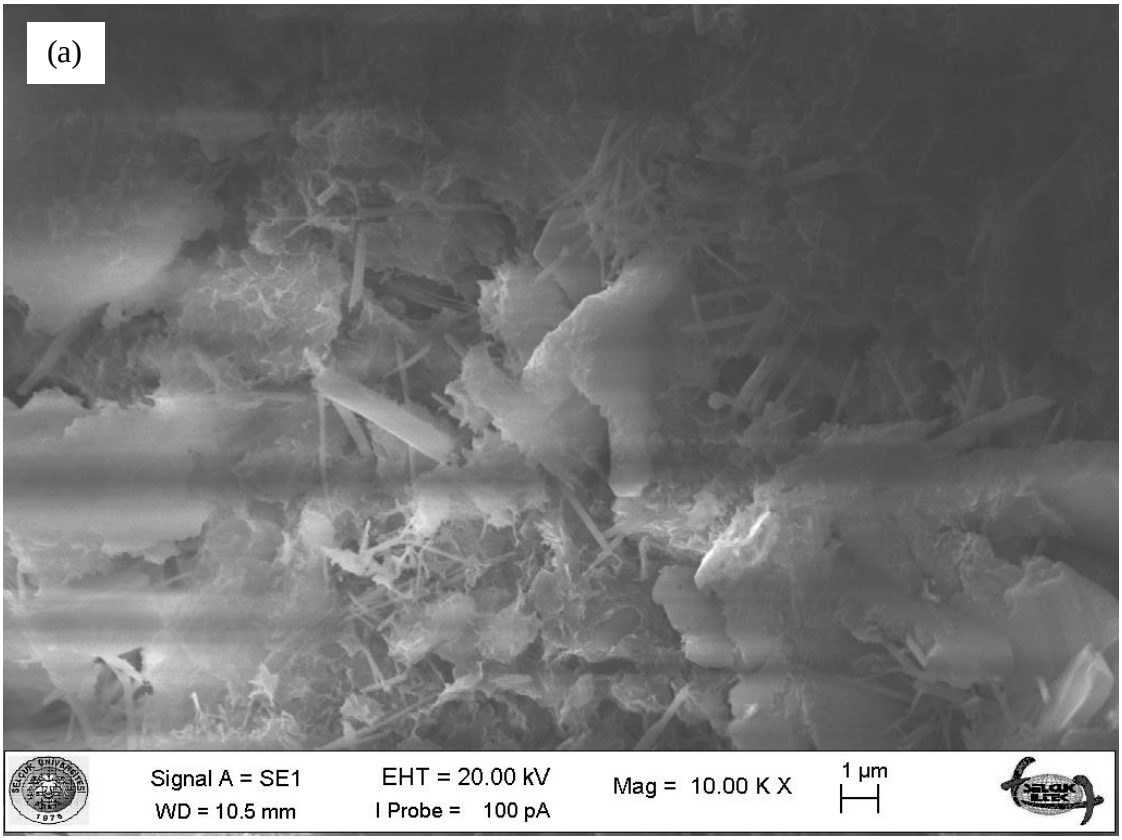


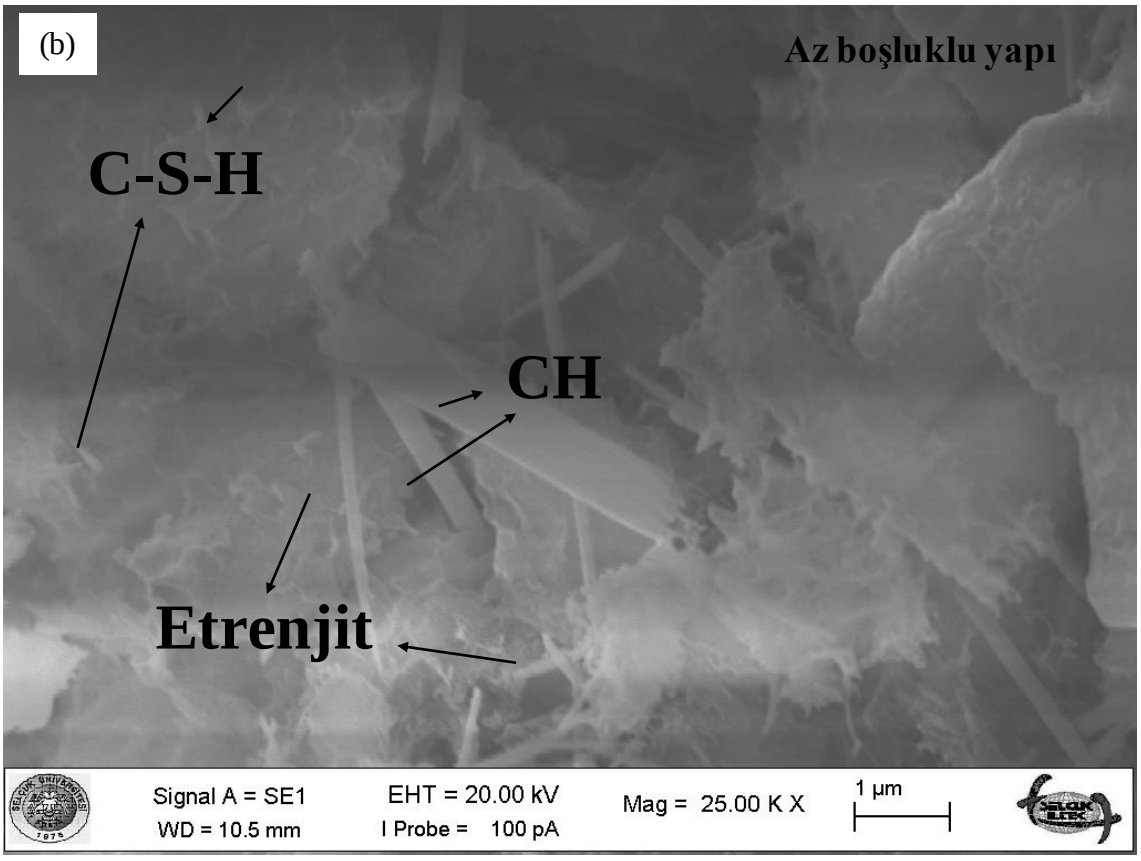
Şekil 4.135. Tasarım 4'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



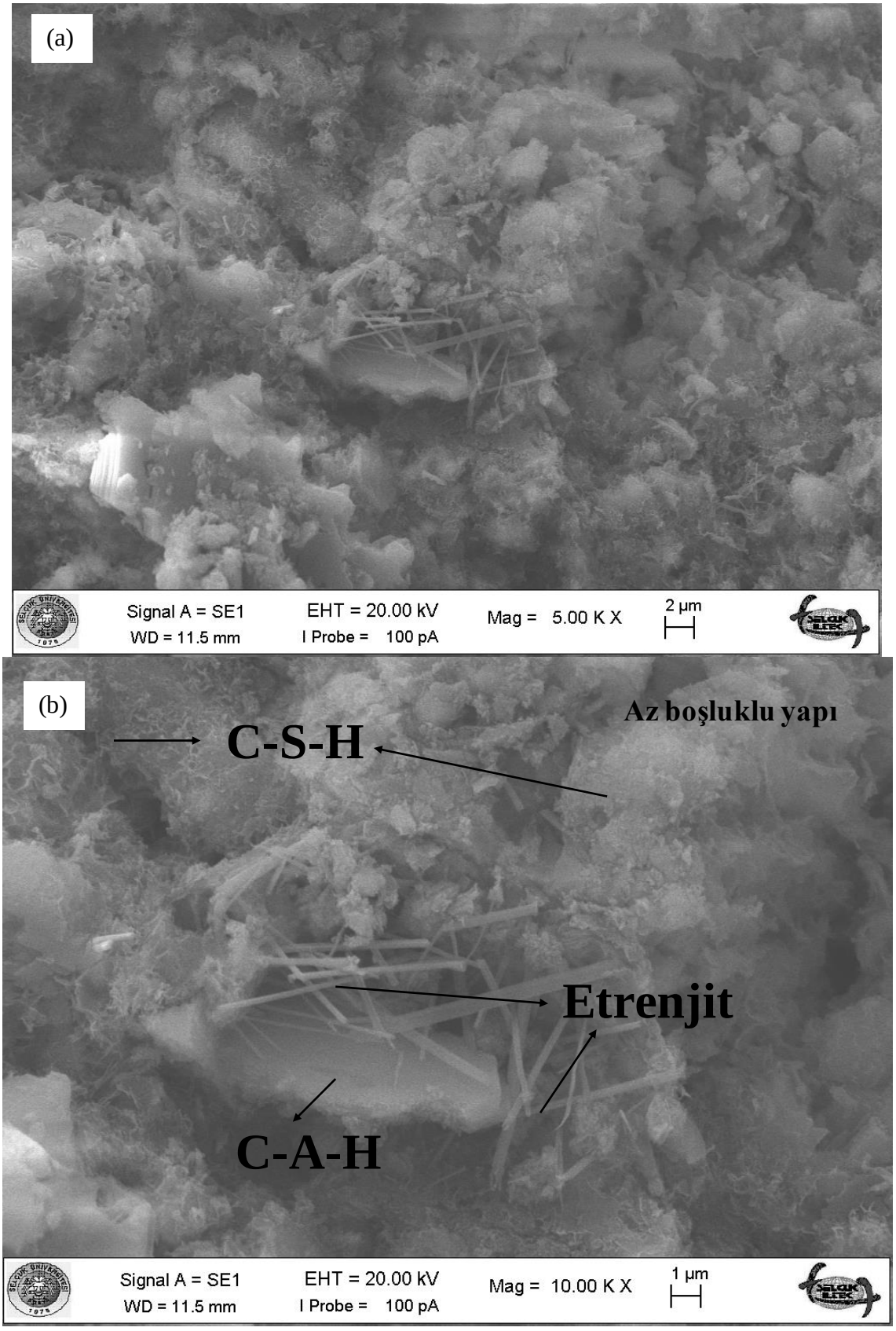


Şekil 4.136. Tasarım 4'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



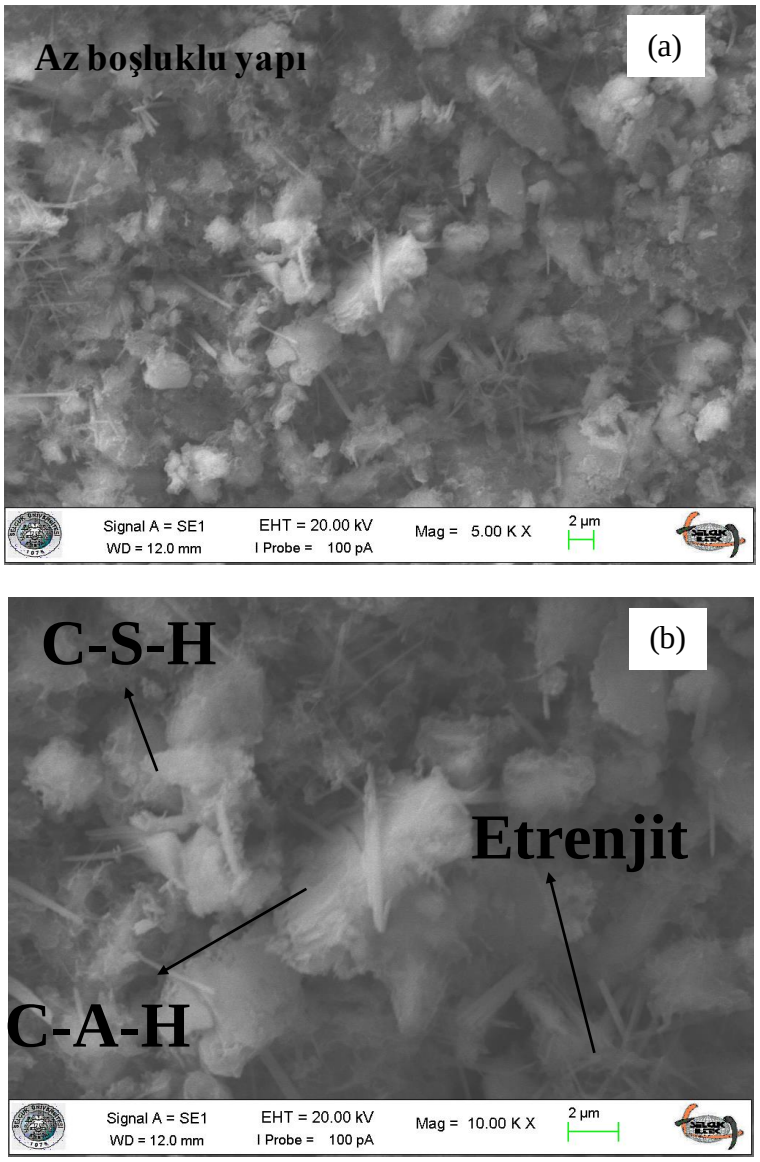


Şekil 4.137. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x10000, b) x25000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

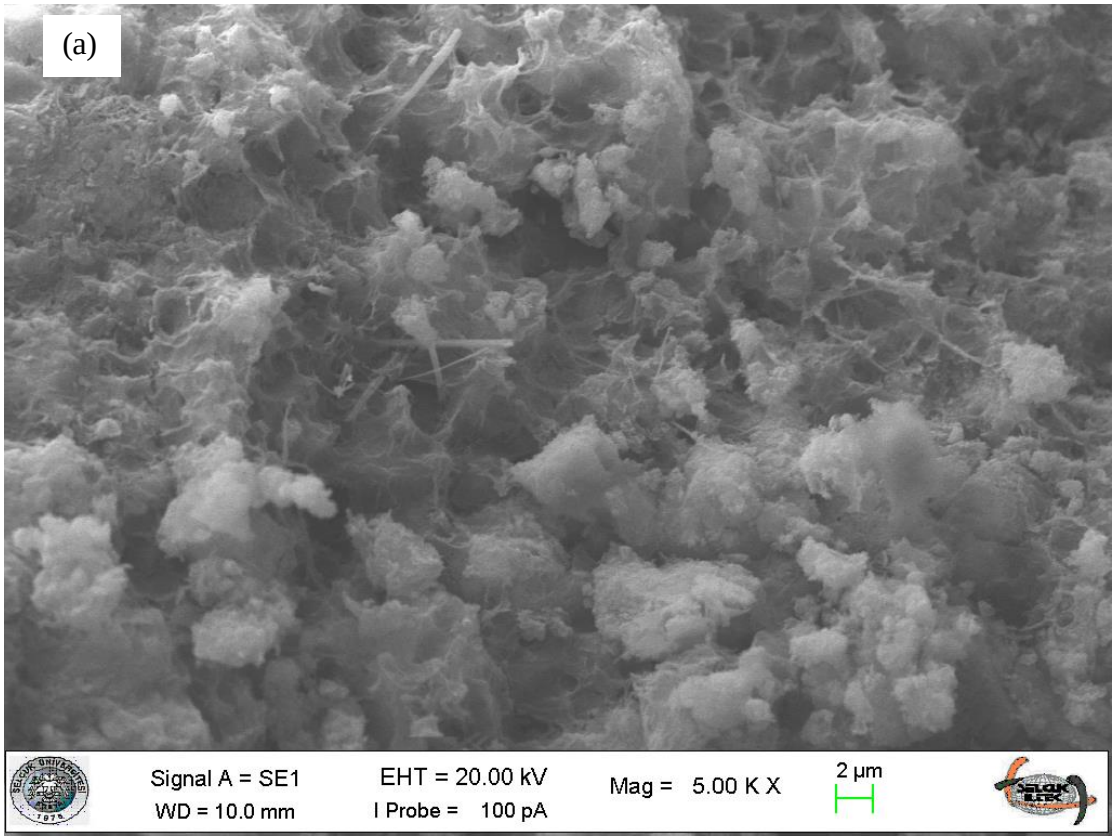


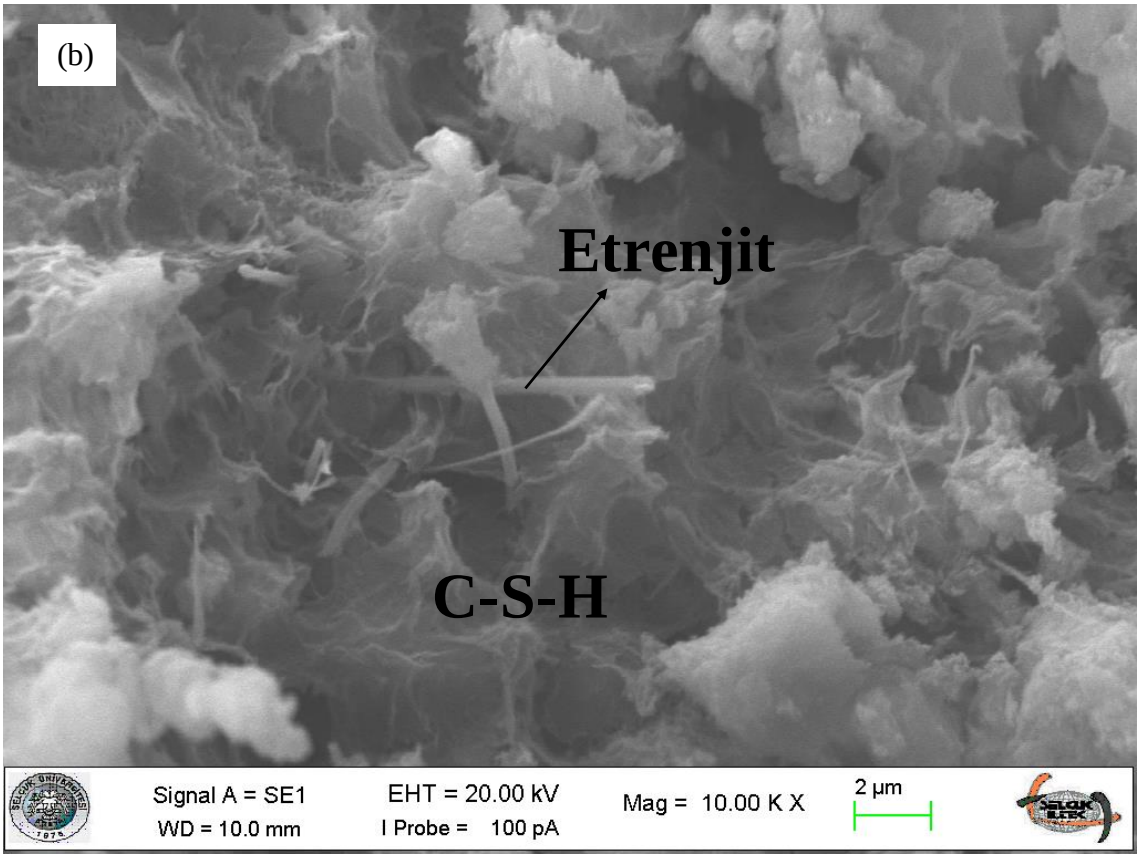
Şekil 4.138. Tasarım 14'e ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

Optimum tasarıma ait 28 ve 56 gün sürelerindeki SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.139 ve Şekil 4.140'da verilmiştir. DKK numunelerinin içyapısında C-S-H ve C-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu görülmektedir. Uçucu kül taneciklerinin hepsi hidrate olmuştur. Numunelerin az boşluklu bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle dayanım yüksek olurken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı düşük olmaktadır. Optimum tasarımda, büyük ölçekli DKK'nın dayanımı küçük ölçeğe göre %40 düşük olurken, permeabilite katsayısı ve sıkışma indisi sırasıyla %30 ve %50 fazla olmuştur. Büyük ölçekli DKK'da C-S-H jel yoğunluğu küçük ölçeğe göre daha az olurken, numune yapısındaki boşluk hacmi daha fazla olmuştur. Bu nedenle büyük ölçekli DKK performansı küçük ölçeğe göre daha kötü olmaktadır.



Şekil 4.139. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)





Şekil 4.140. Optimum tasarıma ait SEM görüntüleri: a) x5000, b) x10000 (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Derin karıştırma kolonlarının performansına etki eden parametrelerin araştırıldığı bu proje kapsamında deneysel ve istatiki çalışmalar yapılmıştır. Kolon imalatına geçilmeden önce, enjeksiyon deneyleri olarak 85 adet marsh hunisi ve 45 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır. Kolonların imalatı sırasında 17 ton yüksek plastisiteli killi zemin kullanılmıştır. Deneme kolonlarıyla birlikte toplamda 35 adet derin karıştırma kolonu imal edilmiştir. Her bir kolondan 15-20 adet olmak üzere toplamda 600-700 adet karot alma işlemi yapılmıştır. Alınan karot numuneleri uygun boylarda kesilerek ilgili deneyler yapılmıştır. Küçük ölçekli DKK tasarımları için 450 adet zemin-enjeksiyon karışımı mikser yardımıyla hazırlanmıştır. Tüm çalışma boyunca 700 adet serbest basınç deneyi, 400 adet drenajsız-konsolidasyonsuz üç eksenli basınç deneyi, 120 adet konsolidasyon deneyi ve 150 adet permeabilite deneyi yapılmıştır. Deneysel ve istatistiki çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

5.1 DKK İmalatı Sırasındaki Gözlemler

Homojen karışmış ve süreklilik arz eden kolon oluşumu imalat parametrelerine (karıştırma bıçaklarınn dönme, batma/çekme hızları, enjeksiyon deliklerinin çapı), enjeksiyon içeriğine ve iyileştirilmemiş zemin özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu nedenle derin karıştırma kolonlarının imalatı sırasında karıştırma bıçaklarının zeminle enjeksiyonu karıştırma durumu gözlenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- İyileştirilecek zemin yumuşak kıvamda bile olsa bağlayıcı dozajı ve/veya karışımın toplam su/bağlayıcı oranı az olduğu durumlarda karışım katı olmakta ve homojen bir karışım elde etmek zor olmaktadır. Bağlayıcı dozajı az olduğunda ortamda zemin tanelerinin tümünü bağlayacak, hidrate edecek kadar bağlayıcı olmamaktadır. Bunun sonucunda hem bağlayıcı dozajı az hem de karışım kötü olduğu için kolon dayanımı düşük olmaktadır.
- DKK'nın mühendislik özellikleri, karışımdaki toplam su miktarı tarafından etkilenmektedir. Çünkü karışımda bulunan su hem çimento hidratasyonu hem de homojen karışım elde edebilmek için gereklidir. Karışım içerisinde yeterli miktarda su bulunmadığı zaman, çimentolanmayı sağlayan iyonlar zemin taneleri arasındaki boşluklara dağılmakta ve kil ile etkileşime geçmeleri zorlaşmaktadır. Bu nedenle kolon dayanımı düşük çıkmaktadır.

- DKK imalatı sırasında zemini parçalamak ve enjeksiyonla homojen karıştırmak için karıştırma bıçaklarının dönme hızının uygun değerde seçilmesi gerekmektedir. TS EN 14679 (2006), bıçakların dönme hızının 25-50 devir/dk arasında seçilmesini önermektedir. Fakat proje kapsamında yapılan deneyler sırasında, likitlik indisi 0.4 olan plastik kıvamdaki zeminlerde dönme hızı 60 devir/dk'dan daha az seçildiğinde homojen kolon oluşumu sağlanamamıştır. Bu kolonlardan düzgün karot numuneleri alınamamış, alınan numuneler parçalanarak dağılmıştır. Bu nedenle her zemin koşulunda deneme kolonu imalatı yapılarak seçilen imalat parametrelerinin yeterli olup olmadığı incelenmelidir.
- Likit kıvamdaki zeminlerin kayma direnci düşük olduğundan dolayı bıçakların zemini karıştırması kolay olmaktadır. Bu nedenle karıştırma bıçaklarının hızı 60 devir/dk'dan daha düşük seçilebilir. Bununla birlikte, deneyler sırasında 80 devir/dk değerinden fazla dönme hızı seçildiğinde iyileştirilecek zeminde çok fazla dalgalanma ve yatay deplasman olduğu gözlenmiştir. Likit kıvamdaki zemin ortamında bıçakların dönme hızı çok seçilmemelidir. Aksi halde imalatın yapıldığı bölgeye yakın yerlerdeki hassas yapılarda (tarihi yapılar, metro tüneli vs.) oturma problemiyle karşılaşılabilir.
- DKK imalatları sırasında delgi gövdesinin batma ve geri çekme hızları 0.4-1.2 m/dk arasında değişmektedir. TS EN 14679 (2006), DKK imalatı sırasında delgi gövdesinin batma hızının 0.5-1 m/dk arasında seçilmesi gerektiğini önermektedir. Bu yönüyle DKK imalatları sırasında seçilen batma ve çekme hızları standarda uygun olmaktadır.
- Deneyler sırasında bağlayıcı dozajı veya karışımın su muhtevasının fazla olduğu durumlarda homojen karışım ilk taramadan itibaren elde edilirken, az olduğu durumlarda 3-4 taramadan sonra elde edilmiştir. Tarama sayısı arttıkça çok daha homojen kolon oluşumu elde edilmekte, bunun sonucunda kolon dayanımı artmaktadır.
- Karıştırma bıçaklarının üzerinde bulunan delik çapı, buradan çıkacak enjeksiyon basıncını etkilemektedir. Bu nedenle delik çapı ne kadar az olursa o kadar yüksek basınç elde edilmekte ve zeminin parçalanması ve enjeksiyonla karışması daha kolay olmaktadır.

Kolon imalatı sırasında yapılan bir diğer gözlem şudur: Karıştırma bıçakları dönerken kolon bölgesindeki zeminin bir kısmını kenarlara doğru iterek kolon ile iyileştirilmeyen zemin arasında bir ara tabaka oluşturmaktadır. Bu ara yüzey tabakasının kolon yüzeyine çok güçlü bağlarla tutunduğu ve iyileştirilecek zemine göre çok daha katı bir kıvamda olduğu belirlenmiştir. Bunun sonucunda, derin karıştırma kolonunun zemin içerisinde yüklemeye maruz kaldığında (kazık yükleme deneyi gibi) kayma yüzeyinin kolon yüzeyinde değil, oluşan

ara tabaka ile iyileştirilecek zemin arasında olacağı düşünülmektedir. Çünkü bu ara yüzey kolon yüzeyindeki düzleme göre daha zayıftır.

5.2 İmalat Parametrelerinin Belirlenmesi

Proje kapsamında yapılan deneysel ve istatistiki çalışmalar sonucunda, homojen ve sürekli bir DKK oluşumu için gerekli optimum imalat parametreleri belirlenirken hem kolon dayanımı (q_u) hem de zemin iyileştirme derecesi (RI) dikkate alınmıştır. Sonuç olarak optimum imalat parametreleri çimento dozajı 325 kg/m^3, karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk, enjeksiyon deliklerinin çapı 3 mm ve iyileştirilecek zeminin likitlik indisi 1.0 olarak belirlenmiştir. Kolon dayanımı üzerinde en etkili parametre çimento dozajı olmuştur. Diğer parametrelerin etki sırası enjeksiyon deliklerinin çapı, zeminin likitlik indisi (veya su muhtevası) ve karıştırma bıçağının dönme hızı şeklinde olmaktadır.

Tasarımlardaki en düşük ve en büyük kolon dayanımı sırasıyla 832.8 kPa ve 2105.1 kPa olurken, optimum durumda kolon dayanımı 2189.5 kPa olmuştur. Zemin iyileştirme derecesi için en düşük, en büyük ve optimum değerler sırasıyla %2097, %30509 ve %31732 olmuştur. İyileştirilmemiş zemin dayanımında, imalat parametrelerine ve zemin koşullarına bağlı olarak 20 ile 300 kat arasında bir iyileştirme yapılmıştır. Optimum durum için deneysel ve istatistiki sonuçlar arasında q_u yönünden %5.2, RI yönünden %5.6 fark bulunmuştur. Bu sonuç deneysel ve istatistiki çalışmaların birbiriyle uyumlu olduğunu ve sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Kolon imalatı sırasında seçilen parametreler ile dayanım (q_u) ve zemin iyileştirme derecesinin (RI) değişimi incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Çimento dozajı veya faktörü arttıkça hem q_u hem de RI artmaktadır.
- q_u ve RI, çimento içeriğinin %25'den az olduğu durumlarda artış göstermezken, %25'den fazla olduğunda belirgin bir artış göstermiştir.
- Zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi ($I_{L,mix}$) 0.9-1.1 arasında olduğunda kolon dayanımı maksimum elde edilirken, $I_{L,mix}$ 1.1'den büyük olduğunda kolon dayanımı oldukça düşmektedir. $I_{L,mix}$ değeri arttıkça zemin iyileştirme oranı sürekli artmaktadır ve $I_{L,mix}$=1.4 olduğunda en yüksek seviyeye ulaşmıştır.
- Düşük dozajlarda (α<325 kg/m^3) karışımın toplam su/çimento içeriği (W_T:W_b) arttıkça q_u azalmaktadır. W_T:W_b>3 olduğunda kolon dayanımındaki azalma çok fazla olmuştur. α>325 kg/m^3'ten büyük olduğu zaman ise karışımın toplam su/bağlayıcı oranı arttığında dayanımda çok fazla azalma olmamıştır.
- Dozaj az olduğu zaman (s/b=1) zemine aktarılan su miktarı azaldığından dolayı zeminin enjeksiyonla karışması zor olmakta ve dayanım düşmektedir. Bu durumda

karıştırma bıçaklarının toplam dönme sayısı (BRN) artırılarak karıştırma süresini artırmak gerekmektedir. Bu nedenle $\alpha<325$ kg/m^3 iken BRN>1000 devir/m seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. $\alpha>325$ kg/m^3 iken BRN arttıkça homojen karışım elde etmek kolaylaşmış ve kolon dayanımına olumlu etkisi olmuştur.

5.3 Uçucu Kül Katkılı DKK Tasarımı

Deneysel ve istatistiki çalışmalarda farklı imalat parametrelerine sahip DKK'lar için dayanım (UCS, UU), sıkışma indisi (Cc) ve permeabilite katsayısı (k) gibi özelliklerin kür süresine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda bağlayıcı dozajı, uçucu kül oranı, süper akışkanlaştırıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve zeminin likitlik indisi gibi parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra performansı en yüksek DKK imalatının yapılabildiği zemin koşulu ve imalat parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir. Seçilen optimum durum için DKK veya zemin-enjeksiyon karışımlarının performans özellikleri farklı kür sürelerinde belirlenmiştir. Araştırmalar hem derin karıştırma makinesiyle imal edilen DKK (büyük ölçekli) hem de mikserle hazırlanan karışımlar (küçük ölçekli DKK) için ayrıca yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- DKK performansı üzerinde en etkili parametre kür süresi olmaktadır. Kür süresine bağlı olarak DKK performansındaki artış diğer parametrelere göre daha baskın olmuştur.
- DKK performansı üzerindeki ikinci önemli parametre bağlayıcı dozajı olmuştur. Zemin-enjeksiyon karışımı içerisinde bağlayıcı miktarı arttıkça ortaya çıkan hidratasyon ürünleri de artmakta (C-S-H jeli) ve daha sağlam bir yapı elde edimektedir. Bunun sonucunda dayanım artarken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı azalmaktadır.
- DKK performansı üzerindeki üçüncü önemli parametre su/bağlayıcı oranı olmuştur. Ortamdaki su, zemin-çimento-uçucu kül arasında meydana gelen hidratasyon reaksiyonları için gereklidir. Ortamdaki su az olduğunda hidratasyon reaksiyonları için gerekli su olmamakta ve çimentolanmayı sağlayan iyonlar zemin taneleri arasındaki boşluklara dağılmaktadır. Ortamdaki suyun yeterli olması halinde performans yüksek olurken, suyun gereğinden fazla olması DKK yapısında büyük boşluklara neden olmakta ve performans düşmektedir.
- DKK performansı üzerindeki dördüncü önemli parametre uçucu kül oranı olmuştur. Uçucu kül kullanıldığında zemin-çimento-uçucu kül arasında oluşan puzzolanik reaksiyonlar sonucunda zemin-çimento arasındaki birincil hidratasyon ürünlerine (C-S-H, CH) ek olarak yeni hidratasyon ürünleri (C-S-H, C-A-H jelleri) ortaya çıkmakta ve DKK performansı artmaktadır. Uçucu kül erken dönemde (7. günde) performansı olumsuz

etkilemiştir. 28. günde performansa önemli derecede katkı sunarken 56. günde etkisini tam manasıyla göstermiştir.

- DKK performansı üzerindeki beşinci önemli parametre zeminin likitlik indisi olmuştur. Likitlik indisi zemin içerisindeki su miktarıyla ilişkilidir ve enjeksiyondan gelen su ile birlikte karışımın toplam su muhtevasını (karışımın likitlik indisi veya toplam su/bağlayıcı oranı) etkilemektedir.
- DKK performansı üzerindeki altıncı önemli parametre süper akışkanlaştırıcı katkı oranı olmuştur. Katkı kullanılması ile yüksek oranda uçucu kül içeren enjeksiyonlar bile düşük su/bağlayıcı oranlarında hazırlanabilmiştir. Örneğin optimum tasarımda %40 uçucu kül içeren enjeksiyon 0.8 su/bağlayıcı oranı ile uygulanabilmiş ve bunun sonucunda yüksek dayanım, düşük sıkışma ve geçirimlilik özelliklerine sahip DKK imalatı yapılmıştır.
- DKK performansı üzerinde en az öneme sahip parametre hücre basıncı (yanal basınç) olmuştur. Bunun sonucunda homojen karışmış DKK için derinlikten bağımsız olarak kolon boyunca dayanımın aynı olacağı söylenebilir.

Büyük ölçekli DKK tasarımlarında elde edilen performans değerleri (en az-en fazla olduğu değerler) aşağıda özetlenmiştir.

- 28 gün sonunda, kolonun serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı değerleri sırasıyla 491.2-3269.8 kPa, 693.6-3335.6 kPa, 0.056-0.543, 2.854×10^{-9}-2.382×10^{-11} m/s aralığında değişmektedir.
- 56 gün sonunda, kolonun serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı değerleri sırasıyla 641.2-3837.1 kPa, 943-4086.7 kPa, 0.045-0.359, 1.854×10^{-9}-8.848×10^{-12} m/s aralığında değişmektedir.
- Kür süresi dikkate alındığında 56. gündeki performans değerleri 28. güne göre serbest ve üç eksenli basınç dayanımları bakımından sırasıyla %40 ve %30 artarken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla %18 ve %50 azalmaktadır.

Küçük ölçekli DKK tasarımlarında elde edilen performans değerleri (en az-en fazla olduğu değerler) aşağıda özetlenmiştir.

- 7 gün sonunda, zemin-enjeksiyon karışım numunelerinin serbest ve üç eksenli basınç dayanımı değerleri sırasıyla 191.7-3160 kPa ve 243.9-3230 kPa aralığında değişmektedir.
- 28 gün sonunda, numunelerin serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı değerleri sırasıyla 613.1-5757.5 kPa, 596.8-5231.4 kPa, 0.040-0.457, 2.627×10^{-9}-5.231×10^{-11} m/s olarak belirlenmiştir.

- 56 gün sonunda, numunelerin serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı değerleri sırasıyla 864.9-6363.5 kPa, 688.2-6760.9 kPa, 0.045-0.266, $1.346x10^{-9}$-$2.041x10^{-11}$ m/s olarak belirlenmiştir.
- Kür süresinin etkisi sonucu performans değerlerindeki değişim şu şekilde olmuştur: 7-28 ve 28-56 günleri arasında numunelerin dayanımlarındaki ortalama artış sırasıyla %140 ve %35 olmuştur. 28 ve 56 gün sonundaki sıkışma indisi ve permeabilite katsayısındaki azalma sırasıyla %7 ve %55 olmuştur.

Küçük ve Büyük ölçekli DKK tasarımlarında 28 ve 56 gün sonunda performansın en kötü ve en iyi olduğu tasarımlar sırasıyla 4 ve 14 numaralı tasarımlar olmuştur. Bu tasarımların performansları arasındaki farklılıklar imalat parametrelerindeki değişikliğin sonucunda numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile SEM görüntülerine yansımıştır.

- 4 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı (200 kg/m^3) minimum iken, uçucu kül oranı (%60), katkı oranı (%5), su/bağlayıcı oranı (1.4) ve zeminin likitlik indisi (1.0) maksimumdur. Karışımdaki uçucu kül oranı çok fazla (%60) olduğundan ve buna karşılık çimento miktarı azaldığından (%40) dolayı tüm uçucu kül taneleri çimento veya zeminle reaksiyona girememiştir. Karışım içerisindeki su miktarı fazla olduğu için (s/b=1.4, I_L=1, $I_{L,mix}$=1.57, W_T:W_b=3.22) ortamda hidratasyon reaksiyonları için gerek duyulandan çok fazla su bulunmaktadır. Bu nedenle oluşan hidratasyon ürünleri su içerisinde yüzmekte, tüm taneler birbiriyle bağ kuramamakta ve boşluklu bir yapı meydana gelmektedir. SEM görüntülerinde numune içyapısında büyük boşlukların olduğu, hidrate olmamış uçucu kül tanelerinin varlığı, az yoğunlukta kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Bunun sonucunda dayanım düşük olurken, sıkışma indisi ve permemabilite katsayısı yüksek olmaktadır.
- 14 numaralı tasarımda bağlayıcı dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %20, katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi (1.0) olmaktadır. Bu tasarımda bağlayıcı dozajı maksimum olduğundan ve ortamda yeterince uçucu kül bulunduğundan dolayı DKK performansı olumlu yönde etkilenmiştir. SEM görüntülerinde tüm uçucu kül taneciklerinin hidrate olduğu, yoğun bir şekilde C-S-H jeli, yer yer C-H plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca su/bağlayıcı oranının minimum olması ile DKK performansı yüksek çıkmıştır. Karışım içerisindeki su miktarı yeterli seviyede olduğu için (s/b=0.8, I_L=1, $I_{L,mix}$=0.9 ve W_T:W_b=1.48) ortamdaki suyun büyük çoğunluğu hidratasyon reaksiyonları için kullanılmıştır. Ortamda çok fazla su olmadığı için az boşluklu bir numune yapısı meydana gelmiş, bu durum SEM görüntüleriyle desteklenmiştir. Bahsedilen nedenler sonucunda DKK dayanımı yüksek olurken, sıkışma indisi ve permemabilite katsayısı düşük olmuştur.

İstatistiksel analizler ve değerlendirme süreci sonunda dayanım ve zemin iyileştirme derecesinin maksimum, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısının minimum olacağı DKK için optimum imalat parametreleri 56 gün kür süresi için belirlenmiştir. Çünkü uçucu kül etkisini uzun zamanda göstermektedir. Bununla birlikte 7 ve/veya 28 gün kür süreleri için DKK ve zemin-enjeksiyon karışımlarının performans değerlerinin yeterli olup olmadığı belirlenmiştir. Bunun nedeni uçucu kül katkılı DKK imalatı yapıldığı zaman erken kür sürelerinde inşaat faaliyetlerine devam ediliyor olmasıdır.

- Optimum imalat parametreleri; çimento dozajı 425 kg/m^3, uçucu kül oranı %40, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir.
- Büyük ölçekli DKK tasarımında, 56 gün sonunda kolonun serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla 4002 kPa, 4166.2 kPa, 0.048, 0.849x10^{-11} m/s olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere bakıldığında dayanımı yüksek, sıkışabilirliği ve geçirimliliği düşük kolon imalatı yapılmıştır. 28 gün sonunda kolonun serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla 2814.5 kPa, 3010 kPa, 0.055, 1.612x10^{-11} m/s olarak belirlenmiştir. Uygulamadaki çoğu projede 1000 kPa dayanımın yeterli olacağı FHWA (2013) tarafından belirtilmiştir. Uçucu kül katkılı DKK'nın 28 gün sonunda da yüksek dayanıma, düşük sıkışabilirliğe ve geçirimliliğe sahip olduğu görülmektedir.
- Küçük ölçekli DKK tasarımında, 56 gün sonunda numunelerin serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla 6615 kPa, 6673 kPa, 0.026, 0.456x10^{-11} m/s olarak belirlenmiştir. 28 gün sonunda numunelerin serbest ve üç eksenli basınç dayanımları, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı sırasıyla 4752.5 kPa, 5614.8 kPa, 0.048, 2.170x10^{-11} m/s olarak belirlenmiştir.
- Optimum tasarıma ait SEM görüntülerinde oldukça yoğun C-S-H ve C-A-H jellerinin oluştuğu ve numune yapısının neredeyse boşluksuz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç da optimum durumda performansın yüksek elde edilmesini desteklemektedir. Ayrıca optimum tasarımda portlandit (CH) plakalarının oluşmaması optimum miktarda uçucu külün kullanıldığını ve tüm kalsiyum hidroksit bileşiklerinin (CH) Al_2O_3 veya SiO_2 ile tepkimeye girerek C-S-H ve C-A-H jellerini oluşturduğunu göstermektedir.
- Büyük ölçekli optimum DKK tasarımı için performans değerleri bakımından istatistiki sonuçlar ile doğrulama deneyleri arasında %3-8 kadar fark olmuştur. Küçük ölçekli DKK tasarımında bu fark dayanım sonuçları bakımından %4-9, konsolidasyon ve permeabilite sonuçları bakımından %50-70 fark ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar deneysel ve istatistiki çalışmaların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Küçük ölçekli DKK performansı büyük ölçeğe göre serbest ve üç eksenli basınç dayanımları yönünden sırasıyla %40 ve %30 daha fazla olurken, sıkışma indisi ve permeabilite katsayısı yönünden sırasıyla %20 ve %45 daha az olmuştur. Aynı imalat parametreleri kullanılmasına rağmen küçük ölçekli DKK tasarımlarının performansı büyük ölçeğe göre daha fazla elde edilmiştir. Bu farklılık imalat yöntemi ve kür koşullarının farklı olmasından kaynaklamaktadır.

- Küçük ve büyük ölçekli DKK imalatları düşünüldüğünde küçük ölçekte zemin ve enjeksiyon büyük ölçeğe göre çok daha homojen karışmaktadır. Bu nedenle küçük ölçekli DKK performansı büyük ölçeğe göre daha yüksek elde edilmiştir.
- Büyük ölçekte α ve a_w değerleri sırasıyla 200-425 kg/m^3 ve %14.6-37.9 aralıklarında değişirken küçük ölçekte 257-1760 kg/m^3 ve %18.7-128 aralıklarındadır. Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında $\alpha_{in\text{-}place}$ aynı olmasına rağmen α ve a_w küçük ölçekte daha fazla olmaktadır. Bu nedenle küçük ölçekli DKK performansı daha yüksek elde edilmektedir.
- Büyük ölçekli DKK imalatı sırasında zemin-enjeksiyon karışımı içerisindeki su kolon bölgesinde kalmakta ve ortamı terk edememektedir. Küçük ölçekli DKK imalatı sırasında fazla suyun bir kısmı buharlaşarak ortamı terk etmektedir. Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında W_T:W_b sırasıyla 2.17-4.32 ve 1.48-3.22 aralıklarında değişmektedir. Sonuç olarak zemin-enjeksiyon karışımının toplam su/bağlayıcı oranı büyük ölçekte daha fazla olmuştur. Bu nedenle büyük ölçekteki performans değerleri küçük ölçeğe göre daha düşük olmaktadır.
- Büyük ve küçük ölçekli DKK tasarımlarında $I_{L,mix}$ sırasıyla 0.52-1.15 ve 0.55-1.57 aralıklarında değişmektedir. Zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi küçük ölçekte daha fazla olmasına rağmen küçük ölçekli DKK performansı daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç DKK performansı üzerinde W_T:W_b parametresinin $I_{L,mix}$ parametresine göre daha baskın olduğunu göstermektedir.

Uçucu kül katkılı DKK performansı imalat parametreleri ve zemin-enjeksiyon karışımının fiziksel özelliklerinden etkilenmektedir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Bağlayıcı faktörü (α) ve içeriği (a_w) arttıkça DKK dayanımı (q_u, q_{uu}) ve zemin iyileştirme derecesi (RI) artarken, sıkışma indisi (Cc) ve permeabilite katsayısı (k) azalmaktadır.
- Büyük ölçekli DKK tasarımlarında dayanımın maksimum olduğu durumlar; α<300 kg/m^3 iken $I_{L,mix}$=(0.8-1.0)I_L ve α>300 kg/m^3 iken $I_{L,mix}$=(1.2-1.3)I_L olduğunda elde edilmiştir. Küçük ölçekli DKK tasarımlarında, $I_{L,mix}$ 1.1'den küçük olduğunda ve α 1000 kg/m^3'ten

büyük olduğunda dayanım değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Zemin-enjeksiyon karışımlarının dayanımları $I_{L,mix}$ değeri 1.3'e kadar artmakta daha sonra azalmaktadır.

- $\alpha<300$ kg/m^3 iken $a_w>\%20$ olduğunda dayanım artmakta fakat $a_w>\%30$ iken dayanımda belirgin bir artış olmamaktadır. $\alpha>300$ kg/m^3 iken $a_w=\%30$ olduğunda dayanım maksimum olmaktadır.
- W_T:W_b ve/veya $I_{L,mix}$ arttıkça q_u ve q_{uu} azalırken, Cc ve k artmaktadır.
- Büyük ölçekli DKK tasarımlarında BRN 800-900 devir/m değerine kadar q_u ve RI artmakta, 900 devir/m'den sonra azalmaya geçmektedir.

Projenin büyük bölümü sahadaki uygulamaya benzer şekilde imal edilen derin karıştırma kolonları üzerinde yürütülmüştür. Projeden elde edilen en önemli sonuç %40 uçucu kül içeren enjeksiyon ile DKK uygulamasının yapılabilecek olmasıdır. Bunun sonucunda DKK uygulamalarında (jet grout vb. uygulamalar da sayılabilir) çimento kullanımı ve maliyeti %40 oranında azalmış olacaktır. Enjeksiyon karışımına toplam kuru bağlayıcının %40'ı kadar uçucu kül katkısı ile DKK dayanımı artmakta, sıkışma ve geçirimlilik özellikleri azalmaktadır.

5.4 Öneriler

Proje ile yüksek oranda uçucu kül içeren enjeksiyon ile DKK uygulamasının yapılabilir olduğu, bunun sonucunda da yüksek performanslı DKK imal edilebildiği gösterilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar enjeksiyonlama yoluyla yapılan içitim tipi katkılı zemin iyileştirme çalışmaları (jet grout, kimsayal enjeksiyon vb.) için de geçerli olacaktır. Yüksek oranda uçucu kül kullanıldığında hem çimento kullanımı azalacak (üretim kaynaklı karbon salınımının azalması, enejji tasarrufu) hem de uçucu kül tüketimi artacaktır (enjeksiyon maliyetlerinin azalması, atıkların kullanılarak çevre sağlığının korunması). Bu nedenle derin karıştırma veya jet grout gibi zemin ıslahı çalışmalarında uçucu kül kullanılması devlet tarafından teşvik edilebilir, hatta kamusal ihalelerde kamu kurumları şartnamelerde bu durumu isteyebilir.

DKK performansı için geliştirilen istatistiki modeller (regresyon denklemleri) sadece uçucu kül+çimento katkılı DKK için değil, çimento katkılı DKK imalatı için de kullanılabilir.

Uçucu kül etkisini tam manasıyla 56 günden sonra göstermektedir. Uygulamada uçucu kül kullanılması halinde DKK performansını belirlemek için 56 gün beklenilmesine gerek yoktur. Geliştirilen istatistiki modeller ile DKK'nın 7 ve 28 günlük performans değerleri tahmin edilerek bu sürelerde kolondan karot alınıp performans değerlendirmesi yapılabilir. İkinci bir alternatif ise uygulama sahasından zemin örnekleri alınarak mikser karışımları hazırlanıp DKK performansı tahmin edilebilir. Çünkü proje kapsamında yapılan çalışmalarda

mikser karışımı ve derin karıştırma makinesiyle imal edilen DKK'ların performansı, imalat yöntemine ve kür süresine bağlı ilişkilerle belirlenmiştir.

Sahadaki uygulamalarda DKK imalatına başlamadan önce su/bağlayıcı oranı şu şekilde belirlenebilir: DKK performansının en iyi elde edildiği durumlar zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisi ($I_{L,mix}$), çimento ve çimento+uçucu kül katkılı DKK'lar için sırasıyla (0.9-1.1)I_L ve (1.2-1.3)I_L olarak belirlenmiştir. Buradan hareketle yapılması gereken ilk önce sahadaki zemin profilinde killi zeminin kıvam limitleri ve doğal su muhtevasını belirlemektir. Daha sonra seçilen bağlayıcı dozajı ve cinsi (çimento veya çimento+uçucu kül) için zemin-enjeksiyon karışımının su muhtevasını yukarıda verilen değere getirecek şekilde su/bağlayıcı oranı belirlenmelidir.

DKK imalatına geçilmeden önce iki farklı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin enjeksiyon kıvamına olan etkisi incelenmiştir. Bunlardan bir tanesinin yüksek oranda uçucu kül içeren enjeksiyon için daha fazla su kesme özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle farklı markaların ürünleri üzerinde çalışmaların devam ettirilmesinde fayda vardır.

DKK numunelerinden alınan örneklerin SEM görüntüleri incelendiğinde etrenjit iğnelerinin oluşumu belirlenmiştir. Etrenjit iğneleri kolona dışarıdan nüfuz edecek sülfatlı su etkisiyle hacim artışı göstererek kolonun dağılmasına neden olabilir. Bu nedenle yeraltı suyundaki sülfat konsantrasyonu belirlenmeli, riskli bir durum varsa sülfata dayanıklı çimento kullanılmalıdır.

Deneysel çalışmalarda DKK numunelerinin SEM görüntüleri incelenerek kolonun mineralojik ve morfolojik yapısı belirlenmiştir. Hidratasyon ürünlerini ve mikro yapıyı görmek adına SEM görüntüleri yeterli olmuştur. Fakat oluşan hidratasyon bileşiklerinin isimleri ve yüzdelerini imalat parametreleriyle ilişklendirmek için XRD ve XRF analizlerinin yapılması daha kapsayıcı olacaktır.

Derin karıştırma uygulamalarında karıştırma bıçağının geometrisi zeminin parçalanması ve enjeksiyonla kolay karışabilmesi için önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle farklı tip bıçak geometrileri ile deneysel çalışmalara devam edilebilir. Karıştırma bıçağının dönme hızı ise zemin-enjeksiyon karışımın homojenliğini etkileyen önemli bir parametredir. Proje kapsamında bıçakların optimum dönme hızı Türk ve Avrupa standartlarından farklı çıkmıştır. Zemin türü ve özellikleri bu durumda etkili olmuştur. Bu nedenle hem imalat parametreleri hem de enjeksiyon özelliklerinin DKK performansına etkisi farklı zemin ortamlarında araştırılmaya devam edilmelidir. Bu kapsamda düşük plastisiteli kil, killi-kumlu zeminler, tabakalı zeminler, turba ve lös zeminlerde çalışmaların devam etmesi faydalı olacaktır.

Kolon imalatı sırasında kolon bölgesi ile iyileştirilmeyen zemin arasında bir ara yüzey tabakasının oluşturduğu gözlenmiştir. Bu ara yüzey tabakasının kolon yüzeyine çok güçlü

bağlarla tutunduğu ve iyileştirilecek zemine göre çok daha katı bir kıvamda olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ara yüzey tabakasının DKK'nın yük-oturma davranışına olan etkilerinin araştırılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

ACI (American Concrete Institute), 2014, ACI Committee 232.3R-14: Report on high-volume fly ash concrete for structural applications, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, USA.

Alaka, H. A. ve Oyedele, L. O., 2016, High volume fly ash concrete: The practical impact of using superabundant dose of high range water reducer, *Journal of Building Engineering*, 8:81–90.

Al-Tabba, A. and Evans, C. W., 1998, Pilot in situ auger mixing treatment of a contaminated site—Part I: Treatability study, *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 52–59.

ASTM C128-15, 2015, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C150/C150M-17, 2017, Standard specification for portland cement, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C191-13, 2013, Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C219-19a, 2019, Standard terminology relating to hydraulic and other inorganic cements, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C511-13, 2013, Standard specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C618-19, 2019, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D698-12e2, 2012, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C940-16, 2016, Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced-aggregate concrete in the laboratory, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D6910/D6910M-19, 2019, Standard test method for marsh funnel viscosity of construction slurries, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D1140-17, 2017, Standard test methods for determining the amount of material finer than 75-µm (No. 200) sieve in soils by washing, *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 D2216-19, 2019, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D2435/D2435M-11, 2011, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using ıncremental loading, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D2487-11, 2011, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D2850-15, 2015, Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D4318-17e1, 2017, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity ındex of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D5084-10, 2010, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D6910/D6910M-19, 2019, Standard test method for marsh funnel viscosity of construction slurries, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D6913/D6913M-17, 2017, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM D7928-17, 2017, Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Baker, S., 2000, Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay, *Swedish Deep Stabilization Research Centre*, Linköping, Sweden.

Bergado, D. T. and Lorenzo, G. A., 2002, Recent developments of ground improvement in soft Bangkok clay, *Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology*, Saga University, Japan, 17-26.

Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., and Balasubramaniam, A. S., 1996, Soft ground improvement in lowland and other environments, *American Society of Civil Engineers*, New York.

Bergado, D. T. and Lorenzo, G. A., 2005, Economical Mixing Method for Cement Deep Mixing, *Innovations in Grouting & Soil Improvement*, 1-10.

Bhadriraju, V., Puppala, A. J., Madhyannapu, R. S. and Williammee, R., 2007, Laboratory procedure to obtain well-mixed soil binder samples of medium stiff to stiff expansive clayey soil for deep soil mixing simulation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, No. 3, 225-238.

Bilodeau, A. and Malhotra, V. M., 2000, High volume fly ash system, *Concrete Solution for Sustainable Development*, 97(1), 41-48.

Boehm, D. W., 2012, Dry deep and mass mixing–current methods and applications, Proc. Deep soil mixing specialty short course, *4th International conference on Grouting and Deep Mixing*, Marriott New Orleans, LA (USA).

Bruce, D. A., 2000a, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, Report No. FHWA-RD-99-138, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Bruce, D. A., 2000b, Supplemental reference appendices for an introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications*, Volume II: Appendices*, Report No. FHWA-RD-99-144, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Broms, B. B, 1999, Keynote Lecture: Design of lime, lime/cement and cement columns, *International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization,* 125–153, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Broms, B. B., 2003, Deep soil stabilization: Design and construction of lime and lime/cement columns, *Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden.

Burke, G. K., Sehn, A. L., Hussin, J. D., Hull, V. E., and Mann, J. A., 2007, Dry soil mixing at jewfish creek, *Soil Improvement*, *GeoDenver Conference*, 1–11, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Bushra, I. and Robinson, R. G., 2013, Effect of fly ash on cement admixture for a low plasticity marine soil, *Advances in Civil Engineering Materials*, 2(1), 608-621.

Chai, J. C., Miura, N., and Koga, H., 2005, Lateral displacement of ground caused by soilecement column installation, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(5), 623e632.

Chai, J. C., Carter, J. P., Miura, N., and Zhu, H. H., 2009, Improved prediction of lateral deformations due to installation of soil cement columns, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(12), 1836e1845.

Chen, J., Zhang, L., Zhang, J., Zhu, Y. and Wang, J., 2013, Field tests, modification, and application of deep soil mixing method in soft clay, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, (1), 24.

Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M. and Lee, F. H., 2004, Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130 (7), 696–706.

Chittoori, B. C. S., 2008, Clay minerology effects on long term performance of chemically treated expansive clays, *PhD Thesis*, Faculty of the Graduate School, The University of Texas At Arlington.

Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U. and Mengé, P., 2009, Construction Processes, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,* 3006-3135.

CDIT (Coastal Development Institute of Technology), 2002, *The Deep Mixing Method: Principle, Design, and Construction*, Balkema, Lisse, Netherlands.

Collins, K., 1984, Characterization of expansive soil microfabric, *In Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, South Australia, pp. 37- 41.

Cross, D., Stephens, J. and Vollmer, J., 2005, Structural applications of 100 percent fly ash concrete, *In Proceedings of the World of Coal Ash (WOCA)*, pp. 1–9, Springer, Lexington, Kentucky, USA.

Çakır, M., 1999, Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu, *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çetiner, S. I., 2004, Stabilization of expansive soils by Çayırhan fly ash and Desulphogypsum, *Master Thesis*, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of The Middle East Technical University.

Das, B. M., 2005, Fundamentals of geotechnical engineering, *Publisher: Chris Carson*, pp 270-272.

Dasenbrock, D., 2005, Application of deep mixing method to a challenging bridge construction project: the glen road ınterchange," *Innovations in Grouting and Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication 136, 1–10, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Dean, R. B. and Dixon, W. J., 1951, Simplified statistics for small numbers of observations, *Anal. Chem*, 1951, 23 (4), 636–638. DOI: 10.1021/ac60052a025.

Demiral, T. Ö., 2017, Sülfatlı su içerikli kum zeminlerde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının taşıma gücüne sülfatın etkisi, *Yüksek lisans tezi*, Selçuk Üniversitesi.

Deng, Y.-F., Liu, S.-Y., and Hong, Z.-S., 2006, In-situ soil strength after deep mixed columns installation, *GeoCongress 2006*: *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, 253. https://doi.org/10.1061/40803(187)253

Dhir, R. K., McCarthy, M. J., and Paine, K. A., 2002, Use of fly ash to BS EN 450 in structural concrete", *Thomas Telford*.

Diamond, S., and Kinter, E. B., 1965, Mechanism of soil-lime stabilization—An interpretative review, *Highw. Res. Rec*., 92, 83–102.

Dong, J., Hiroi, K., and Nakamura, K., 1996, Experimental study on behavior of composite ground improved by deep mixing method under lateral earth pressure, grouting and deep mixing, *Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 14–17 May, Balkema, Tokyo, pp. 585–590.

Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., Collin, J. G., and Berg, R. B., 2006, Ground Improvement Methods Volume II, Report No. FHWA-NHI-06-020, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.

EuroSoilStab, 2002, Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils—Design Guide: Soft Soil Stabilization, CT97-0351, Project No. BE 96-3177, *IHS BRE Press*, Watford, UK.

Fang, Z., and Yin, J. H., 2007, Responses of excess porewater pressure in soft marine clay around a soil-cement column, *Int. J. Geomech*., 7(3), 167e175.

FHWA (Federal Highway Administration), 2000a, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, *Prepared by Geosystems, L.P., Document No. FHWA-RD-99-138*, March, 143 p.

FHWA (Federal Highway Administration), 2000b, Supplemental reference appendices for an introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, *Prepared by Geosystems, L.P., Document No. FHWA-RD-99-144*, December, 295 p.

FHWA (Federal Highway Administration), 2001, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications: Verification and properties of treated soil, *Prepared by Geosystems, L.P., Document No. FHWA-RD-99-167*, October, 455 p.

FHWA (Federal Highway Administration), 2013, Federal Highway Administration Design Manual: Deep mixing for embankment and foundation support. *Report No. FHWA-HRT-13-046, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Filz, G. M., Hodges, D. E., Weatherby, D. E., and Marr, W. A., 2005, Standardized definitions and laboratory procedures for soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing, *Innovations in Grouting and Soil Improvement*, GSP No. 136 (CD-ROM), ASCE, Reston, VA. 13 p.

Filz, G., Adams, T., Navin, M., and Templeton, A. E., 2012, Design of deep mixing for support of levees and floodwalls," *Grouting and Deep Mixing: 4th International* 216 *Conference on Grouting and Deep Mixing*, Geotechnical Special Publication 228, 89–133, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Grisolia, M., Kitazume, M., Leder, E., Marzano, I.P., and Morikawa, Y., 2012, Laboratory study on the applicability of molding procedures for the preparation of cement stabilized specimens, *In: Proceedings of the IS-GI Brussels 2012*, Belgium.

Grisolia, M., Leder, E., and Marzano, I. P., 2013, Standardization of the molding procedures for stabilized soil specimens as used for QC/QA in deep mixing application, *In: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Hassan, K. E., Cabrera, J. G., and Maliehe, R. S., 2000, The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, 22(4), 267-271.

Hayashi, H., Nishikawa, J., Ohishi, K., and Terashi, M., 2003, Field observation of long-term strength of cement treated soil, *Grouting and Ground Treatment,* GSP No. 120, 598-609.

Herrin, M., and Mitchell, H., 1961, Lime-soil mixture, *Bulletin 304*, *Highway Research Board*, National Research Council, Washington, D.C.

Herzog, A. and Mitchell, J. K., 1963, Reaction accompanying stabilization of clay with cement, *Highway Research Board Record*, No. 36, 1963, pp.146-171

Hodges, D. K., Filz, G. M., and Weatherby, D. E., 2008, Laboratory mixing, curing, and strength testing of soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing, *CGPR Report No. 48, Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research,* Blacksburg, VA.

Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagara, T. S., 2003, Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4): 439-444.

Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T. S., 2005, Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 187-192. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:2(187)

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y., 2009, Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay, *Soils and Foundations*, 49(1), 85–98. doi:10.3208/sandf.49.85

Huang, C. H., Lin, S. K., Chang, C. S. and Chen, H. J., 2013, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 71–78.

Ignjatovic, I., Sas, Z., Dragas, J. Somlai, J. and Kovacs, T., 2017, Radiological and material characterization of high volume fly ash concrete, *Journal of Environmental Radioactivity*, 168:38-45.

Ino, K., Udagawa, I., Iwabata, K., Takakusagi, Y., Kubota, M,, Arai, K. et al., 2011, Heterogeneous nucleation of protein crystals on fluorinated layered silicate, *PLoS ONE*, 6(7), e22582. DOI: 10.1371/journal.pone.0022582

Jacobson, J., 2002, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *MS Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 83 pages.

Jacobson, J. R., Filz, G. M., and Mitchell, J. K., 2003, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *Virginia Transportation Research Council*, Charlottesville, VA.

Jacobson, J. R., Filz, G. M., and Mitchell, J. K., 2005, Factors affecting strength of lime-cement columns based on a laboratory study of three organic soils, *Proc. Int. Conf. Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing'05*, SD Report 13 (CD-ROM), Swedish Geotechnical Institute, Linkoping, 87-94.

Japonya Geoteknik Birliği, 2000, Practice for making and curing stabilized soil specimens without compaction, *JGS T 0821-2000, Japanese Geotechnical Society*, Tokyo, Japan.

Kim, J.-E., Park, W.-S., and Jang, Y.-I., 2016, Mechanical properties of energy efficient concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of flyash, blast furnace slag, and silica fume, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 97–108.

Kitazume, M., Grisolia, M., Leder, E., Marzano, I. P., Correia, A. A. S., Oliveira, P. J. V., Ahnberg, H. and Andersson, M., 2015, Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method, *Soils and Foundations,* 55(4), 761–777. doi:10.1016/j.sandf.2015.06.009

Kosmatka, S. H., Voigt, G. F., and Taylor, P., 2006, Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual, *Center for Transportation Research and Education Iowa State University*, p.69-104

Lambrechts, J. R., Ganse, M. A., and Layhee, C. A., 2003, Soil mixing to stabilize organic clay for I-95 widening, Alexandria, VA, *Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the 3rd International Conference,* New Orleans, 575-585.

Lambrechts, J. R., 2005, Design guidelines manual for support of embankments on soft soils by deep mixing, *National Deep Mixing Program*, Boston, MA.

Larsson, S., 2005a, State of Practice Report – Execution, monitoring and quality control". *Proc. International Conference on Deep Mixing-Recent Advances and Best practice*, Stockholm, Sweden.

Larsson, S., Dahlström, M., and Nilsson, B., 2005b, Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 9(1), 1–15.

Larsson, S., and Kosche, M., 2005, A laboratory study on the transition zone around lime-cement columns, *Proc., Int. Conf. on Deep Mixing, Best Practice and Recent Advances*, Vol. 1, Swedish Geotechnical Institute, Linkoping, 111–118.

Lee, F. H., Lee, C. H. and Dasari G. R., 2006, Centrifuge modelling of wet deep mixing processes in soft clays, *Géotechnique*, 56(10): 677-691.

Lee, F. H., Lee, C. H., and Dasari, G. R., 2008, Centrifuge study on uniformity of wet deep mixing, *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, 8(1): 1-20.

Lee, T., Jenevein, D., and Fong, M., 2012, Unique design and quality control of cement deep soil mixing for water cutoff: BART Warm Springs Extension (WSX) *Project, Fremont, CA" GeoCongress 2012*, 3583–3592.

Little, D. N., 1995, Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime." *National Lime Association*, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.

Liu, S.-Y., Du, Y.-J., Yi, Y.-L., and Puppala, A. J., 2012, Field Investigations on Performance of T-Shaped Deep Mixed Soil Cement Column–Supported Embankments over Soft Ground*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* 138(6), 718–727. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000625

Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T., 2003, New Consolidation Equation for Soil-Cement Pile Improved Ground, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 265–275.

Lorenzo, G. A. and 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. and Bergado, D. T., 2006, Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 161–174. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:2(161).

Madhyannapu, R. S., Puppala, A. J., Nazarian, S., and Deren Yuan., 2010, Quality assessment and quality control of deep soil mixing construction for stabilizing expansive subsoils, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 119–128. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000188

Maher, A., Douglas, W. S., Yang, D., Jafari, F., and Schaefer, V. R., 2007, Cement deep soil mixing (CDSM) for solidification of soft estuarine sediments", *Marine Georesources & Geotechnology*, 25(3/4), 221–235. https://doi.org/10.1080/10641190701699319

Mala, K., Mullick, A. K., Jain, K. K. and Singh, P. K., 2013, Effect of relative levels of mineral admixtures on strength of concrete with ternary cement blend, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 7, no. 3, pp. 239–249.

Malhotra, V. M., 1990, Durability of concrete incorporating highvolume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash, *Cement and Concrete Composites*, vol. 12, no. 4, pp. 271–277.

Mallela, J., Von Quintus, H., Kelly, P. E., Smith, L., 2004, Consideration of Lime Stabilized Layer, *Mechanistic-Emprical Pavement Design*, National Lime Assosiciation, Arlington, 38p. Virginia.

Mamlouk, M. S. and Zaniewski, J. P., 2011, Materials for Civil and Construction Engineers, 3rd Ed., *Upper Saddle River: Prentice Hall*.

Marzano, I. P., Leder, E., Grisolia, M., and Danisi, C., 2012, Laboratory study on the molding techniques for QC/QA process of a Deep Mixing work. *In: Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Near East University, Nicosia, North Cyprus. ISBN 975-8359-28-2.

Masike, N., 2019, Silis dumanı ilaveli derin karıştırma kolonlarının üç eksenli basınç dayanımı ve konsolidasyon özelliklerinin araştırılması, *Yüksek lisans tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi.

Matsuo, T., Nisibayashi, K. and Hosoya, Y., 1996, Studies on soil improvement adjusted at low compressive strength in Deep Mixing Method, *Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 14-17 May 1996, Tokyo, pp. 807-824. Balkema. 1996.

Matsuo, O., 2002, Determination of design parameters for deep mixing, *Proc. Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing*, Coastal Development Institute of Technology, Tokyo, 75-79.

Mayne, P. W., Christopher, B. R., and DeJong, J., 2001, Subsurface Investigations, *Report No. FHWA-NHI-01-031, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

McCarthy, M. J. and Dhir, R. K., 2005, Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction, *Fuel*, 84, 1423-1432.

McGinn, A. J. and O'Rourke, T. D., 2003, Performance of deep mixing methods at Fort Point Channel. *Report to Massachusetts Turnpike Authority, Federal Highway Administration, and Bechtel/Parsons Brinckerhoff*, Cornell University.

Medhani, R., 1982, Stabilization of Ponca City Shale, *Ph. D. Dissertation*, August 1982.

Meyersohn, D., 2007, Use of Soil-Cement Piles for Bridge Support, *Presented at the GeoDenver Conference*, American Society of Civil Engineers, Denver, CO. 30.

Mirza, J., Mirza, M. S., Roy, V. and Saleh, K., 2002, Basic rheological and mechanical properties of high-volume fly ash grouts, *Constr. Build. Mater*, 16(6):353–363.

Mitchell, J. K., 1981, Soil improvement—state of the art report" *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* 509-565.

Mitchell, J. K., 1993, Fundamentals o f Soil Behavior, *John Wiley & Sons*, New York.

Mitchell, J. K., and Soga, K., 2005, Fundamentals of soil behavior, 3rd Edition, *John Wiley and Sons Inc*., Hoboken, New Jersey.

Miura, N. and Nishida, K., 1998, Energy considerations on soft Bangkok clay improvement by dry jet mixing (DJM) method, *Proceedings of the Geotechnical Engineering Conference*, Bangkok, Thailand, 1, 132-140.

Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T. S., 2002, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*. Japanese Geotechnical Society. 41(5): 33-45.

Mizuno, Y., Kamura, K., and Matumoto, J., 1988, Experiment on the Improvement of Sandy Soil Using the Deep Mixing Method, *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of JSSMFE*, 2301–2304, Tokyo, Japan (in Japanese).

Mullins, G. and Gunaratne, M., 2015, Soil mixing design methods and construction techniques for use in high organic soils, *Rapor No: BDV25-977-14*, University of South Florida.

Mohammed, A., Arslan, F., Annayev, M., Toka, E. B., Yenginar, Y. and Olgun, M., 2018, Using of fly ash into grouting mixture, *International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER-2018)*, Konya, TURKEY.

Nagaraj, T. S., Srinivasa Murthy, B. R., and Vatsala, A., 1990, Discussion on 'Change in pore size distribution due to consolidation of clays,' by Griffiths Joshi." *Geotechnique*, 40(2), 303–305.

Nagaraj, T. S., and Miura, N., 2001, Soft clay behaviour–Analysis and assessment, *AA Balkema*, Rotterdam, The Netherlands.

Naik, T. R., Ramme, B.W. and Tews, J. H., 1994, Use of high volumes of Class C and Class F fly ash in concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 16, no. 1, pp. 12–20.

Navin, M. P. and Filz, G. M., 2006, Simplified reliability-based procedures for design and construction quality assurance of foundations improved by the deep mixing method, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Noori, M. A., 2019, Katkı içerikli derin karıştırma kolonları performans özelliklerinin model deneylerle araştırılması, *Yüksek lisans tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi.

O'Rourke, T. D. and McGinn, A. J., 2004, Case history of deep mixing soil stabilization for Boston Central Artery, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 77-136. doi:10.1061/40744(154)3

Our, C., Wu, T., and Hsieh, H., 1996, Analysis of deep excavation with column type of ground ımprovement in soft clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, *122*(9), 709–716.

Paine, K. A., Zheng, L. ve Dhir, R. K., 2005, Experimental study and modeling of heat evolution of blended cements, *Advances in Cement Research*, 17, 121-132.

Parmantier, D. M., Fassett, R. A., and Porbaha, A., 2005, Reinforced deep mixed columns for a bridge ramp foundation in the San Francisco Bay Area, *Presented at the International Conference on Deep Mixing*, Swedish Geotechnical Institute, Stockholm Sweden.

Pooranampillai, S., Parmantier, D., Dawson, K., and Shin, S., 2012, A case history on the design, construction, and field quality control of cement deep soil mixing, *Presented at the 37th Annual Conference on Deep Foundations*, Houston, TX.

Porbaha, A., Shibuya, S. and Kishida, T., 2000, State of the art in deep mixing technology: Part III: geomaterial characterization, *Ground Improvement*, 3, 91-110.

Porbaha, A., Raybaut, J.L. and Nicholson, P., 2001, State of the art in construction aspects of deep mixing technology, *Ground Improvement*, 5(3): 123-140.

Porbaha, A., 2002, State of the art in quality assessment of deep mixing technology, *Ground Improvement*, 6(3): 91-110.

Porbaha, A., Weatherby, D., Macnab, A., Lambrechts, J., Burke, G., Yang, D., and Puppala, A.J., 2005, Regional Report: North American practice of deep mixing technology, *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*, R47–R73, Swedish Deep Stabilization Research Centre, Stockholm, Sweden.

Push, R., 1979, Unfrozen water as a function of clay microstructure, *Engineering Geology*, Vol. 13, pp. 157-162.

Pye, N., O'Brien, A., Essler, R., and Adams, D., 2012, Deep dry soil mixing to stabilize a live railway embankment across Thrandeston Bog, *Geotechnical Special Publication*, (228 GSP), 543–553.

Rafalko, S. D., Filz, G. M., Brandon, T. L., and Mitchell, J. K., 2008, Rapid Chemical Stabilization of Soft Clay Soils, *Transportation Research Record 2026*, 39–46, Transportation Research Board, Washington, DC.

Rajasekaran, G., and Rao, S. N., 1997, Lime stabilization technique for the improvement of marine clay, *Soils Found.*, 37(2), 97–104.

Rogers, C. D. F., Glendinning, S., and Troughton, V. M., 2000, The use of additives to enhance the performance of lime piles, *Proc. GIGS 2000*, Helsinki, 127–134.

Rowe, R. K., and Booker, J. R., 1991, Pollutant migration through a liner underlain by fractured soil, *J. Geotech. Engrg.*, 118(7), 1031–1046.

Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., and Zettler, T. E., 2002, Evaluation of soil and rock properties, Geotechnical Engineering Circular No. 5, *Report No. FHWA-IF-02-034, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Samtani, N. C. and Nowatzki, E. A., 2006a, Soils and Foundations Reference Manual Volume 1, *Report No. FHWA-NHI-06-088, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Samtani, N. C. and Nowatzki, E. A., 2006b, Soils and Foundations Reference Manual Volume 2, *Report No. FHWA-NHI-06-089, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Sen, K. K. and Evans, A., 2010, Innovative construction techniques used at North Shore construction project," *The Journal of the Deep Foundations Institute*, *4*(2), 20–30.

Sha, F., Li, S., Liu, R., Li, Z. and Zhang, Q., 2018, Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass, *Construction and Building Materials*, 161: 282–291.

Sharp, J. H., Gartner, E. M. and Macphee, D. E., 2010, Novel cement systems (sustainability), *Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium*, *Adv. Cem. Res.*, 22, 195–202.

Shen, S. L., and Miura, N., 1999, Soil fracturing the surrounding clay during deep mixing column installation, *Soils Found.*, 39(5), 13–22.

Shen, S. L., Miura, N. and Koga, H., 2003a, Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation, *Can. Geotech. J.*, 40(2), 293e307.

Shen, S. L., Han, J., Huang, X. C. and Du, S. J., 2003b, Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns, *Marine Georesources & Geotechnology.*, 21_3_, 15–35.

Shen, S. L., Miura, N., Han, J. and Koga, H., 2003c, Evaluation of property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns, *Grouting and ground treatment*, Geotechnical Special Publication No. 120, L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle, eds., Vol. 1, ASCE, Reston, Va., 634–645.

Shen, S. L., Han, J. and Miura, N., 2004, Laboratory evaluation of mixing energy consumption and its influence on soil-cement strength, *Transp. Res. Rec., Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, DC, pp. 23–30.

Shen, S. L., Han, J. and Hong, Z. S., 2005, Installation effects on properties of surrounding clays by different deep mixing methods, *Geotechnical Special Publication No. 136, ASCE*, CD ROM Proceedings, Austin, TX.

Shen, S. L., Han, J. and Du, Y. J., 2008, Deep mixing induced property changes in surrounding sensitive marine clays, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134(6), 845e854.

Shiells, D. P., Pelnik, T. W. and Filz, G. M., 2003, Deep mixing: An owner's perspective, *Grouting and Ground Treatment, Proc. 3rd Int. Conf.,* ASCE, Reston, VA: 489-500.

Siddique, R., 2004, Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 3, pp. 487–493.

Skempton, A. W., 1948, A possible relationship between true cohesion and the mineralogy of clays. *Proc. 2nd Int. Conf. S.M.*, Vol. 7, p. 45.

Skempton, A. W., 1953, Soil mechanics in relation to geology, Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 29, 33-62, https://doi.org/10.1144/pygs.29.1.33

Skempton, A. W., 1954, The pore water coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, 143-147.

Tabet, W. E., 2015, Characterization of cement-stabilized clay using experimental and analytical techniques, *PhD Thesis*, University of Oklahoma.

Tan, O. ve İyisan, R., 1996, Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu, *ZMTM 6. Ulusal Kongresi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 417-426.

Tan, Ö. ve Zaimoğlu, A. Ş., 2004, Çimento enjeksiyonlarında kullanılan katkı malzemelerinin reolojik özelliklere etkilerinin araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2): 275-281.

Tan, Ö., Yıldız M. ve Olgun. M., 2018, Selçuk Üniversitesi Sanayi Kampüsü İnşaat Alanına Ait Geoteknik Değerlendirme Raporu, *Selçuk Üniversitesi*, Haziran, 2018, Konya.

Tan, Ö., Yenginar, Y. and Olgun, M., 2018, Effects of fly ash and super plasticizer on strength of soil-cement mixing materials, *International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER-2018)*, Konya, TURKEY.

Tan, T.-S., Goh, T.-L. and Yong, K.-Y., 2002, Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing, *Geotechnical Testing Journal*, 25 (4), 422-433.

Taki, O., and Yang, D. S., 1990, Soil-cement mixed wall technique, ASCE, *Geotechnical Engineering Congress*, Denver, CO. pp 298-309.

Tatsuoka, F., Kohata, Y., Uchida, K., and Imai, K., 1996, Deformation and strength characteristics of cement-treated soils in Trans-Tokyo Bay Highway Project, *Grouting and Deep Mixing: Proceedings of IS-Tokyo 96 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 453–459, Tokyo, Japan.

Tekin, E. ve Mollamahmutoğlu, M., 2010, Çok ince taneli çimento (Rheocem 900) enjeksiyonu ile faklı gradasyona sahip kumların enjekte edilebilirliği, *Gazi Ün. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 25(3):533-539.

Terashi, M., 1983, Problems and research orientation of the deep mixing method," *Proceedings of the Journal of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tsuchi To Kiso, 31(8), 75–83.

Terashi, M., 1997, Deep mixing method—brief state of the art, *Presented at the 17th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Germany.

Terashi, M., 2003, The state of practice in deep mixing methods, *Grouting and Ground Treatment*: *Proceedings of the Third International Conference*, Geotechnical Special Publication 120, 25–49, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Terashi, M. and Tanaka, H., 1983, Fundamental properties of lime and cement treated soil (3rd Report), *Rep. Port Harb. Res. Inst*. 22 (1), 69–96.

Terrei, R., Epps J., Barenberg, E., Mitchell, J. and Thompson M., 1984, Soil stabilization in pavement structures-A user's manual, Vol. 2, *Moisture design consideration, Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Thomas, M. D. A., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S. and Cail, K., 1999, Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1207-1214.

Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., 2001, Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri, *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.

Topolnicki, M., 2004, In Situ Soil Mixing, Ground Improvement, 3rd Ed., *CRC Press*, New York, NY.

Topolnicki, M., 2009, Design and execution practice of wet soil mixing in Poland, *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, 19-21 May, pp 195-202.

Tosun, K., 2007, Farklı çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri, *Doktora tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi.

Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonun dayanım özellikleri, *Fırat Ün. Fen ve Müh. Dergisi*, 18(4):513-520.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A., 2009, Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Rapor No: Y03.03*, Ankara.

Türköz, M., 2009, Sıkıştırılmış şişen killerin mikroyapısal değişiminde şişme-büzülme çevrimin etkisi, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, Vol: XXII, No:1.

TS EN 197-1, 2002, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara*.

TS EN 450, 1998, Uçucu kül-Betonda kullanılan-Tarifler, özellikler ve kalite control, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.*

TS 639, 1975, Uçucu küller-Çimentoda kullanılan, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 14679, 2006, Özel jeoteknik uygulamalar-derin karıştırma, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.*

Vargas, J. A., 2007, A designer's view of fly ash concrete, *Concr. Int. ACI*, 29 (2), 43–46.

Wasti, Y., 1987, Liquid and plastic limits as determined from the fall cone and the casagrande methods, *Geotechnical Testing Journal*, 10, no. 1: 26-30. https://doi.org/10.1520/GTJ10135J

Yamadera, A., 1999, Microstructural study of geotechnical characteristics of marine clays, *PhD dissertation*, Saga University, Saga, Japan.

Yang, D. S., Scheibel, L. L., Lobedan, F. and Nagata, C., 2001, Oakland airport roadway Project, *Soil Mixing Specialty Seminar, 26th DFI Annual Conference,* St. Louis, Missouri: 55-71.

Yenginar, Y. and Olgun, M., 2017, Triaxial compression test results on DMC manufactured by fly ash and plasticizer in silty soils, *3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering*, Izmir, Turkey, 535-542.

Yenginar, Y. and Olgun, M., 2017, Effect of fly ash and super plasticizer on permeability of soil-cement mixing materials, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'17)*, Konya, Turkey, 723-727.

Yenginar, Y., Olgun, M. ve Tan, Ö., 2017, Siltli zeminde oluşturulan derin karıştırma kolonlarının dayanım özelliklerinin araştırılması, *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 535-546.

Yenginar, Y. and Olgun, M., 2019, Optimizing construction parameters of DMC in high plasticity soils, *8th Geotechnical Symposium*, Istanbul, TURKEY.

Yenginar, Y. and Olgun, M., 2019, Triaxial compression test results on DMC samples prepared by using different soil types, *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 6, 16-22. https://doi.org/10.15377/2409-5710.2019.06.3

Yılmaz, F., 2006, Zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı, *3rd International Symposium on Environment an Morality*, Alanya, Türkiye, 1175-1181.

Young, J. F., 1981, Hydration of portland cement, *J. Educ. Modules Mater. Sci. Eng*., 3(3), 403-28.

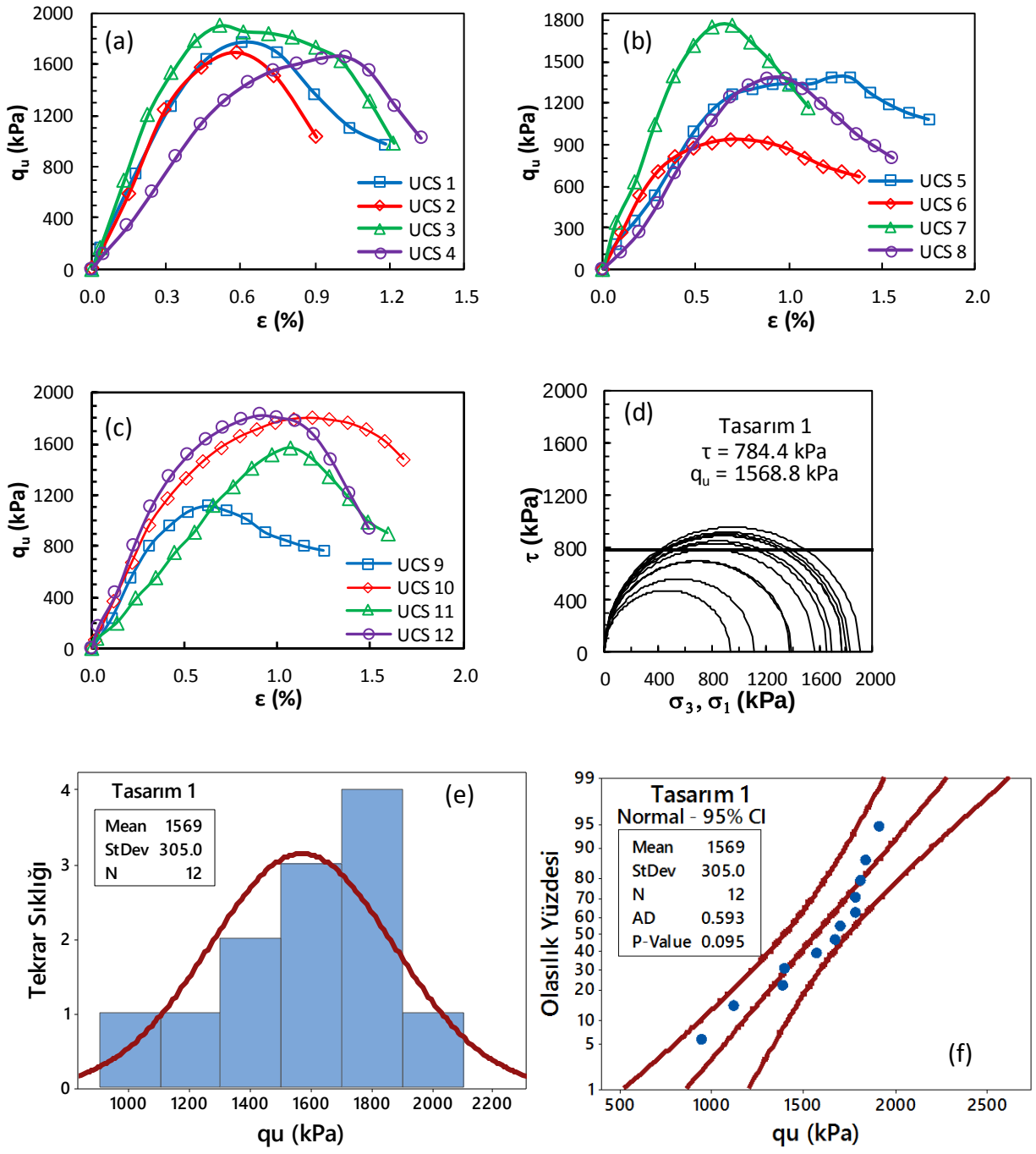
Yoo, S., Choi, Y. C. and Choi, W., 2017, Compression behavior of confined columns with high-volume fly ash concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2017, 1-11.

Yamata, J., 1985, Easy understanding knowledge of cement and concrete, 8th edition, *Carcima Book Co.,* Tokyo, 1985.

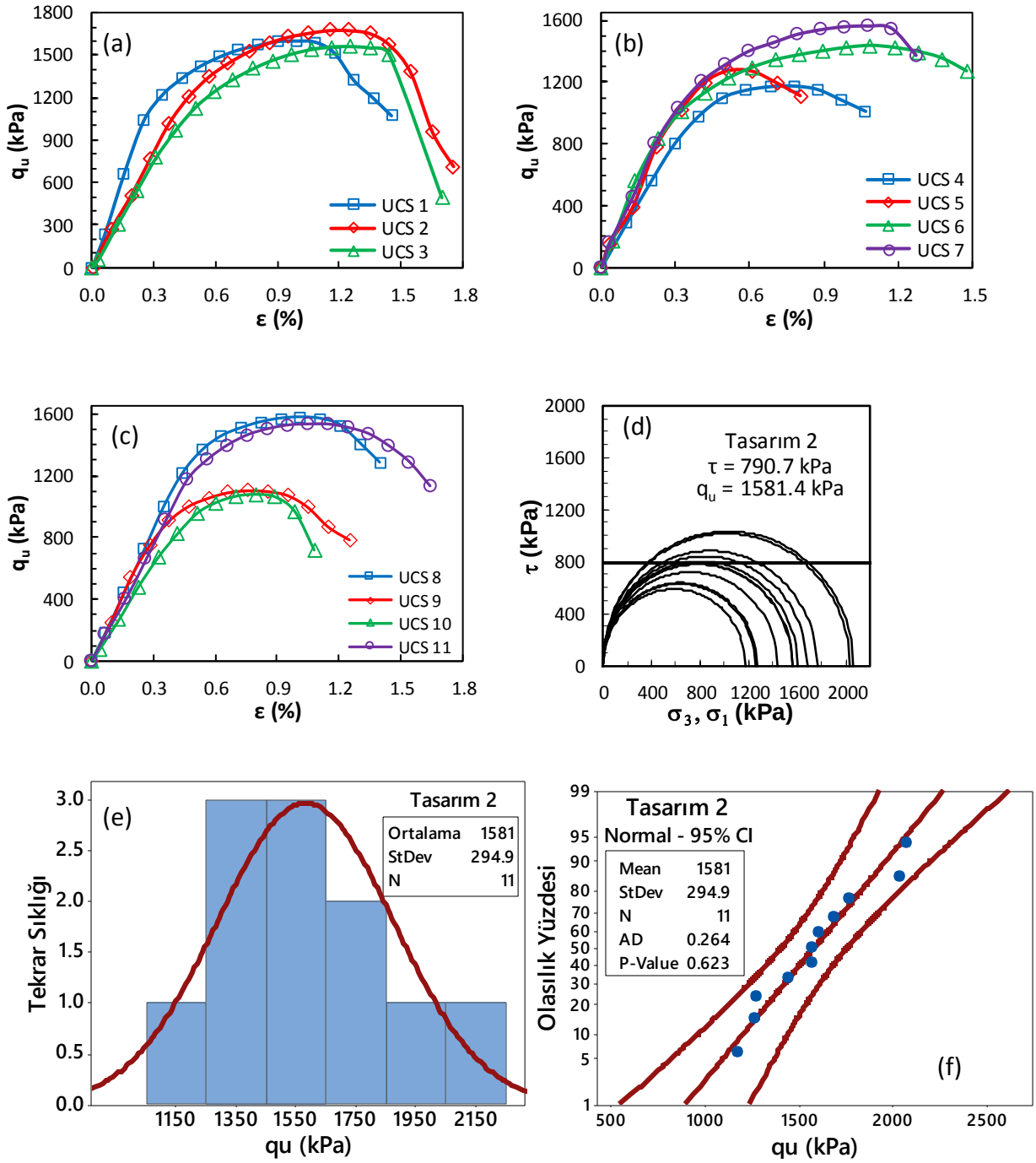
Zhang, Y. M., Sun, W. and Yan, H. D., 2000, Hydration of high-volume fly ash cement pastes, *Cement Concr. Compos*., 22(6):445–452.

EKLER

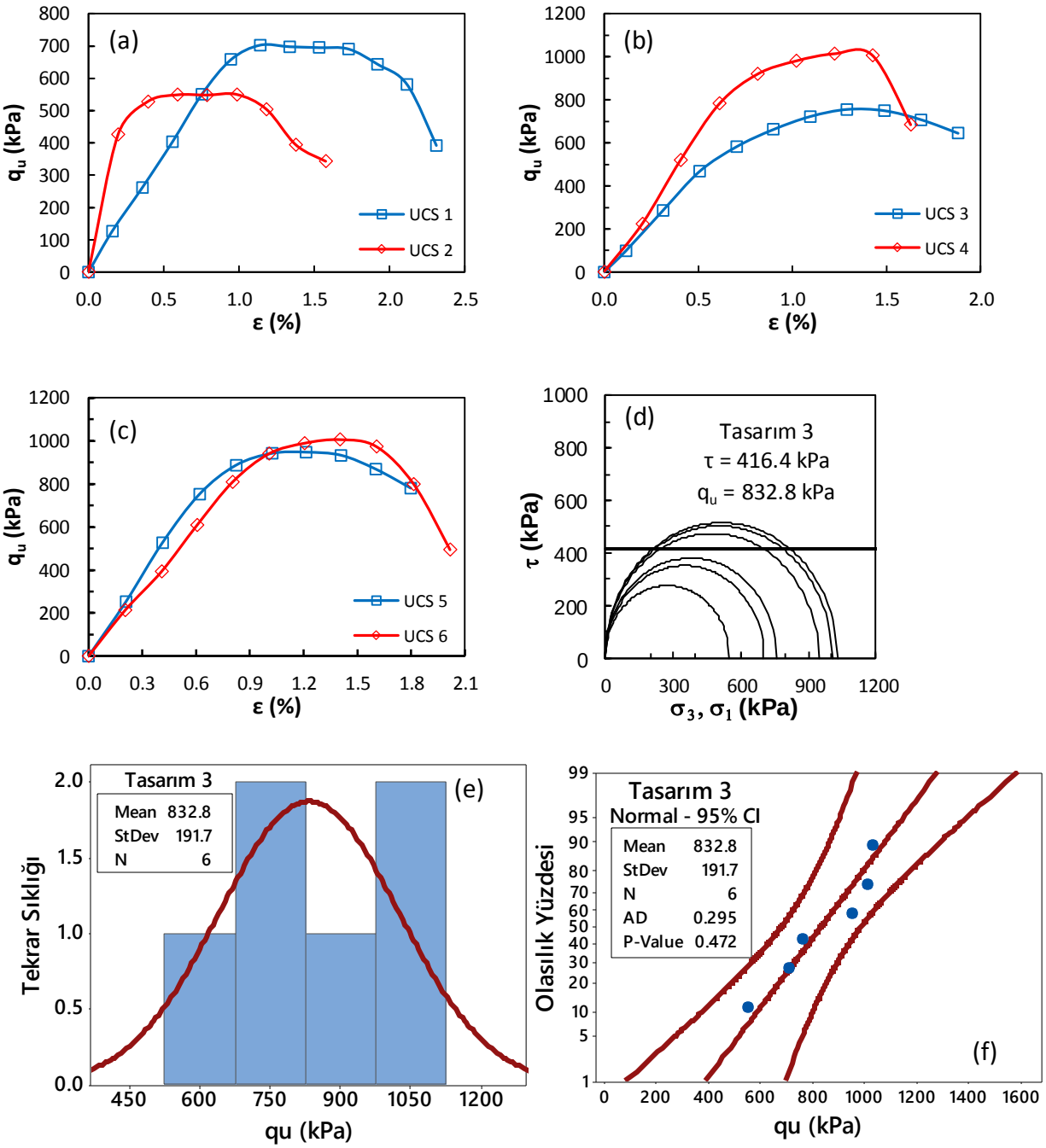
EK-1: Sistem (İmalat) Parametrelerinin Araştırılması



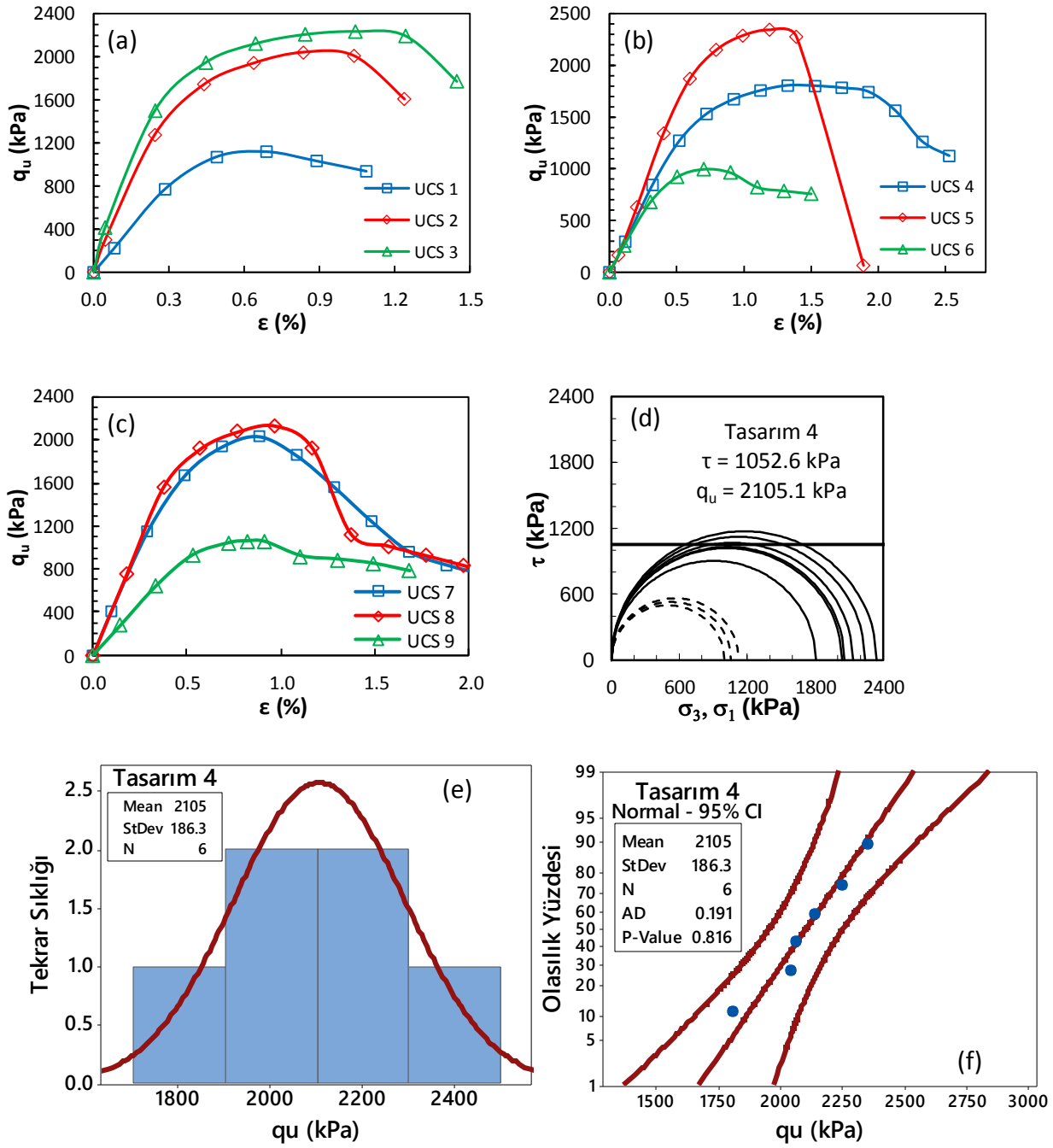
Şekil Ek 1.1. SP-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



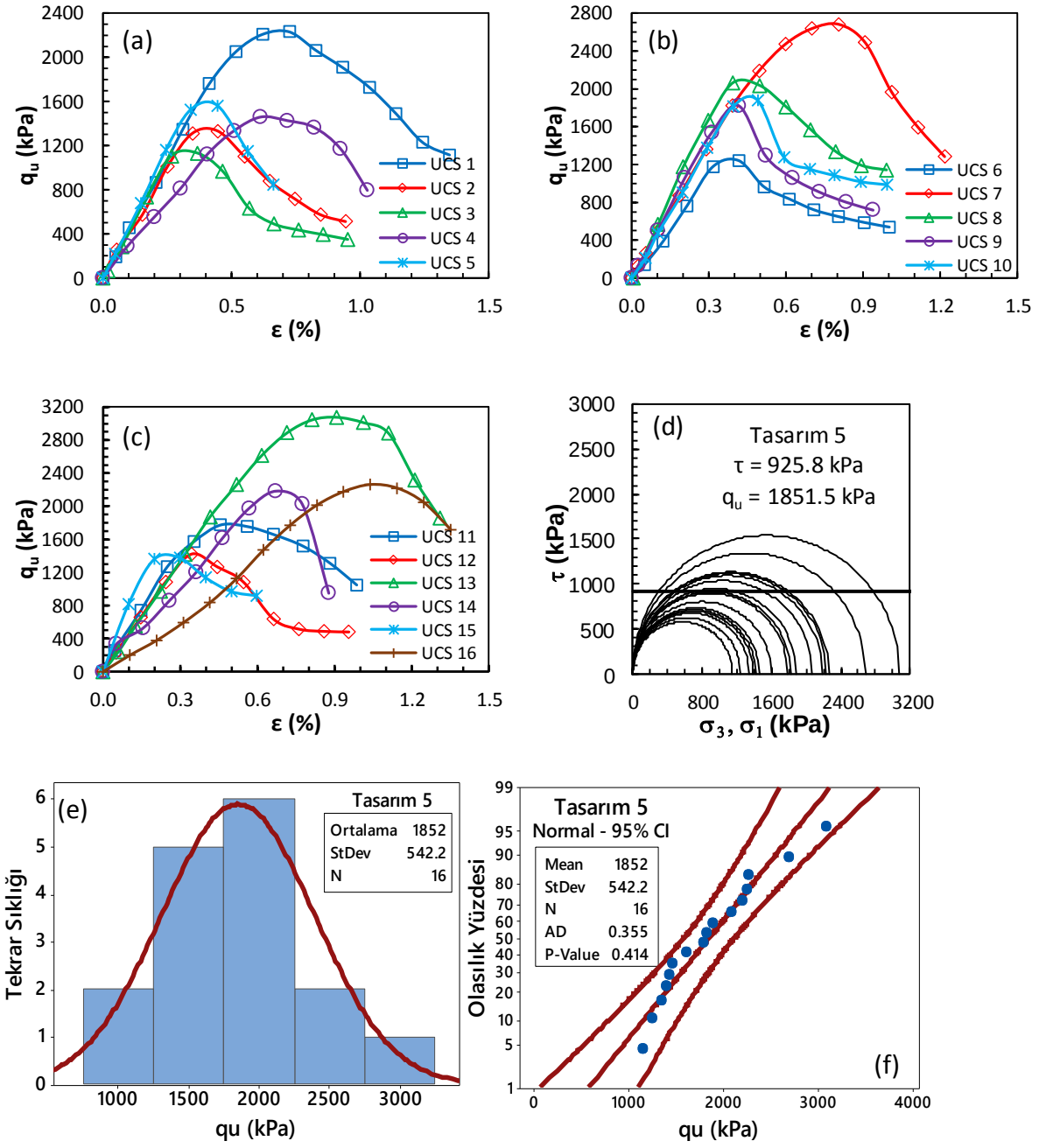
Şekil Ek 1.2. SP-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



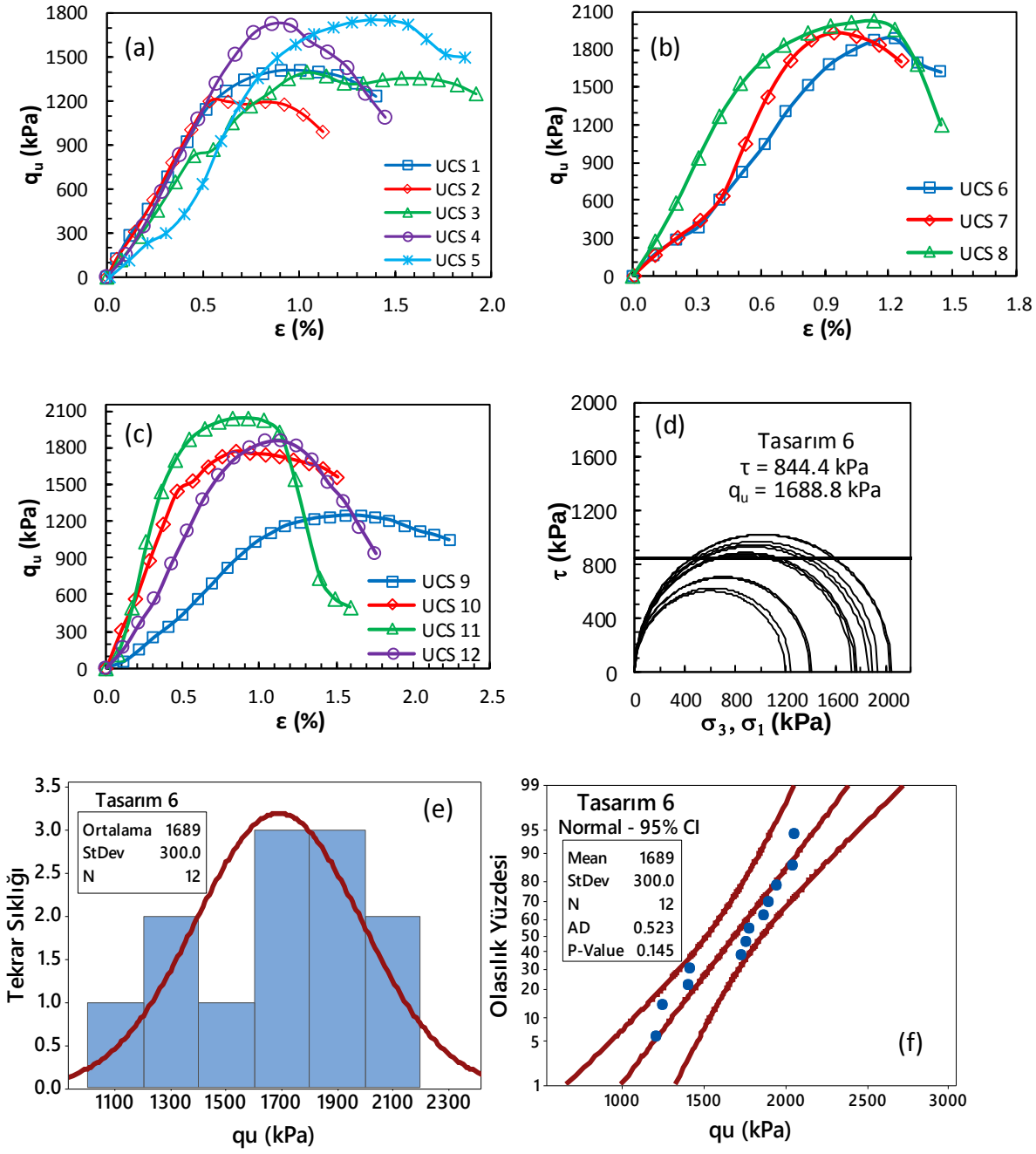
Şekil Ek 1.3. SP-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



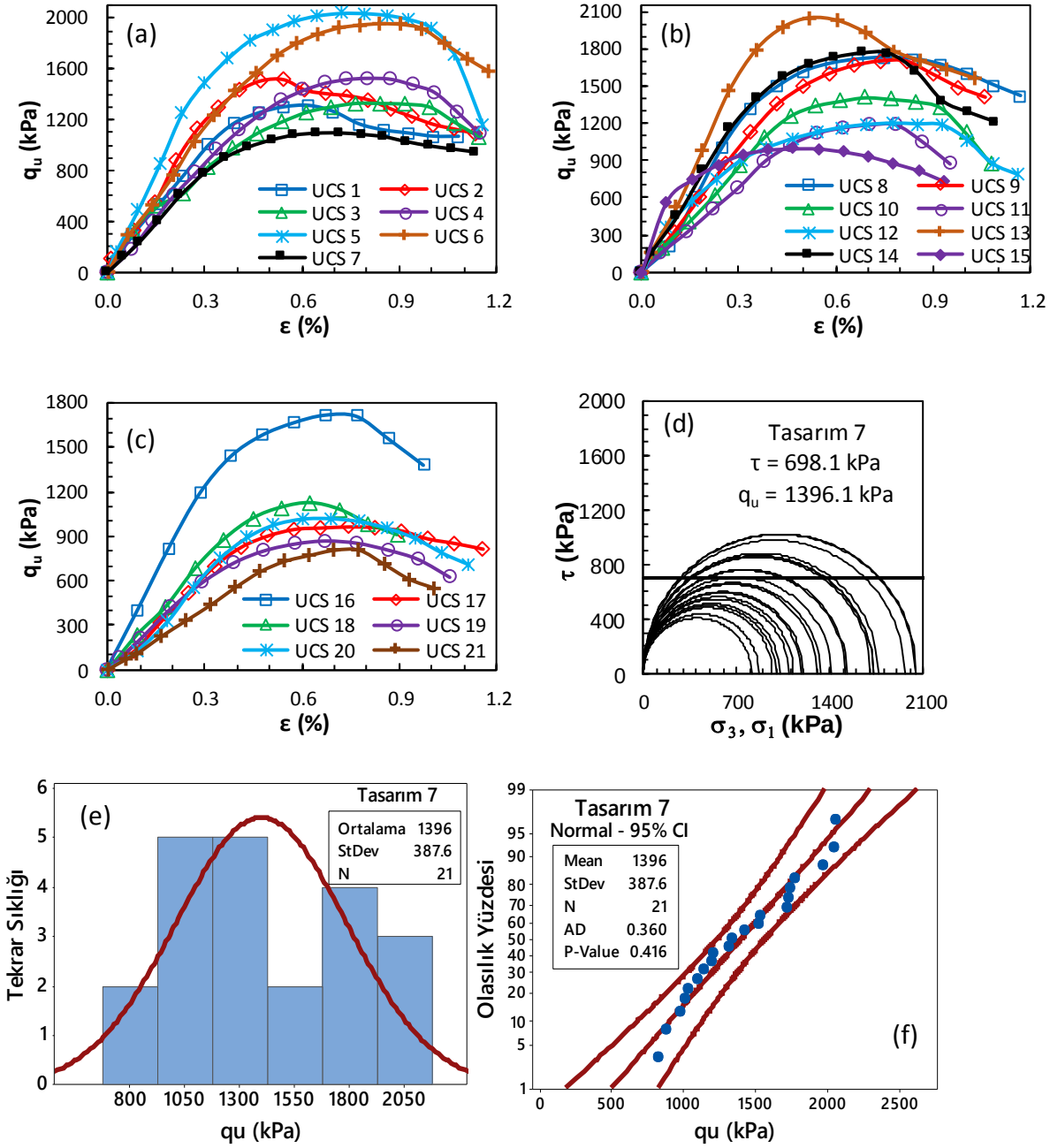
Şekil Ek 1.4. SP-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Not: UCS 1, UCS 6 ve UCS 9 deneyleri ortalamaya katılmamıştır)
(Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



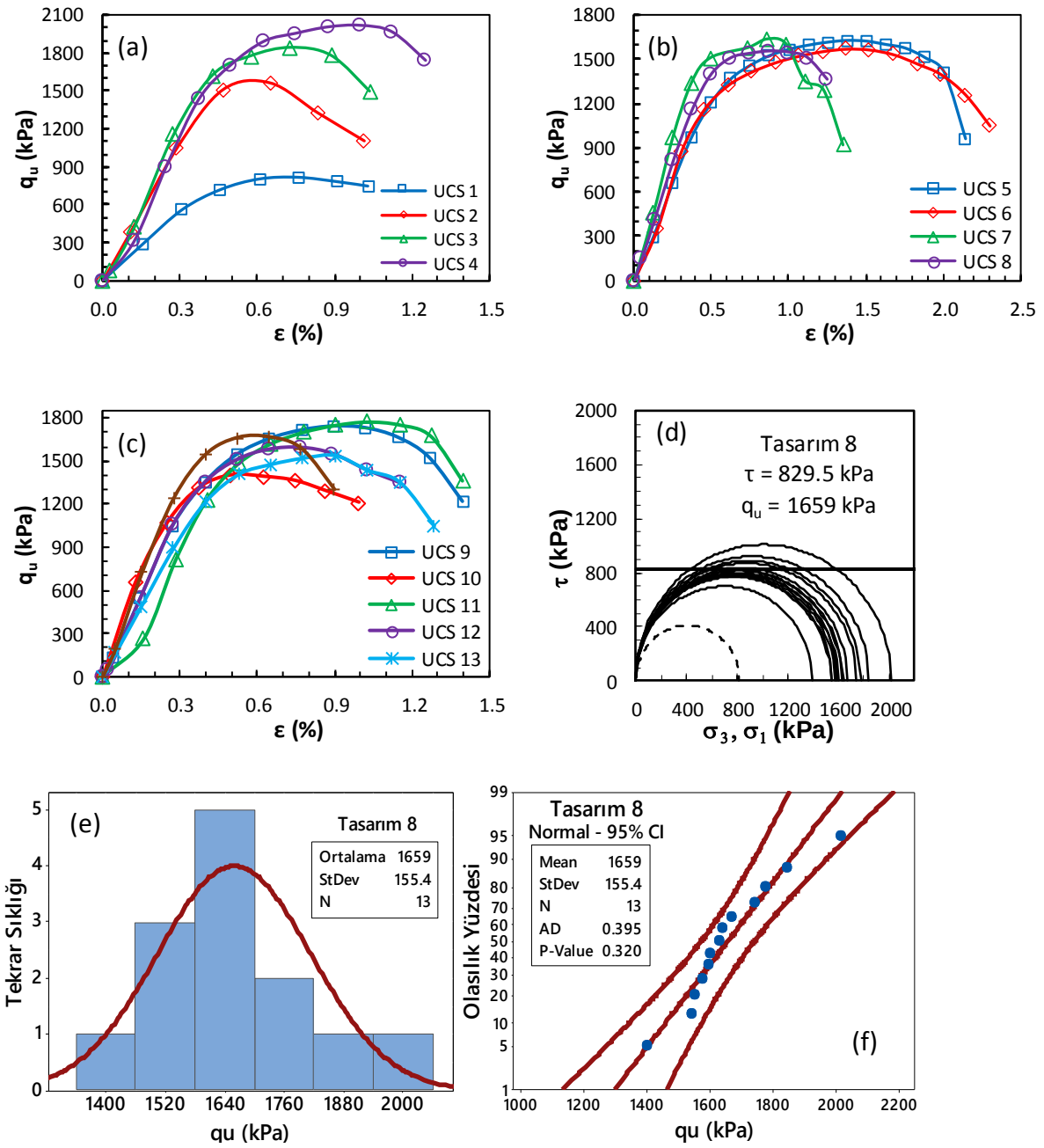
Şekil Ek 1.5. SP-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



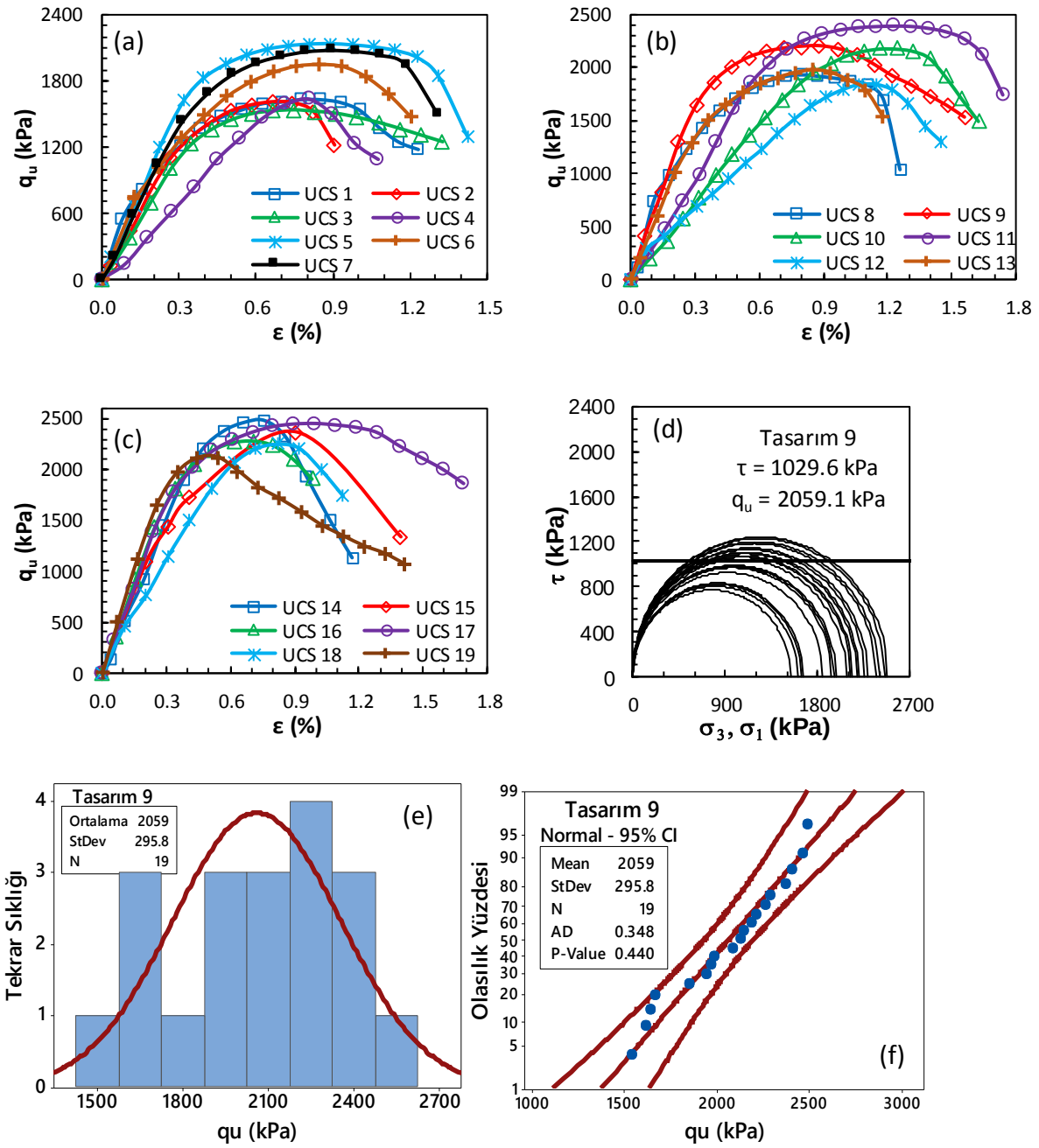
Şekil Ek 1.6. SP-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



Şekil Ek 1.7. SP-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



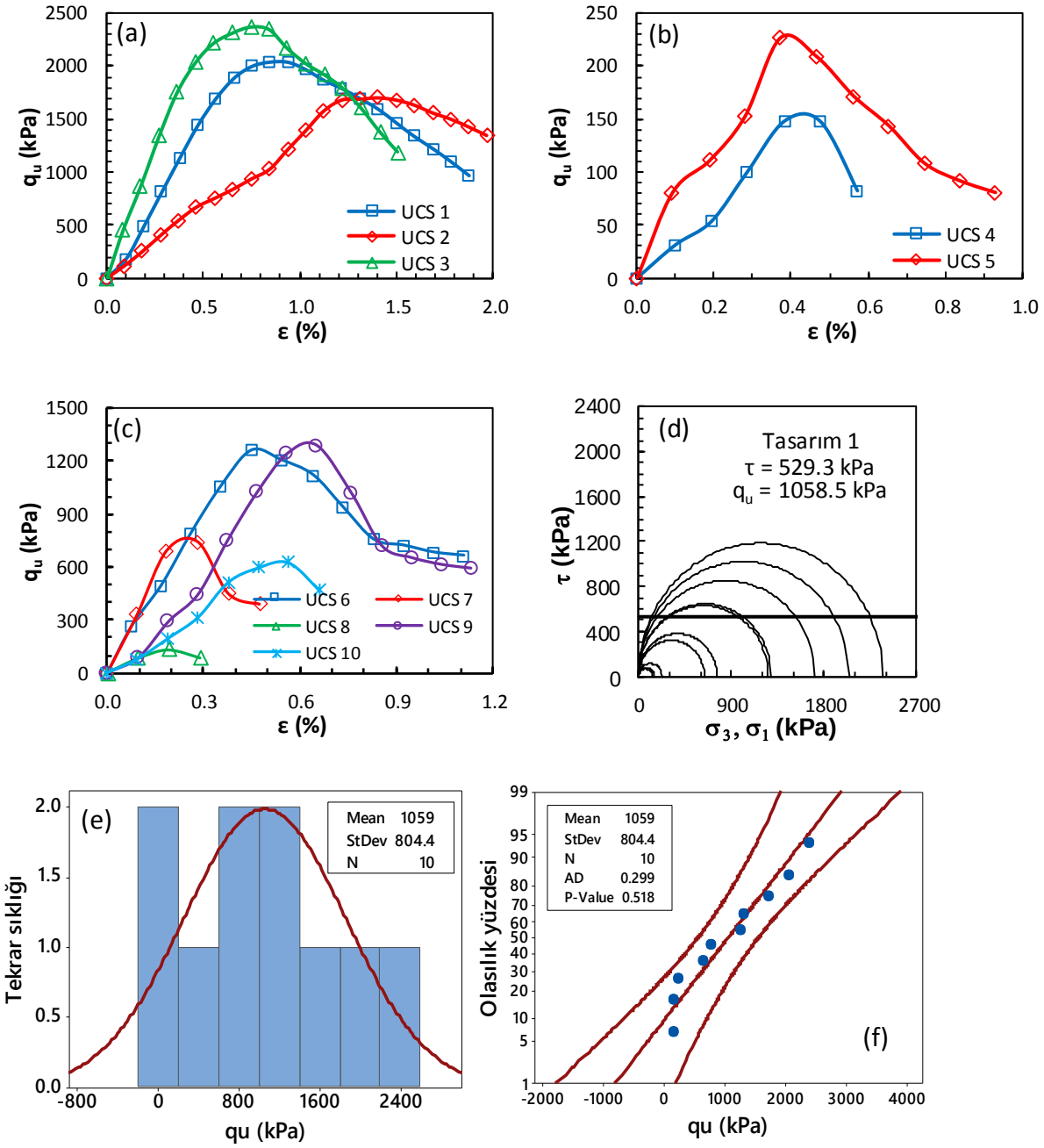
Şekil Ek 1.8. SP-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği(Not: UCS 1 deneyi ortalamaya katılmamıştır) (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)



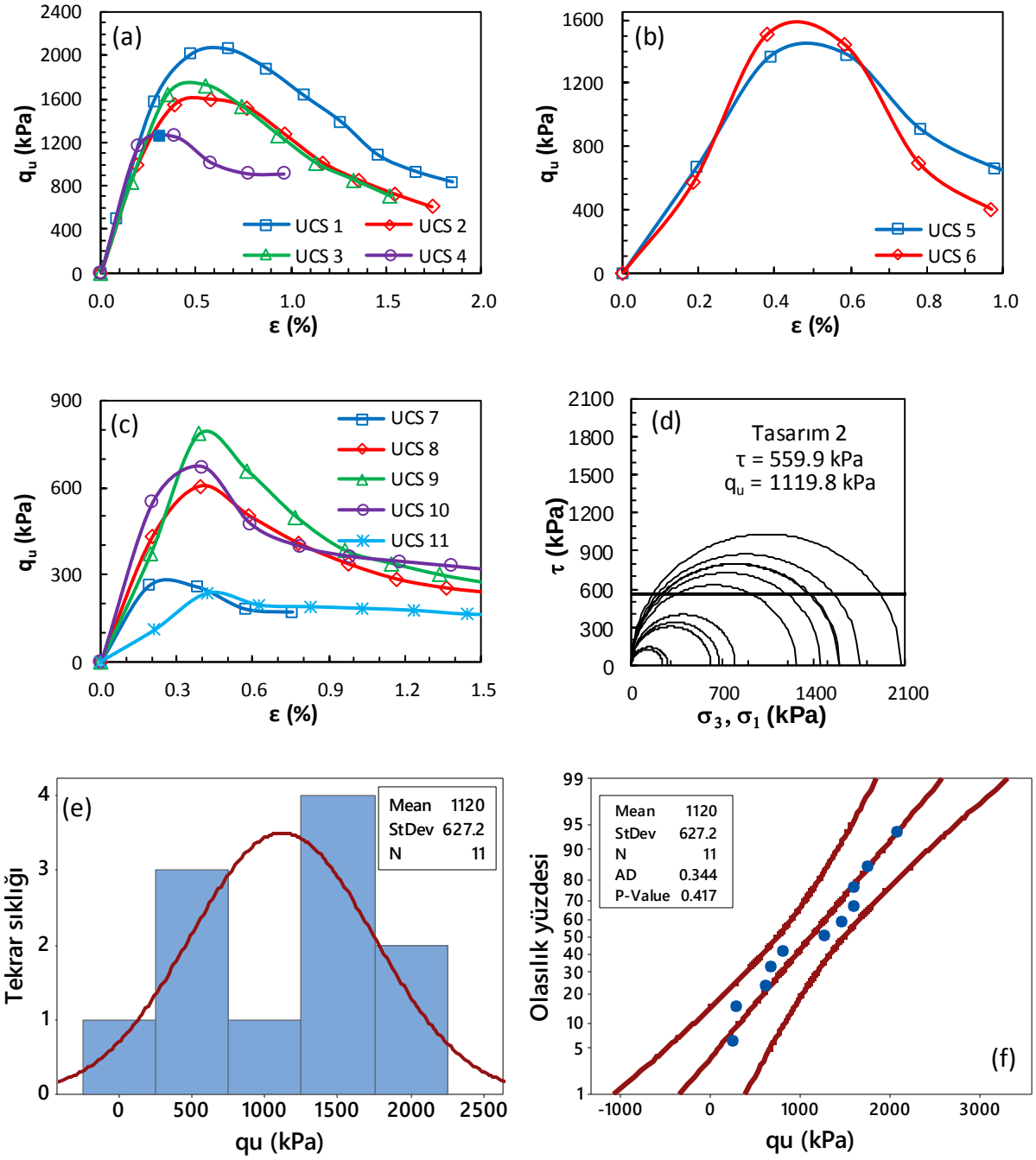
Şekil Ek 1.9. SP-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon alt bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon üst bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Sistem parametreleri, UCS, 28 gün)

EK-2: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

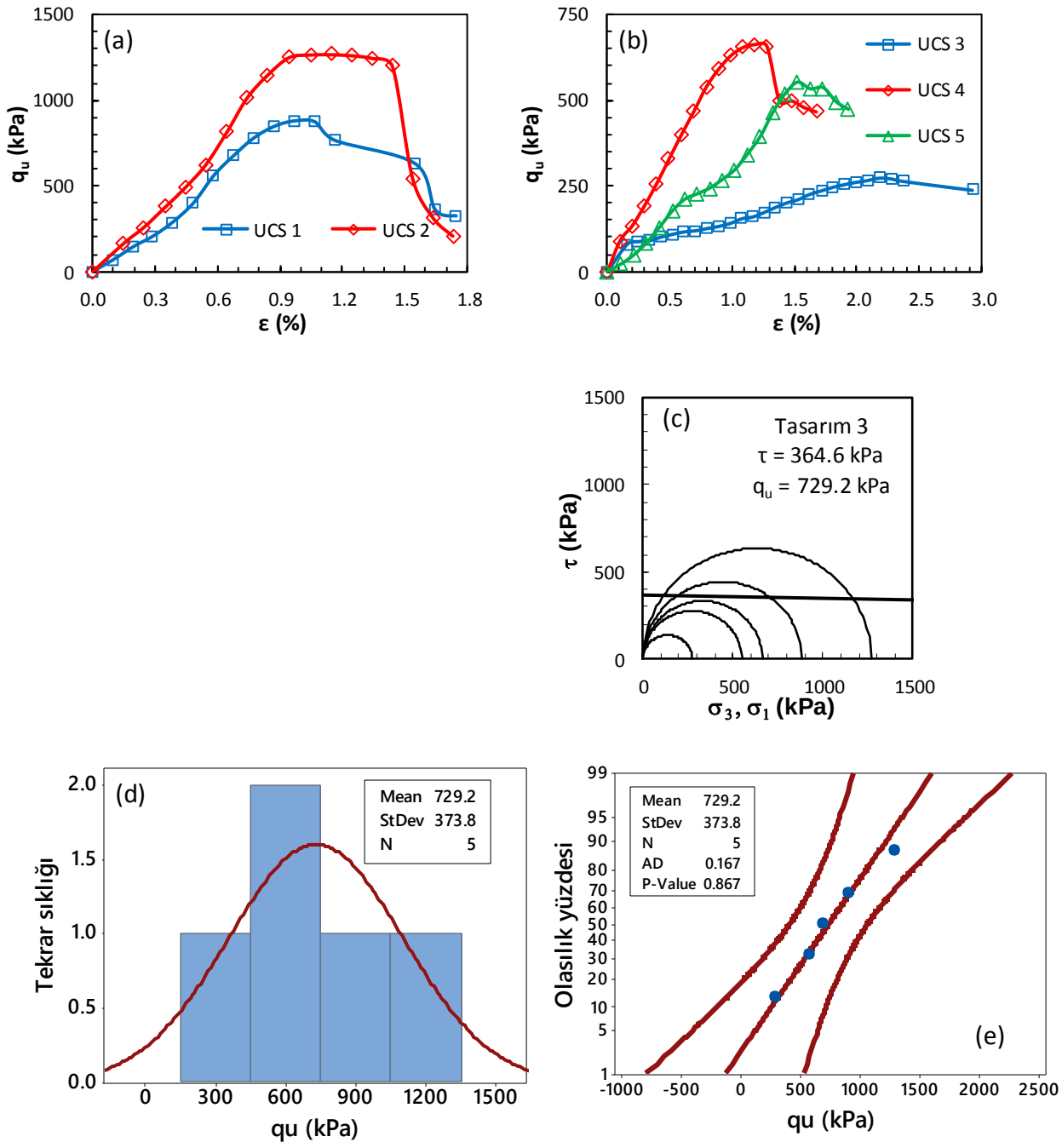
Kür süresi: 28 gün



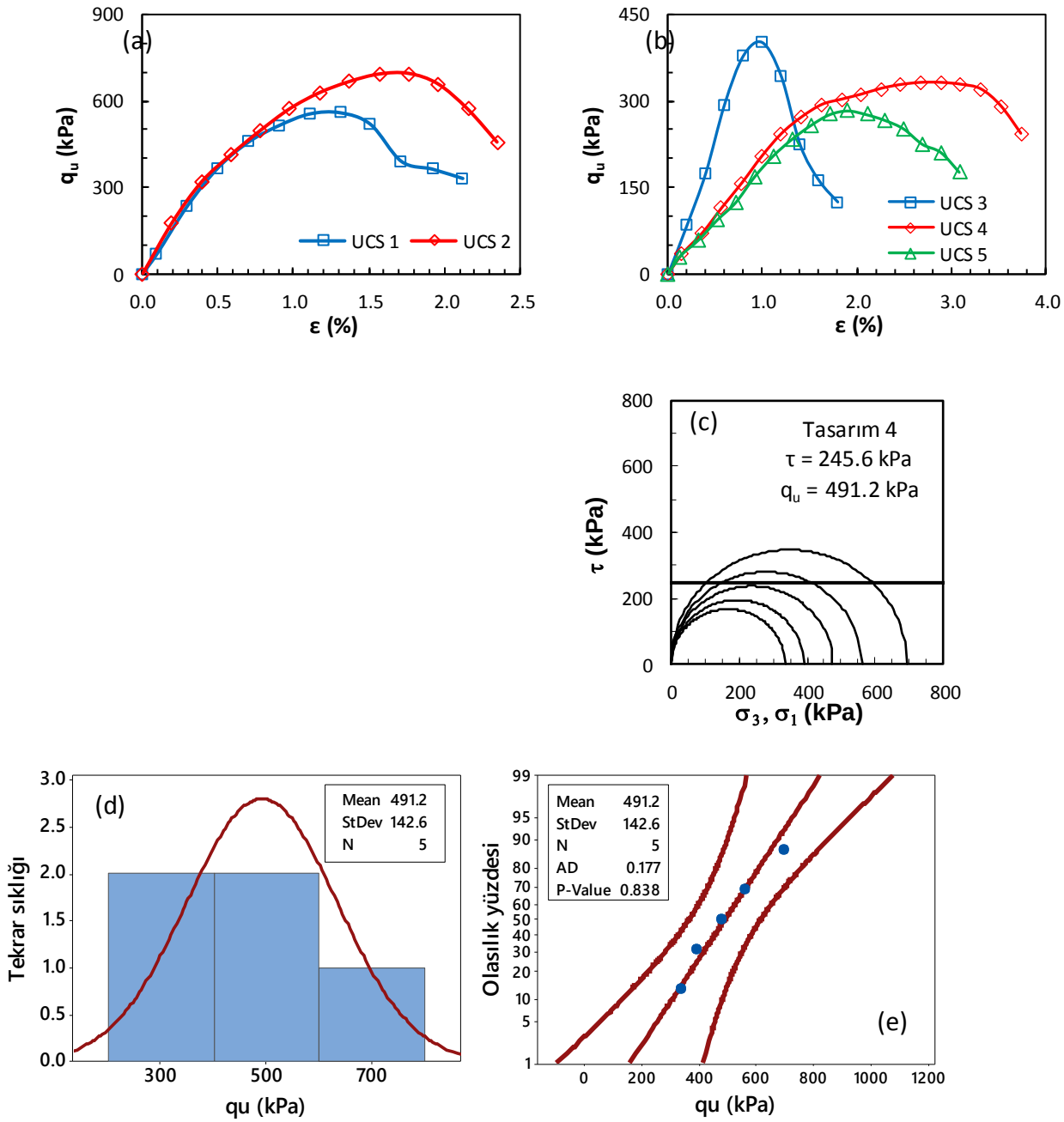
Şekil Ek 2.1 BÖ-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



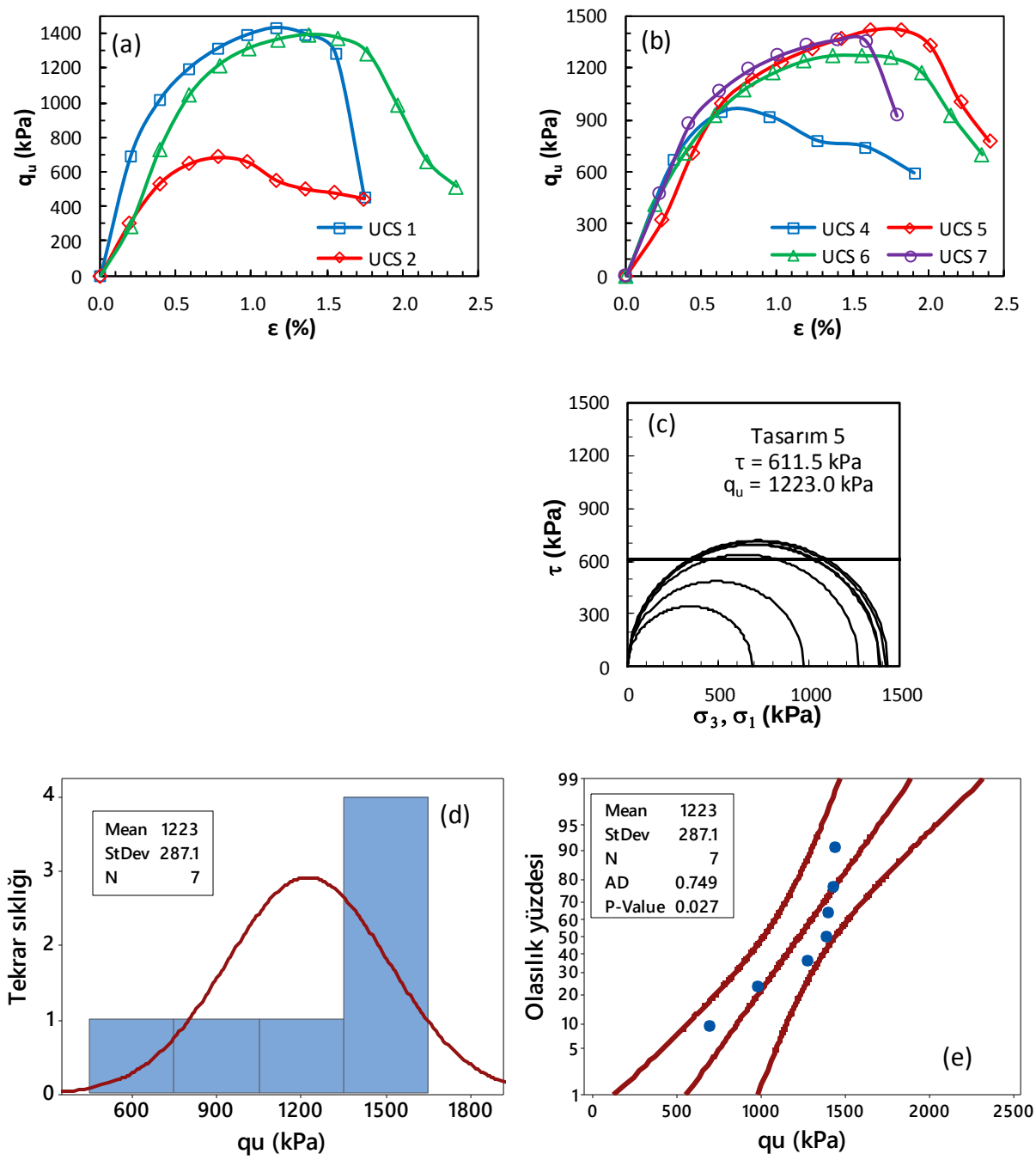
Şekil Ek 2.2. BÖ-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



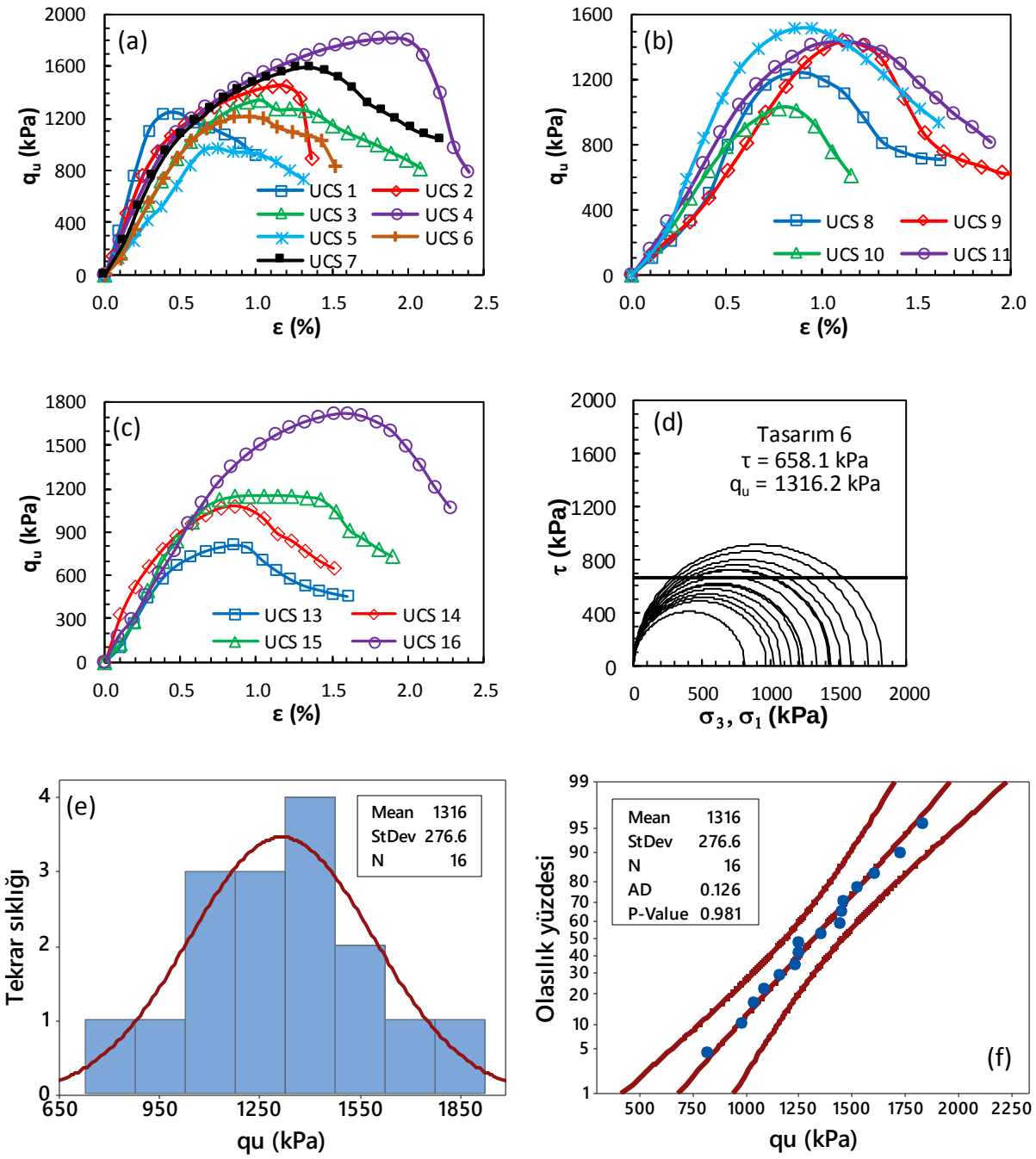
Şekil Ek 2.3. BÖ-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



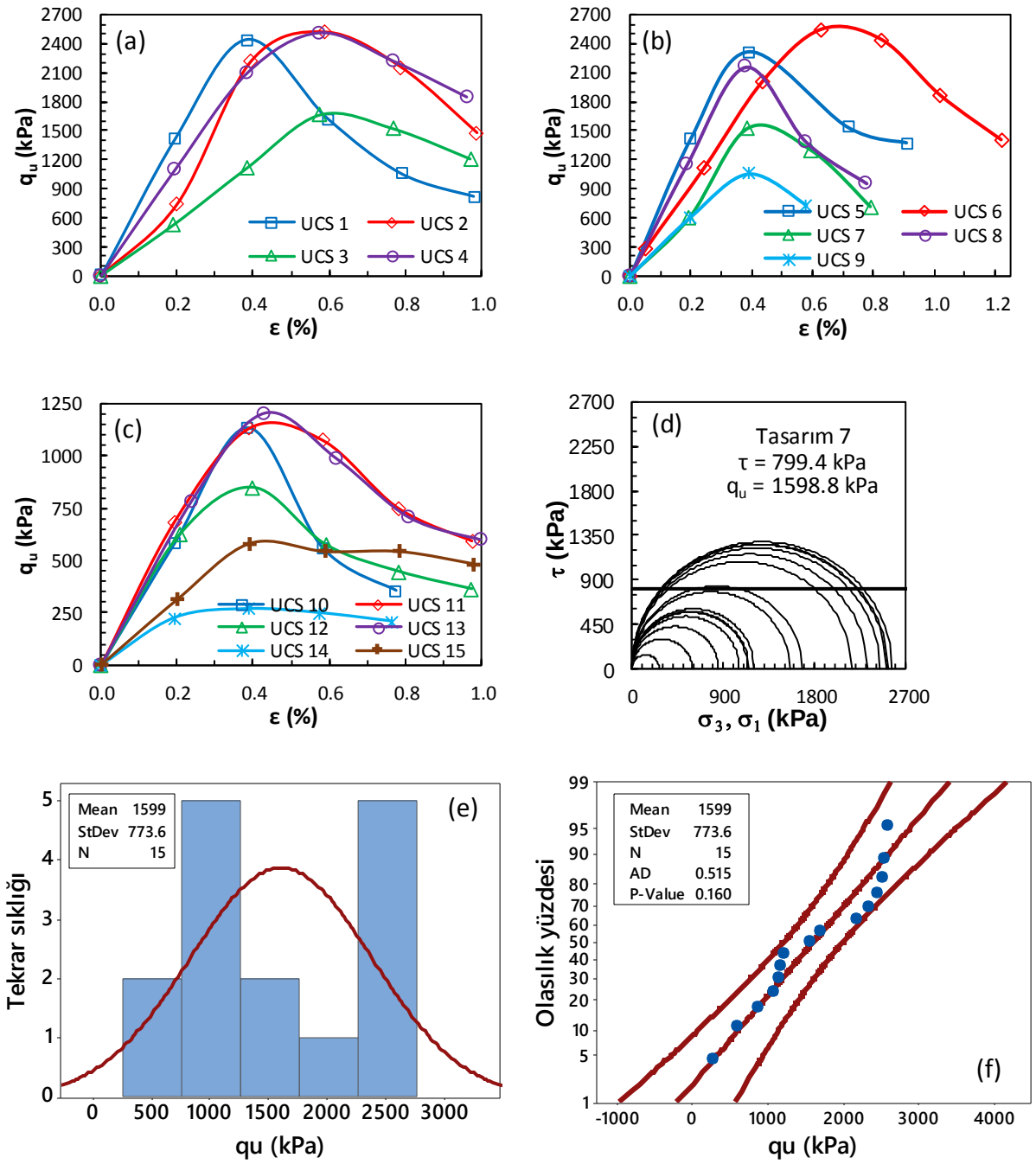
Şekil Ek 2.4. BÖ-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



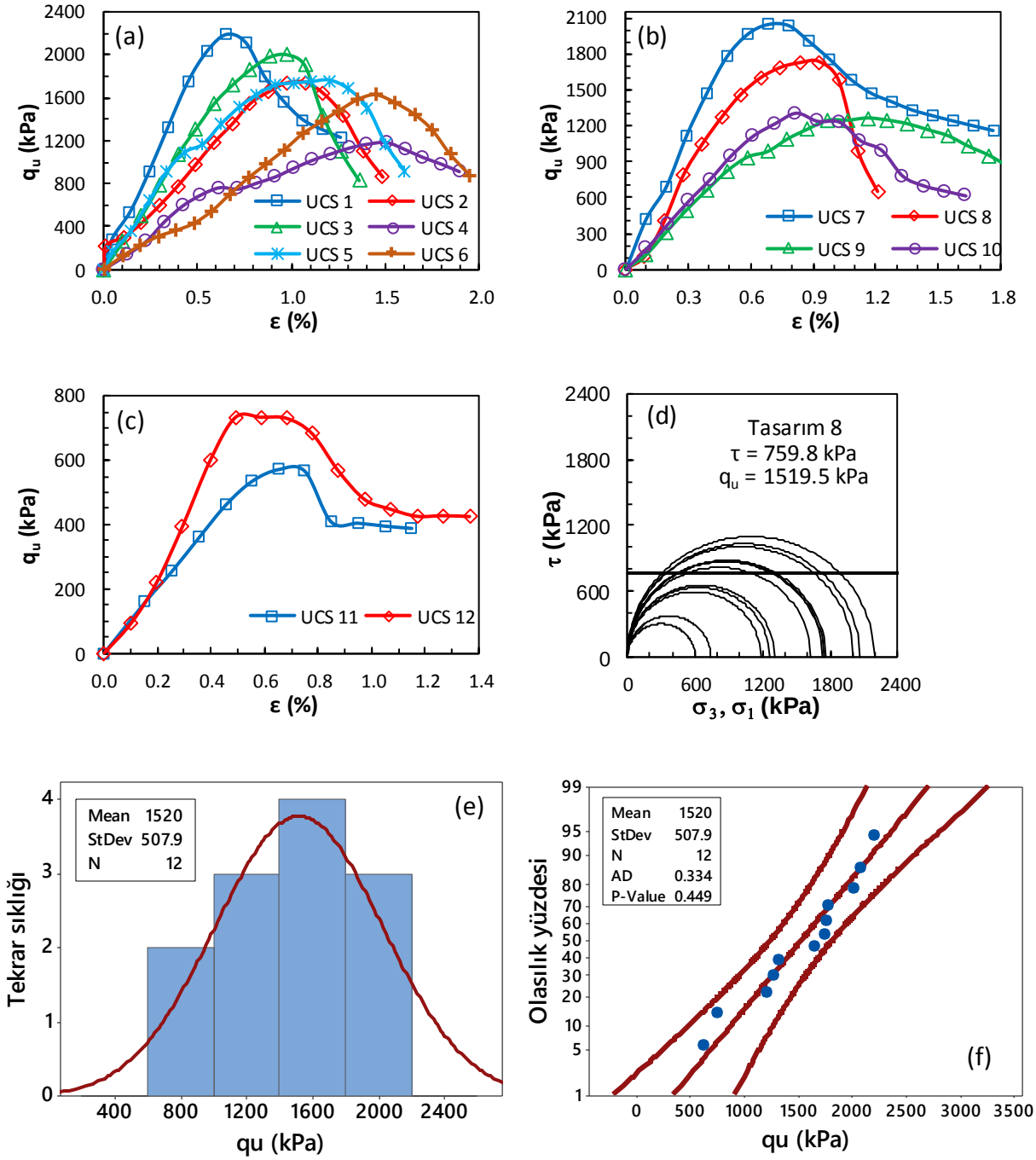
Şekil Ek 2.5. BÖ-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



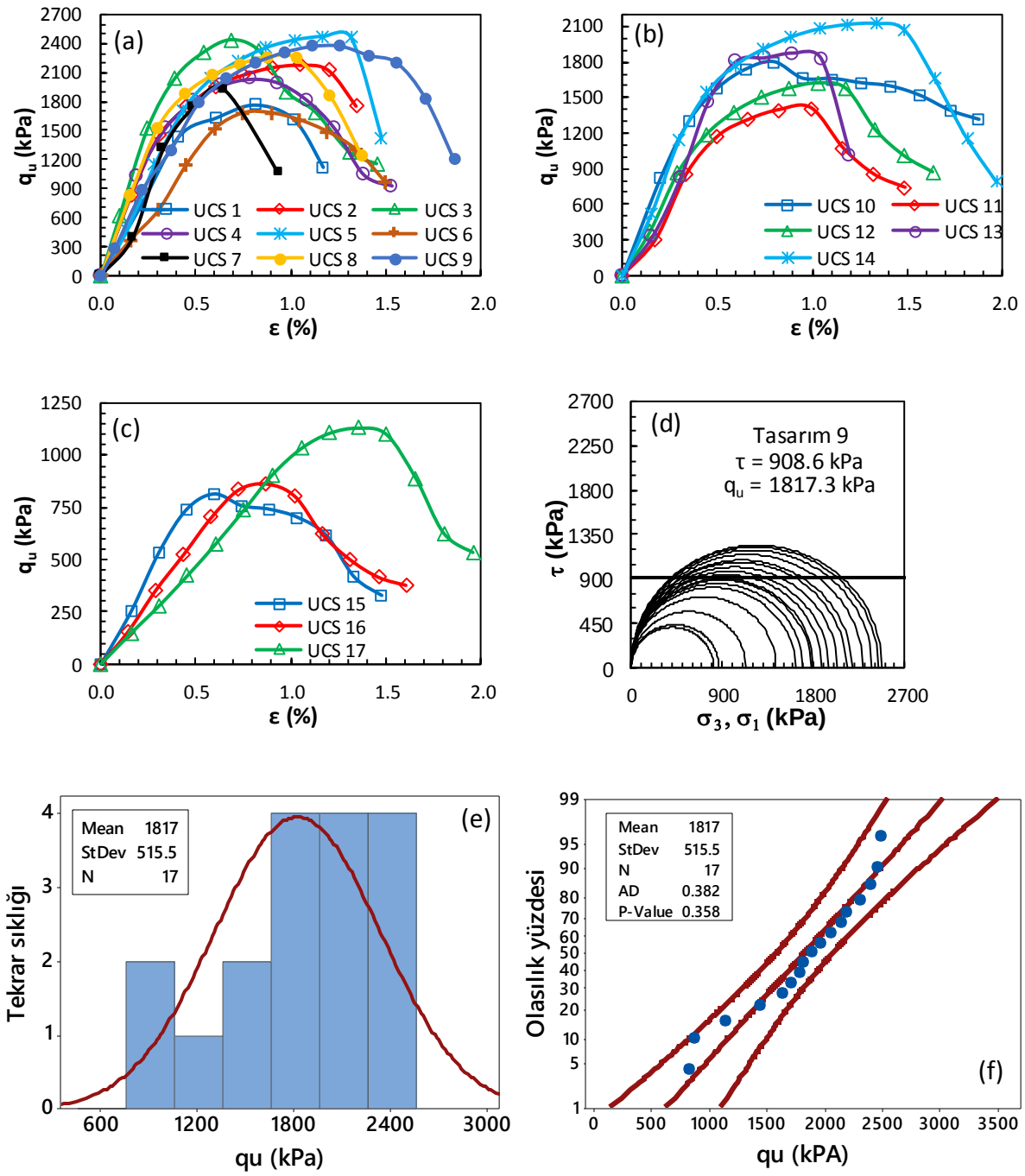
Şekil Ek 2.6. BÖ-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



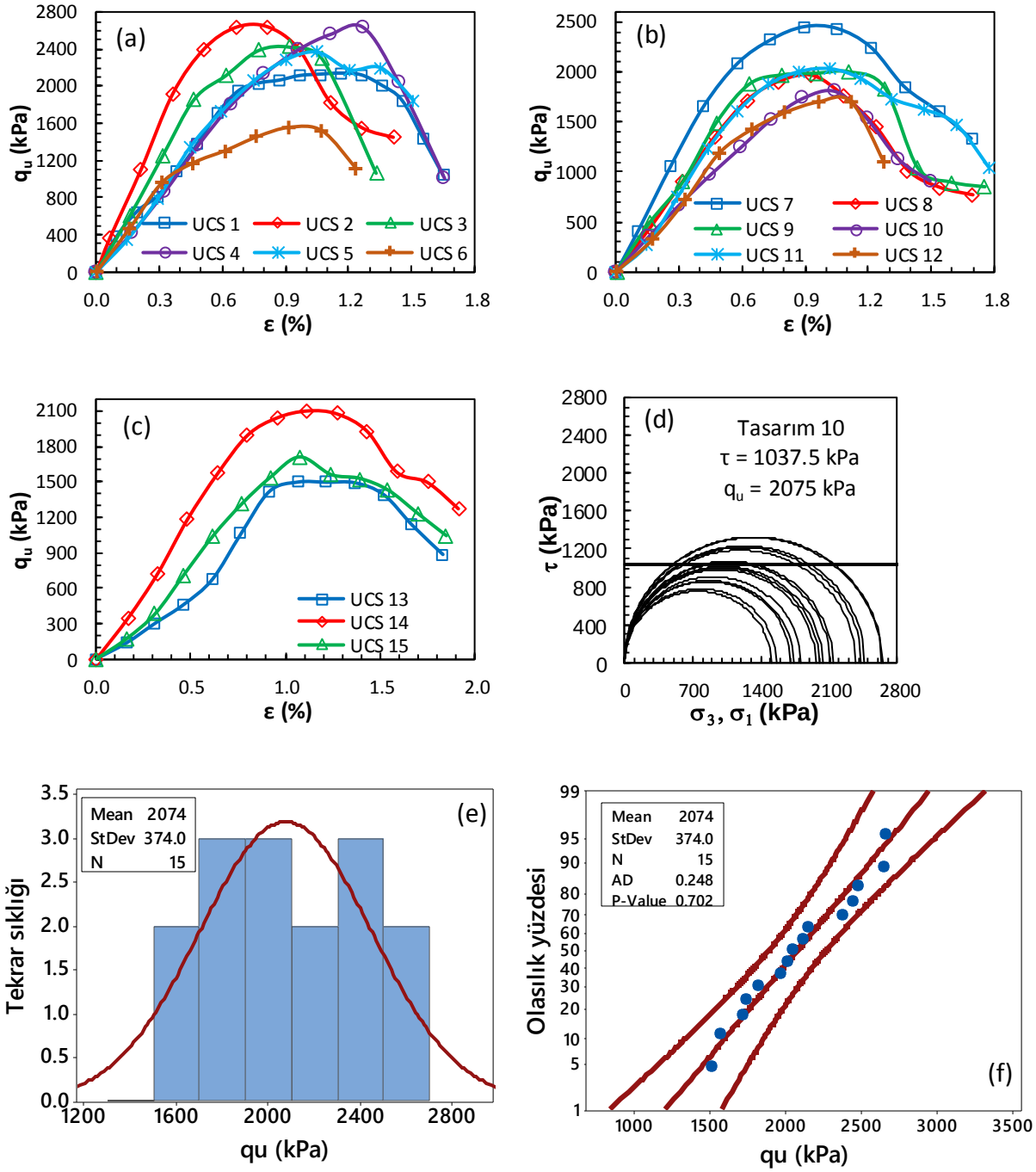
Şekil Ek 2.7. BÖ-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



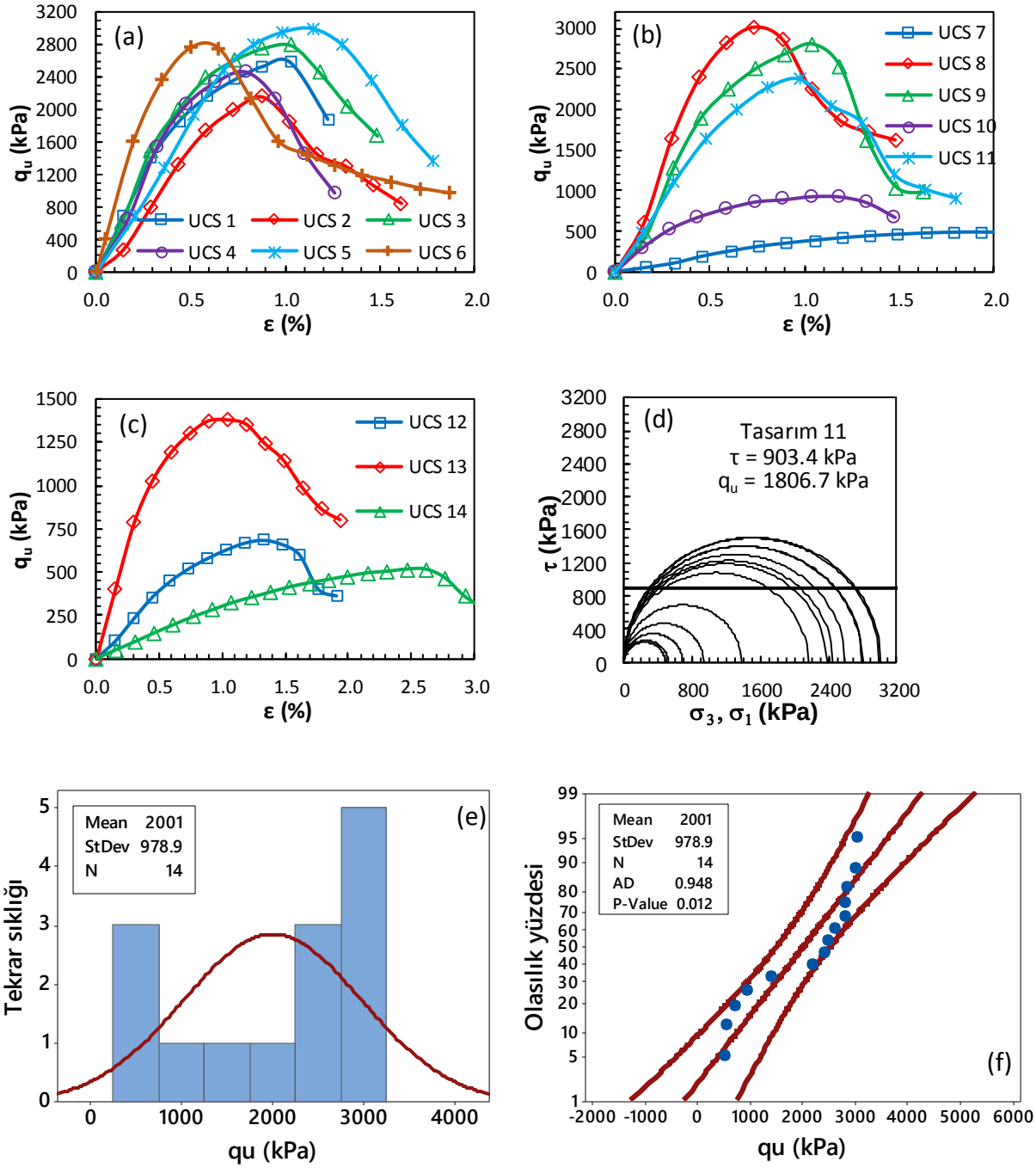
Şekil Ek 2.8. BÖ-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



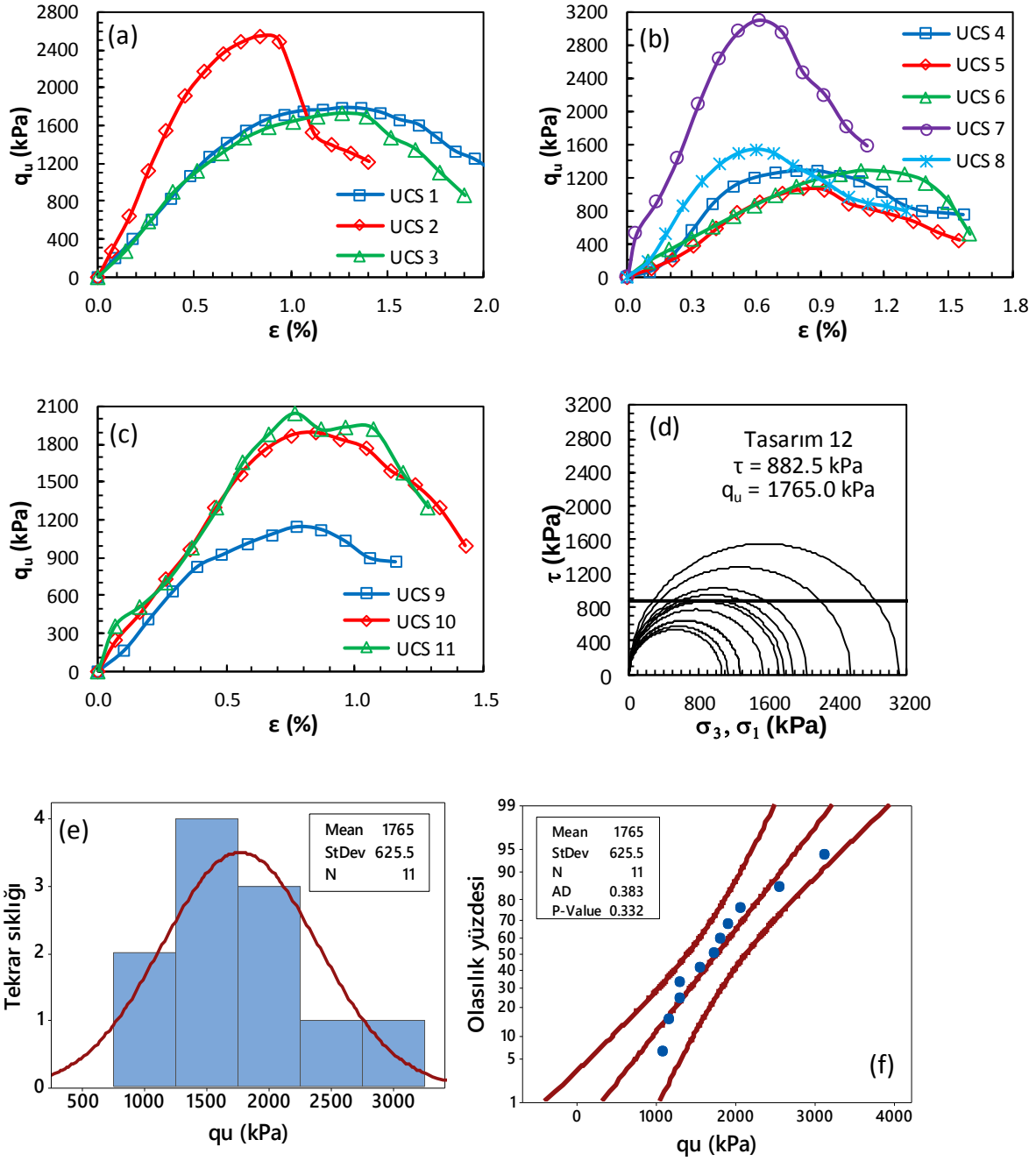
Şekil Ek 2.9. BÖ-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



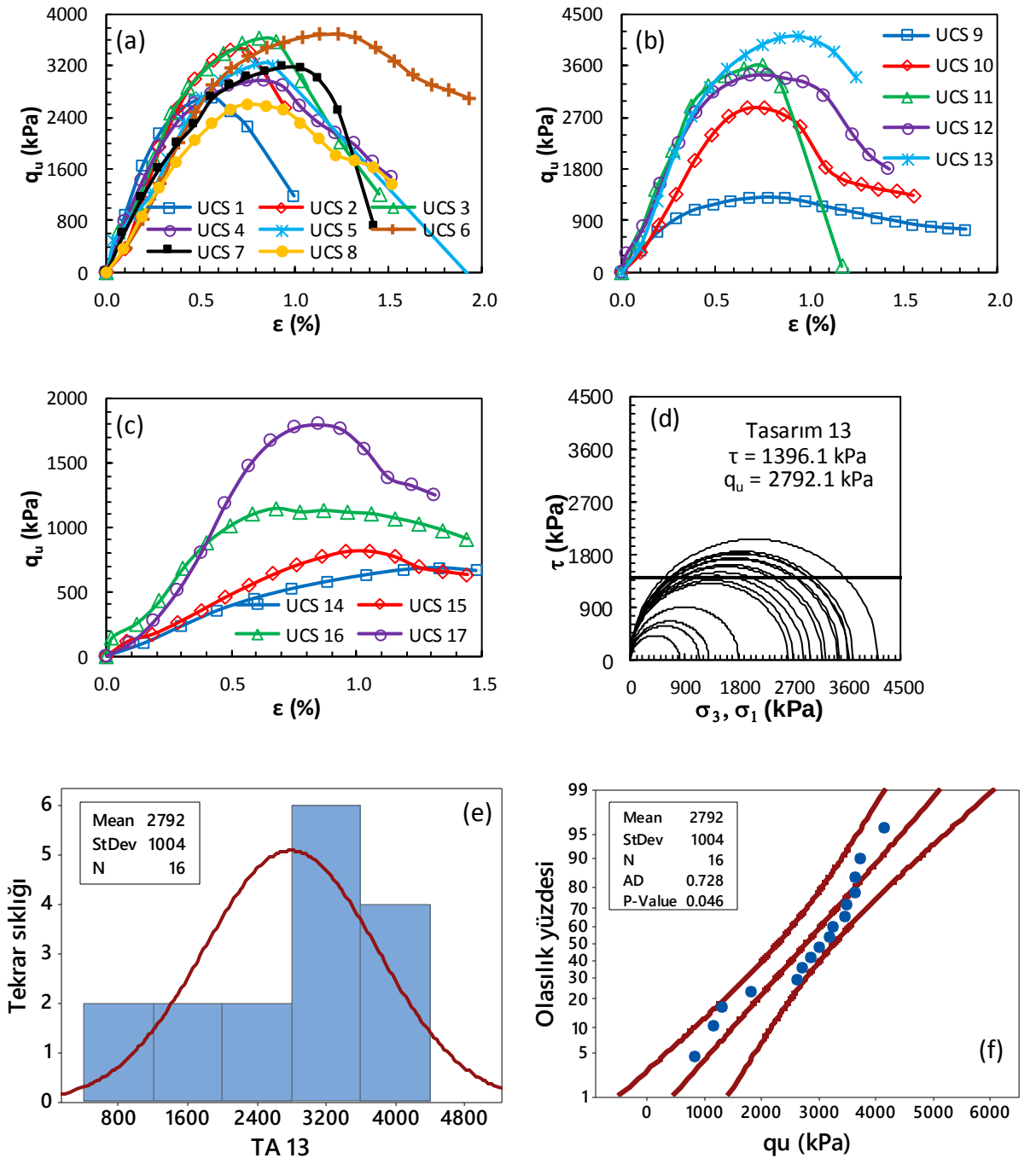
Şekil Ek 2.10. BÖ-10 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



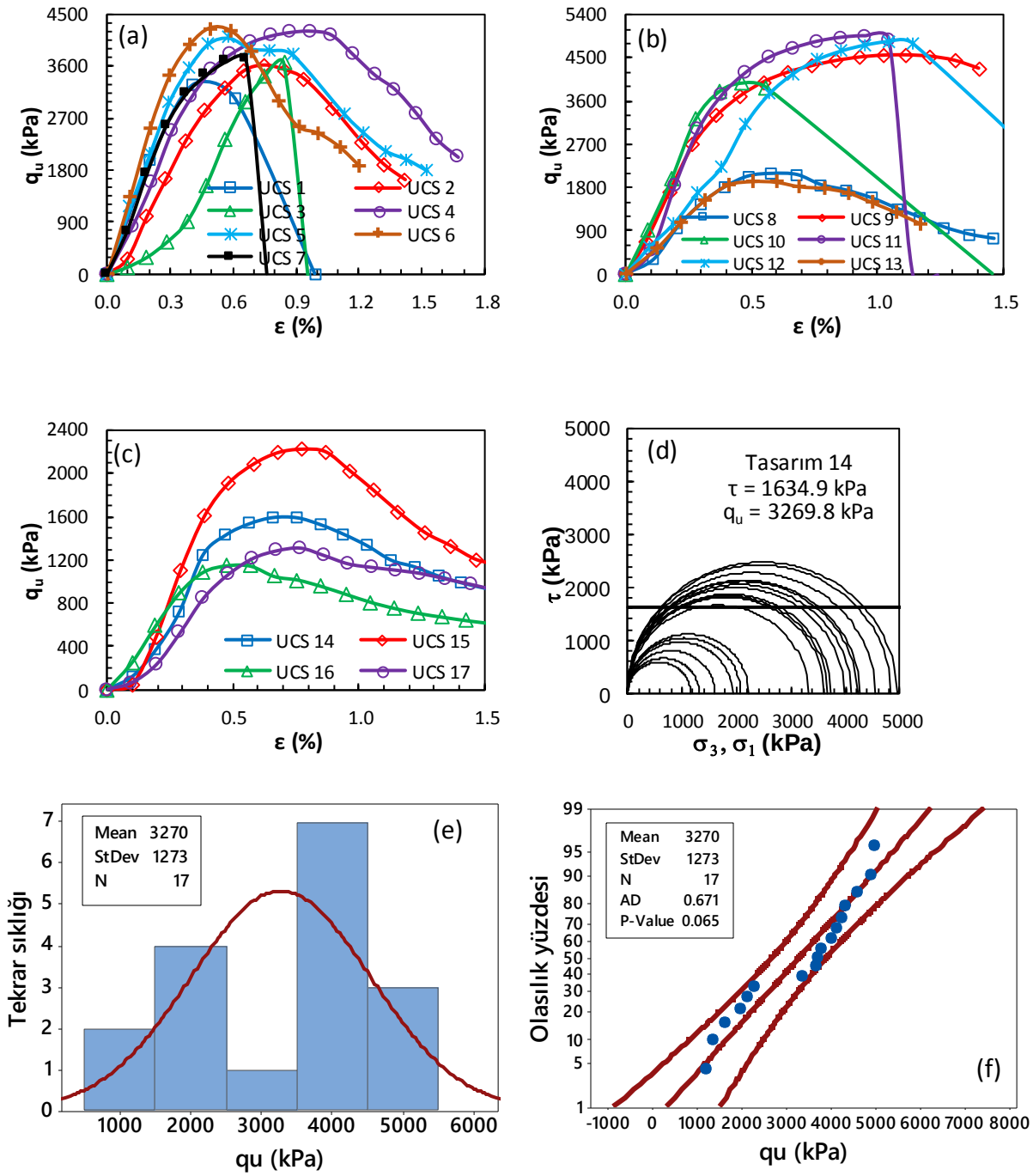
Şekil Ek 2.11. BÖ-11 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



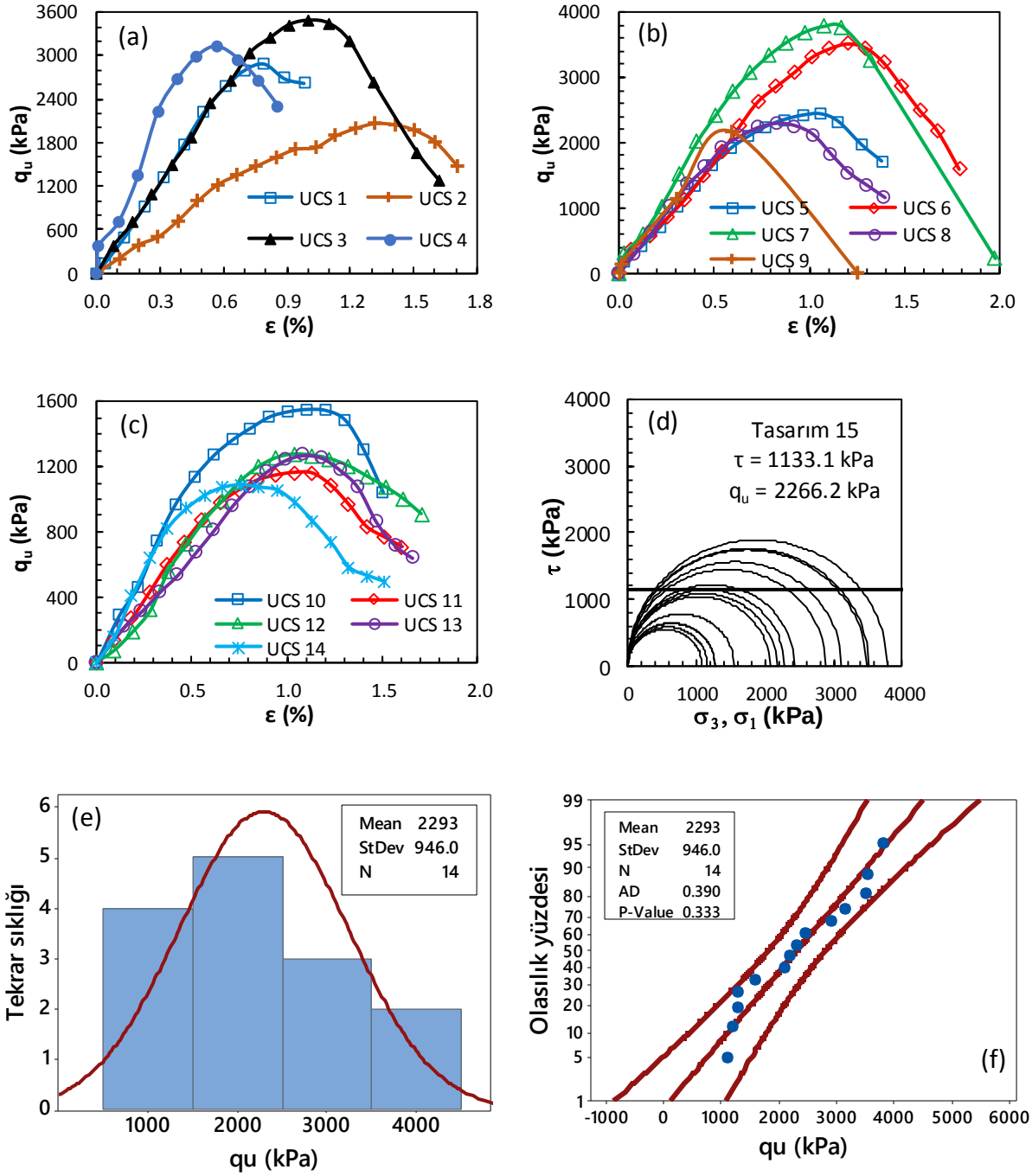
Şekil Ek 2.12. BÖ-12 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



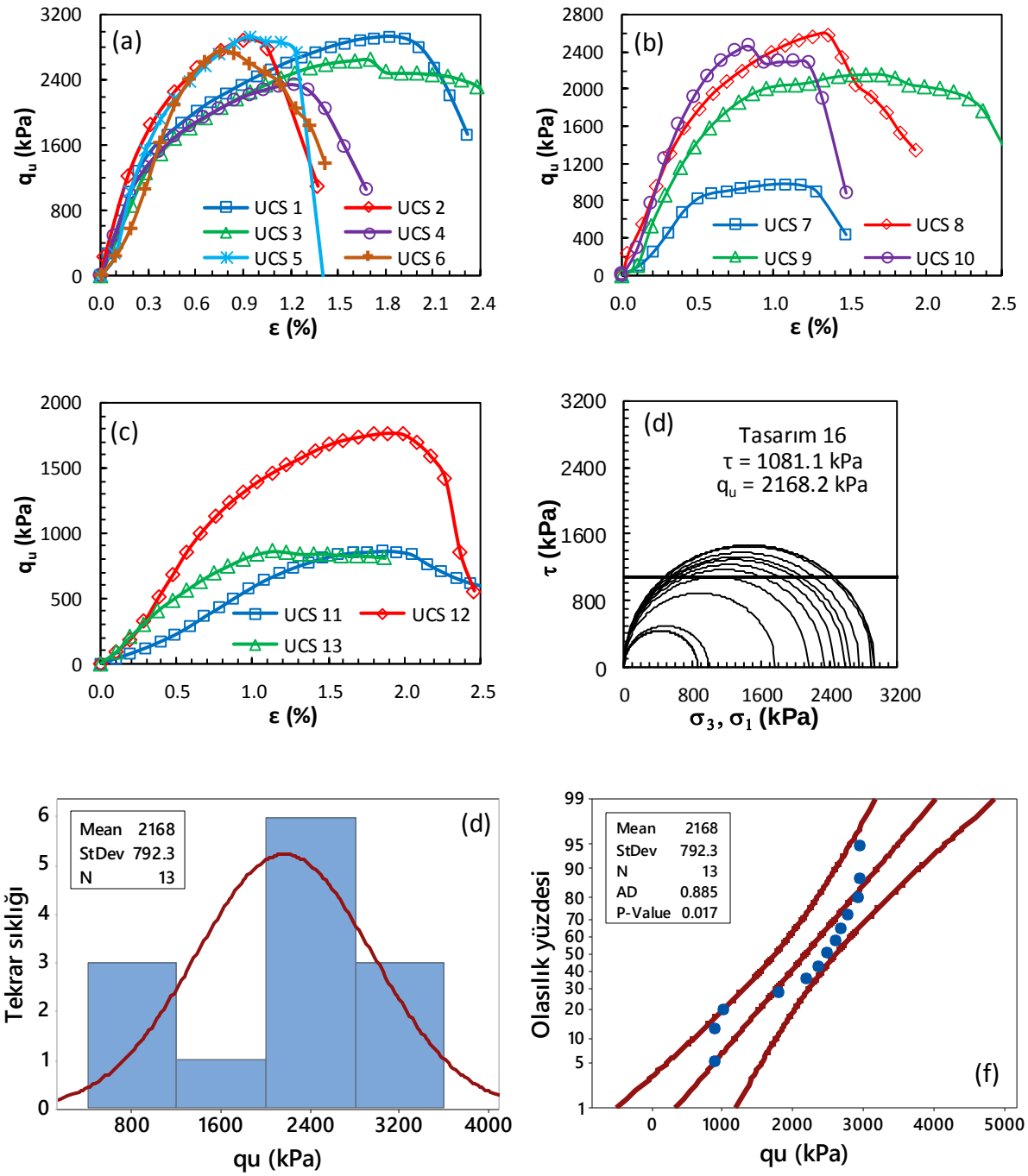
Şekil Ek 2.13. BÖ-13 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



Şekil Ek 2.14. BÖ-14 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

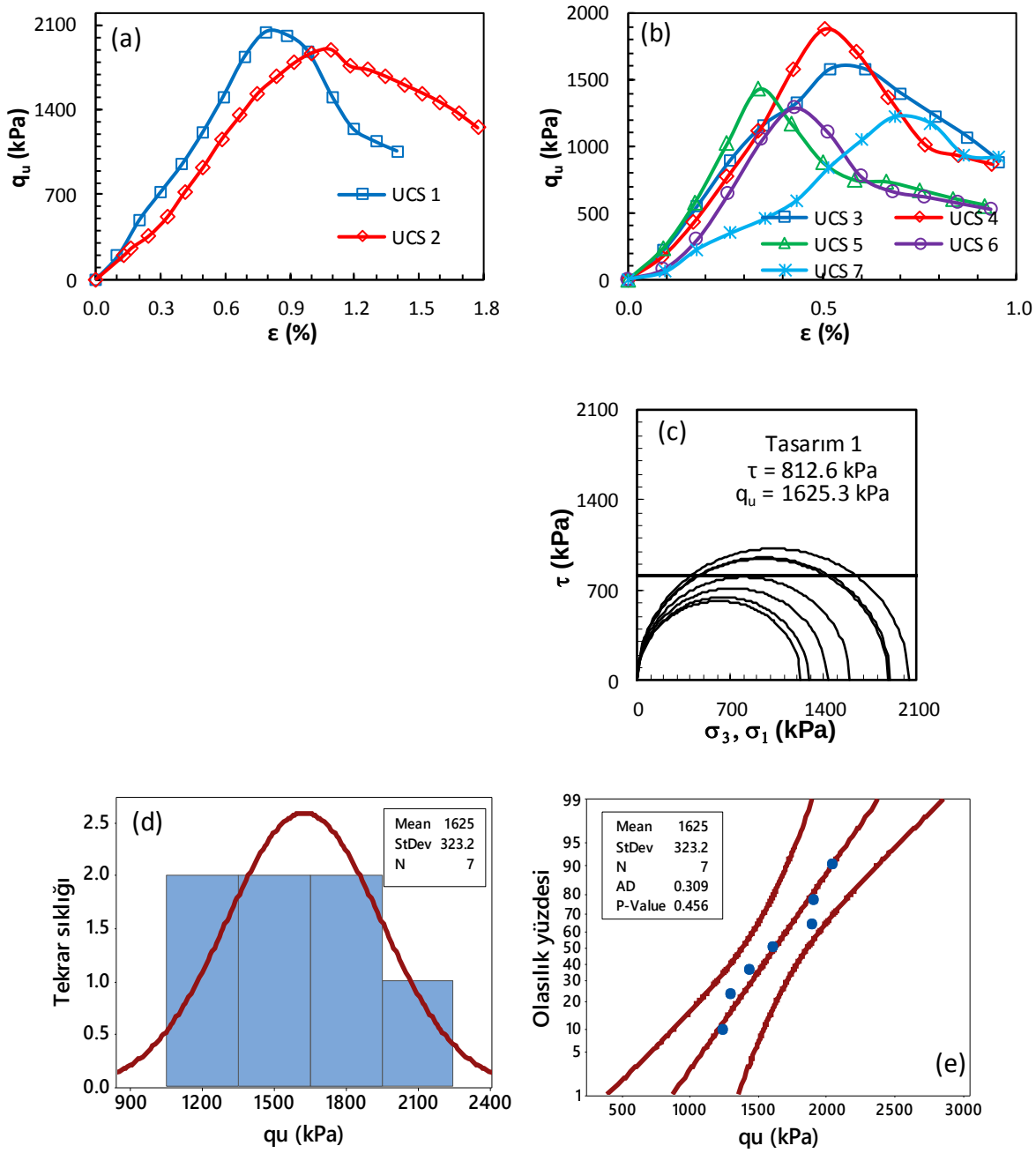


Şekil Ek 2.15. BÖ-15 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

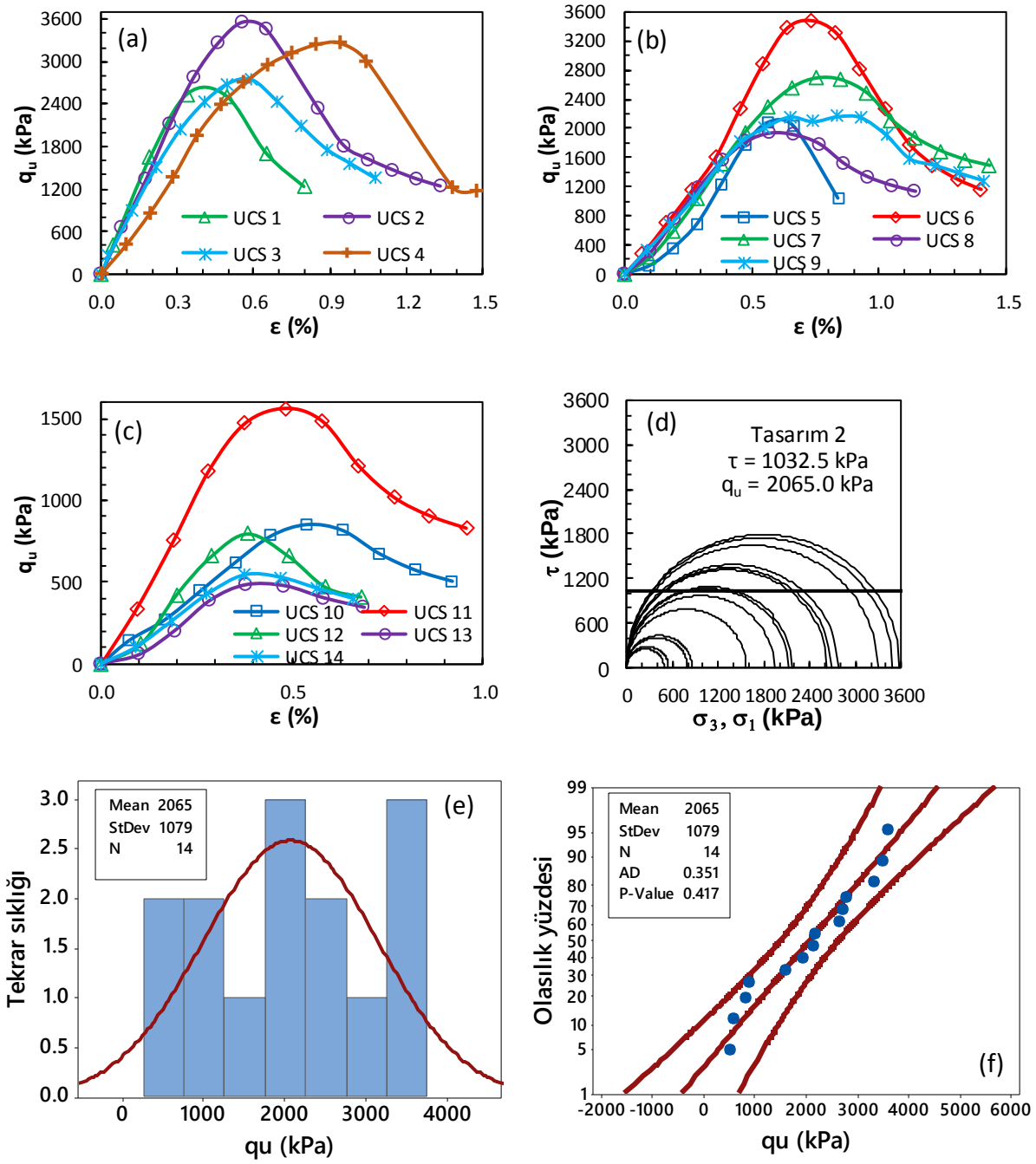


Şekil Ek 2.16. BÖ-16 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

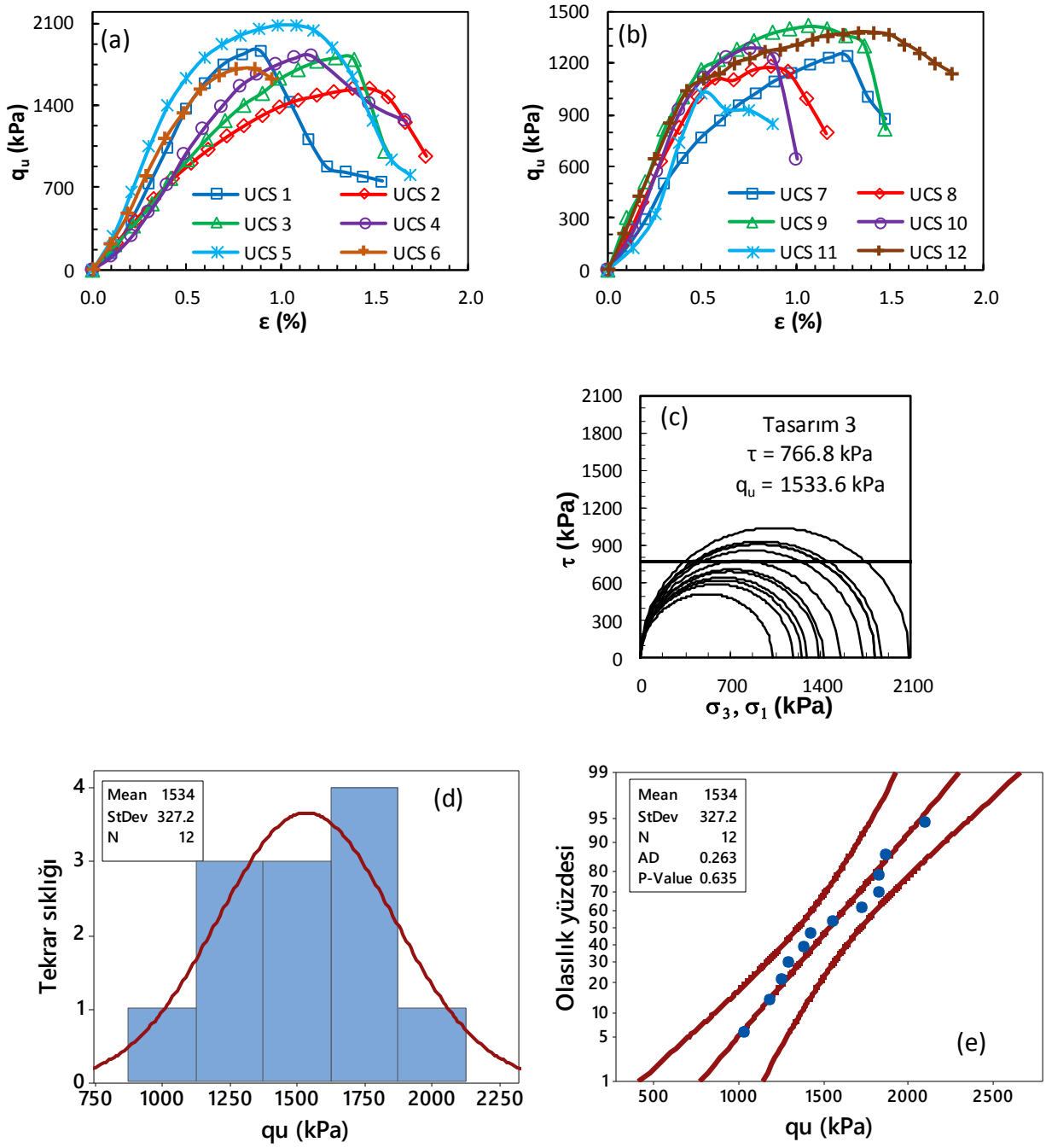
Kür süresi: 56 gün



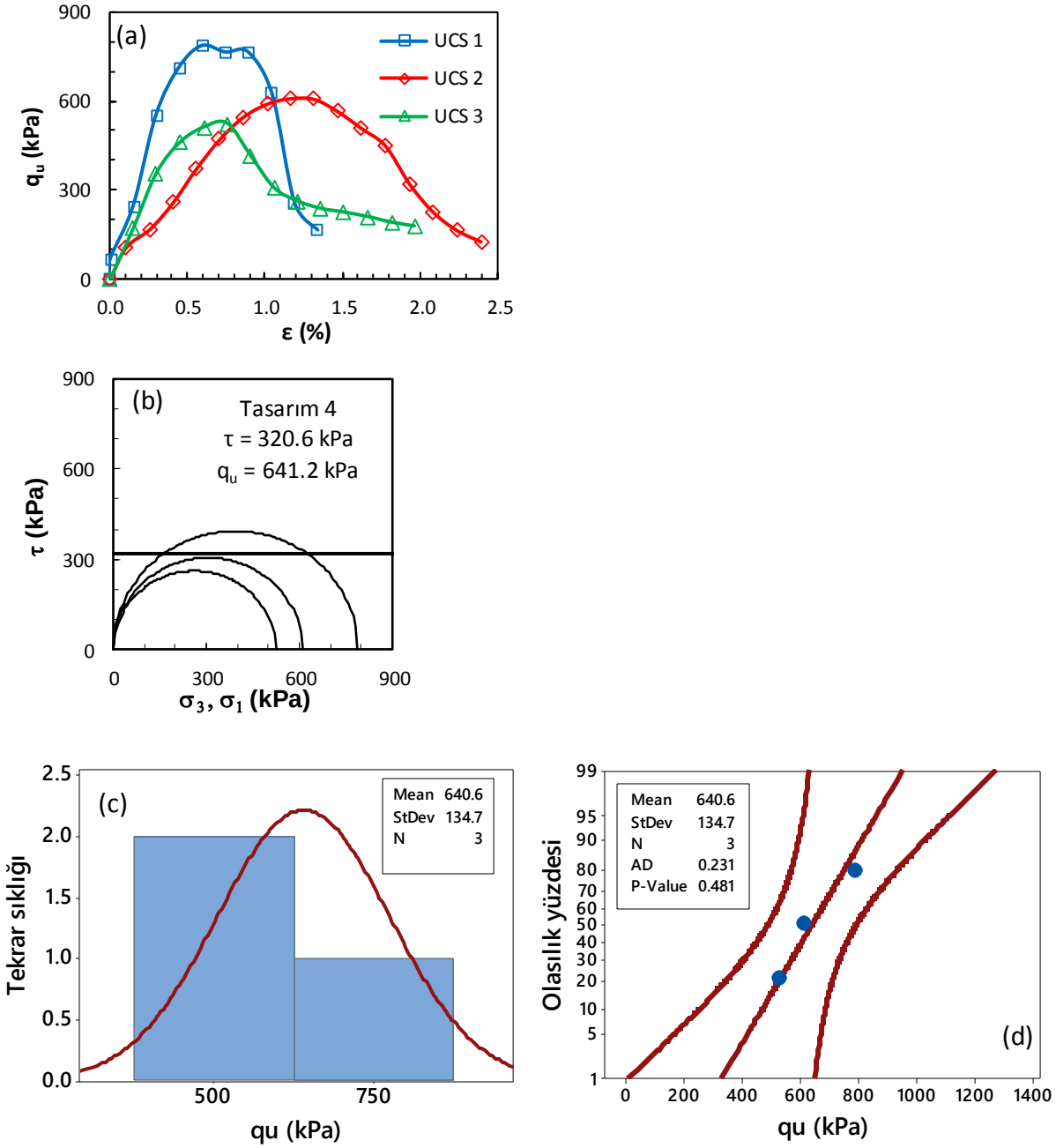
Şekil Ek 2.17. BÖ-1 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



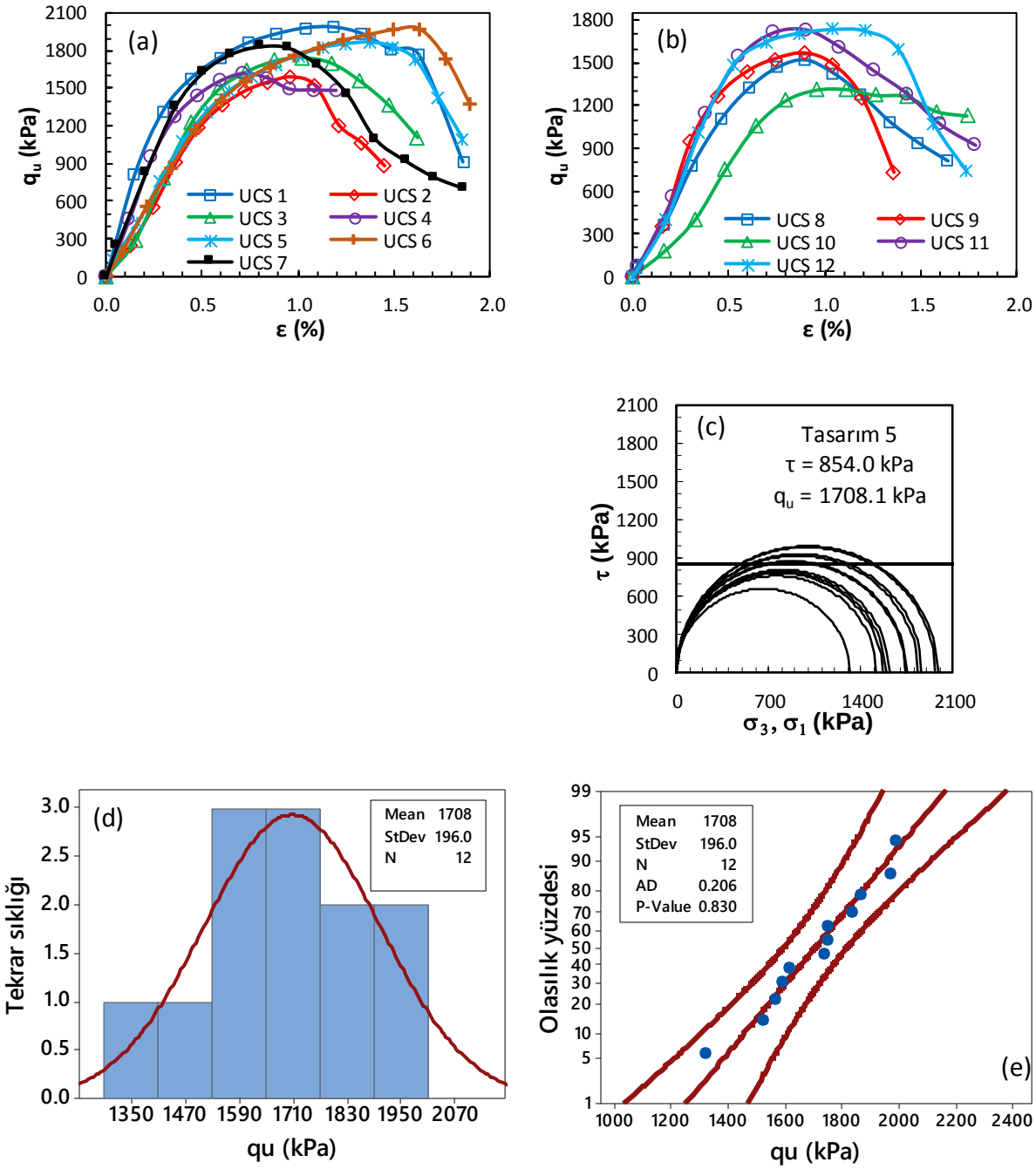
Şekil Ek 2.18. BÖ-2 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



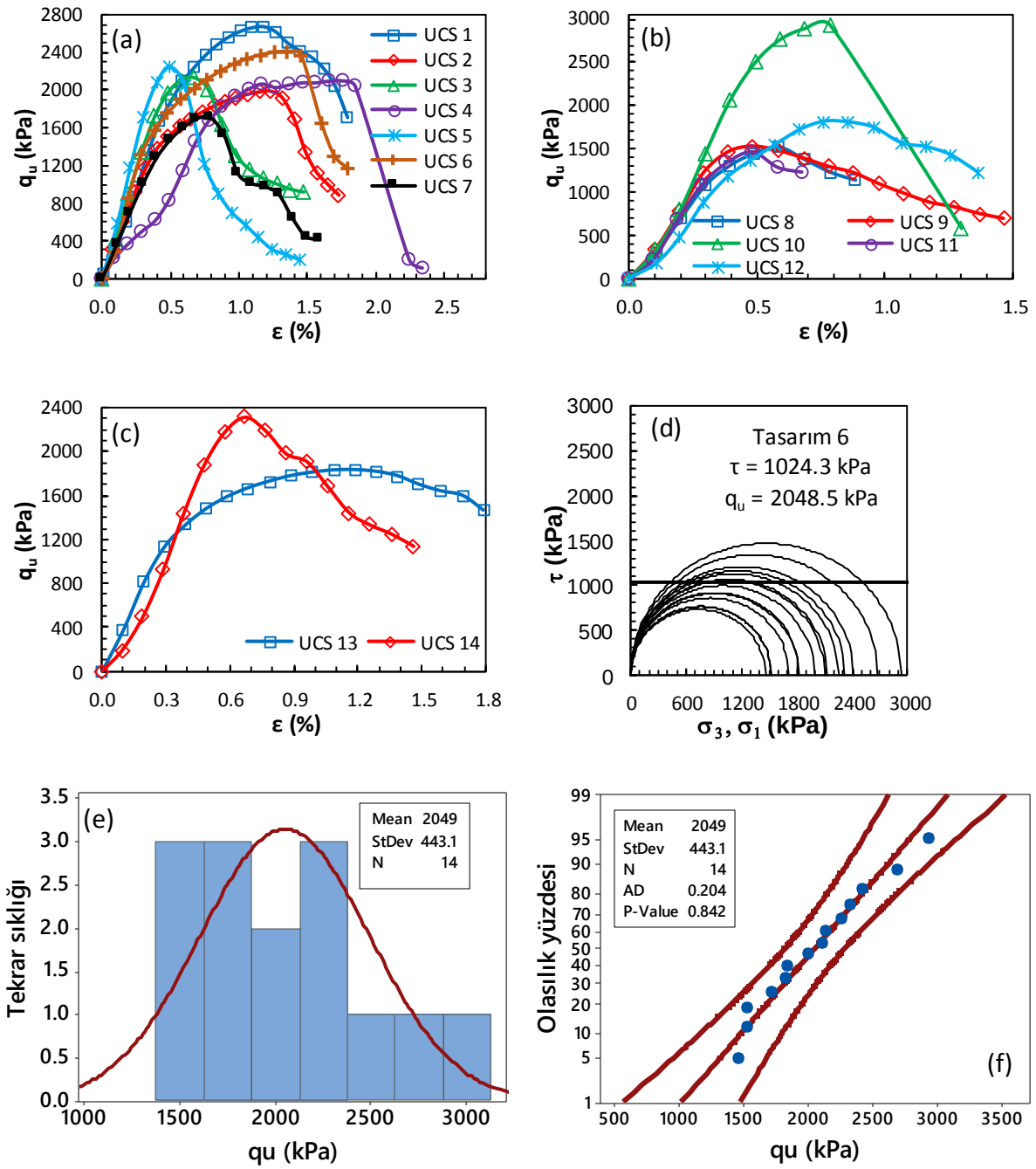
Şekil Ek 2.19. BÖ-3 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



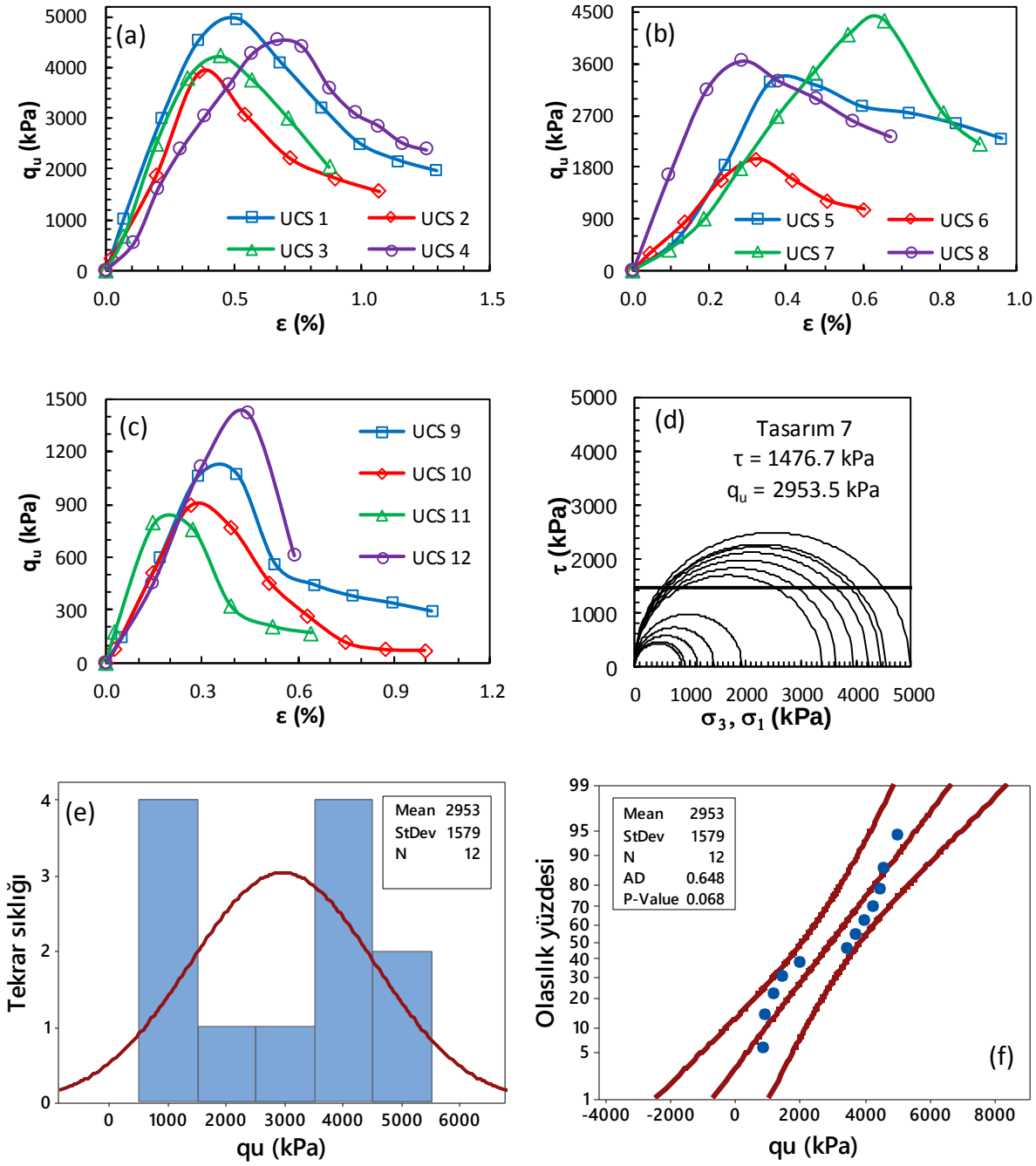
Şekil Ek 2.20. BÖ-4 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) Mohr daireleri, c) histogram grafiği, d) olasılık grafiği
(Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



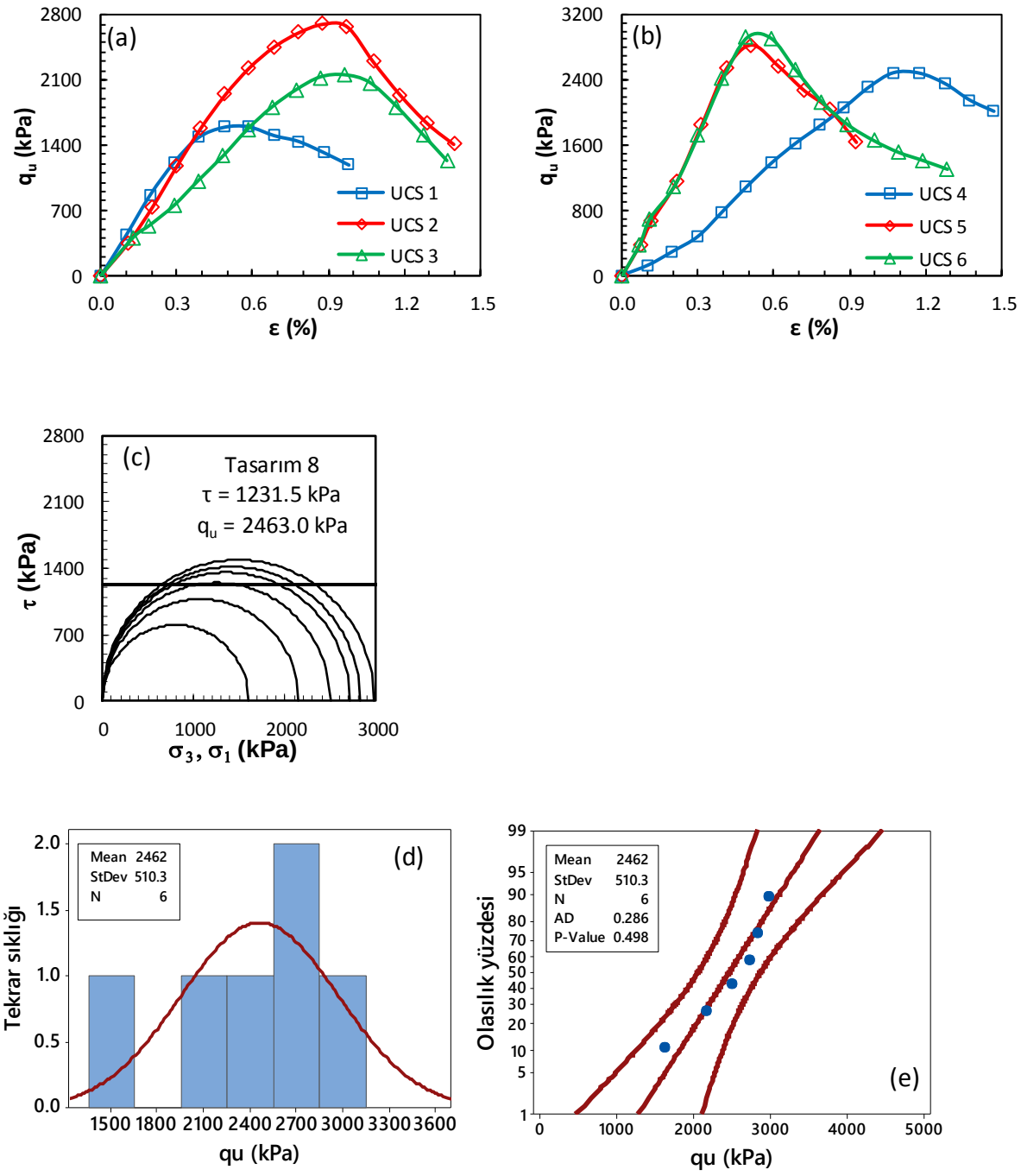
Şekil Ek 2.21. BÖ-5 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



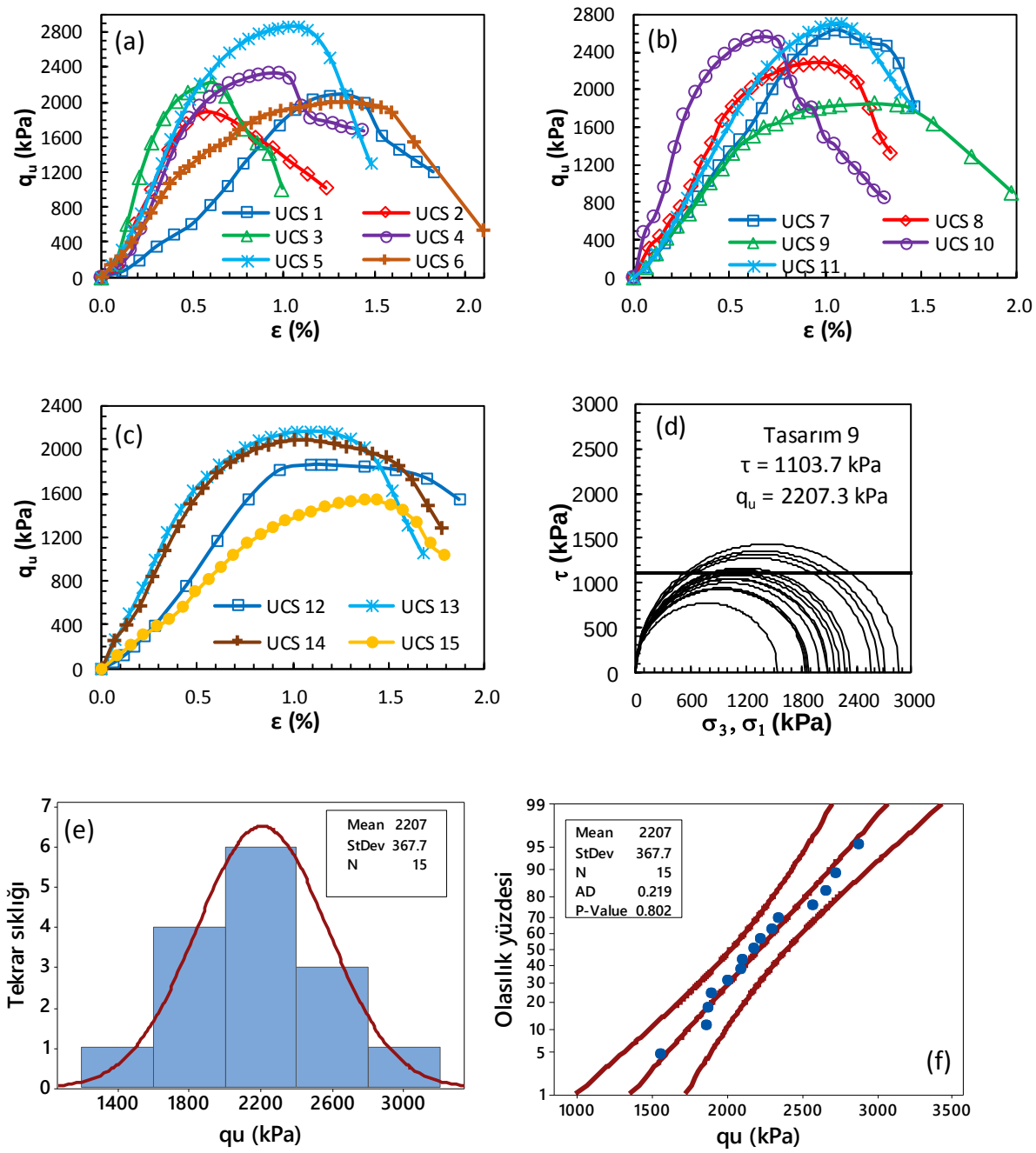
Şekil Ek 2.22. BÖ-6 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



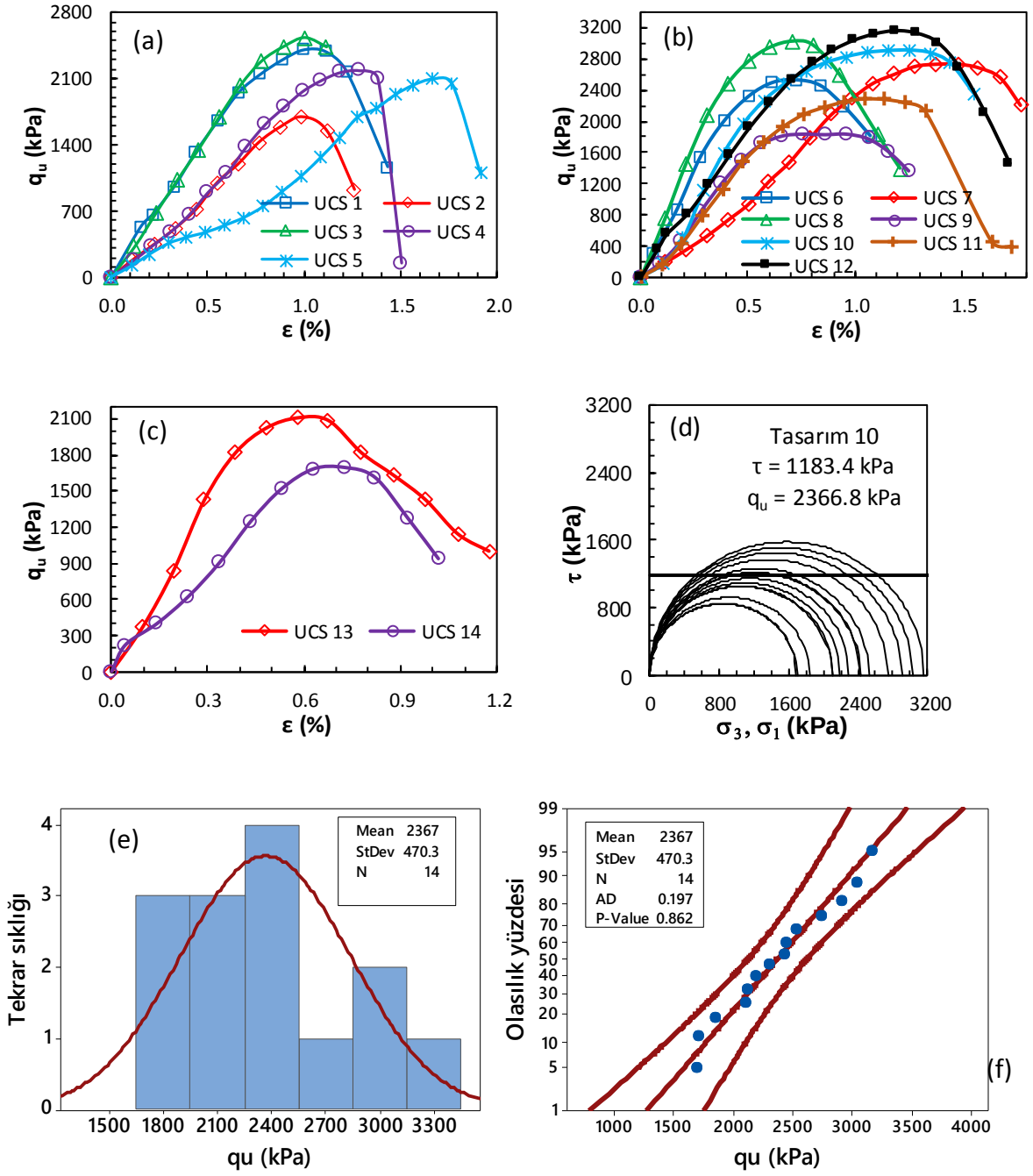
Şekil Ek 2.23. BÖ-7 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



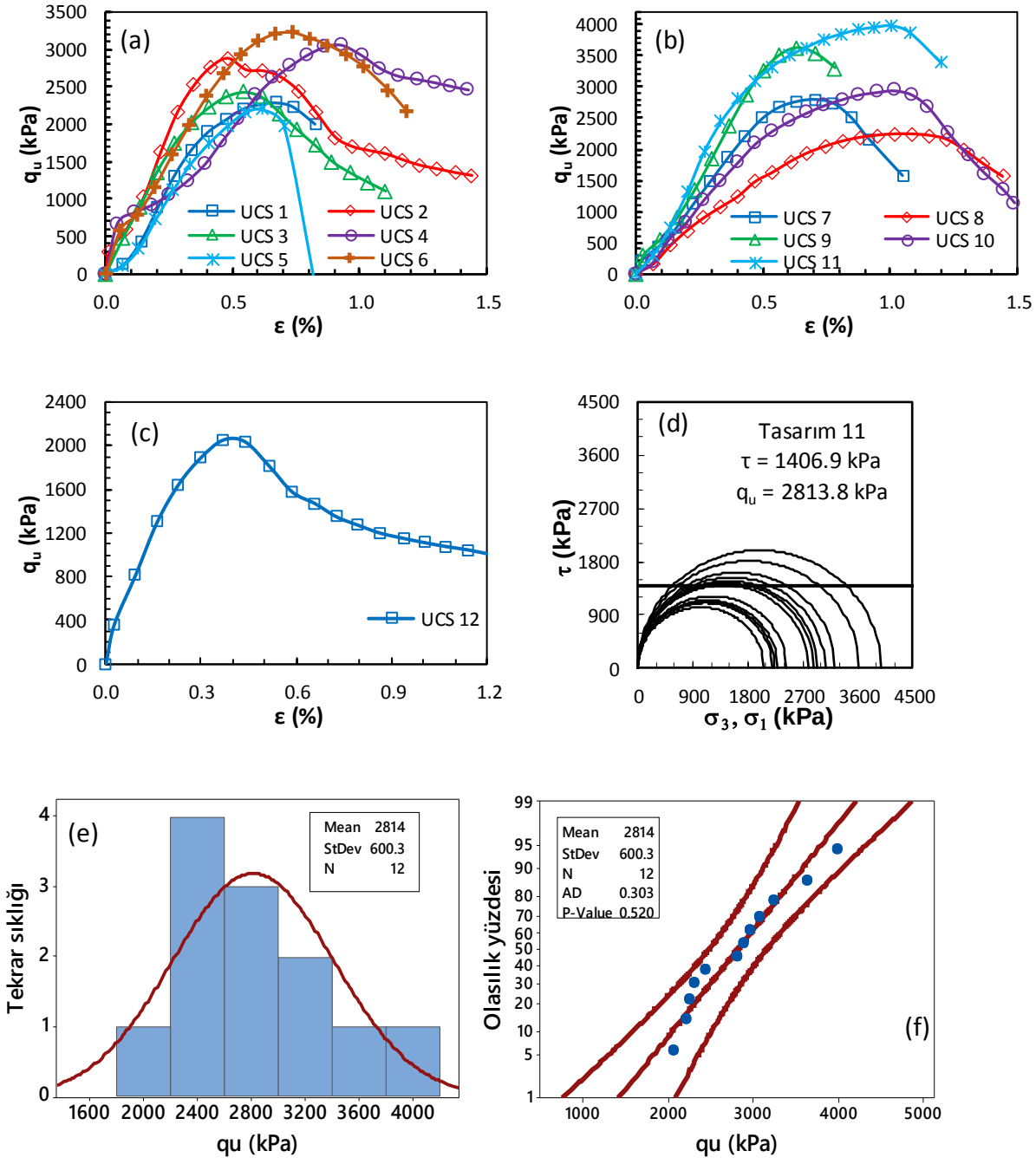
Şekil Ek 2.24. BÖ-8 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon alt bölgesi ve c) Mohr daireleri, d) histogram grafiği, e) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



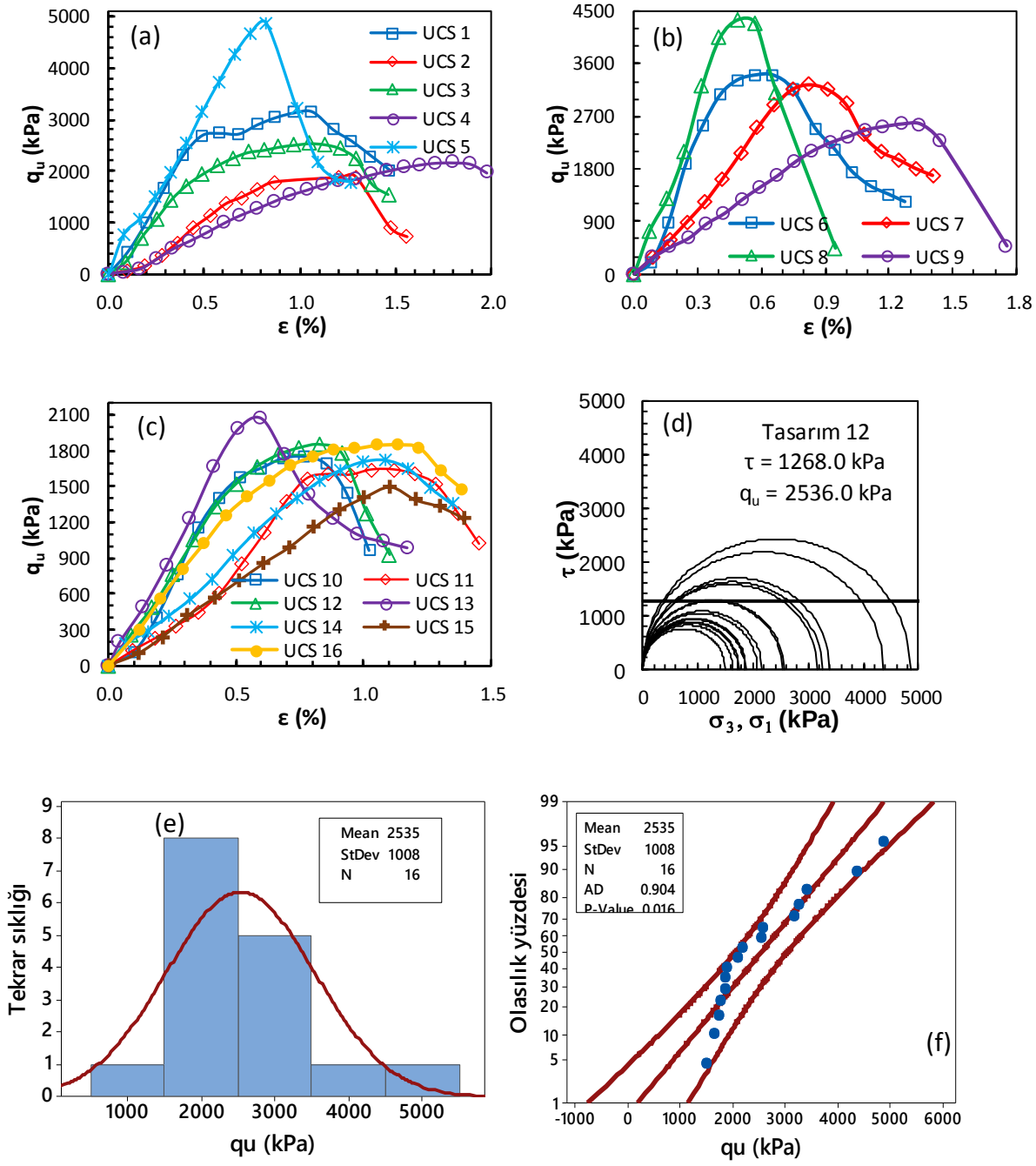
Şekil Ek 2.25. BÖ-9 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



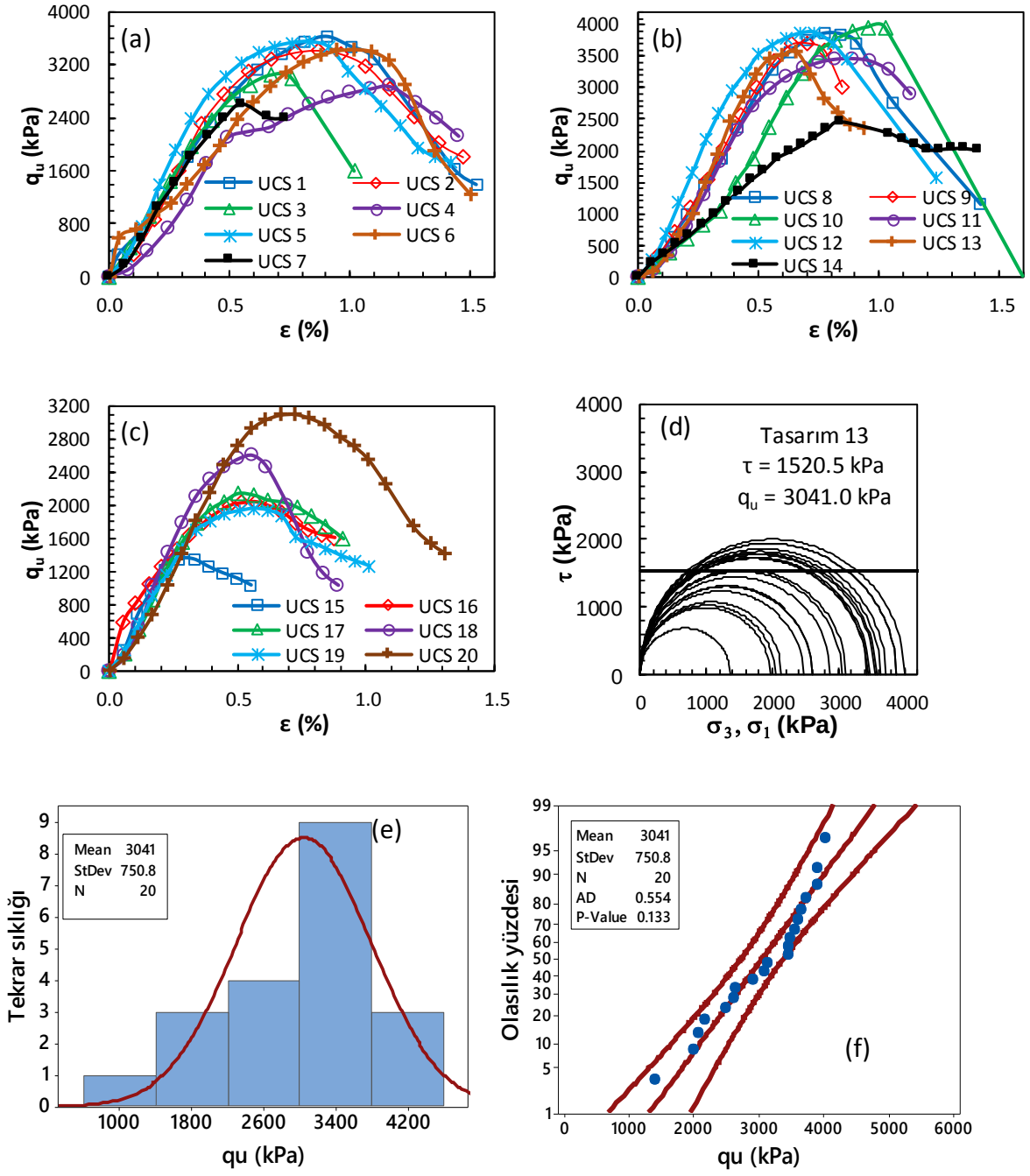
Şekil Ek 2.26. BÖ-10 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



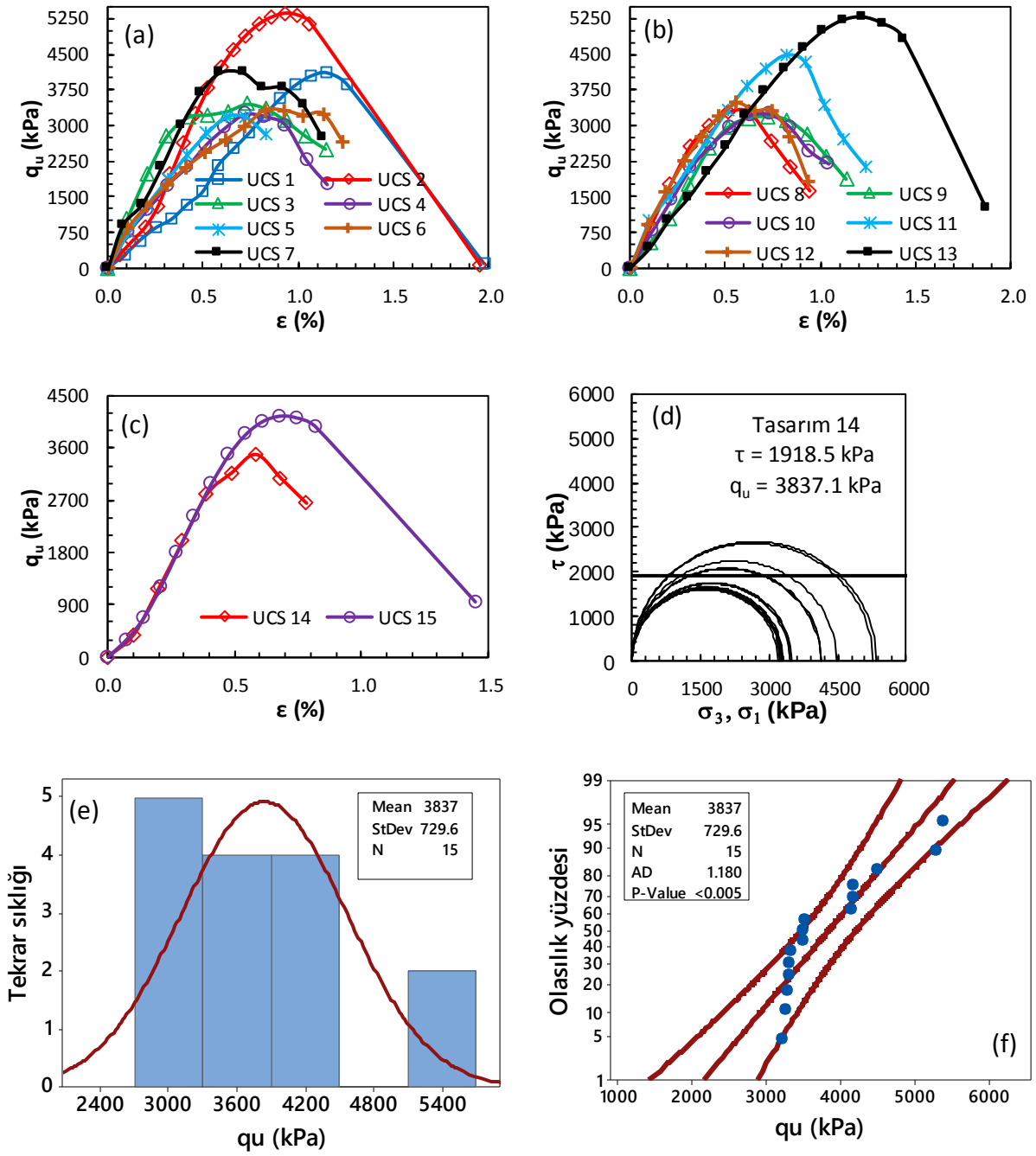
Şekil Ek 2.27. BÖ-11 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



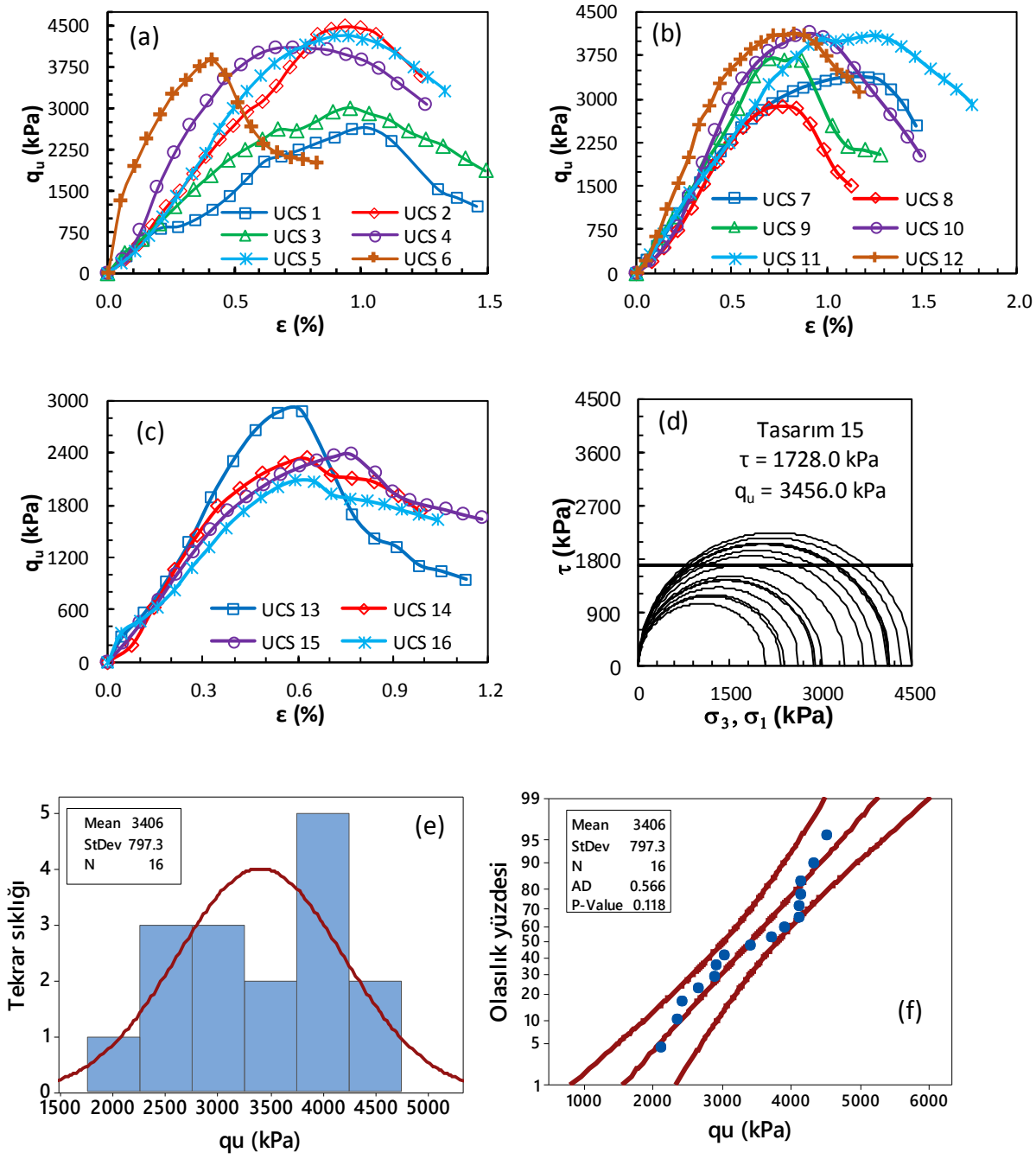
Şekil Ek 2.28. BÖ-12 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



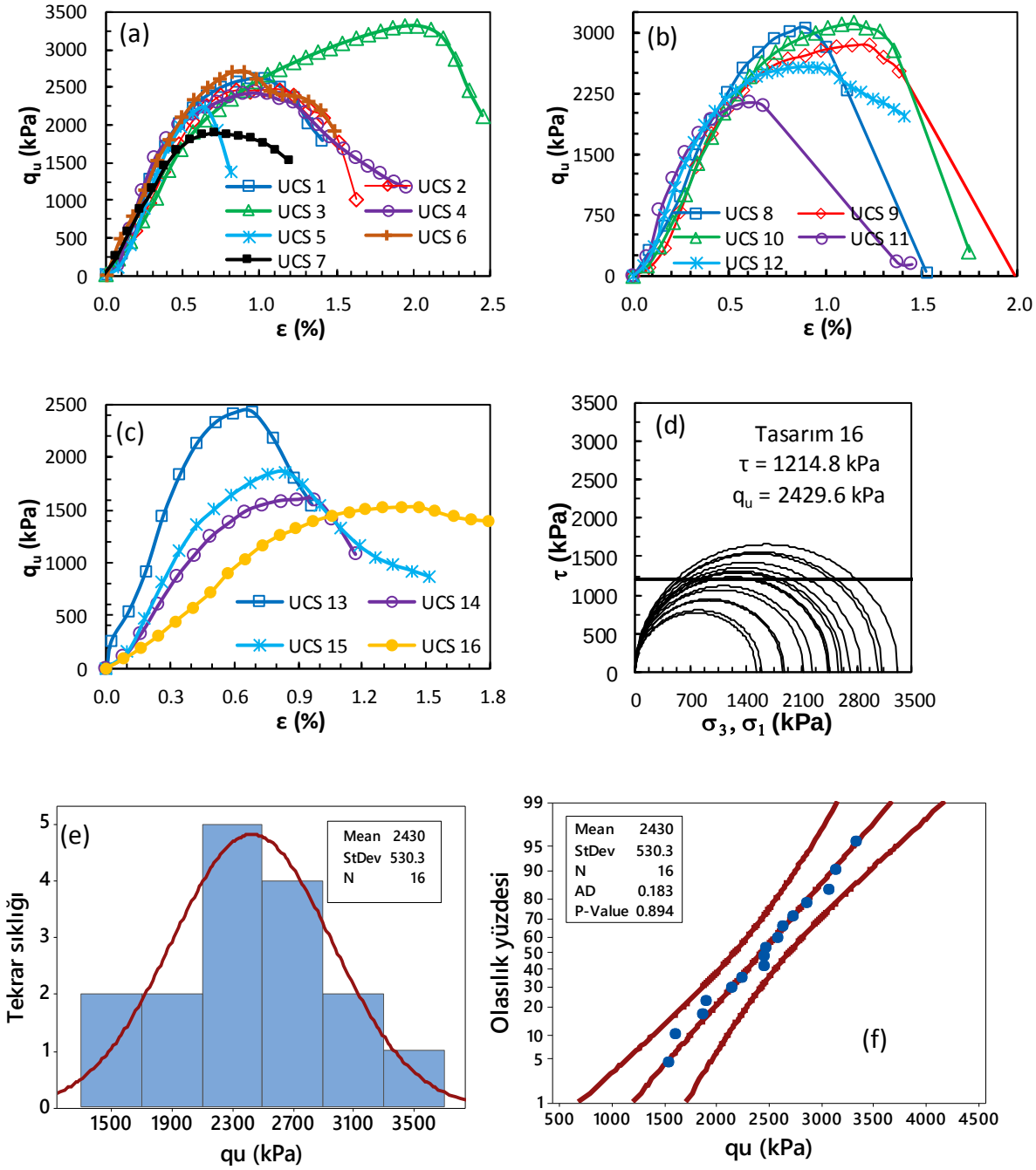
Şekil Ek 2.29. BÖ-13 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



Şekil Ek 2.30. BÖ-14 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



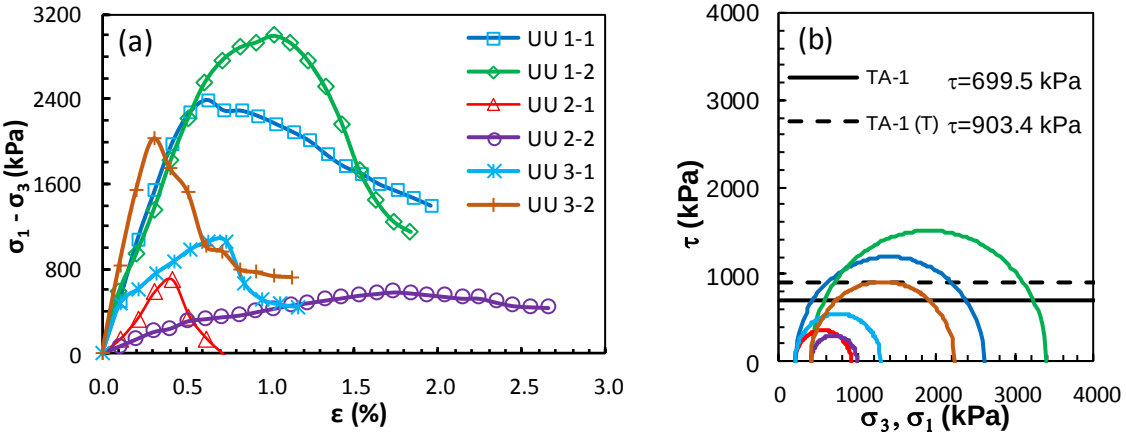
Şekil Ek 2.31. BÖ-15 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



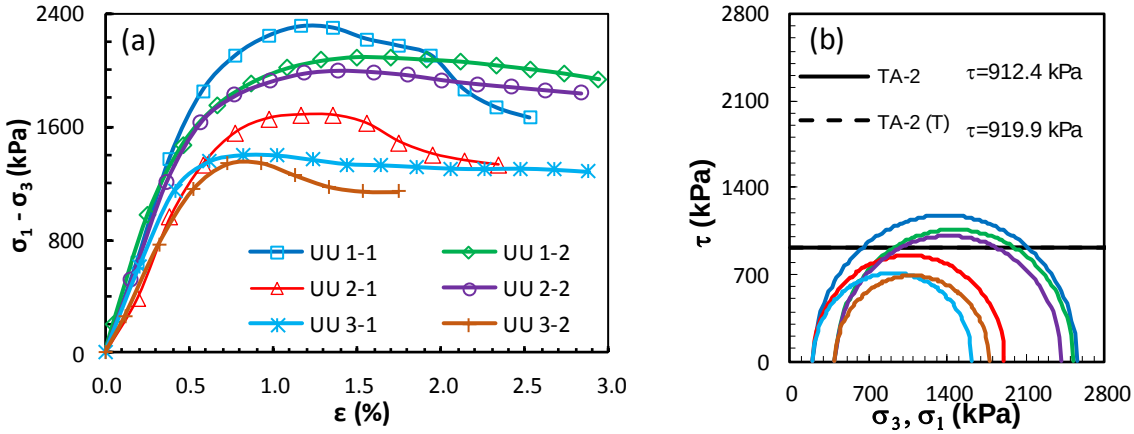
Şekil Ek 2.32. BÖ-16 numaralı kolona ait gerilme-birim deformasyon grafikleri: a) kolon üst bölgesi, b) kolon orta bölgesi, c) kolon alt bölgesi ve d) Mohr daireleri, e) histogram grafiği, f) olasılık grafiği (Büyük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

EK-3: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

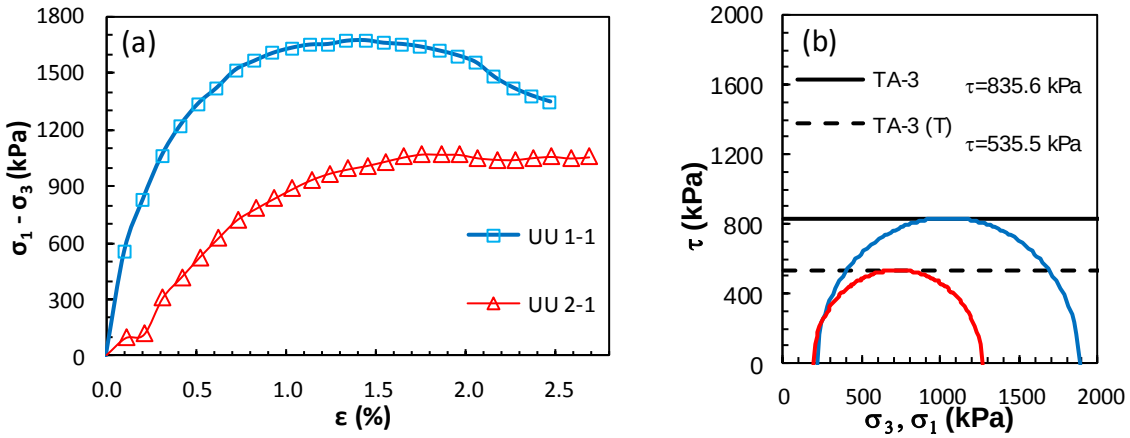
Kür süresi: 28 gün



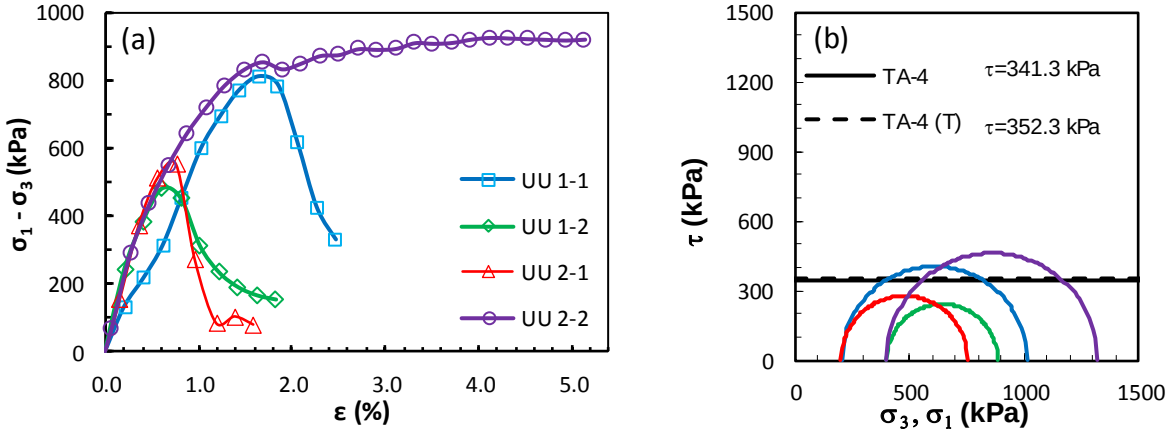
Şekil Ek 3.1. BÖ-1 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



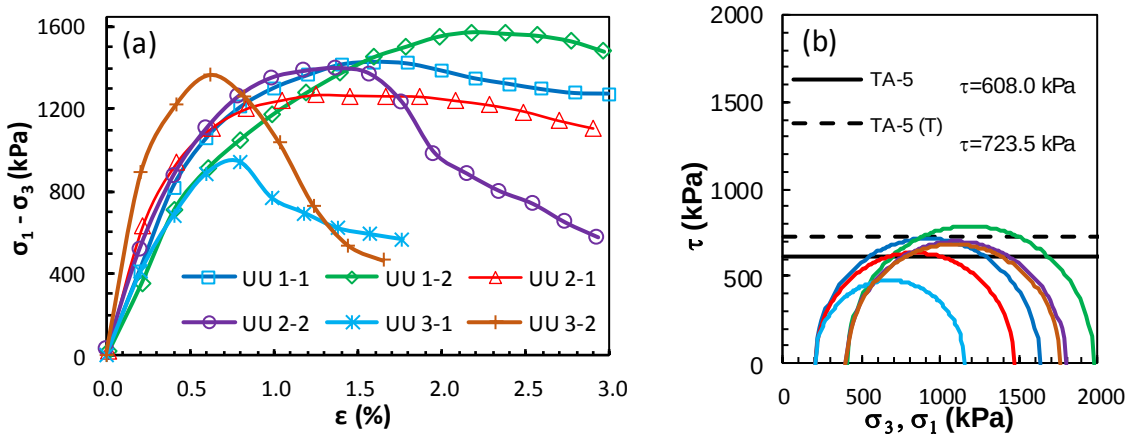
Şekil Ek 3.2. BÖ-2 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



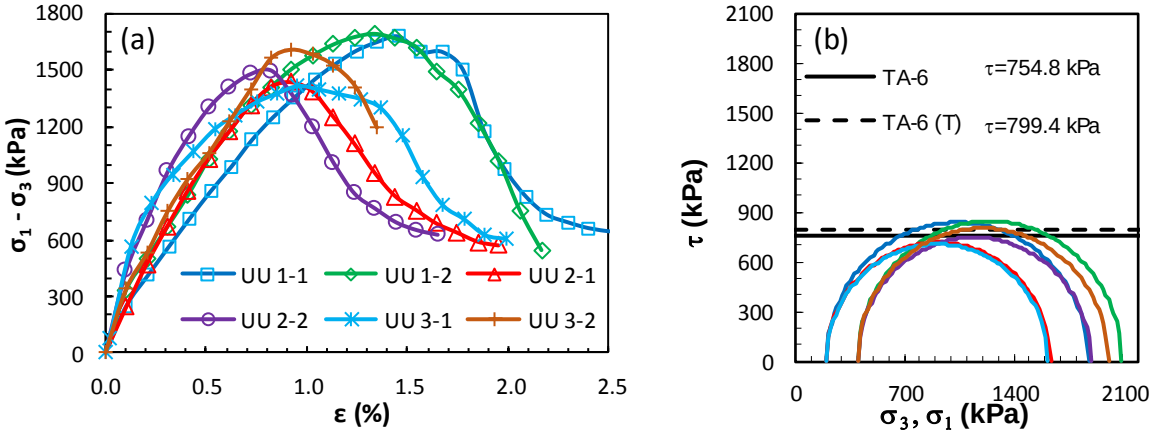
Şekil Ek 3.3. BÖ-3 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



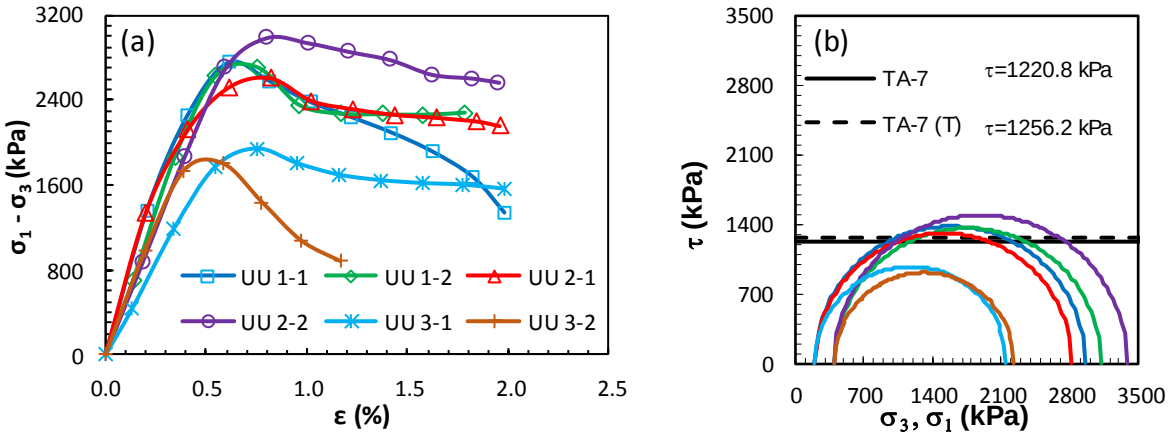
Şekil Ek 3.4. BÖ-4 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



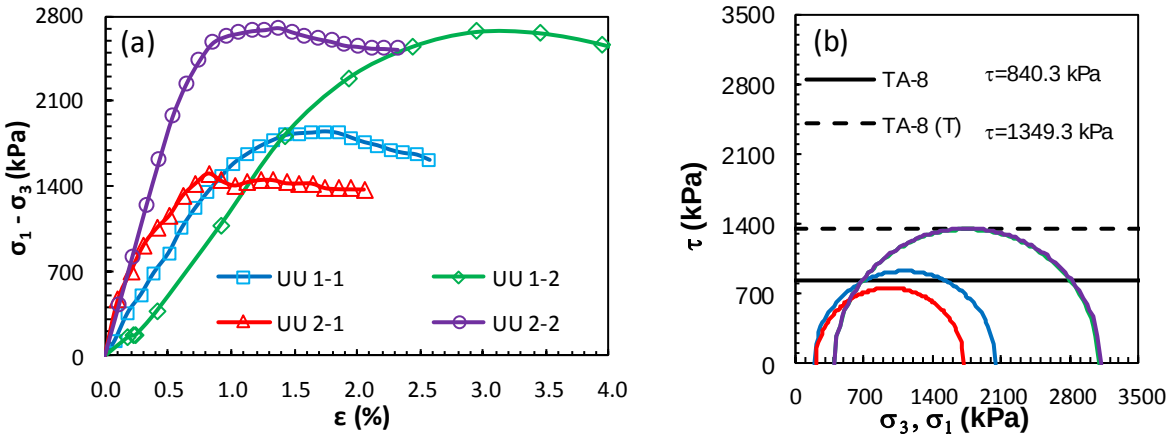
Şekil Ek 3.5. BÖ-5 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



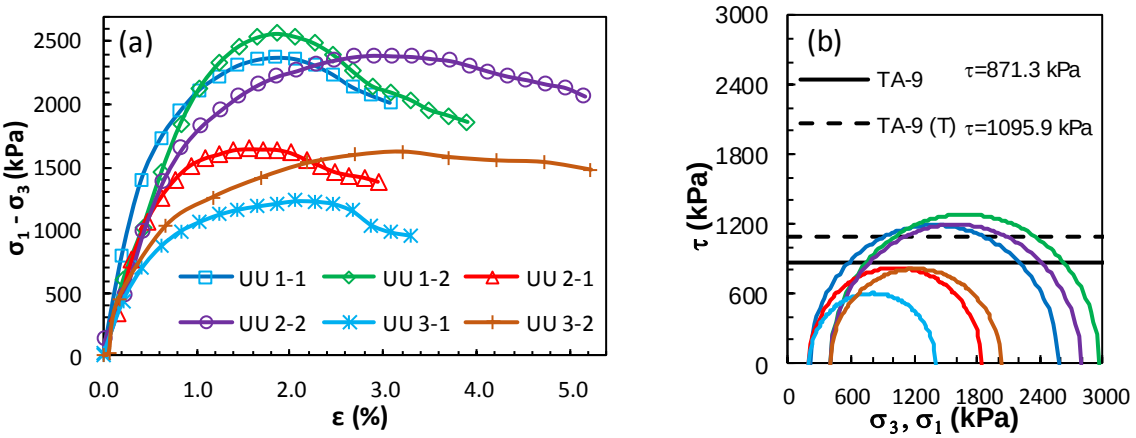
Şekil Ek 3.6. BÖ-6 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



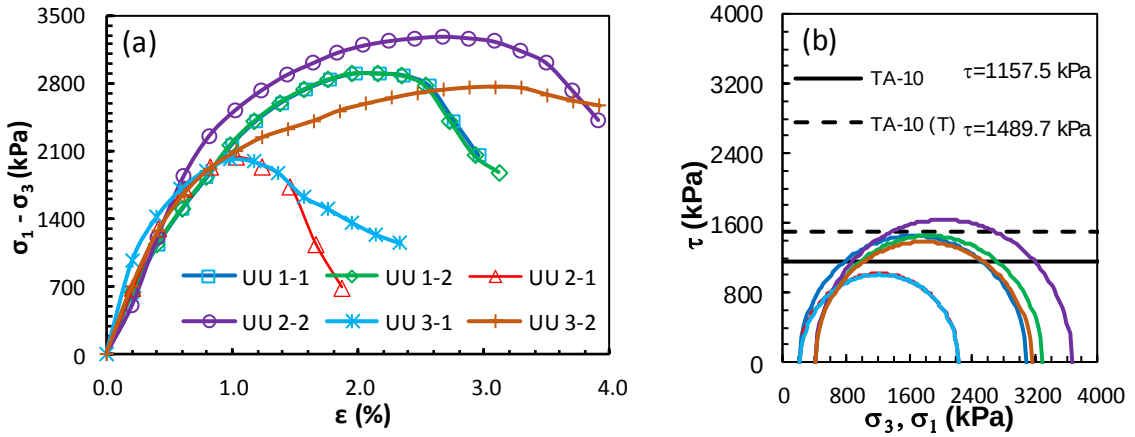
Şekil Ek 3.7. BÖ-7 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



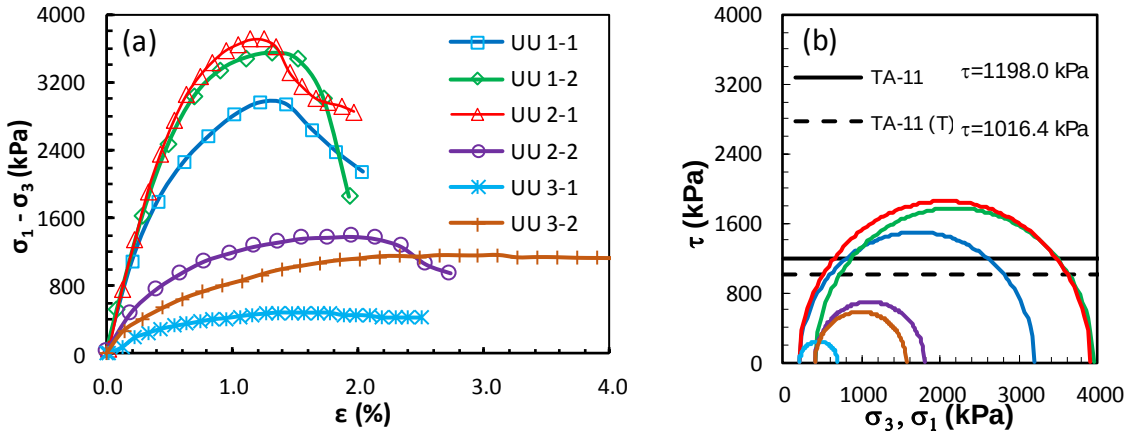
Şekil Ek 3.8. BÖ-8 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



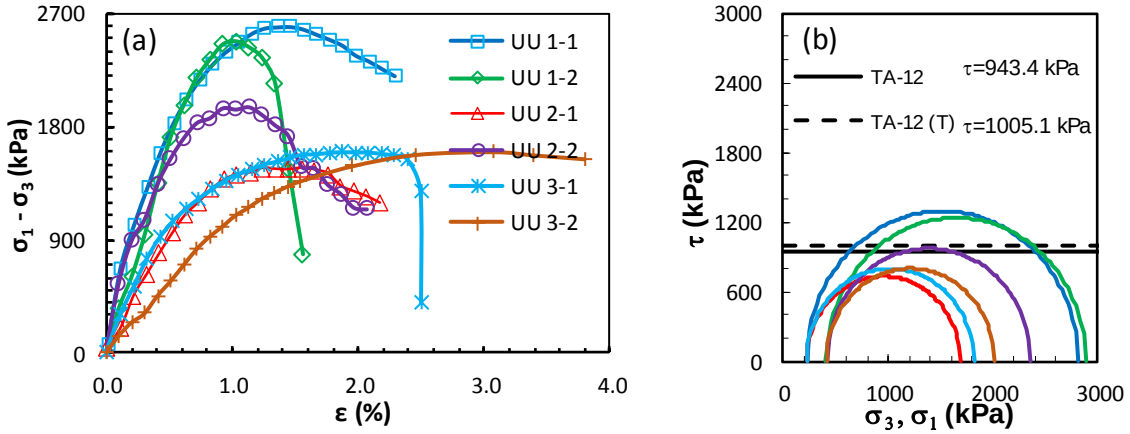
Şekil Ek 3.9. BÖ-9 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



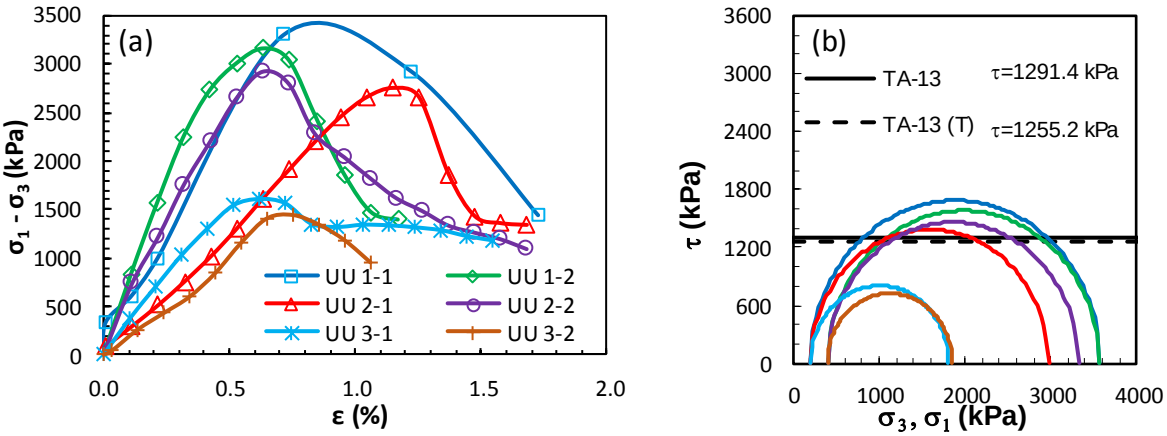
Şekil Ek 3.10. BÖ-10 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



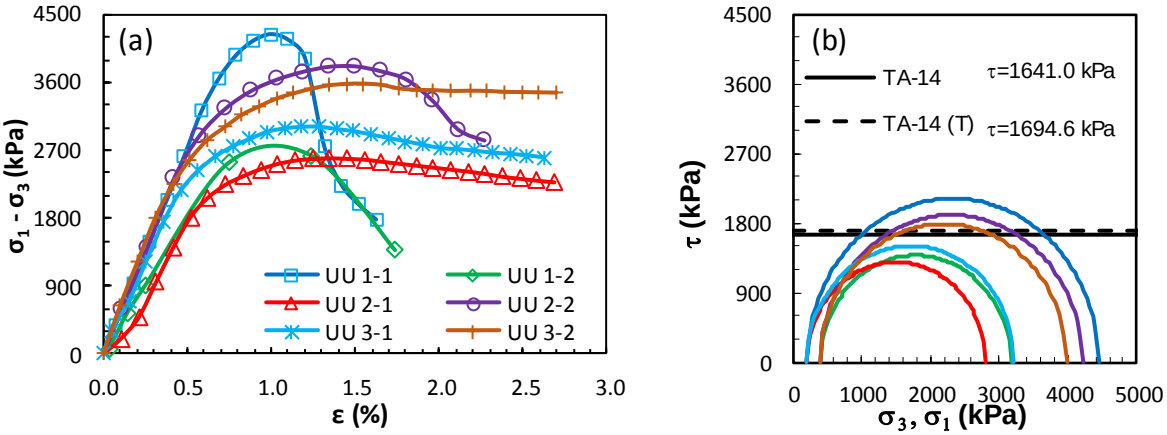
Şekil Ek 3.11. BÖ-11 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



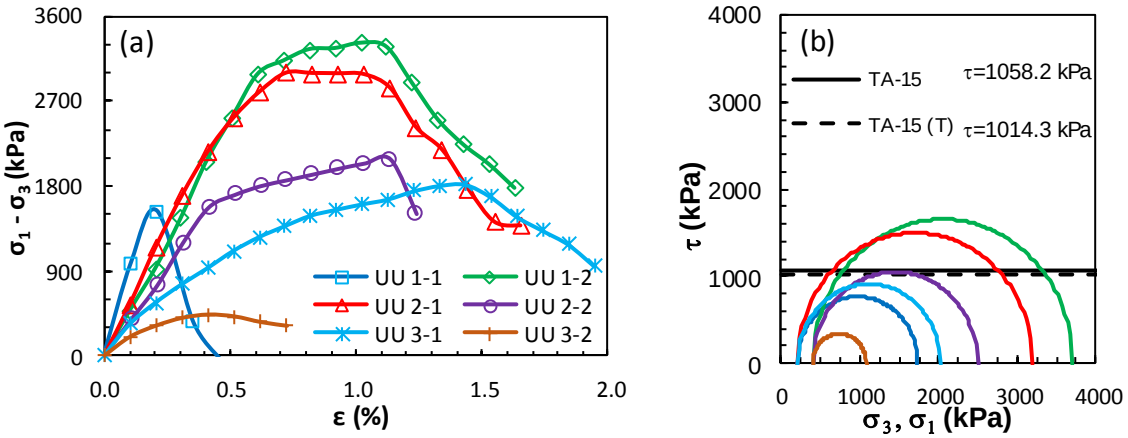
Şekil Ek 3.12. BÖ-12 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



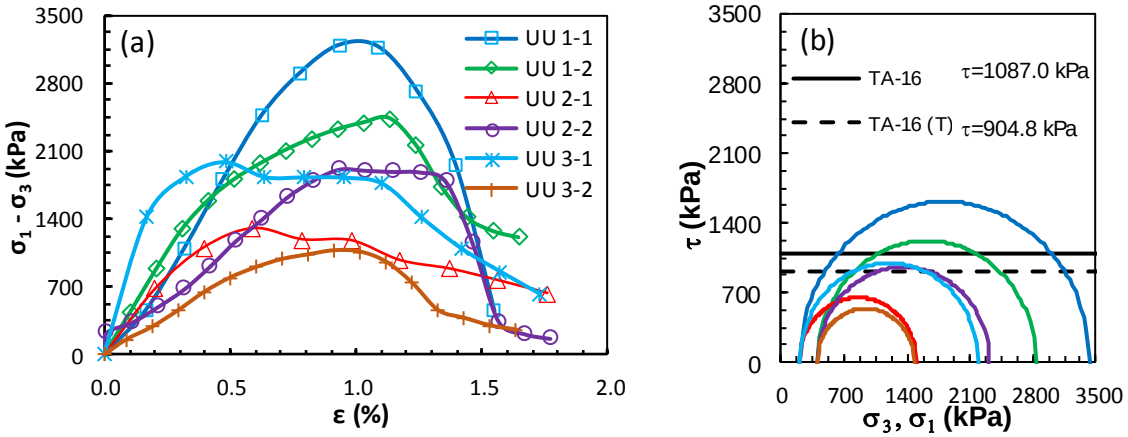
Şekil Ek 3.13. BÖ-13 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



Şekil Ek 3.14. BÖ-14 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

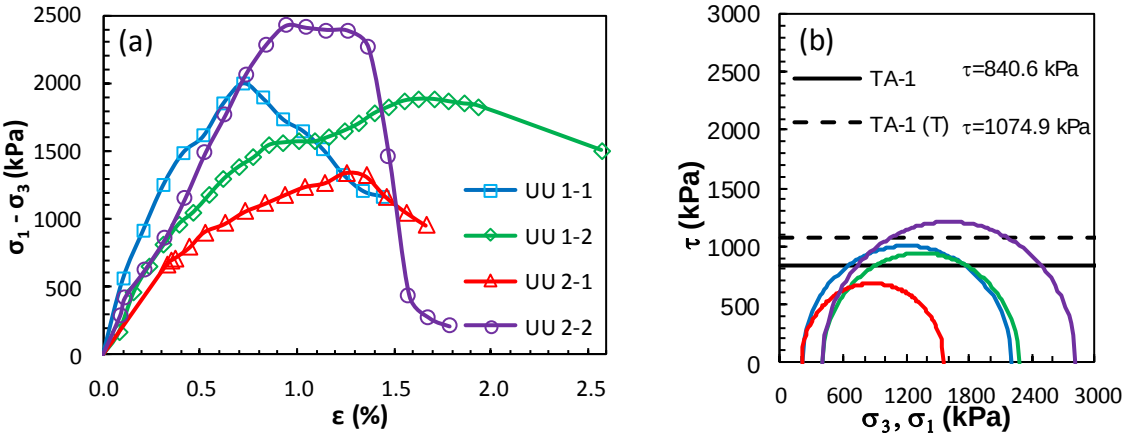


Şekil Ek 3.15. BÖ-15 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

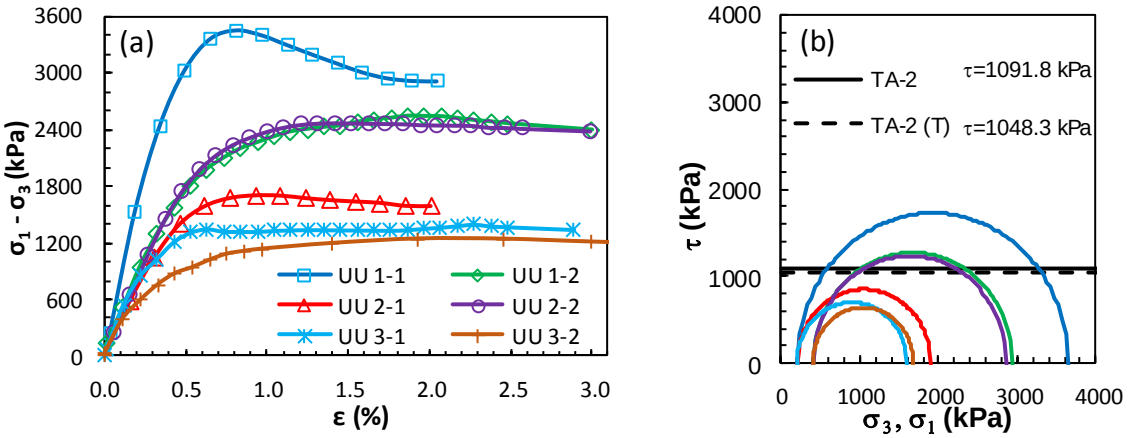


Şekil Ek 3.16. BÖ-16 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

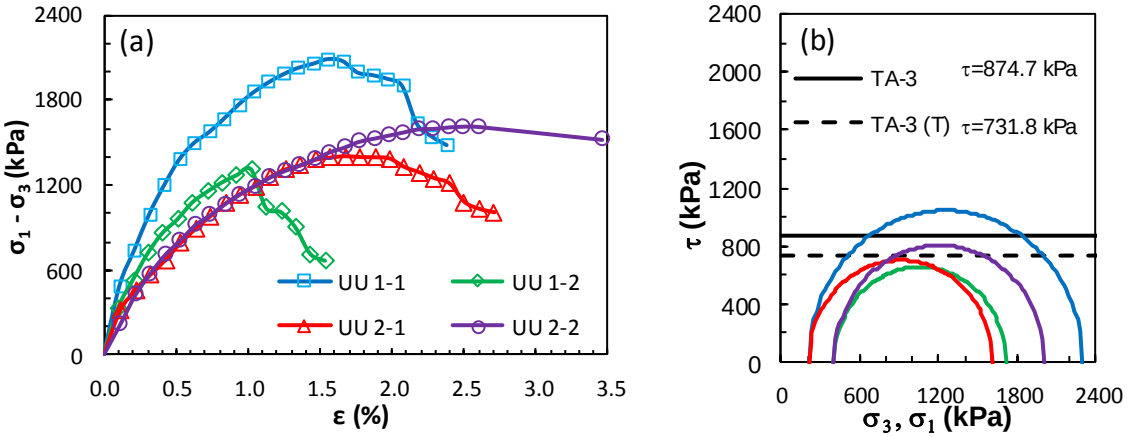
Kür süresi: 56 gün



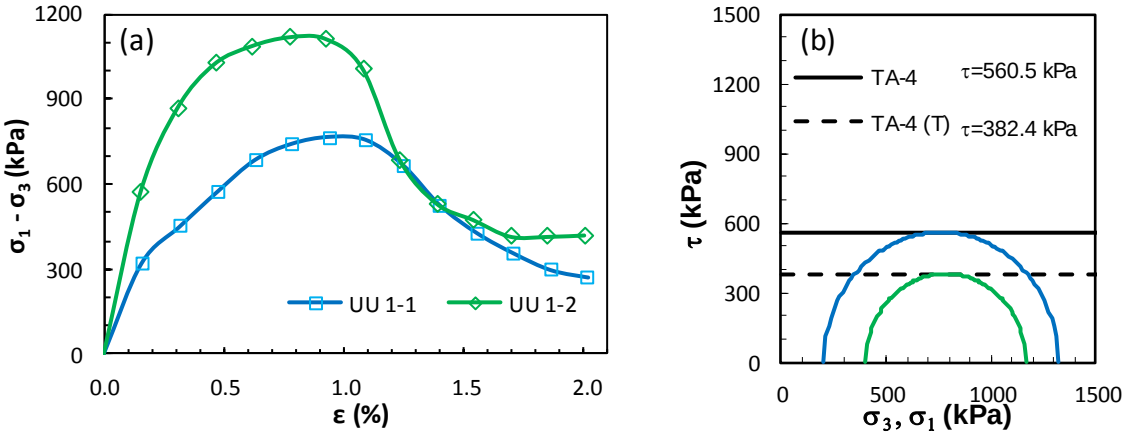
Şekil Ek 3.17. BÖ-1 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



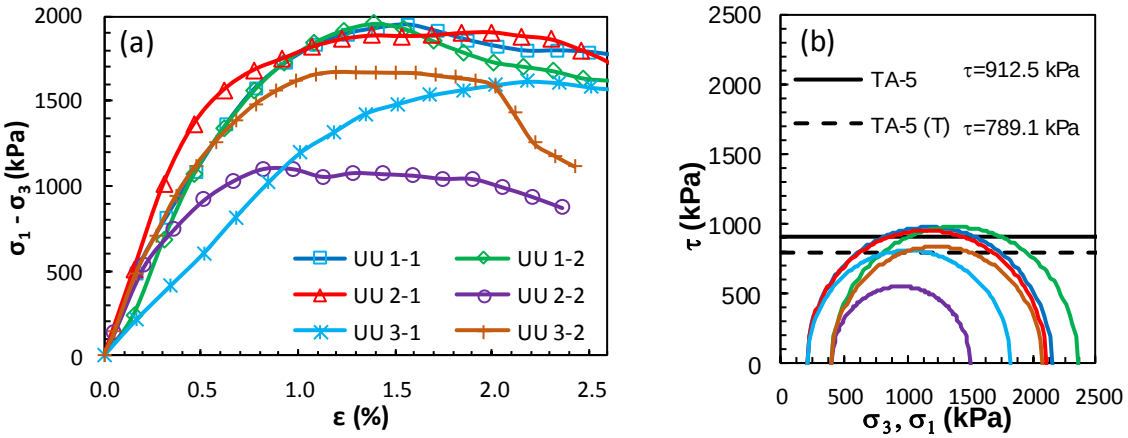
Şekil Ek 3.18. BÖ-2 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



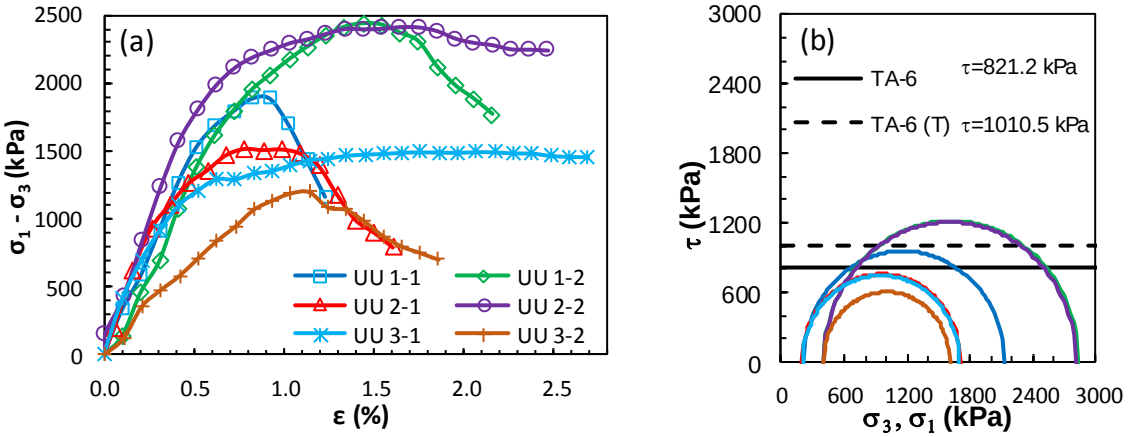
Şekil Ek 3.19. BÖ-3 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



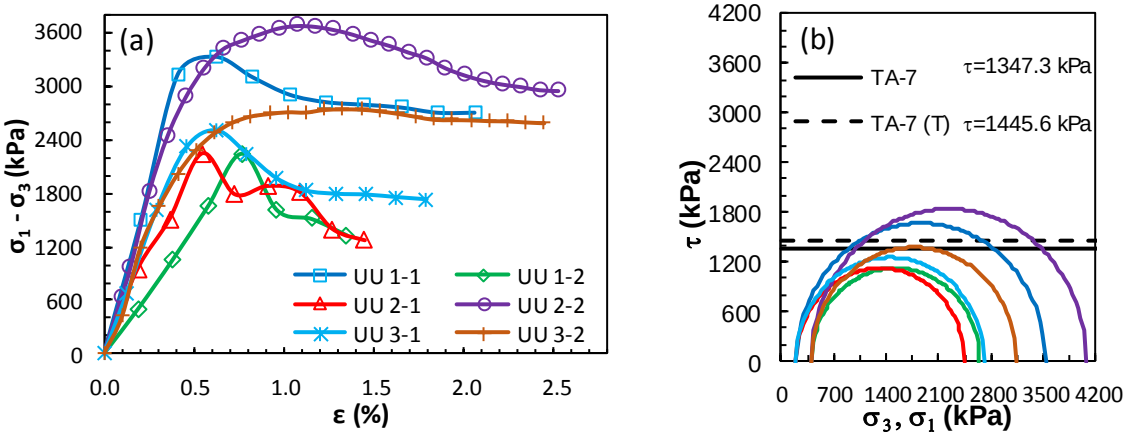
Şekil Ek 3.20. BÖ-4 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



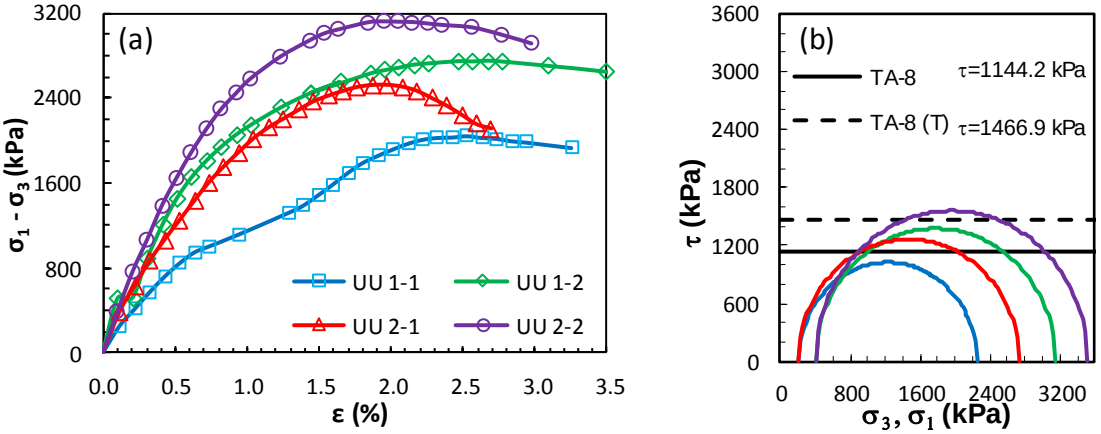
Şekil Ek 3.21. BÖ-5 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



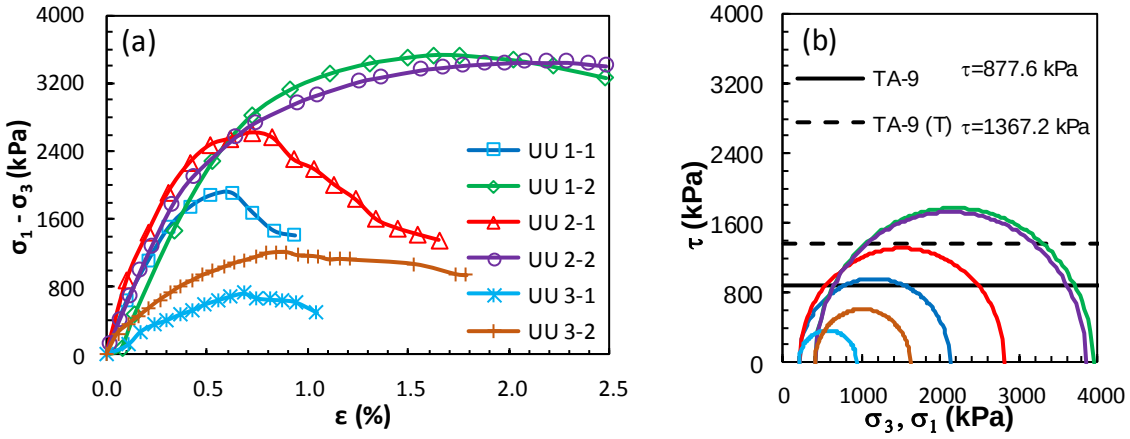
Şekil Ek 3.22. BÖ-6 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



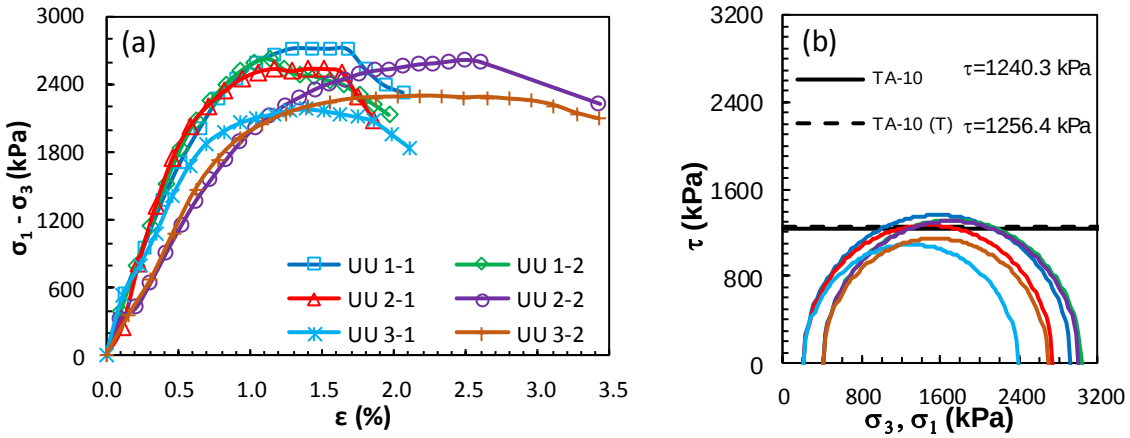
Şekil Ek 3.23. BÖ-7 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



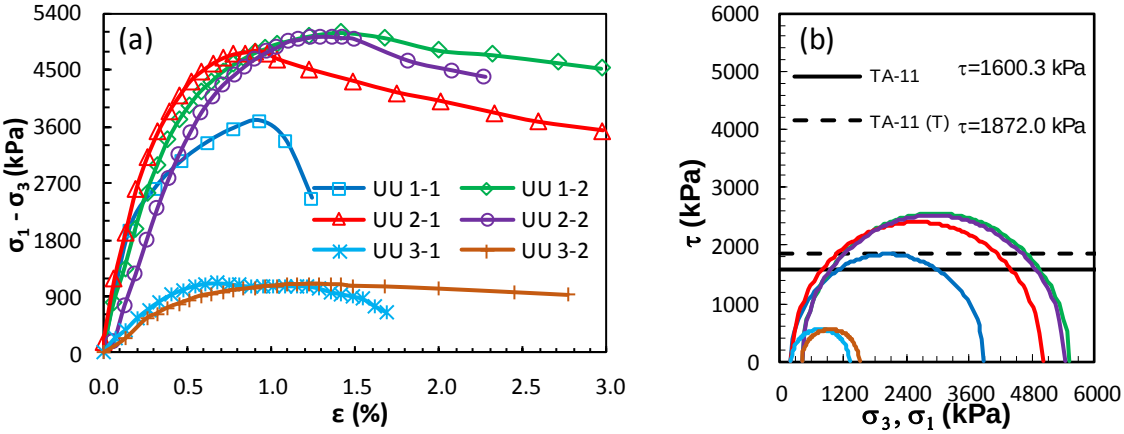
Şekil Ek 3.24. BÖ-8 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



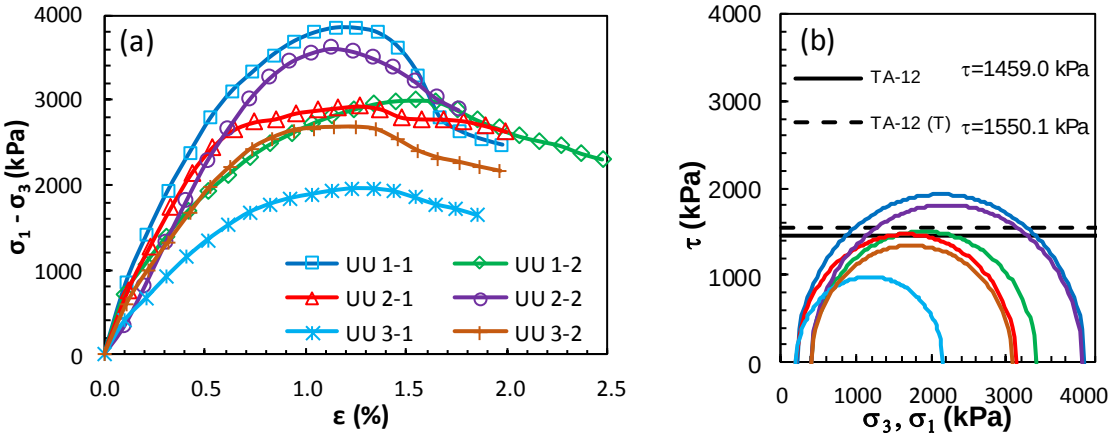
Şekil Ek 3.25. BÖ-9 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



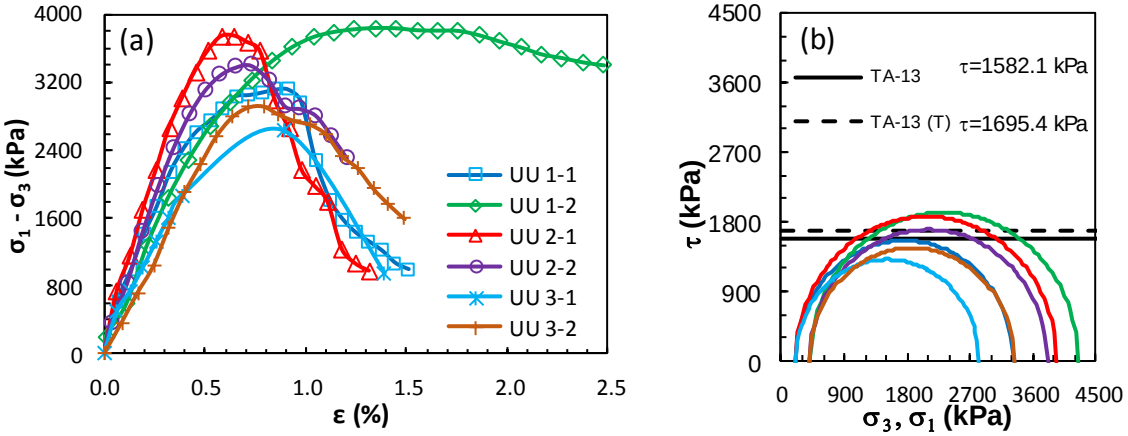
Şekil Ek 3.26. BÖ-10 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



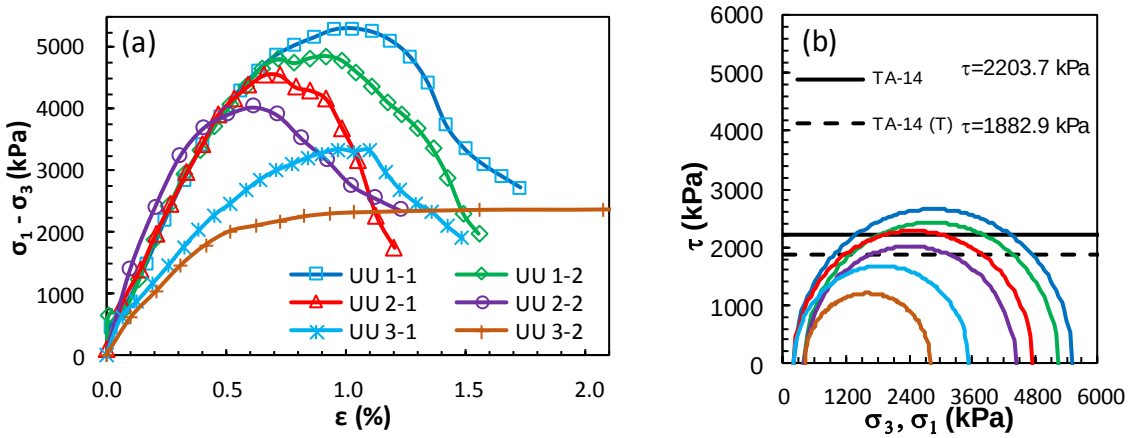
Şekil Ek 3.27. BÖ-11 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



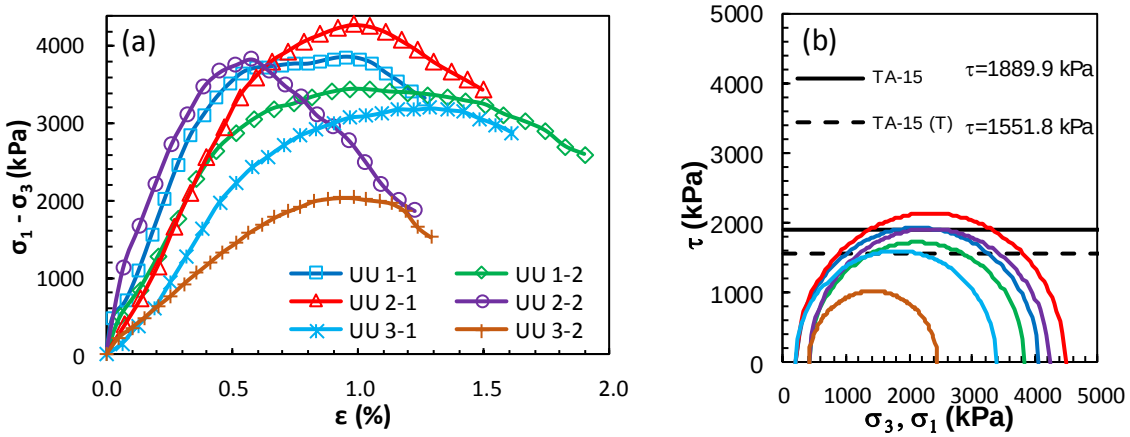
Şekil Ek 3.28. BÖ-12 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



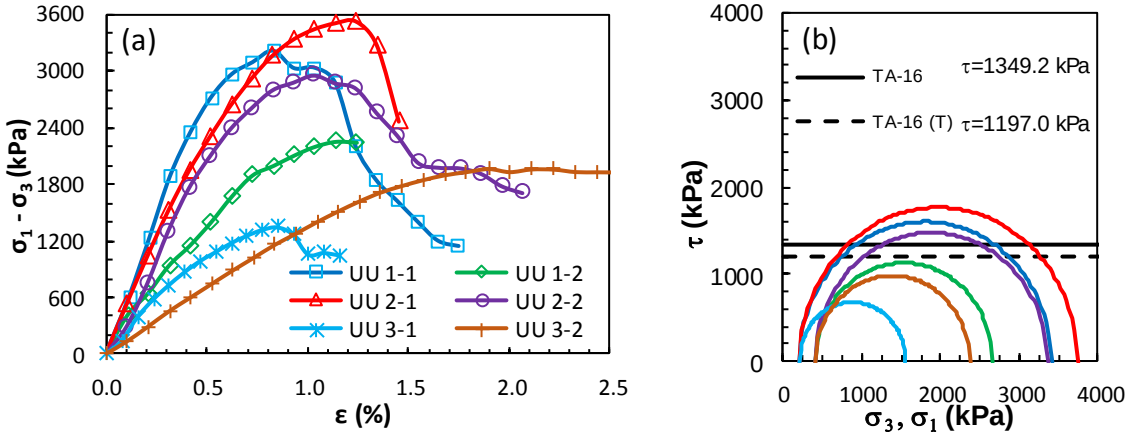
Şekil Ek 3.29. BÖ-13 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



Şekil Ek 3.30. BÖ-14 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (büyük ölçekli DKK, 56 gün)



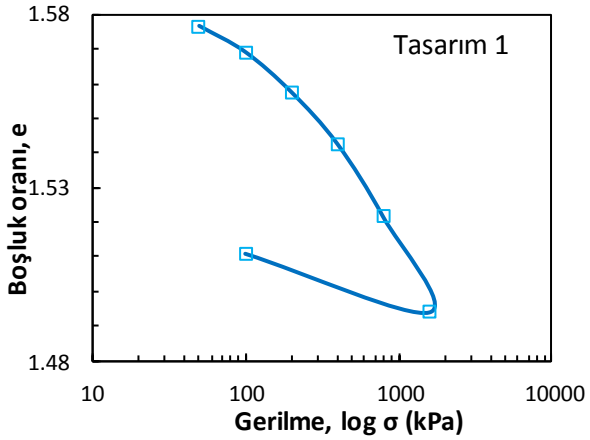
Şekil Ek 3.31. BÖ-15 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



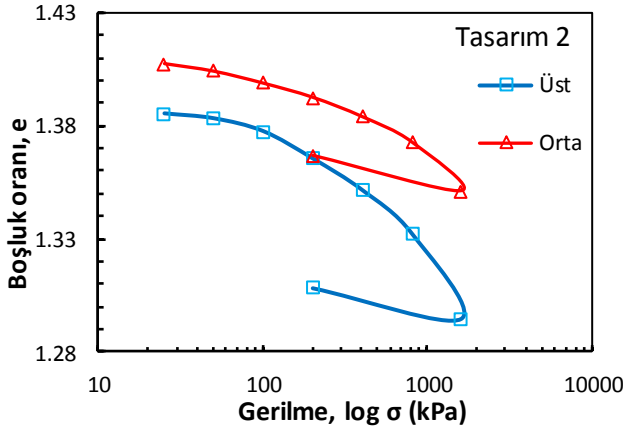
Şekil Ek 3.32. BÖ-16 numaralı kolona ait UU deney sonuçları: a) deviatör gerilme-birim boy kısalması grafikleri, b) Mohr daireleri ile kırılma zarfları (Büyük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

EK-4: Büyük Ölçekli DKK Tasarımı: Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

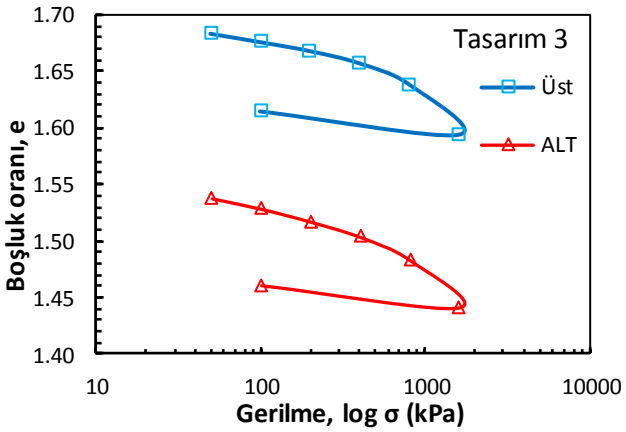
Kür süresi: 28 gün



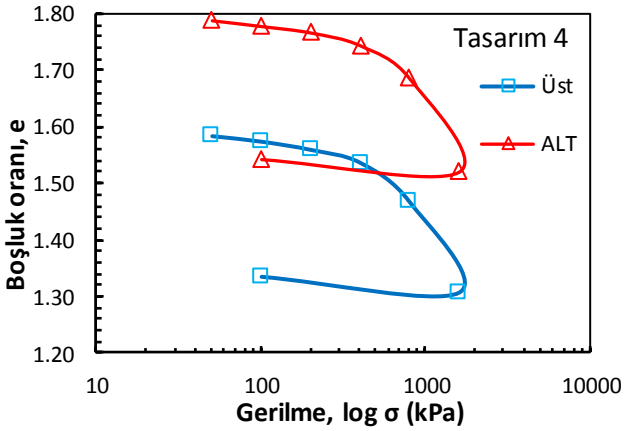
Şekil Ek 4.1. BÖ-1 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



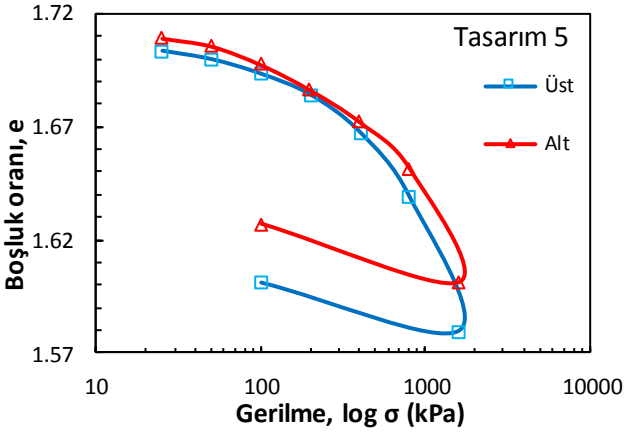
Şekil Ek 4.2. BÖ-2 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



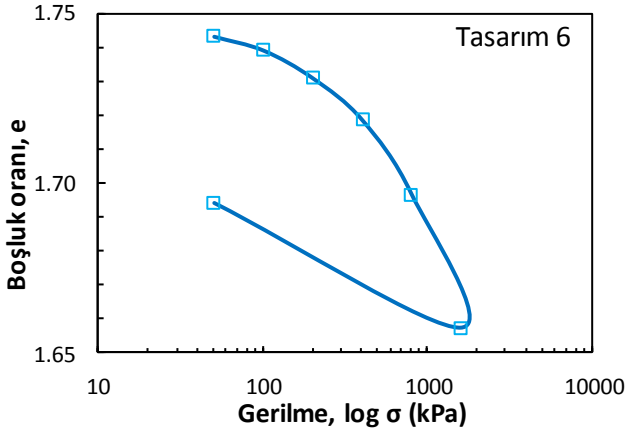
Şekil Ek 4.3. BÖ-3 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



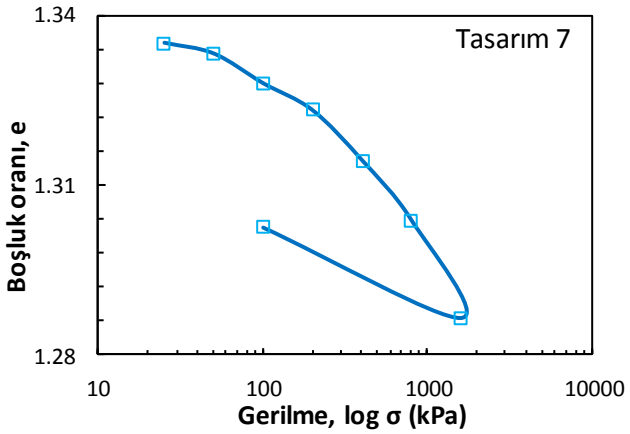
Şekil Ek 4.4. BÖ-4 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



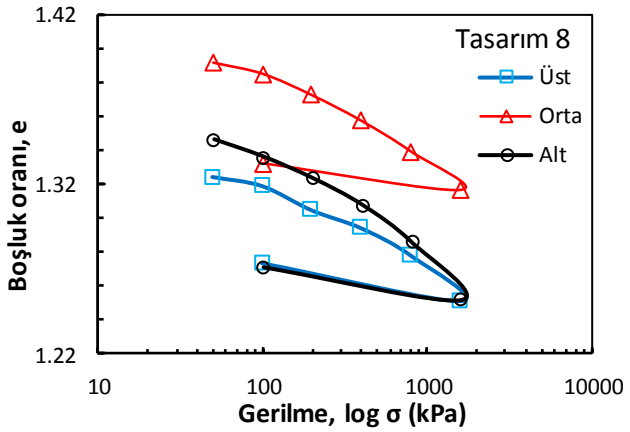
Şekil Ek 4.5. BÖ-5 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



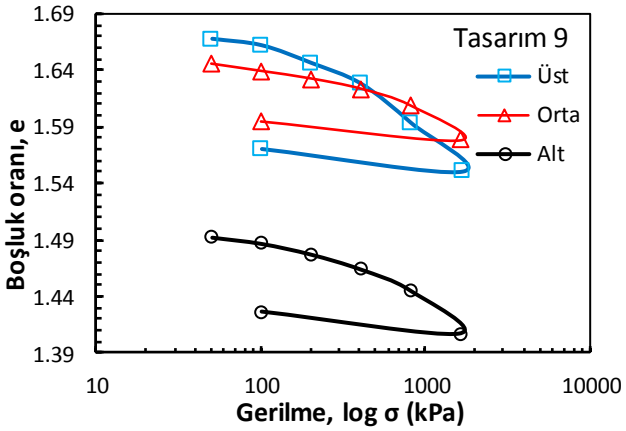
Şekil Ek 4.6. BÖ-6 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



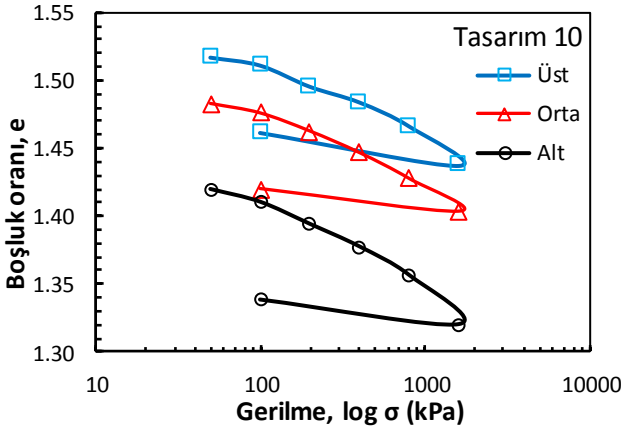
Şekil Ek 4.7. BÖ-7 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



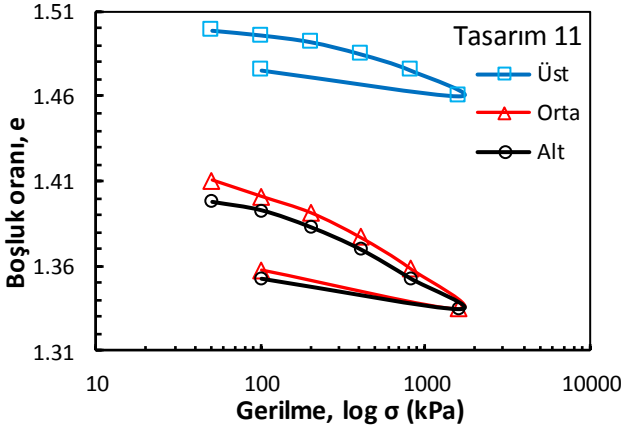
Şekil Ek 4.8. BÖ-8 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



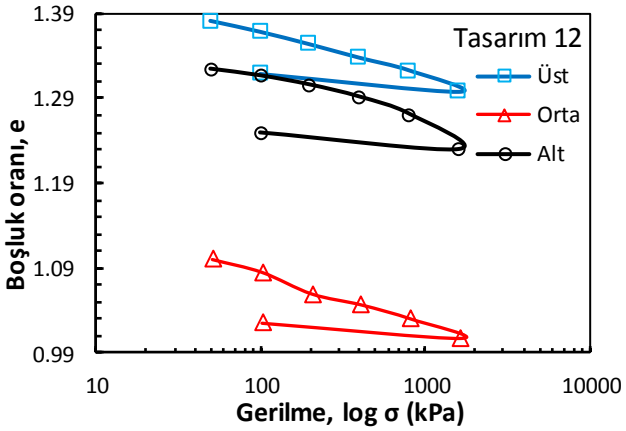
Şekil Ek 4.9. BÖ-9 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



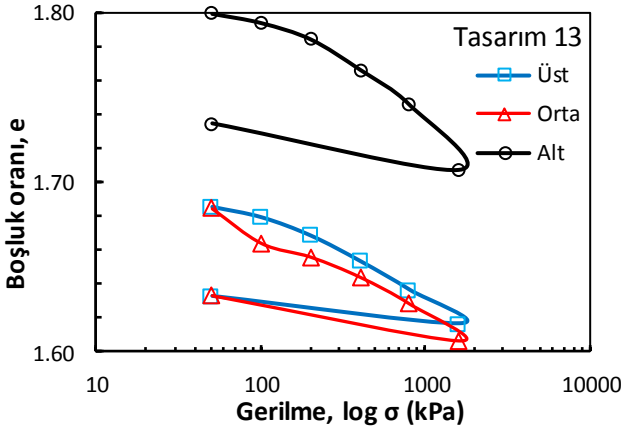
Şekil Ek 4.10. BÖ-10 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



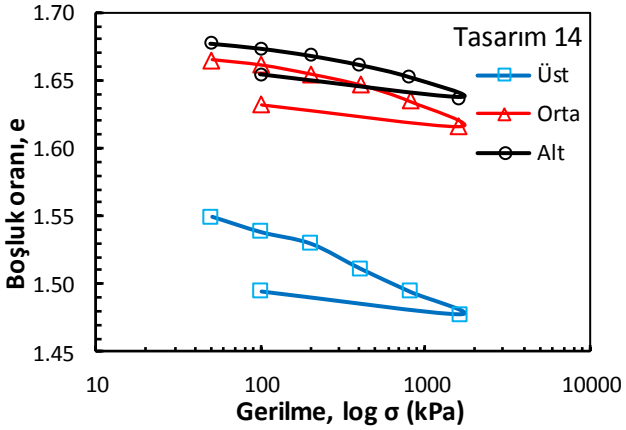
Şekil Ek 4.11. BÖ-11 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



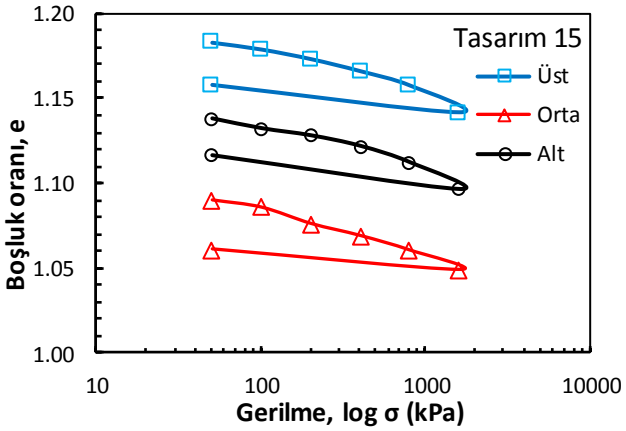
Şekil Ek 4.12. BÖ-12 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



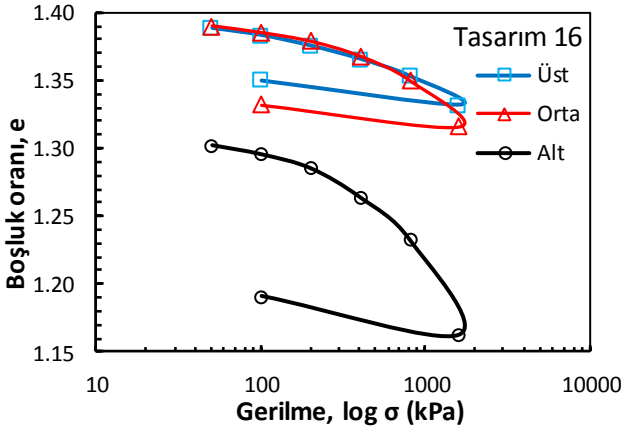
Şekil Ek 4.13. BÖ-13 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)



Şekil Ek 4.14. BÖ-14 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

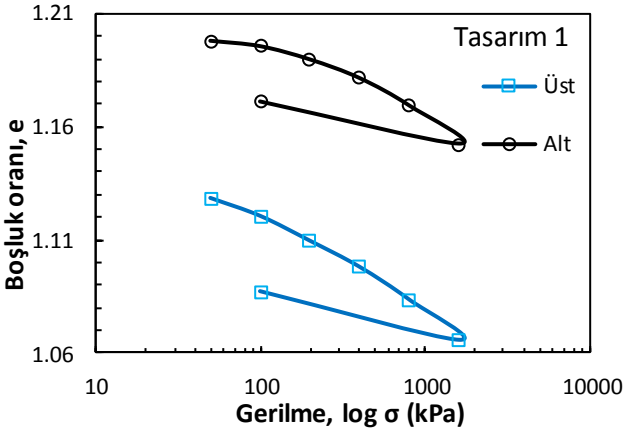


Şekil Ek 4.15. BÖ-15 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

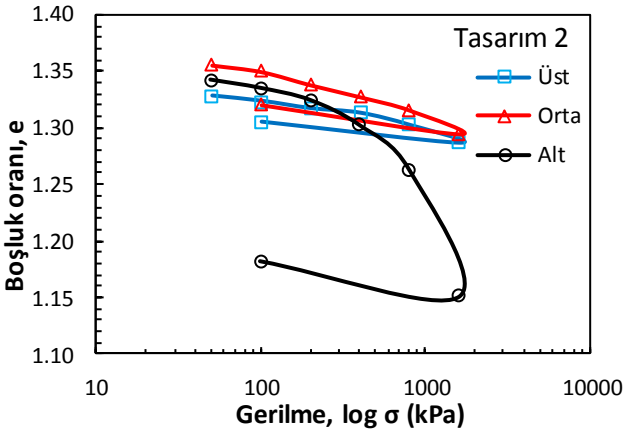


Şekil Ek 4.16. BÖ-16 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 28 gün)

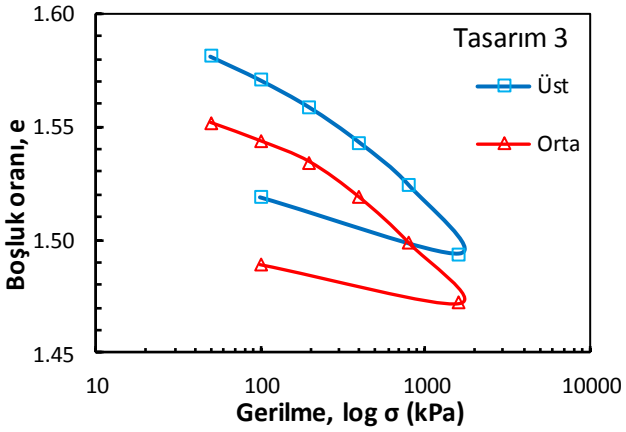
Kür süresi: 56 gün



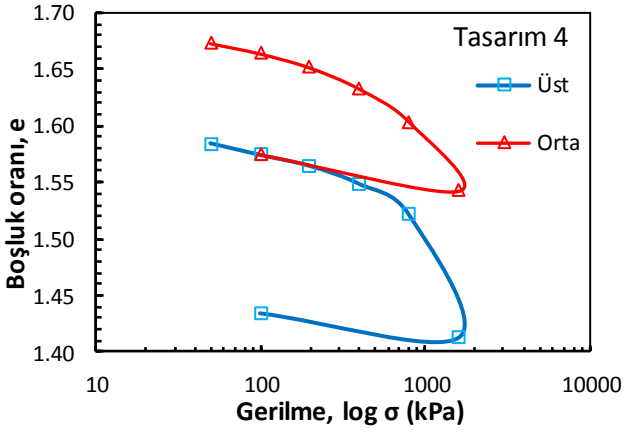
Şekil Ek 4.17. BÖ-1 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



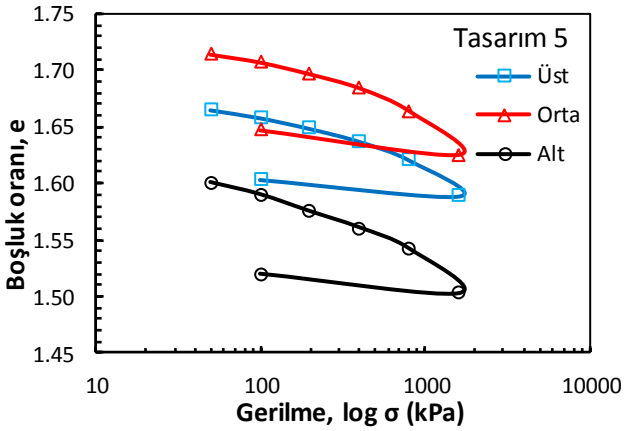
Şekil Ek 4.18. BÖ-2 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



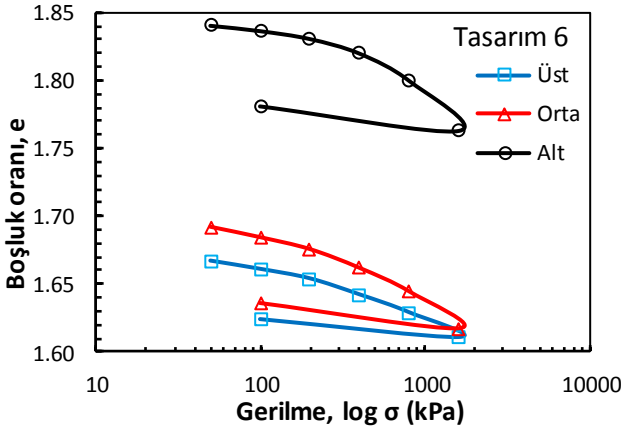
Şekil Ek 4.19. BÖ-3 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



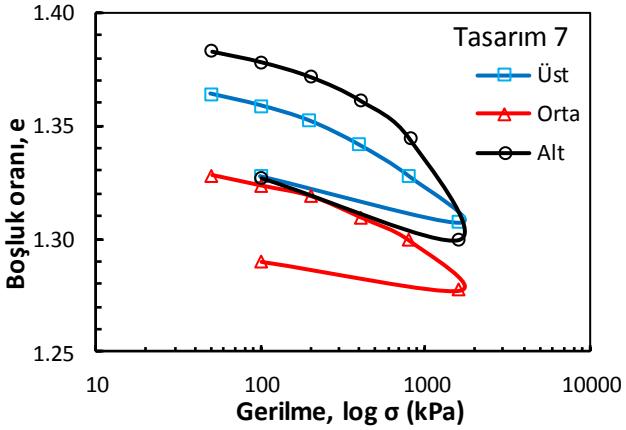
Şekil Ek 4.20. BÖ-4 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



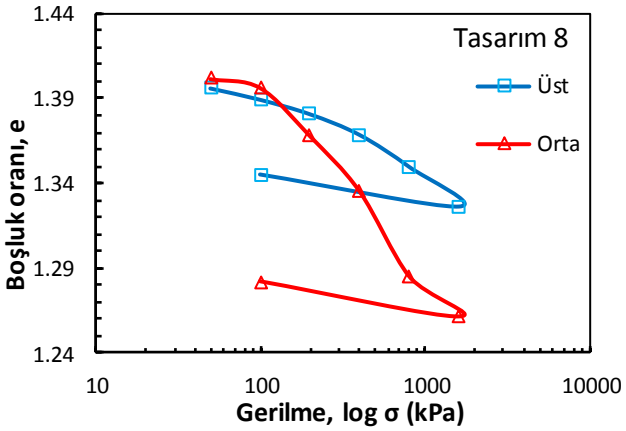
Şekil Ek 4.21. BÖ-5 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



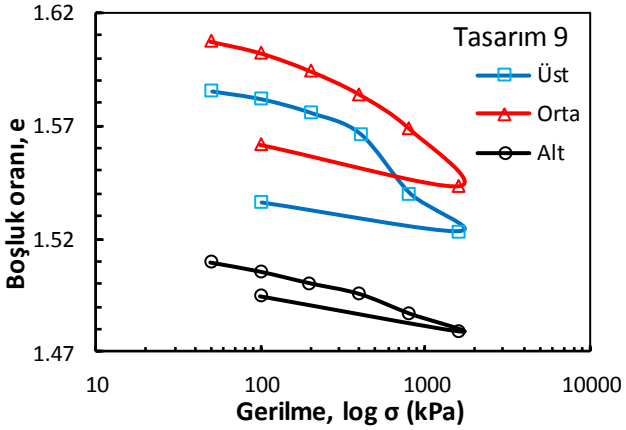
Şekil Ek 4.22. BÖ-6 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



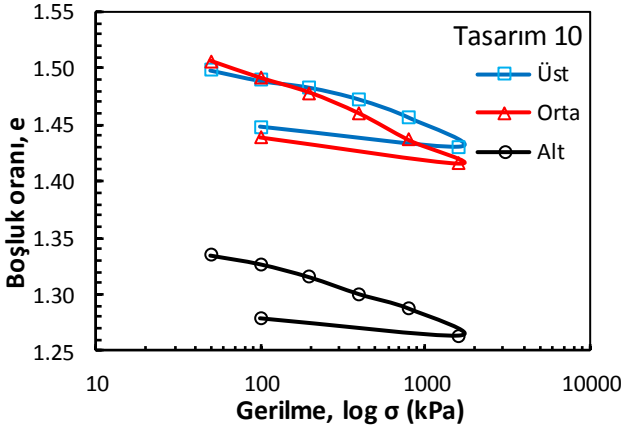
Şekil Ek 4.23. BÖ-7 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



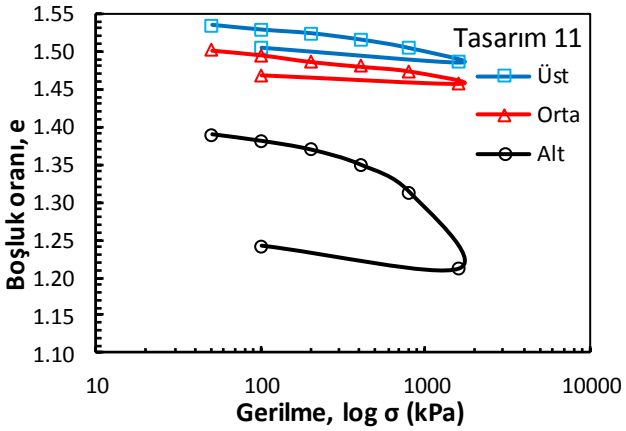
Şekil Ek 4.24. BÖ-8 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



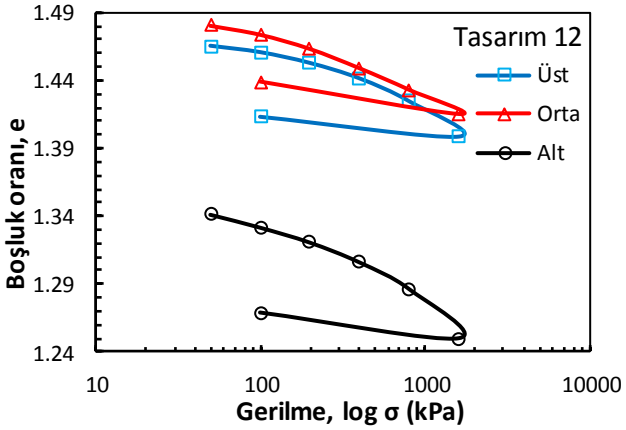
Şekil Ek 4.25. BÖ-9 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



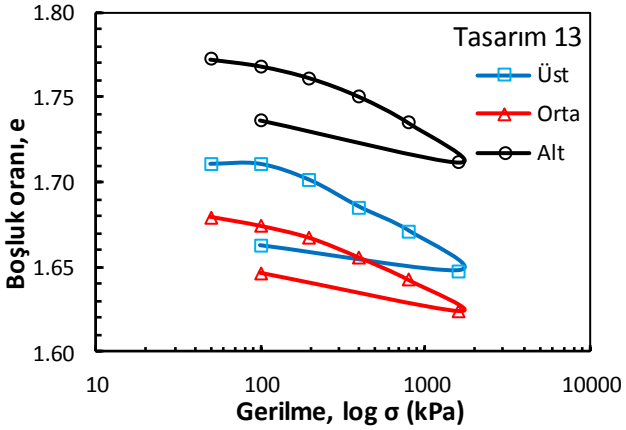
Şekil Ek 4.26. BÖ-10 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



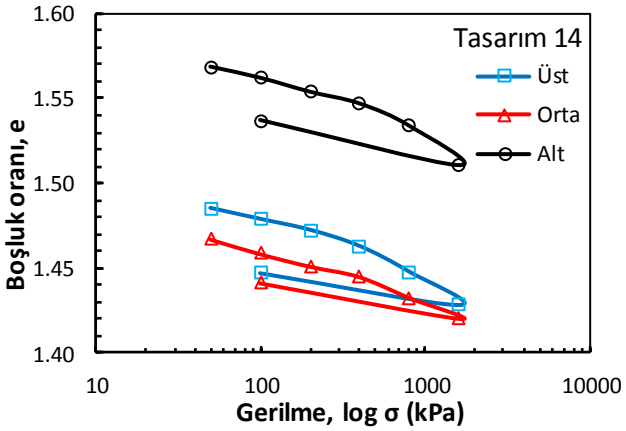
Şekil Ek 4.27. BÖ-11 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



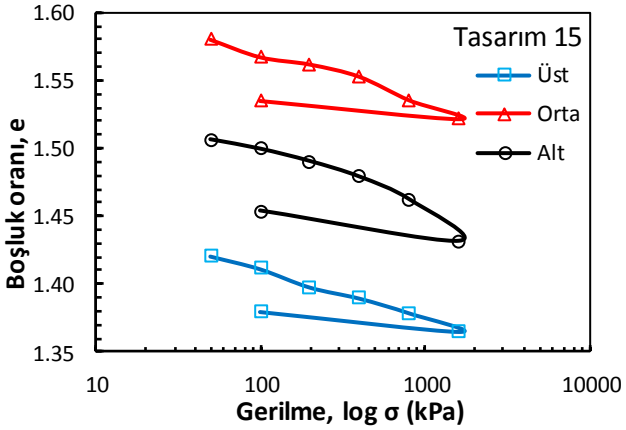
Şekil Ek 4.28. BÖ-12 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



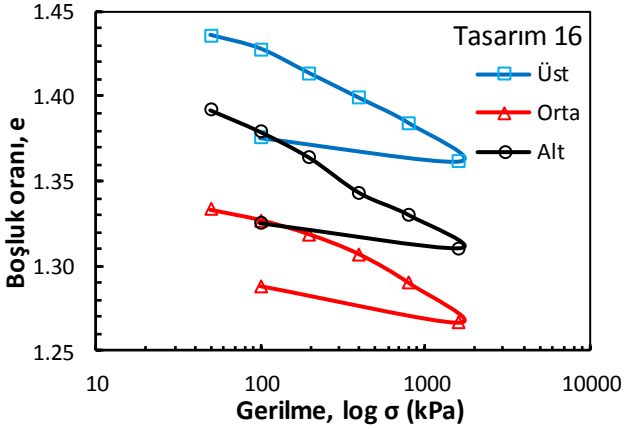
Şekil Ek 4.29. BÖ-13 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



Şekil Ek 4.30. BÖ-14 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



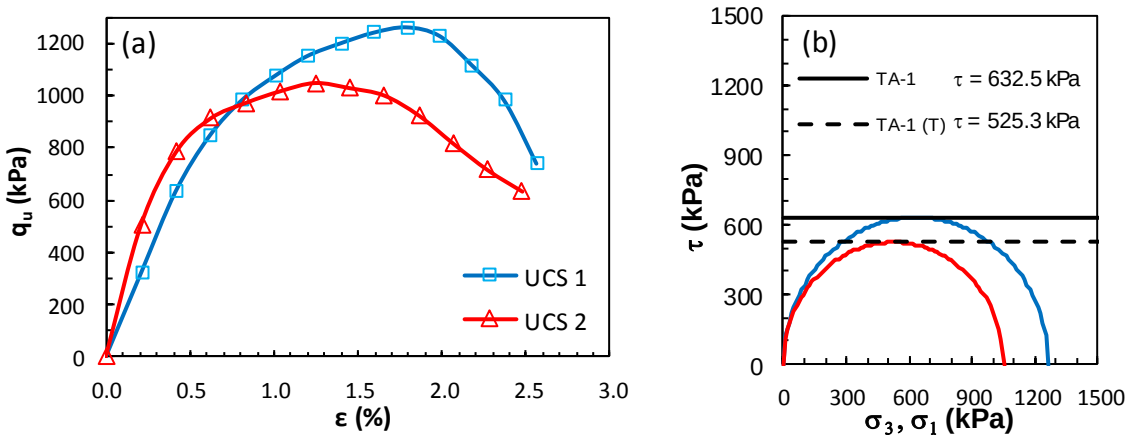
Şekil Ek 4.31. BÖ-15 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)



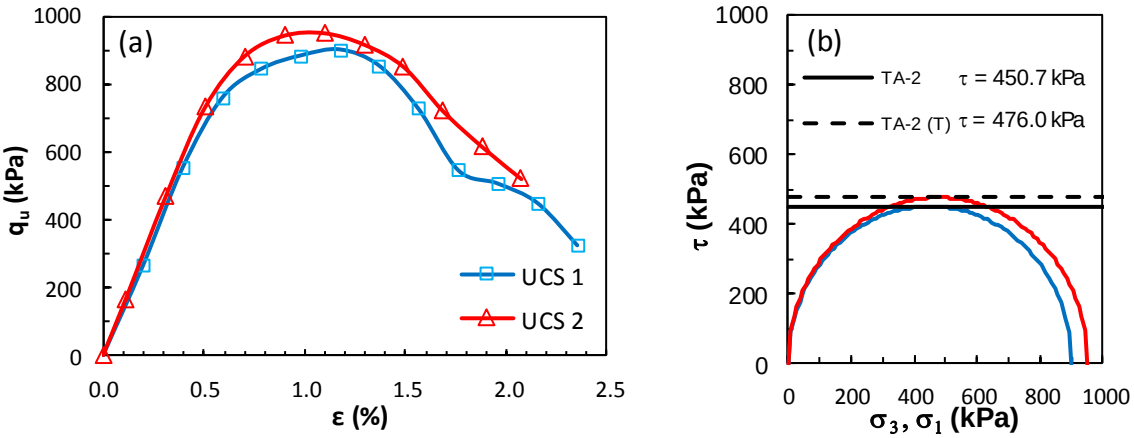
Şekil Ek 4.32. BÖ-16 numaralı kolona ait konsolidasyon deney sonucu (Büyük ölçekli DKK, 56 gün)

EK-5: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

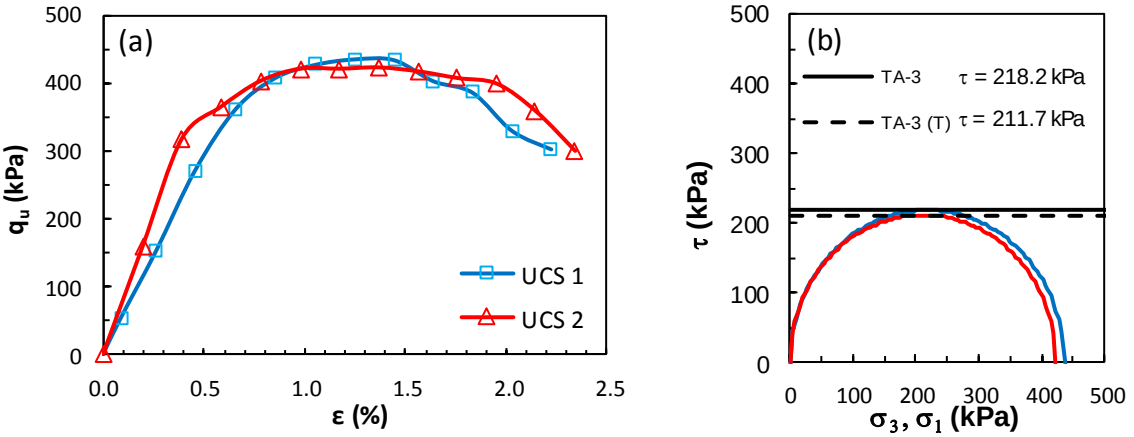
Kür süresi: 7 gün



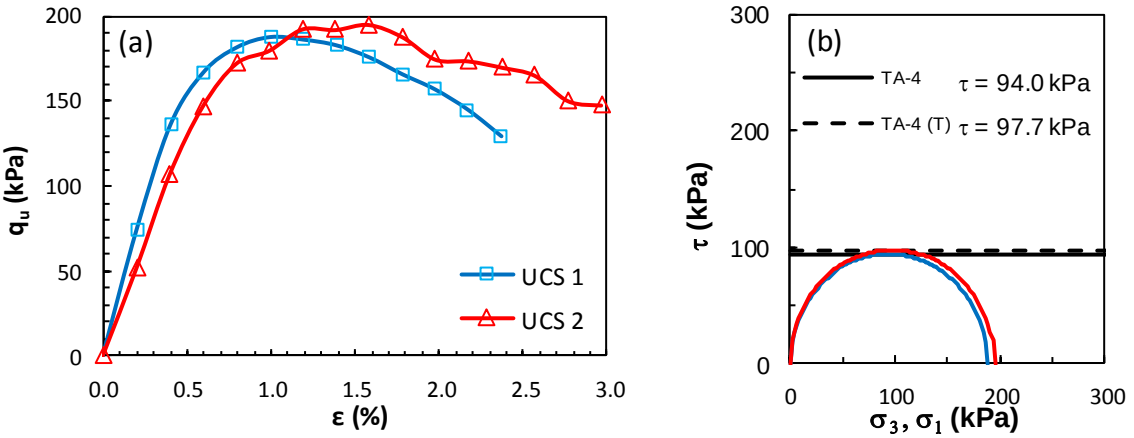
Şekil Ek 5.1. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



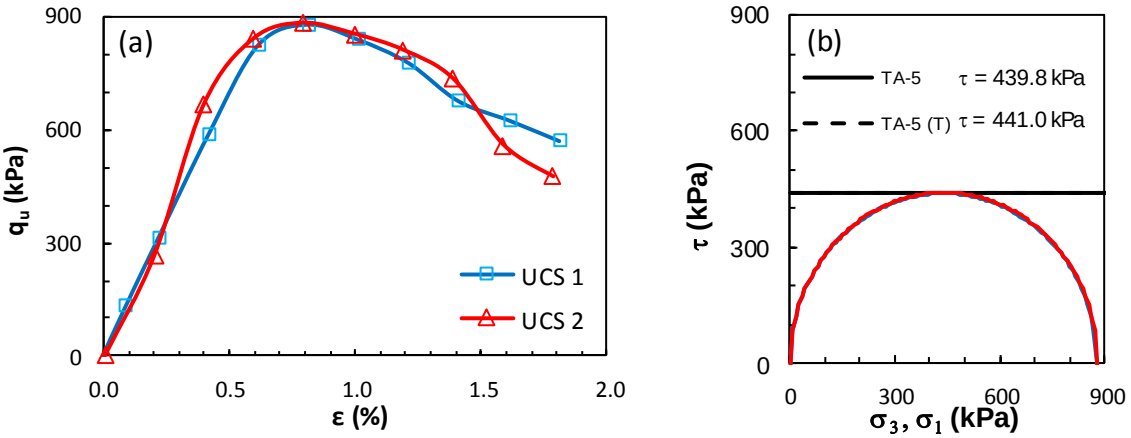
Şekil Ek 5.2. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



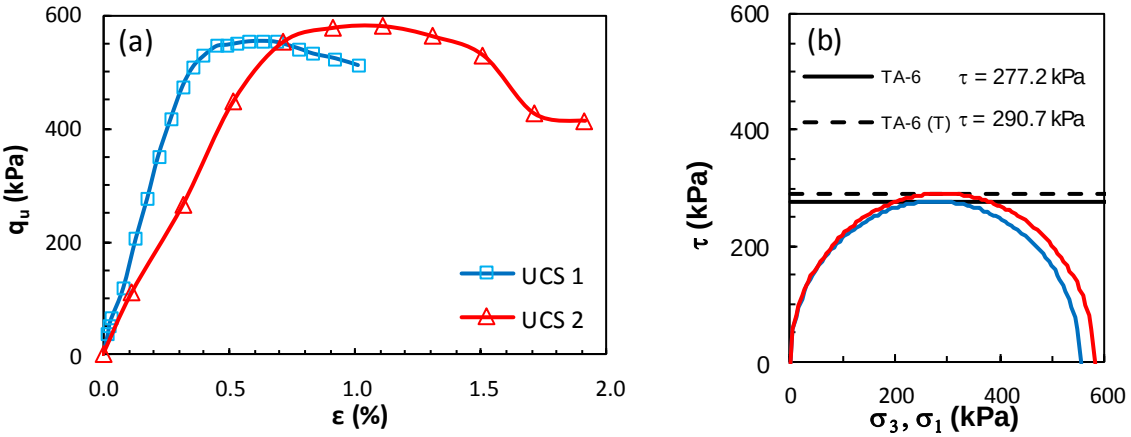
Şekil Ek 5.3. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



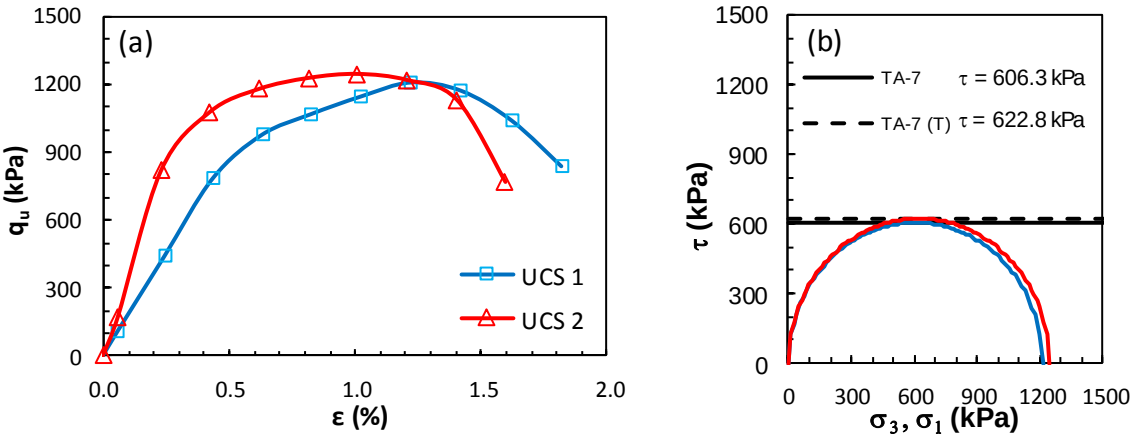
Şekil Ek 5.4. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



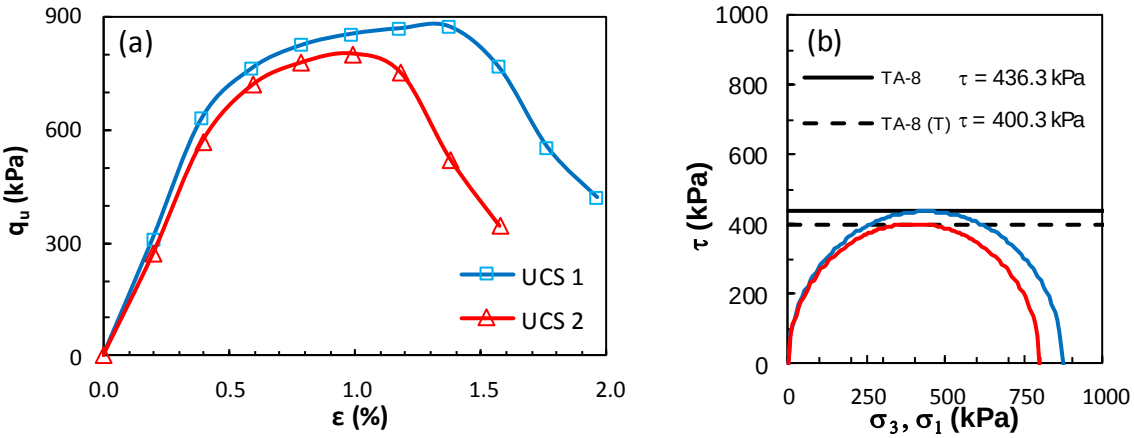
Şekil Ek 5.5. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



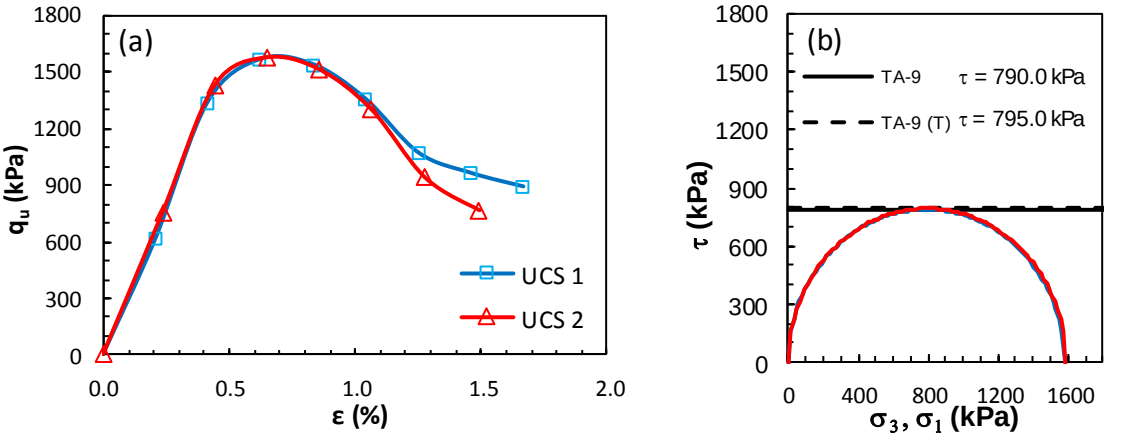
Şekil Ek 5.6. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



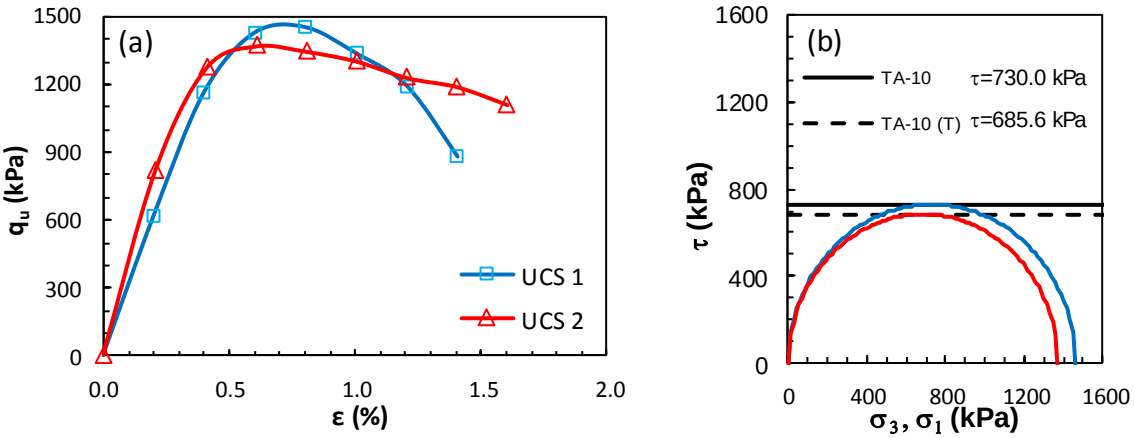
Şekil Ek 5.7. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



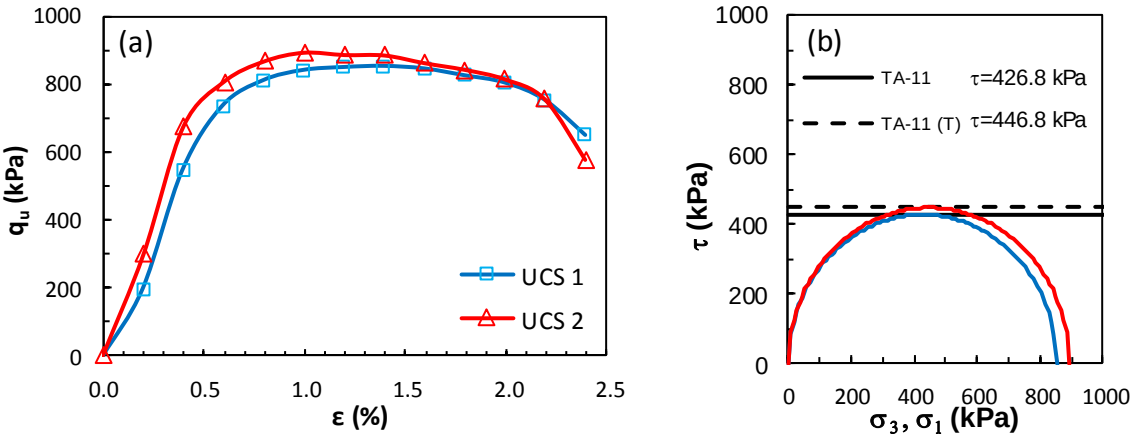
Şekil Ek 5.8. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



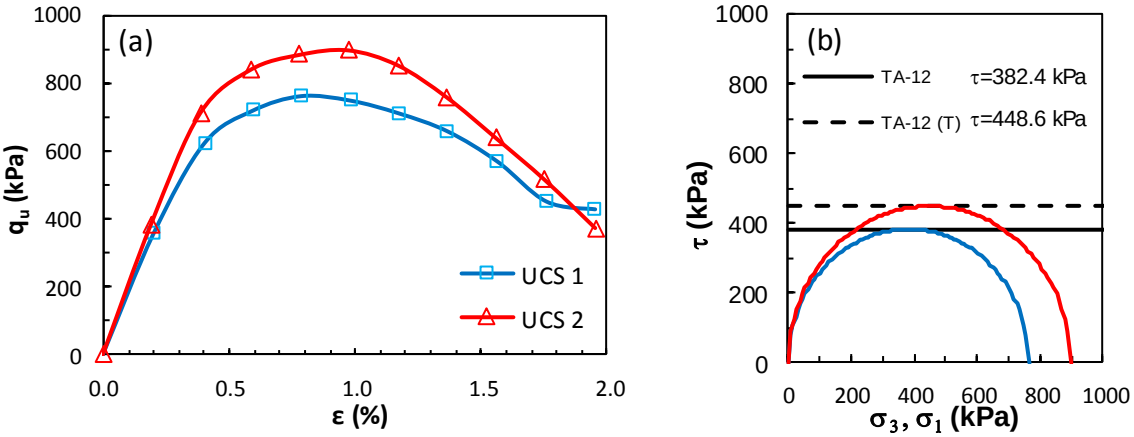
Şekil Ek 5.9. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



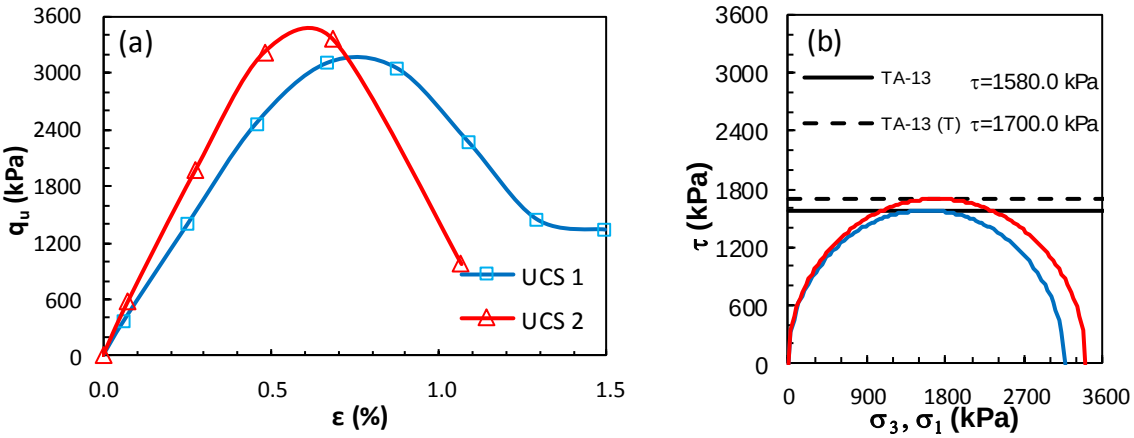
Şekil Ek 5.10. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK UCS, 7 gün)



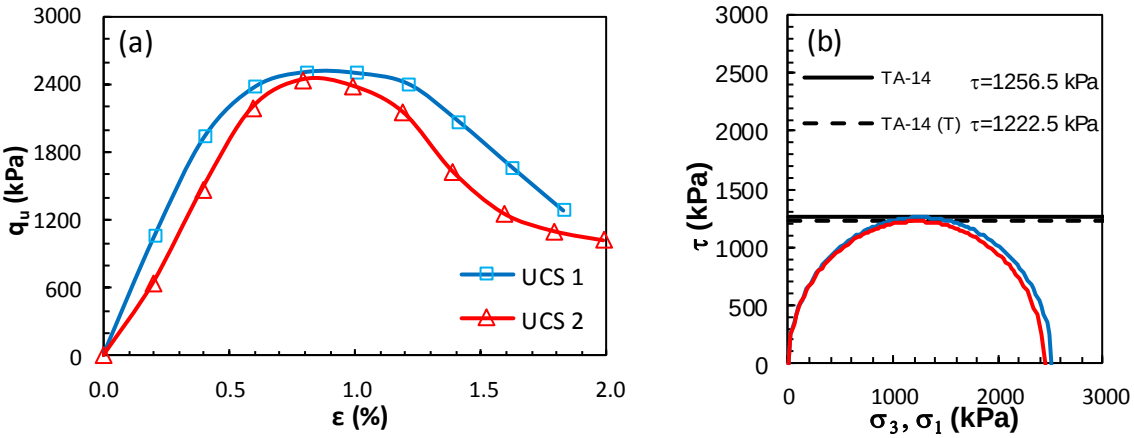
Şekil Ek 5.11. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



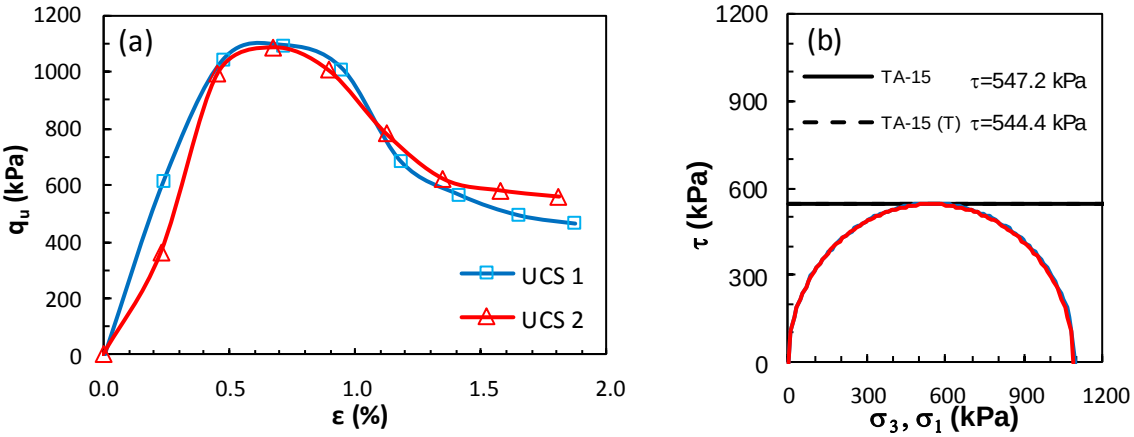
Şekil Ek 5.12. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



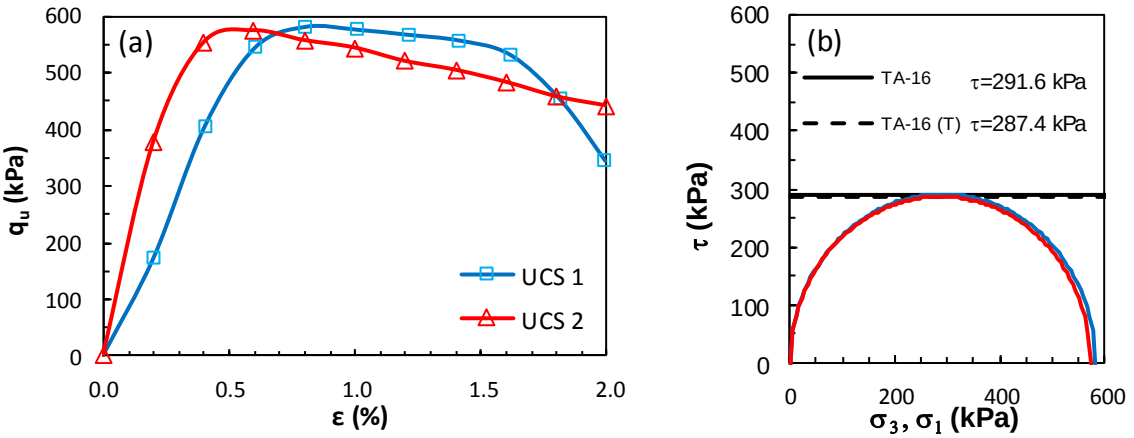
Şekil Ek 5.13. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)



Şekil Ek 5.14. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

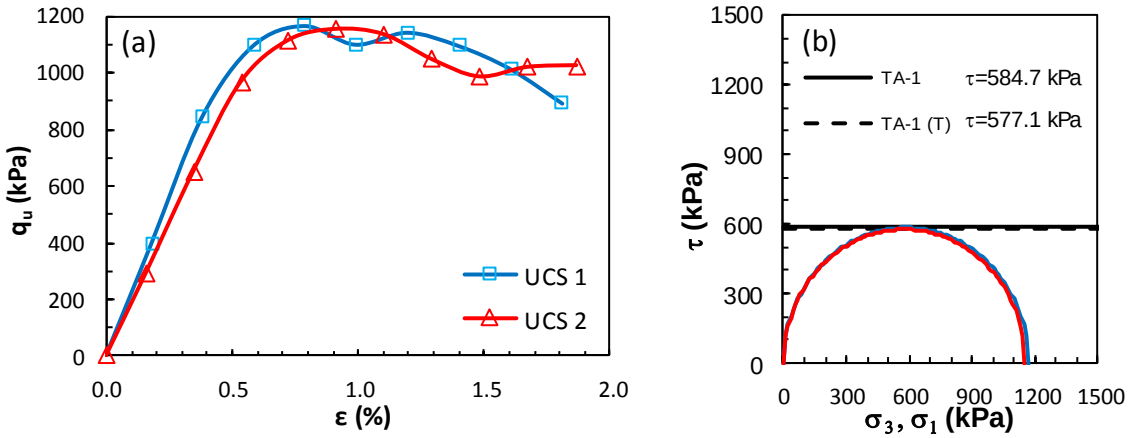


Şekil Ek 5.15. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

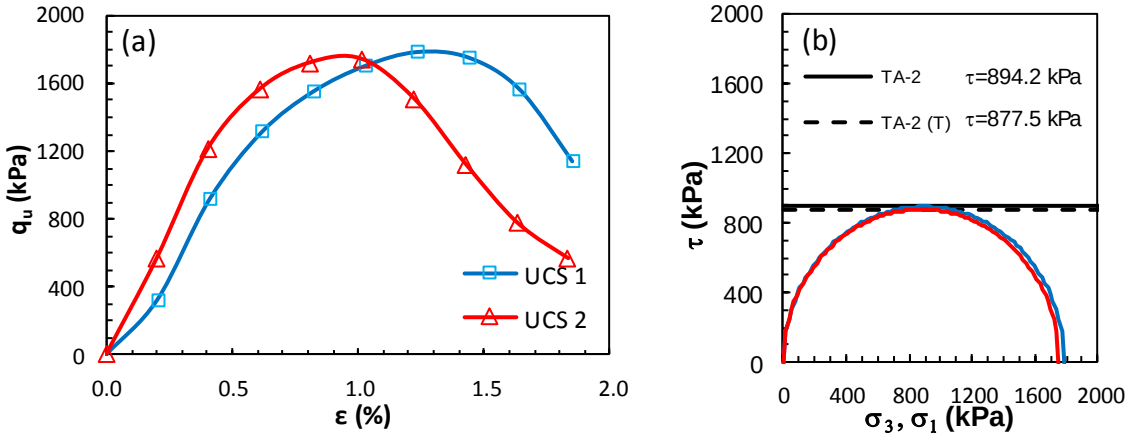


Şekil Ek 5.16. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 7 gün)

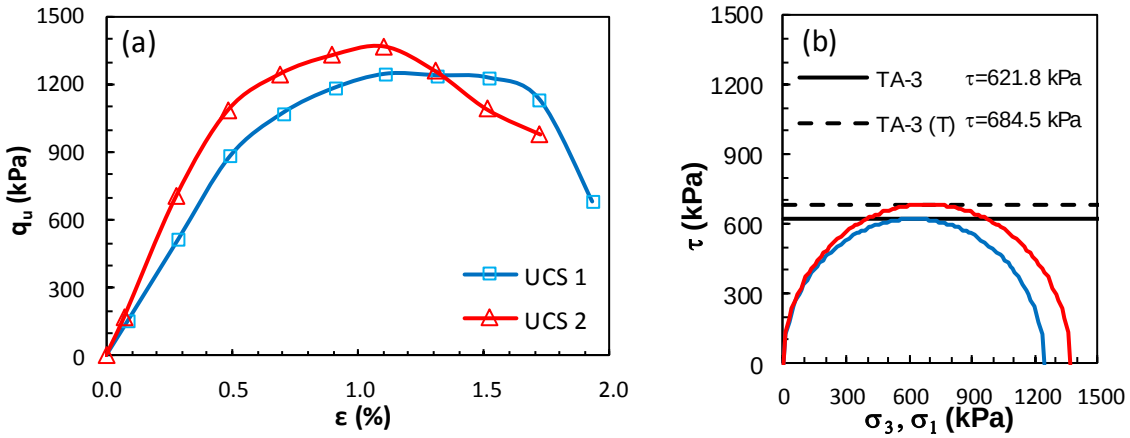
Kür süresi: 28 gün



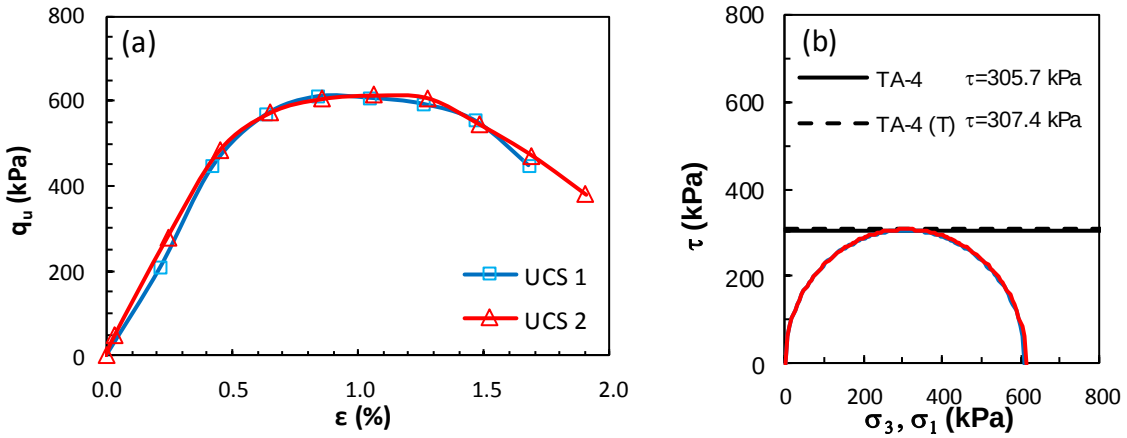
Şekil Ek 5.17. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



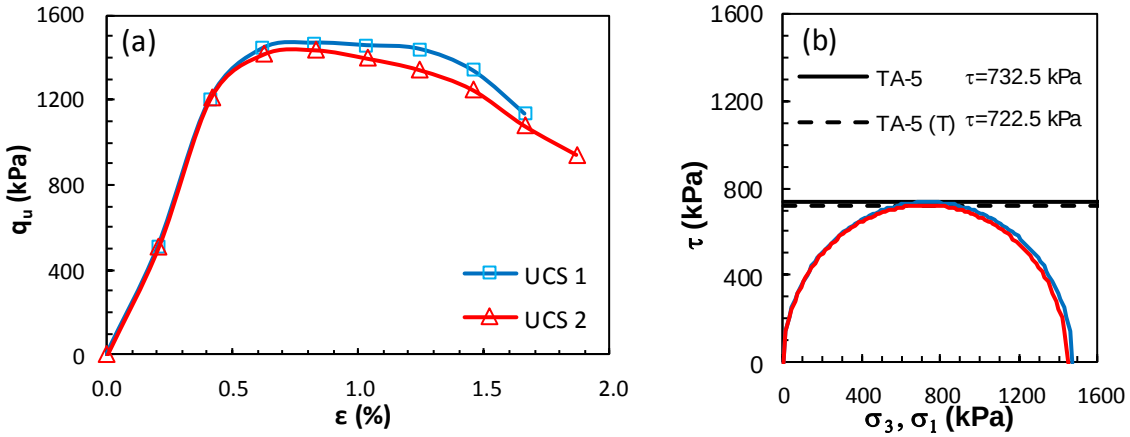
Şekil Ek 5.18. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



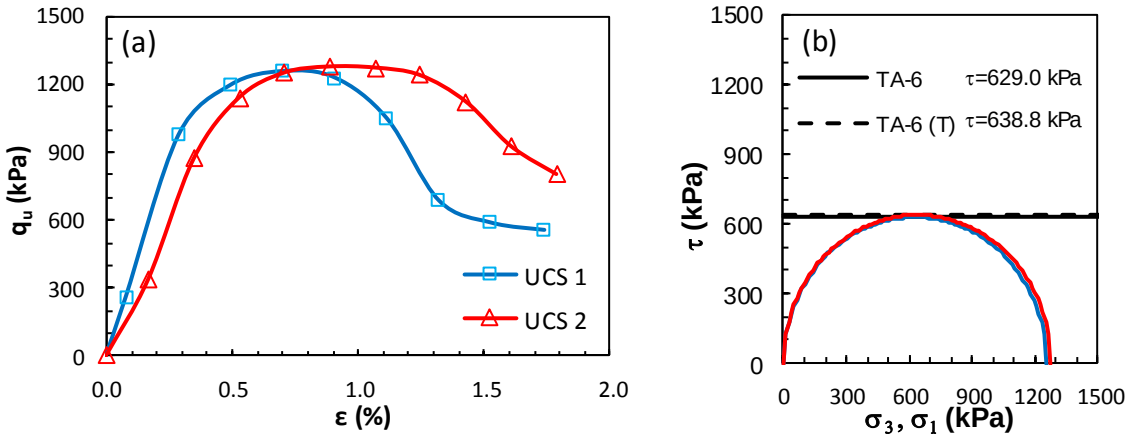
Şekil Ek 5.19. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



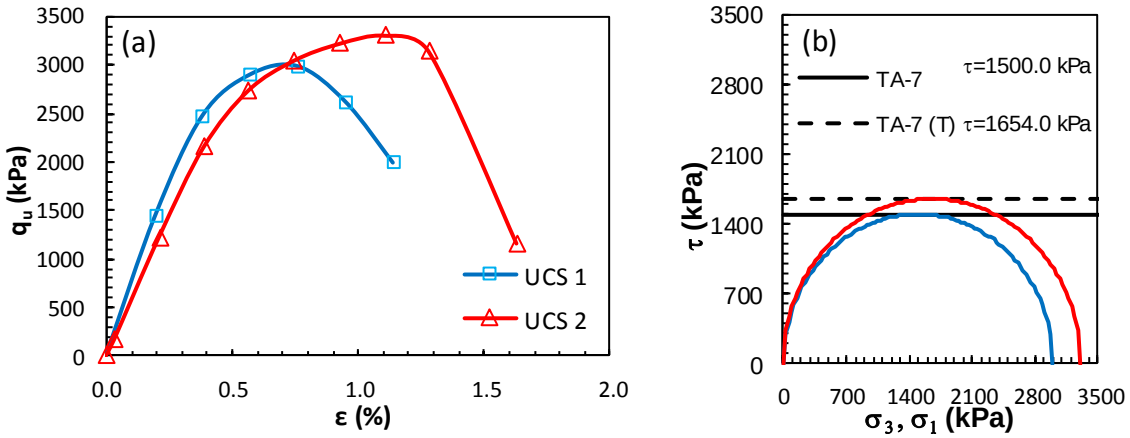
Şekil Ek 5.20. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



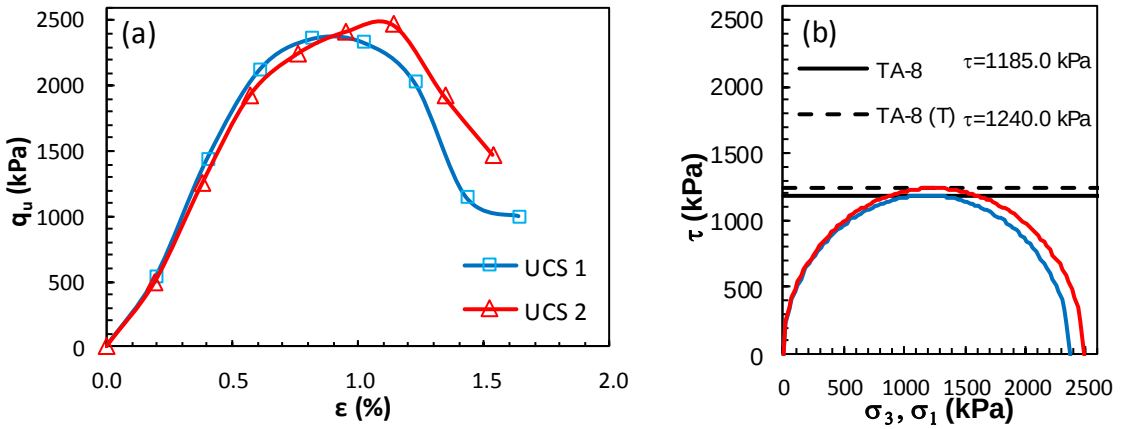
Şekil Ek 5.21. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



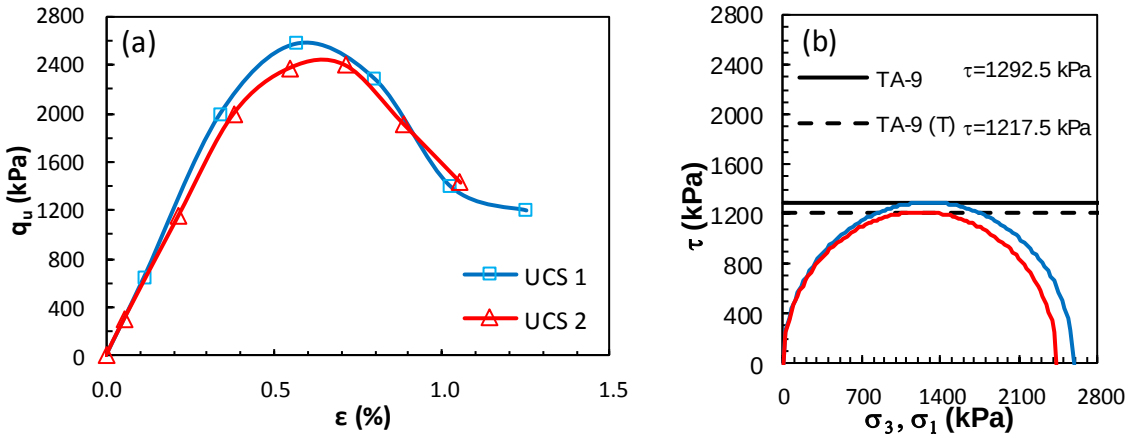
Şekil Ek 5.22. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



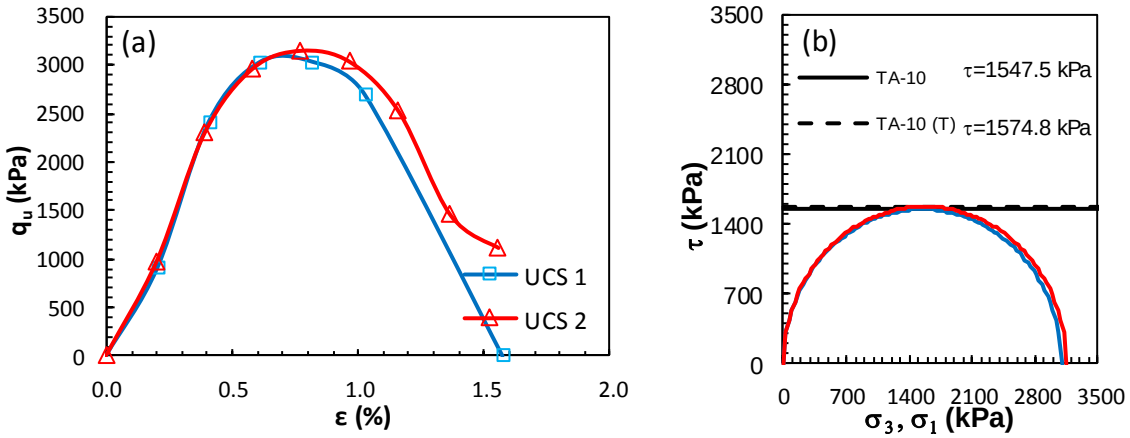
Şekil Ek 5.23. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



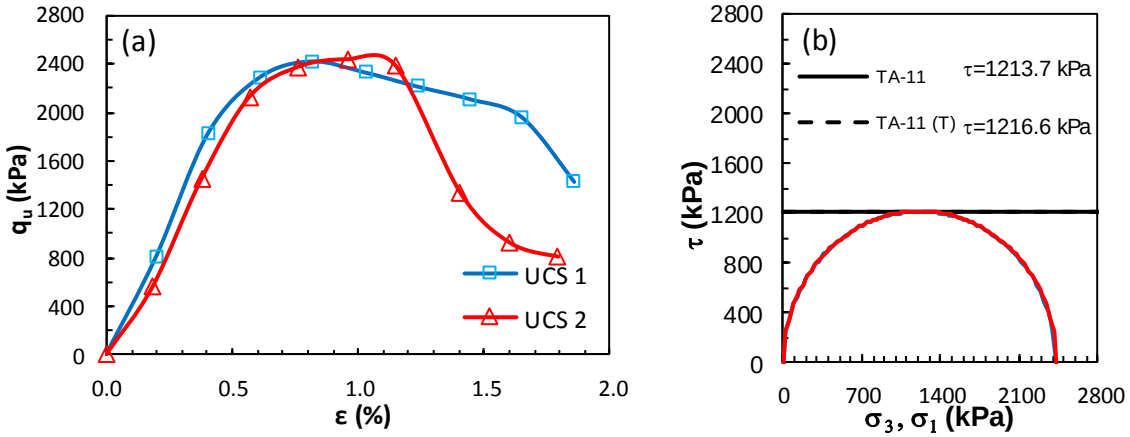
Şekil Ek 5.24. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



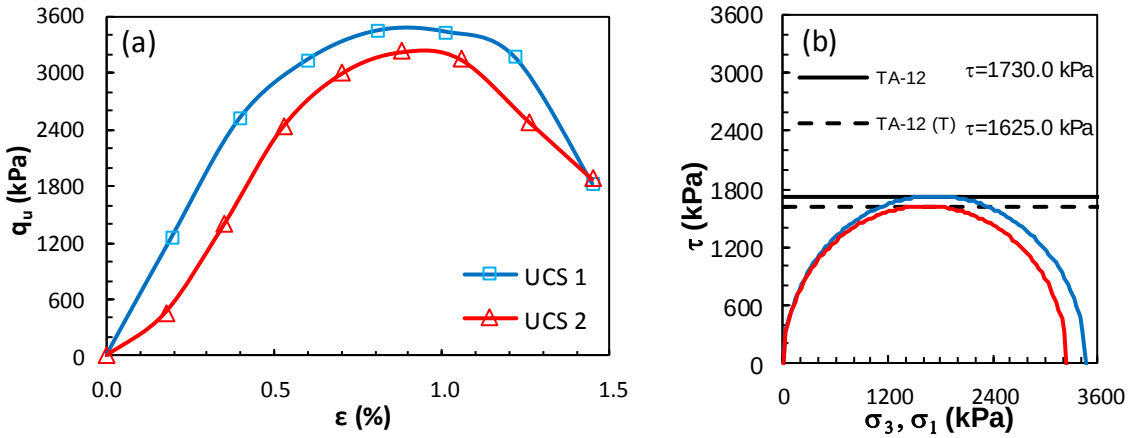
Şekil Ek 5.25. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



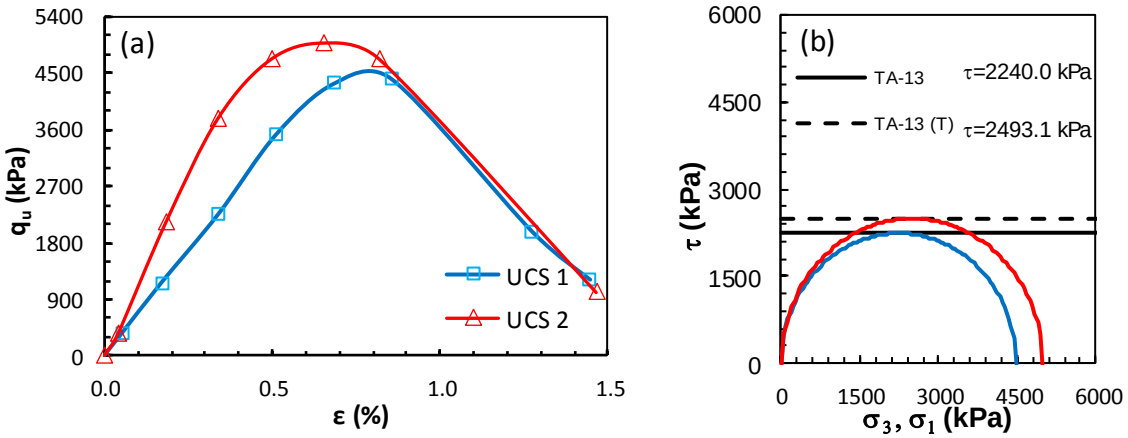
Şekil Ek 5.26. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



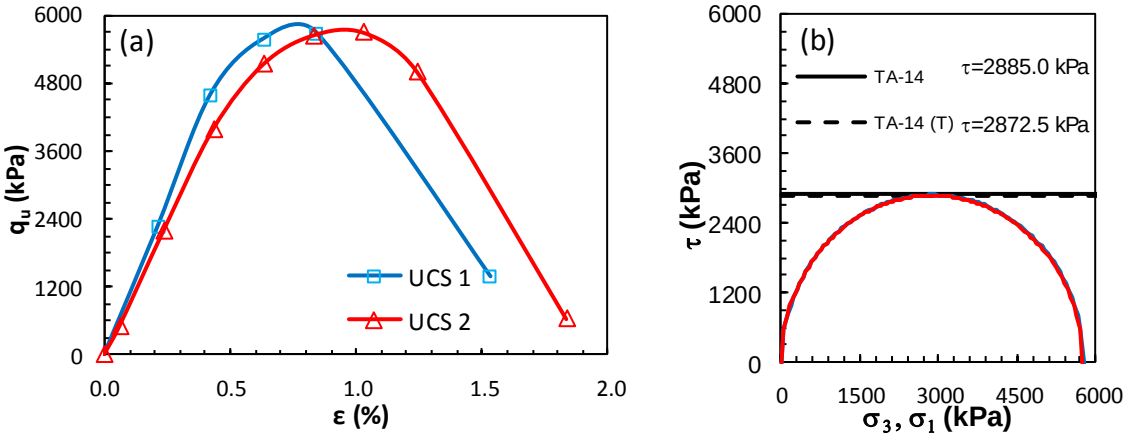
Şekil Ek 5.27. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



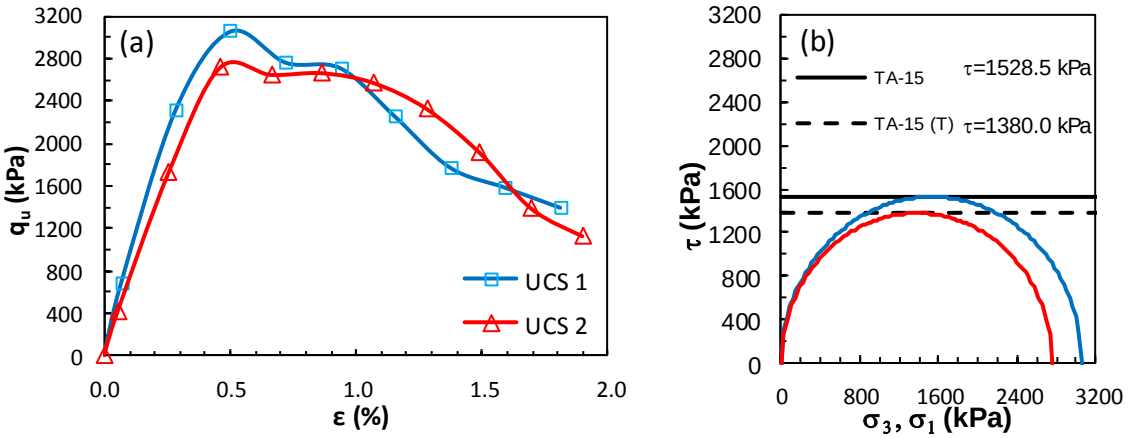
Şekil Ek 5.28. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



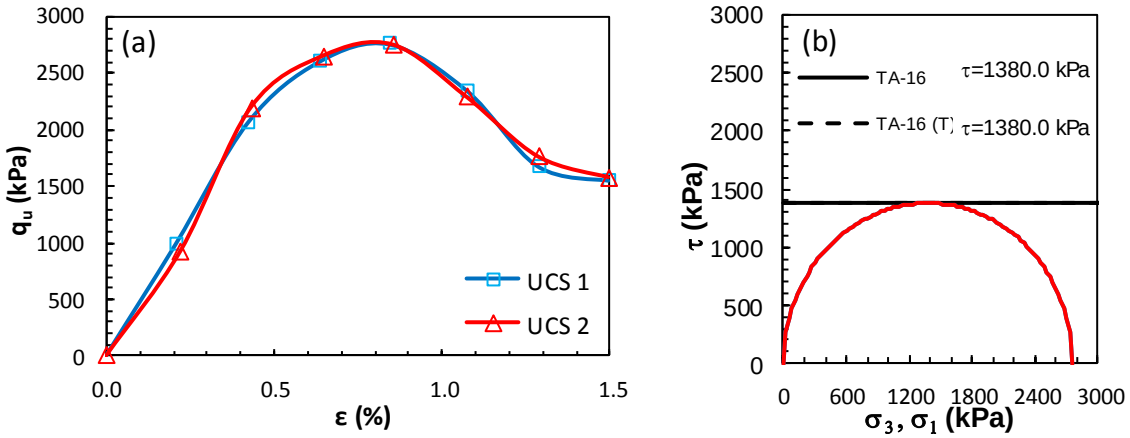
Şekil Ek 5.29. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)



Şekil Ek 5.30. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

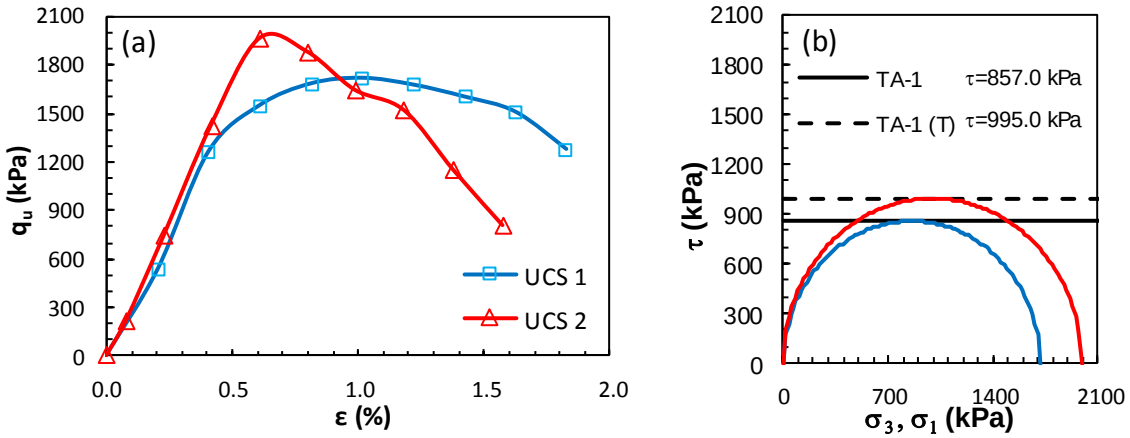


Şekil Ek 5.31. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

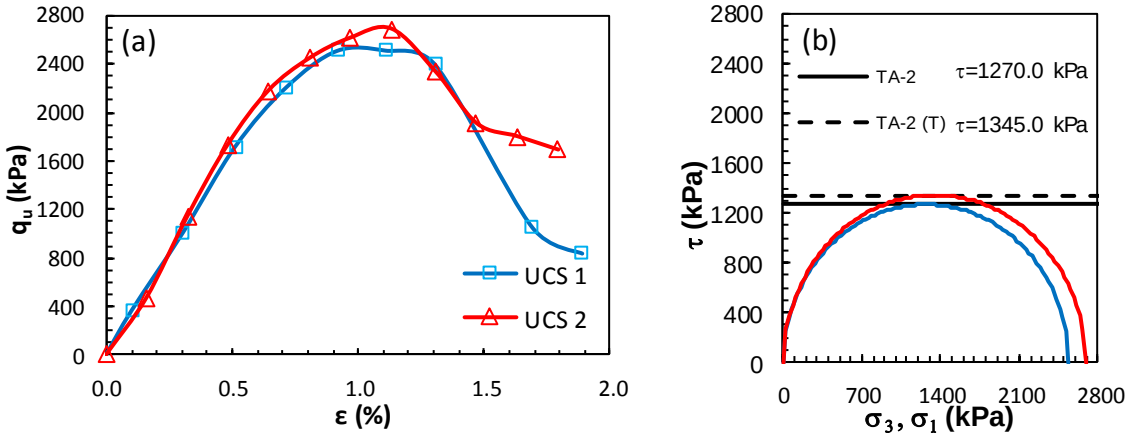


Şekil Ek 5.32. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 28 gün)

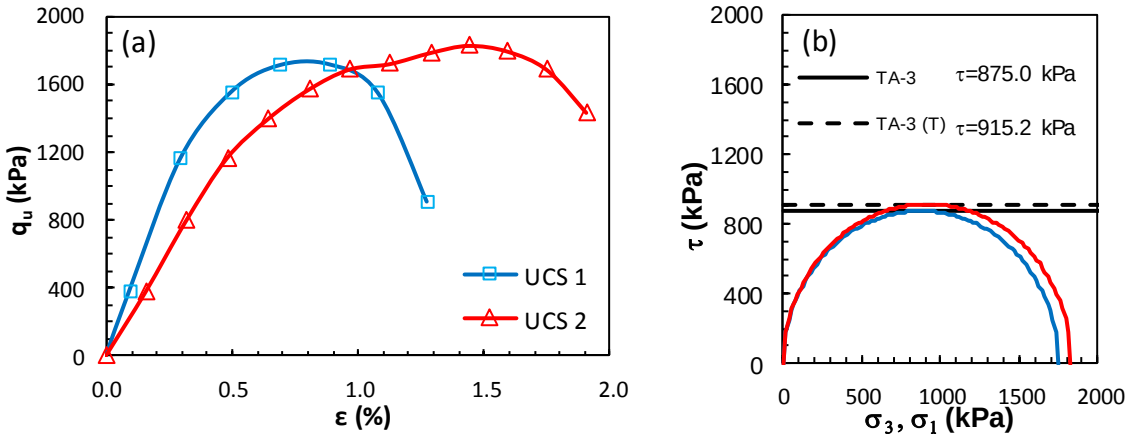
Kür süresi: 56 gün



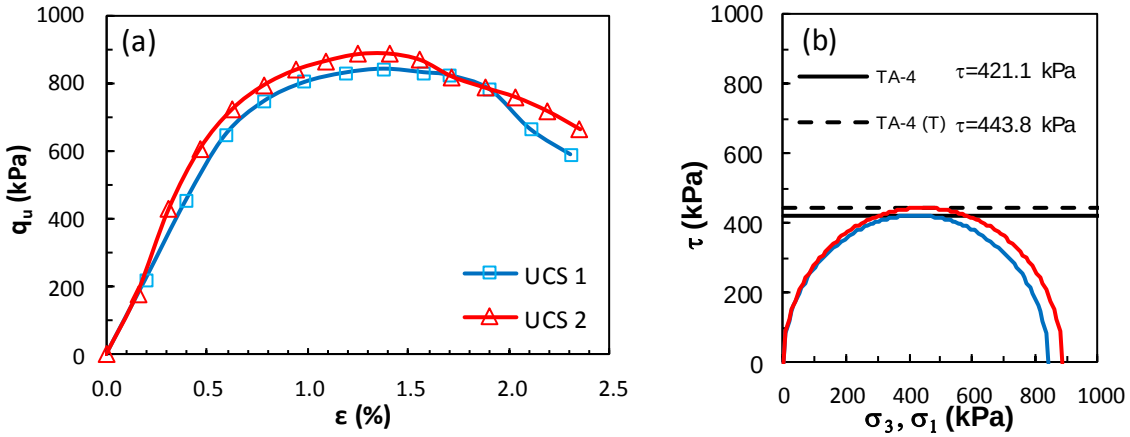
Şekil Ek 5.33. KÖ-1 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



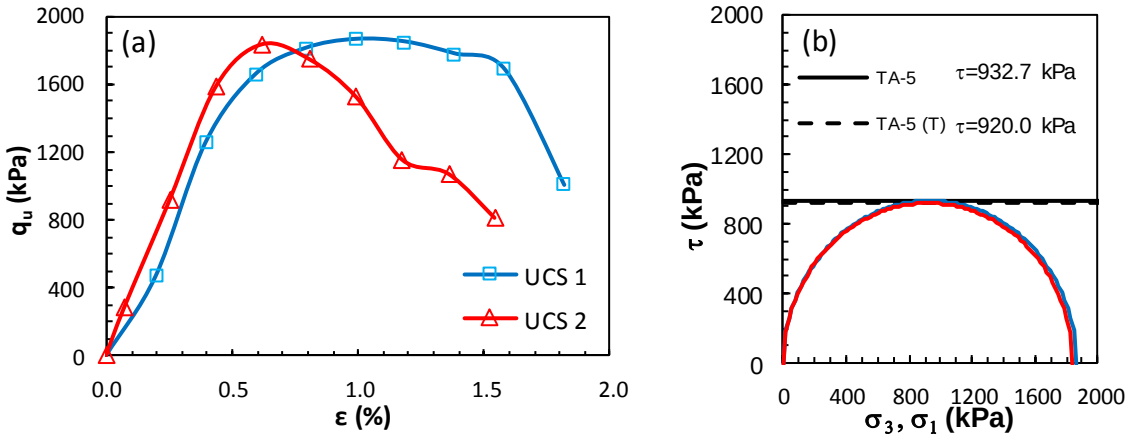
Şekil Ek 5.34. KÖ-2 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



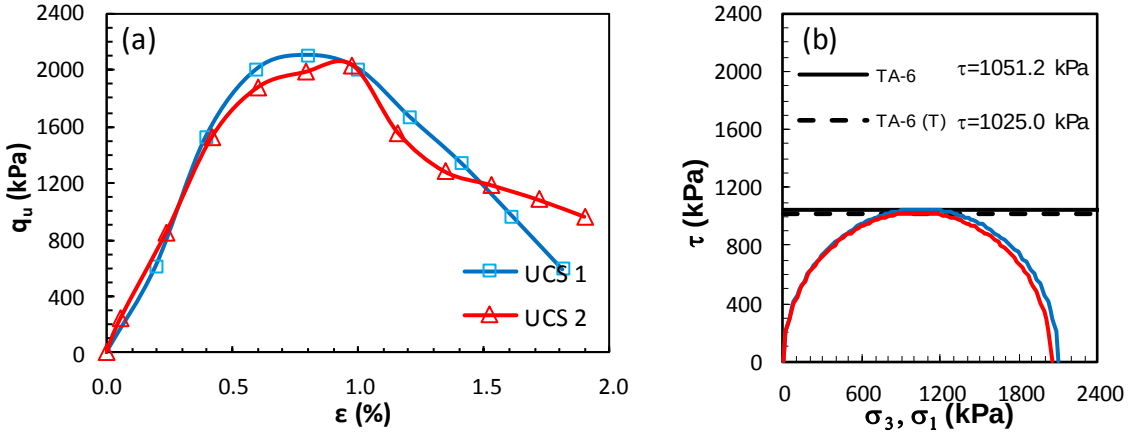
Şekil Ek 5.35. KÖ-3 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



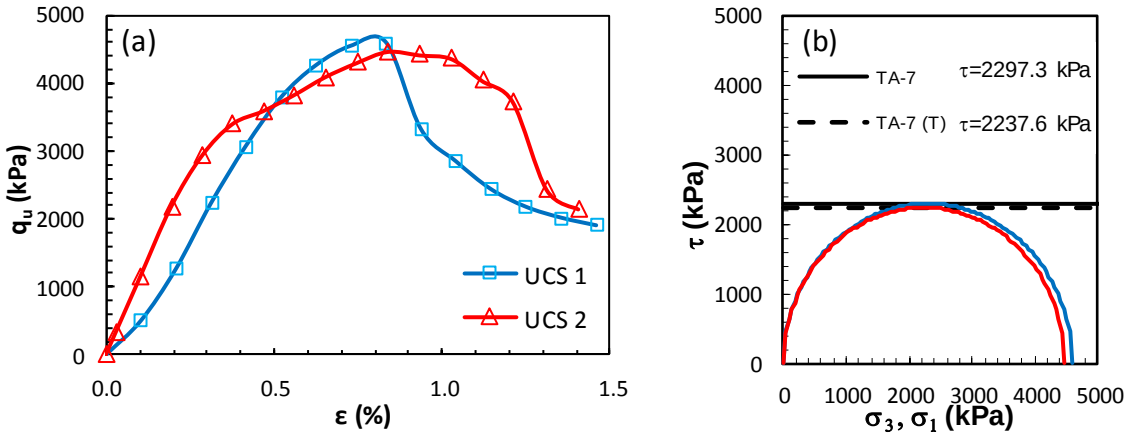
Şekil Ek 5.36. KÖ-4 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



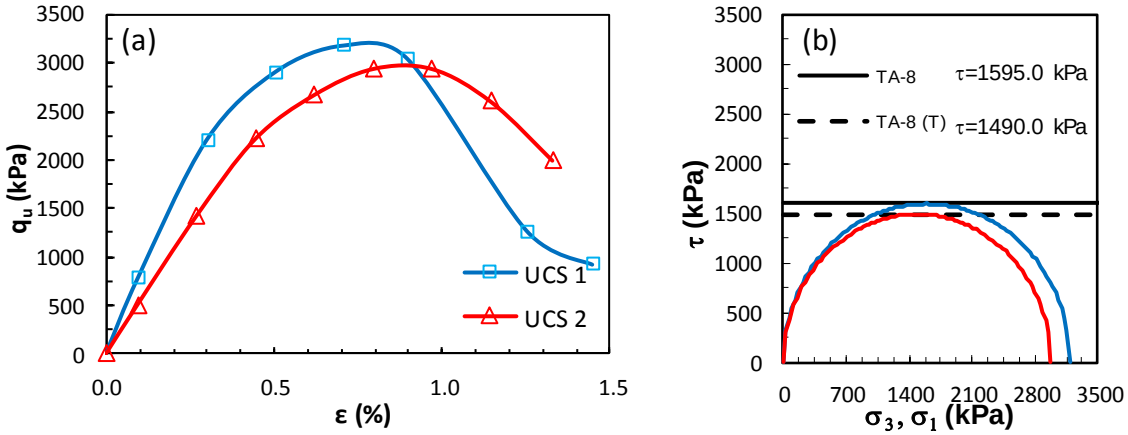
Şekil Ek 5.37. KÖ-5 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



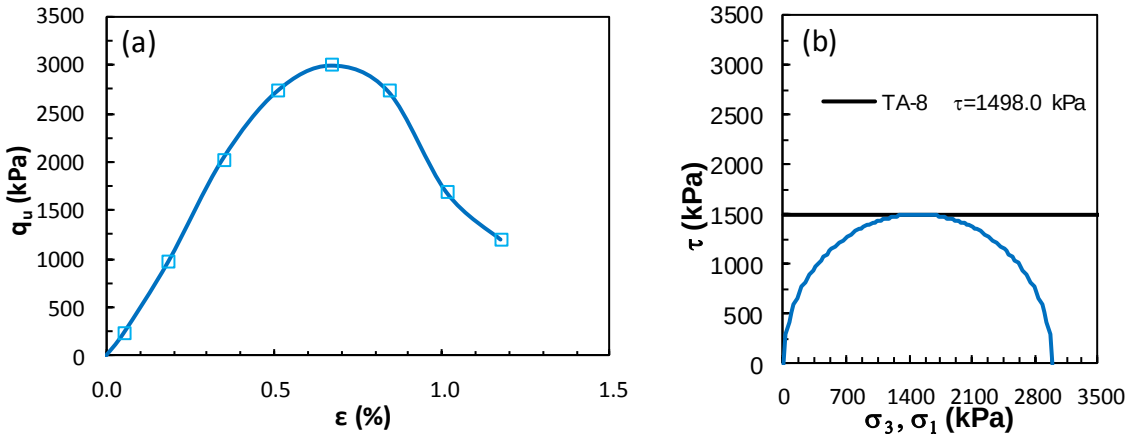
Şekil Ek 5.38. KÖ-6 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



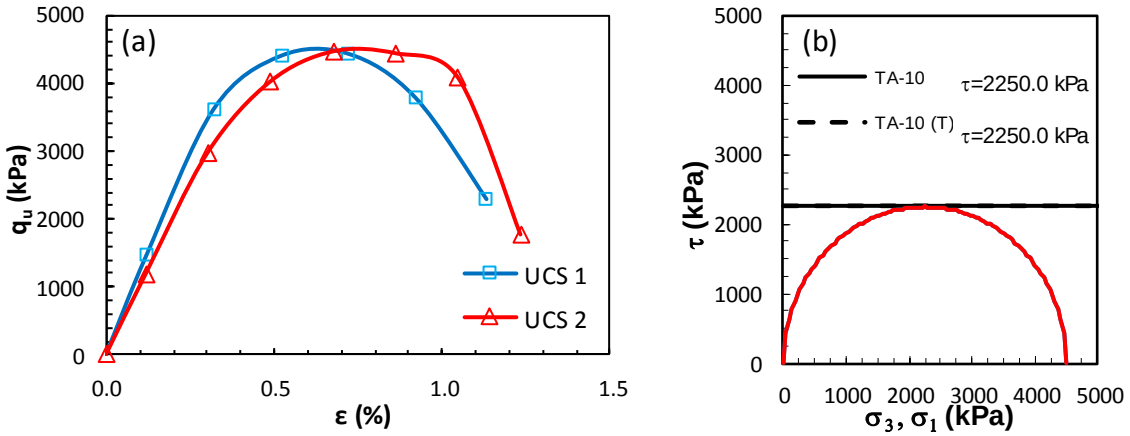
Şekil Ek 5.39. KÖ-7 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



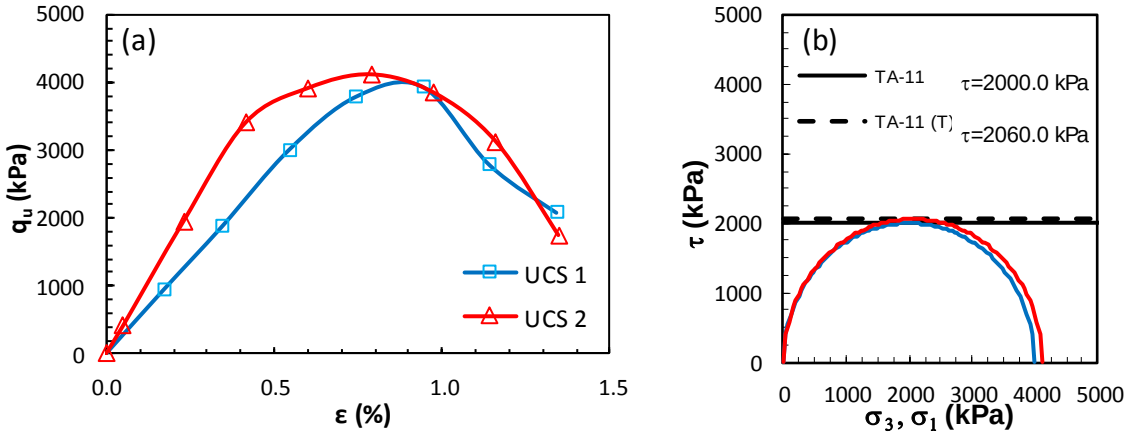
Şekil Ek 5.40. KÖ-8 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



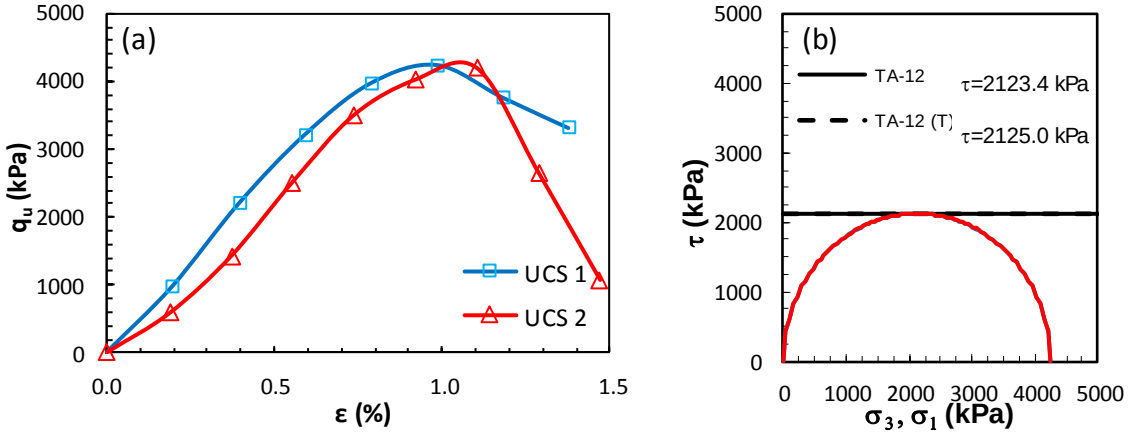
Şekil Ek 5.41. KÖ-9 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



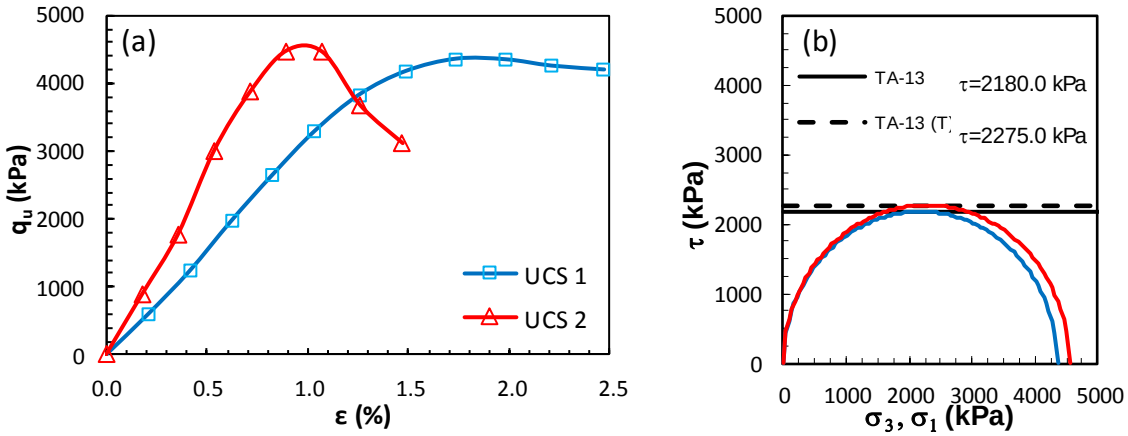
Şekil Ek 5.42. KÖ-10 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



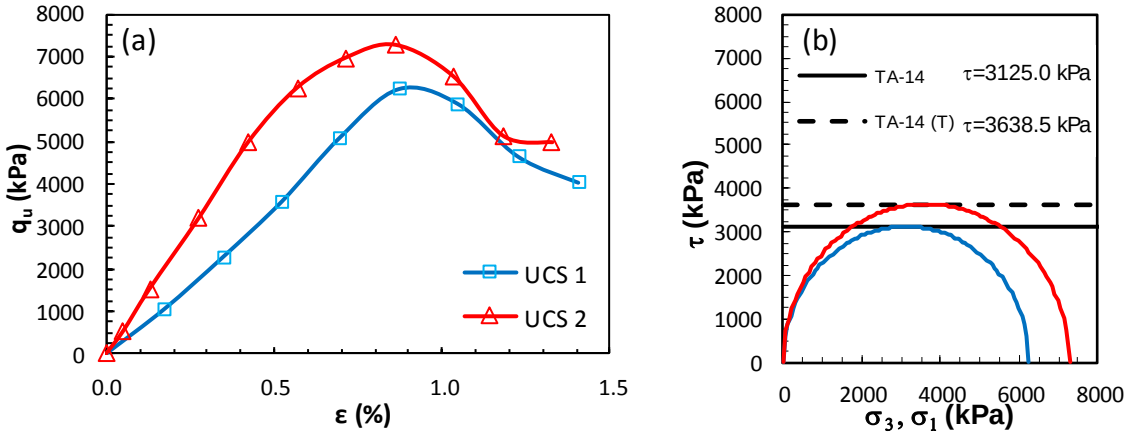
Şekil Ek 5.43. KÖ-11 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



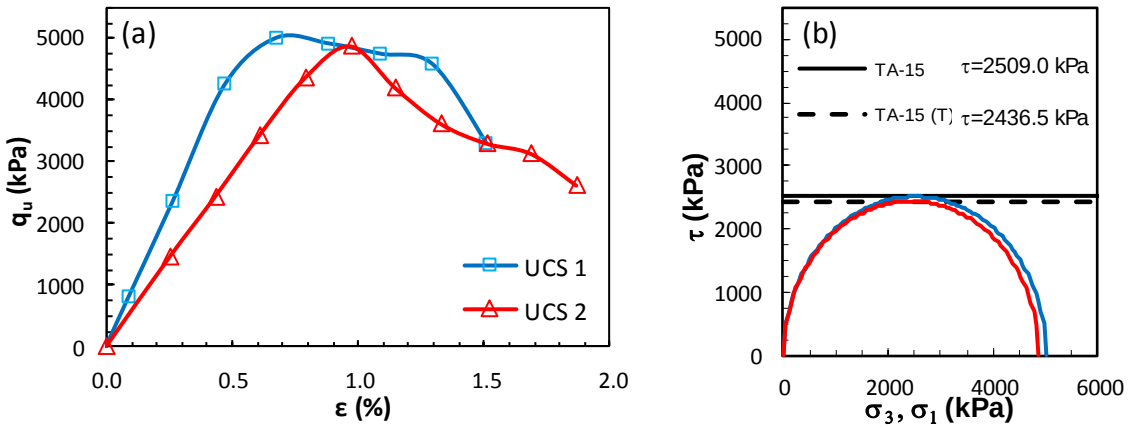
Şekil Ek 5.44. KÖ-12 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



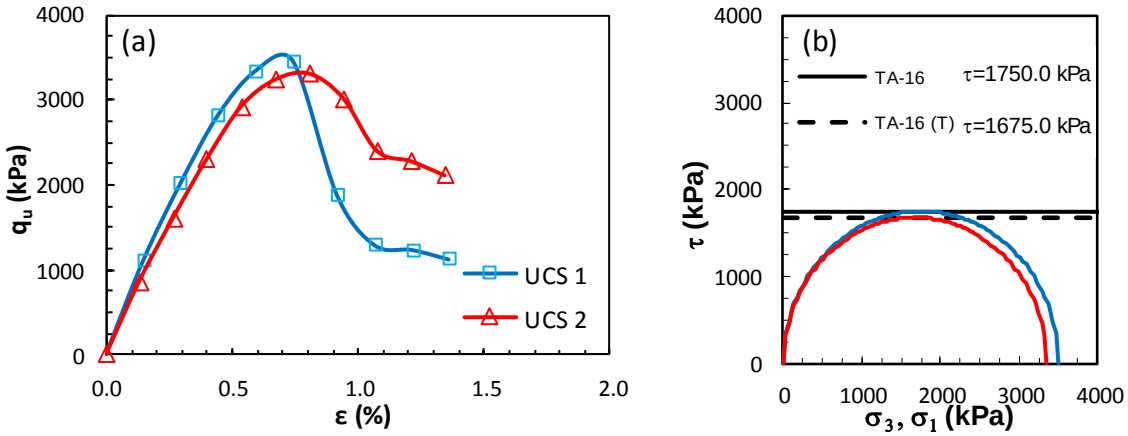
Şekil Ek 5.45. KÖ-13 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



Şekil Ek 5.46. KÖ-14 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



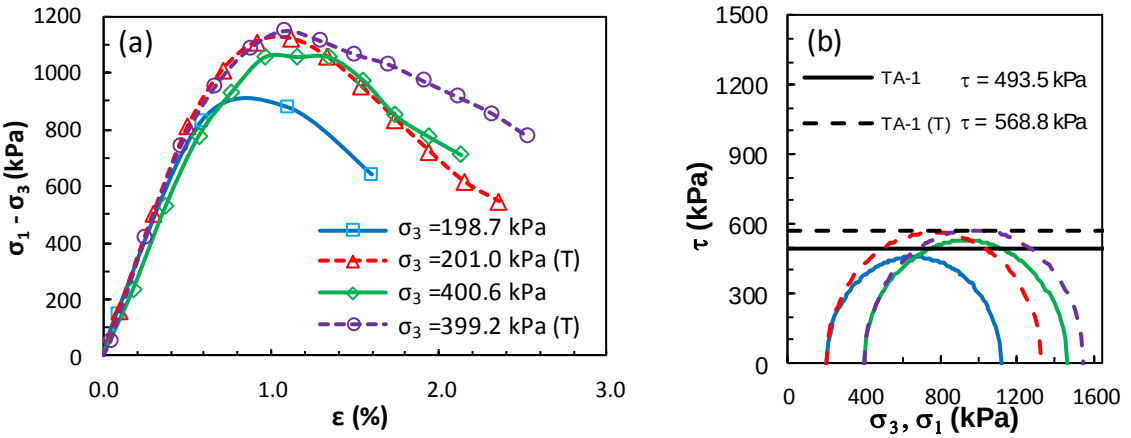
Şekil Ek 5.47. KÖ-15 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)



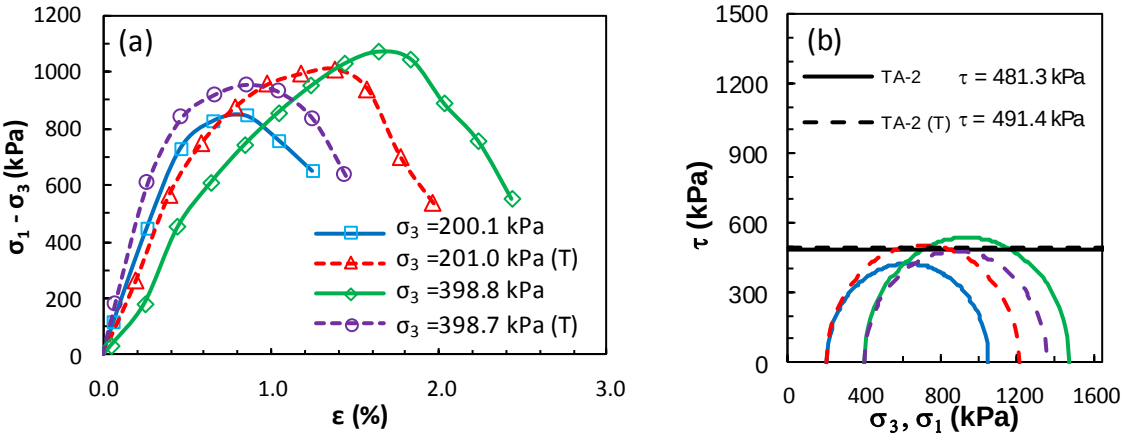
Şekil Ek 5.48. KÖ-16 numaralı tasarım: a) gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UCS, 56 gün)

EK-6: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

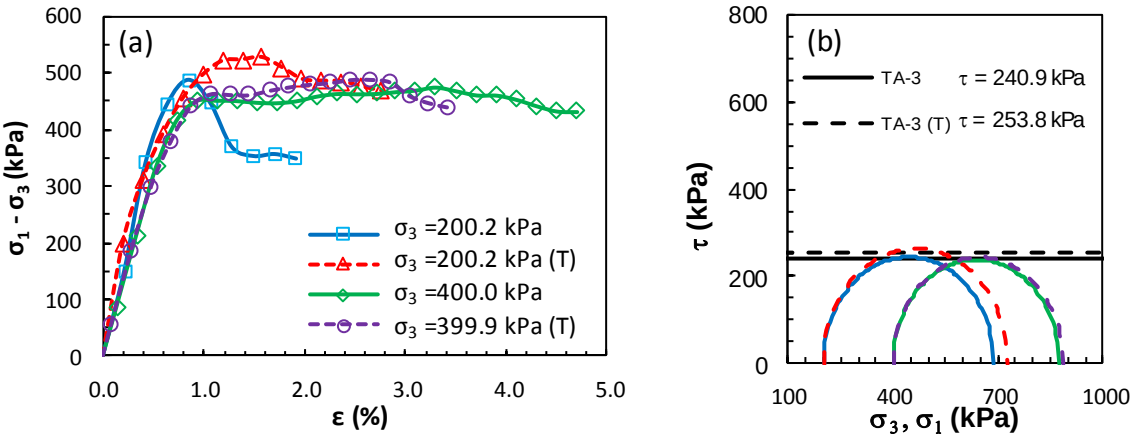
Kür süresi: 7 gün



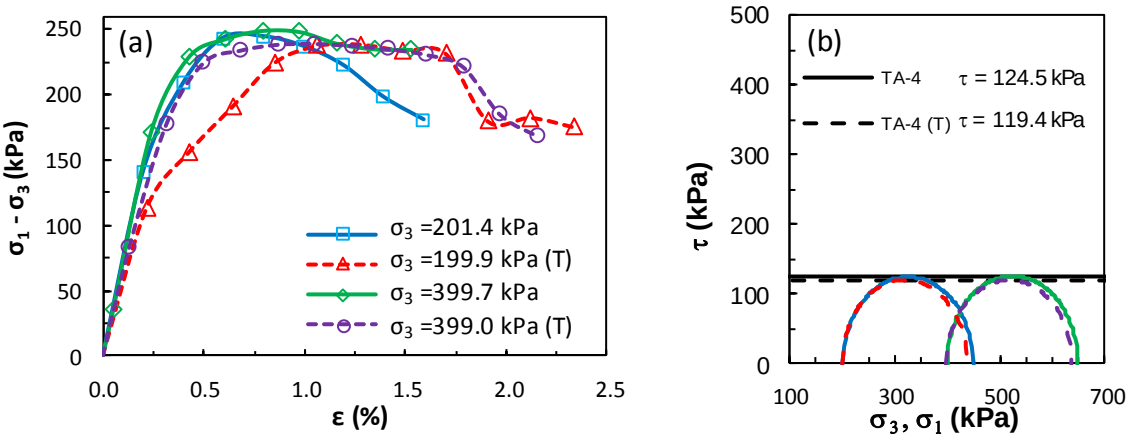
Şekil Ek 6.1. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



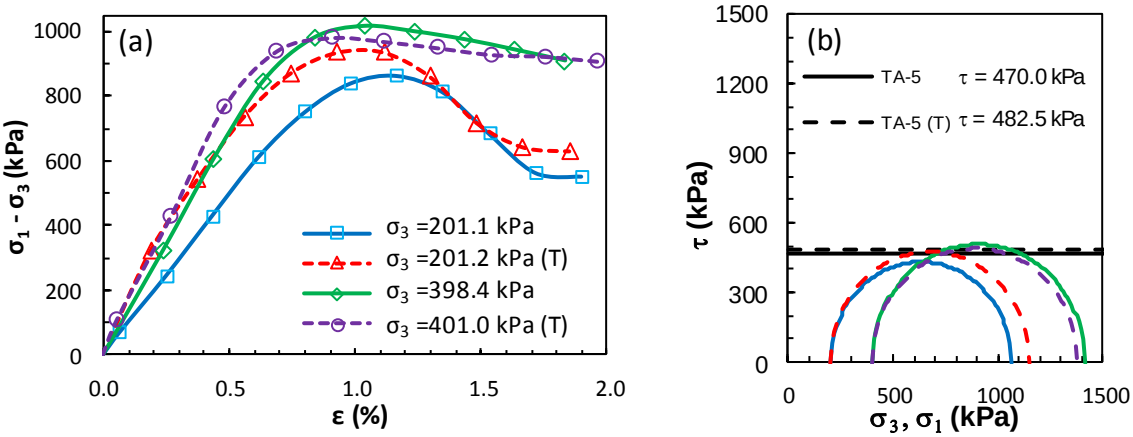
Şekil Ek 6.2. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



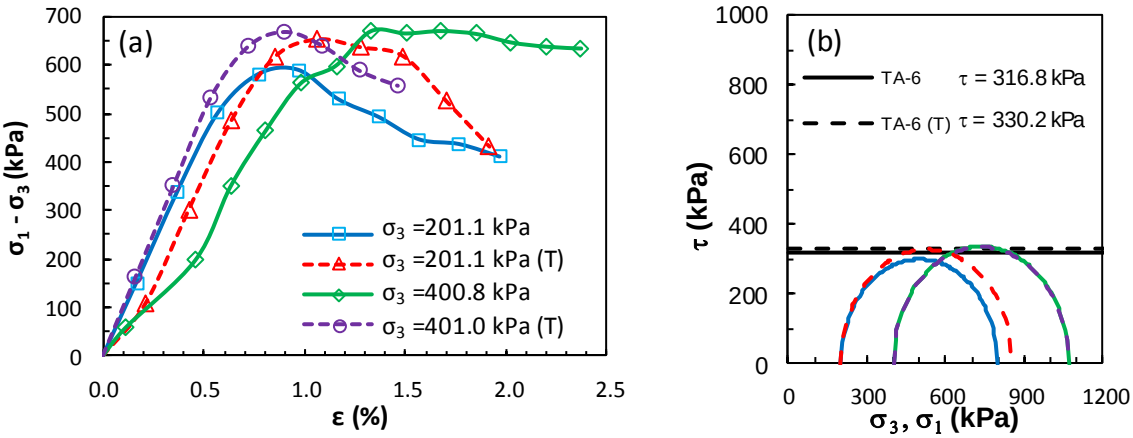
Şekil Ek 6.3. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



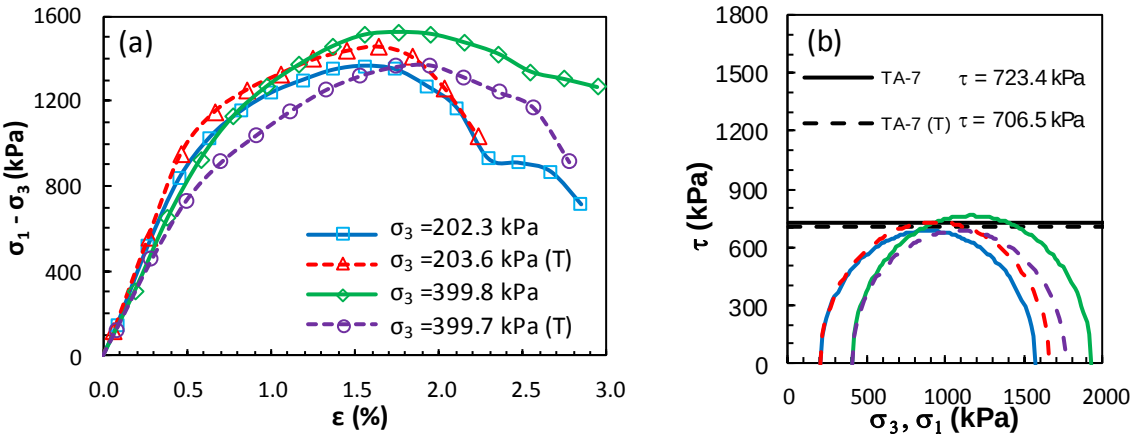
Şekil Ek 6.4. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



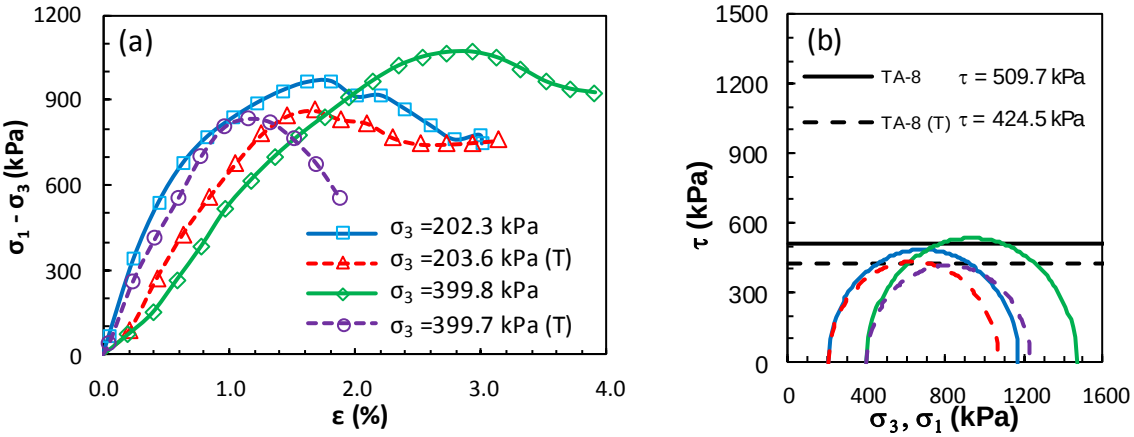
Şekil Ek 6.5. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



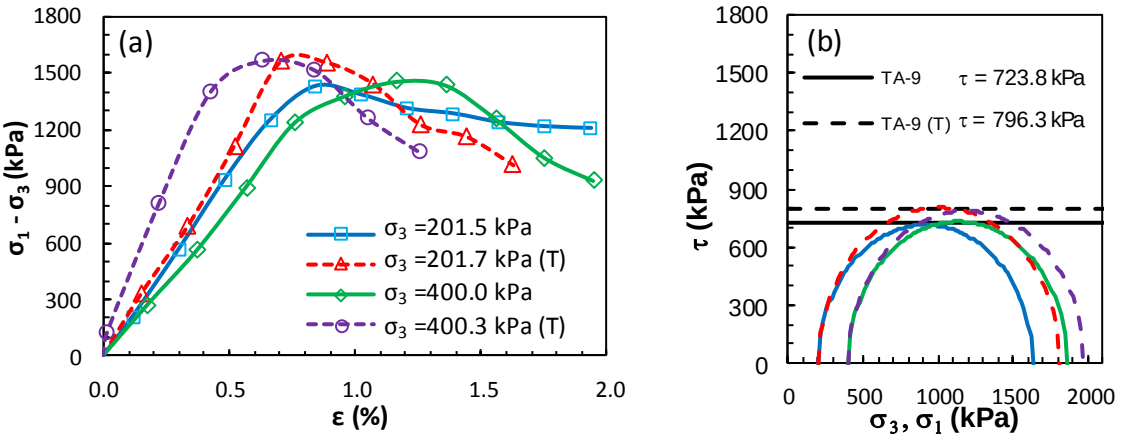
Şekil Ek 6.6. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



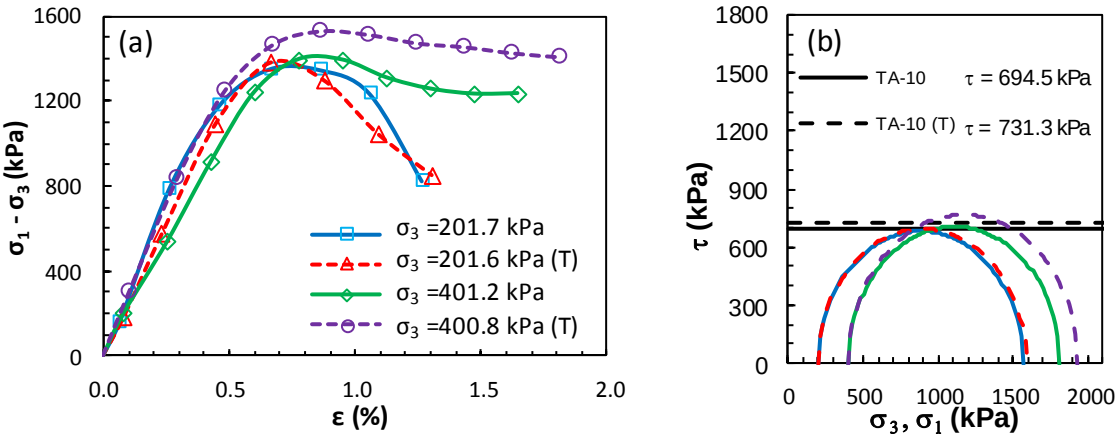
Şekil Ek 6.7. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



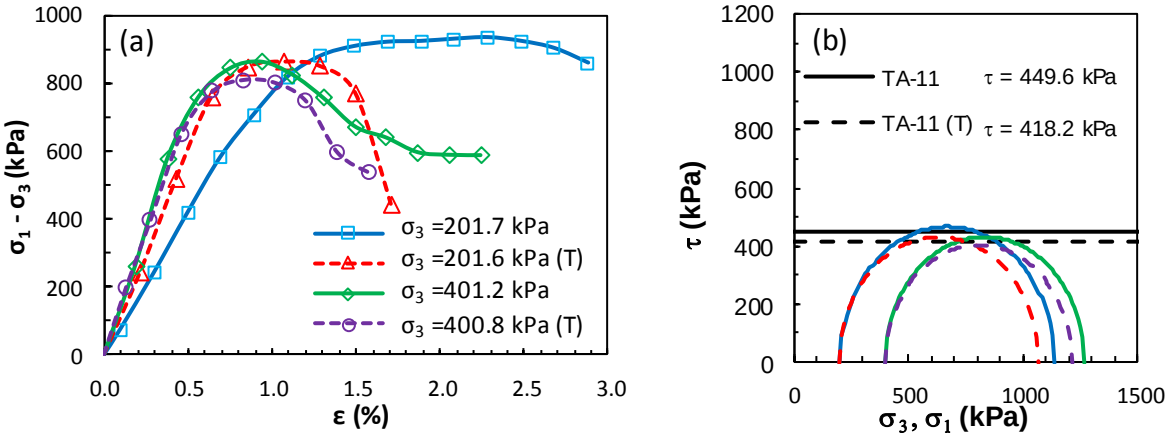
Şekil Ek 6.8. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



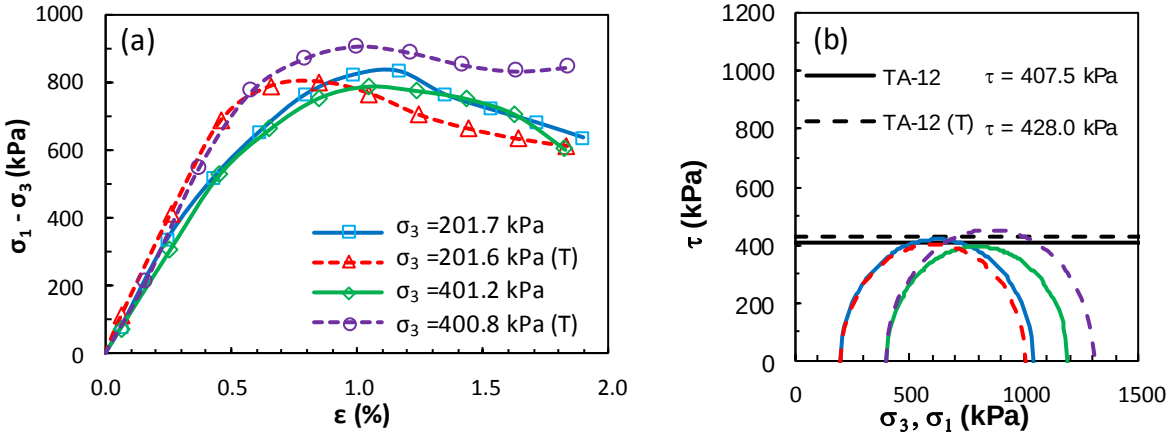
Şekil Ek 6.9. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



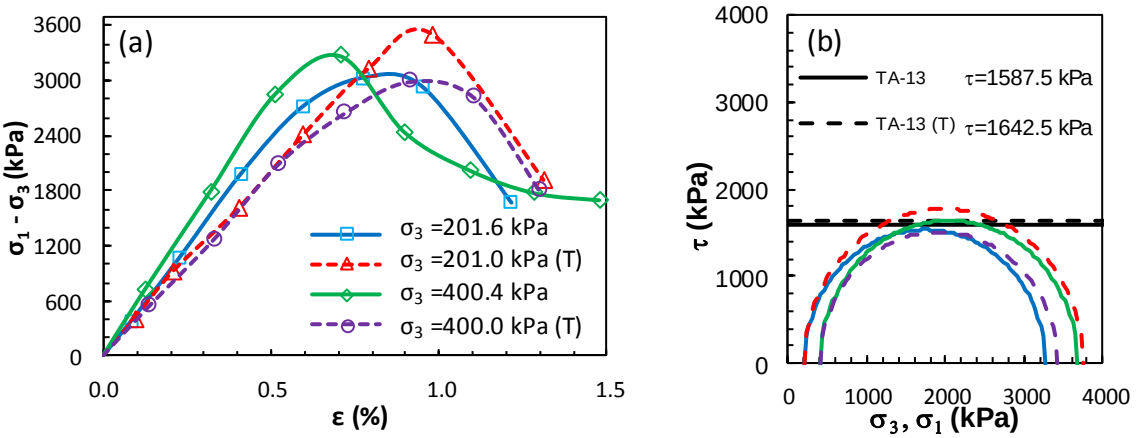
Şekil Ek 6.10. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



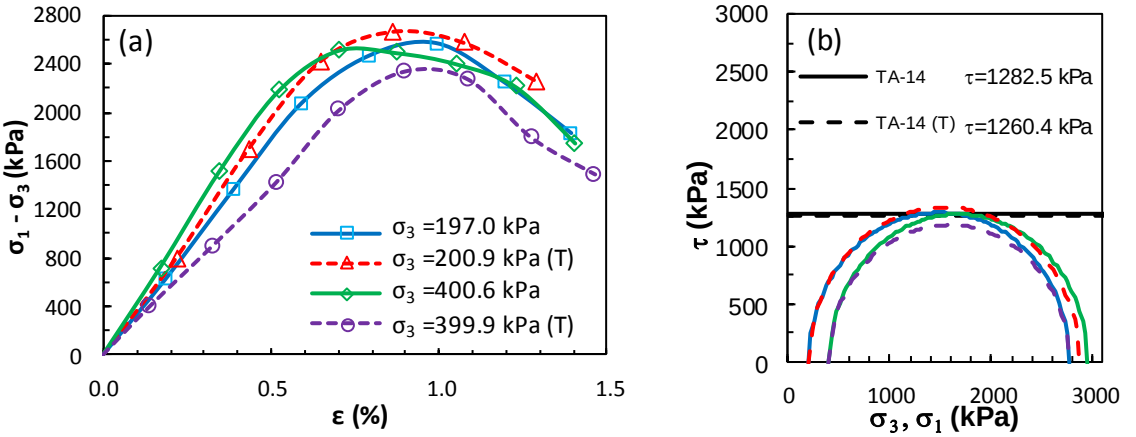
Şekil Ek 6.11. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



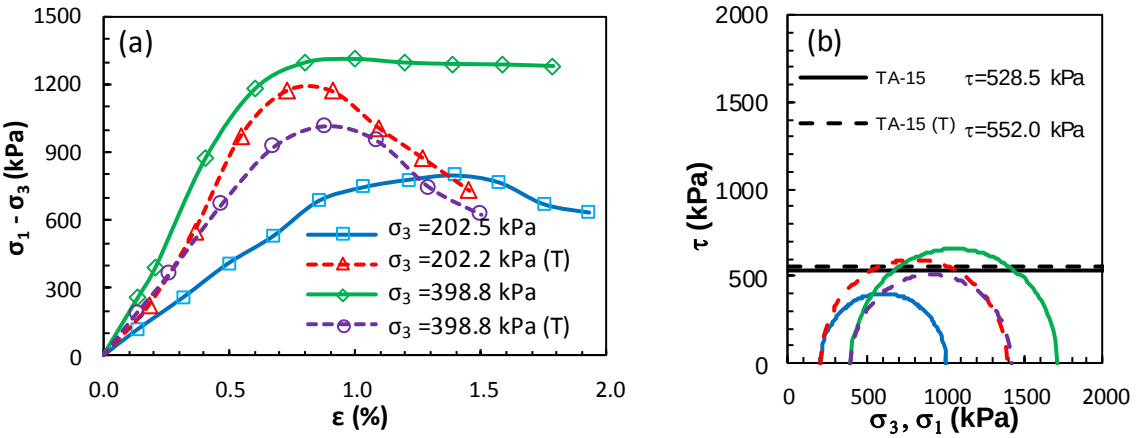
Şekil Ek 6.12. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



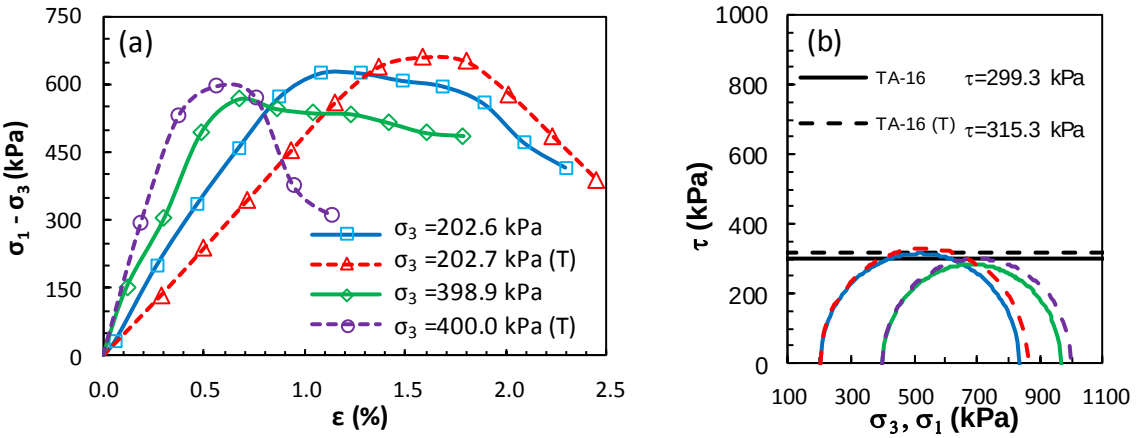
Şekil Ek 6.13. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)



Şekil Ek 6.14. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

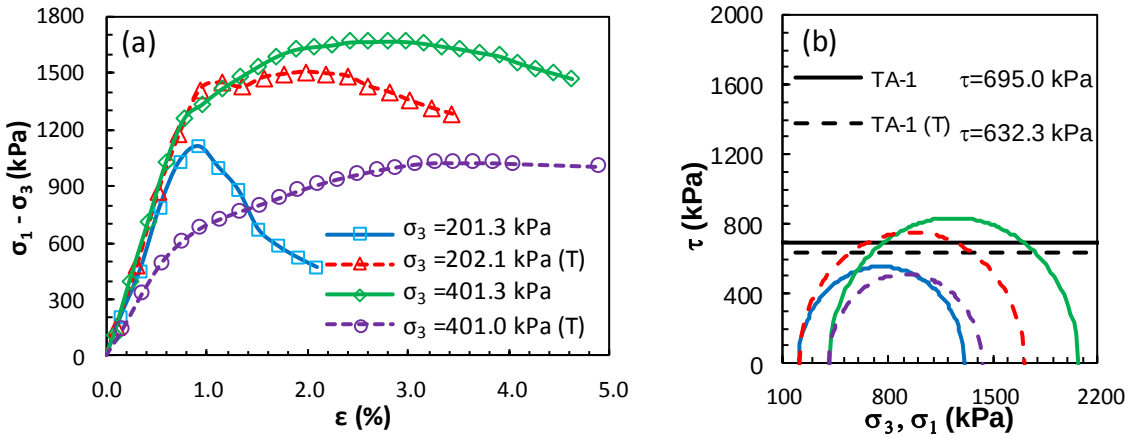


Şekil Ek 6.15. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

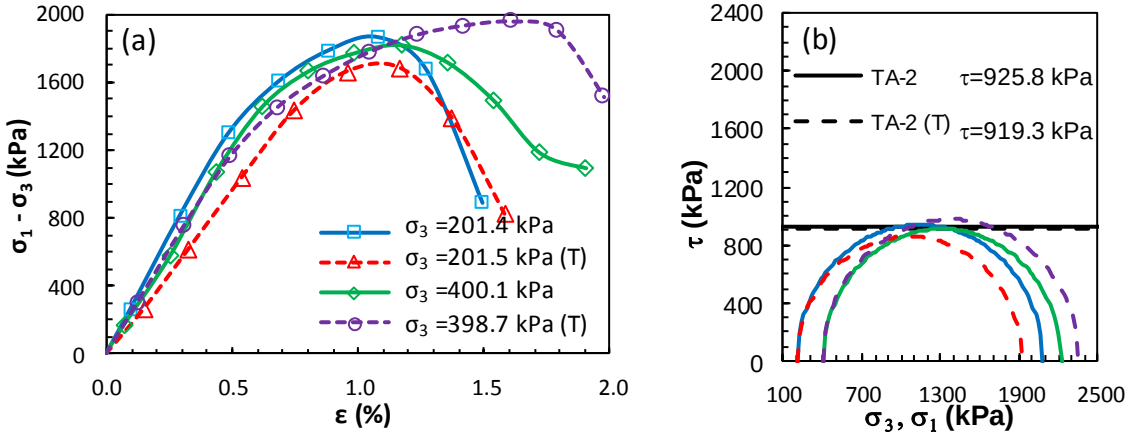


Şekil Ek 6.16. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 7 gün)

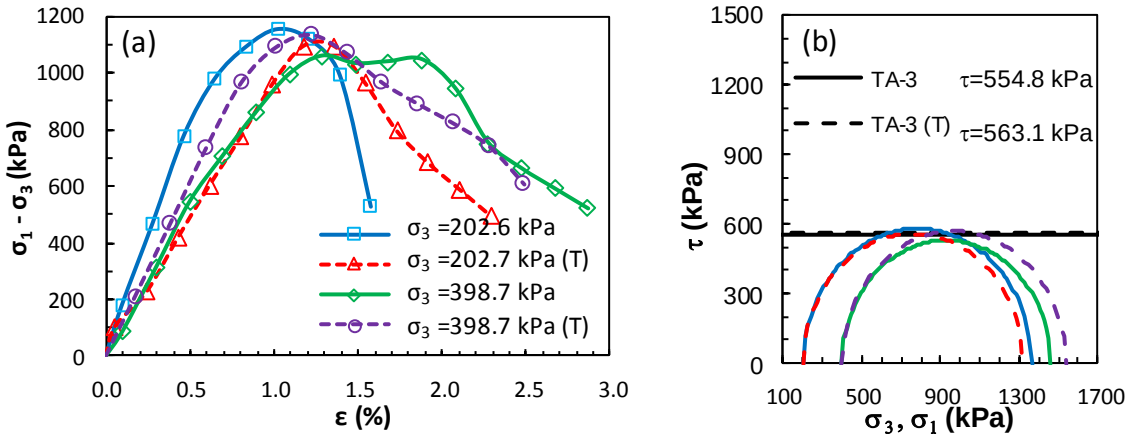
Kür süresi: 28 gün



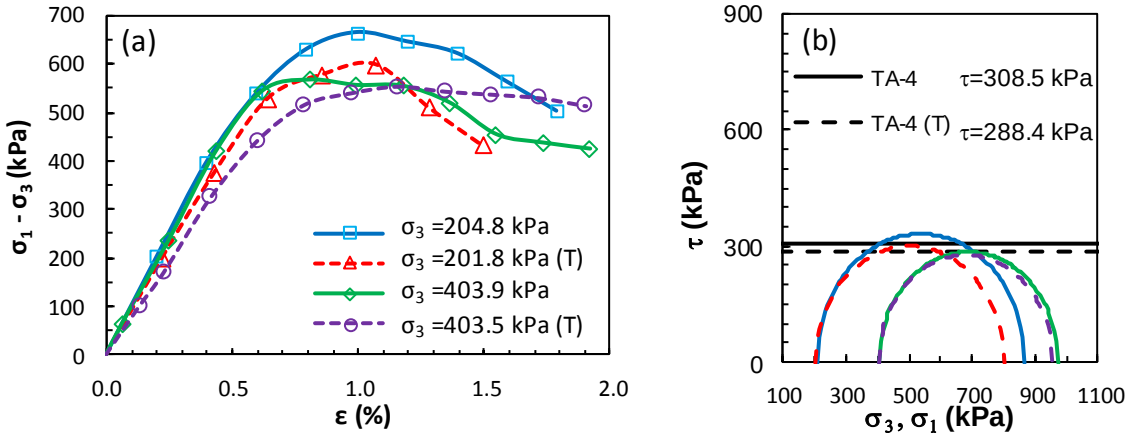
Şekil Ek 6.17. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



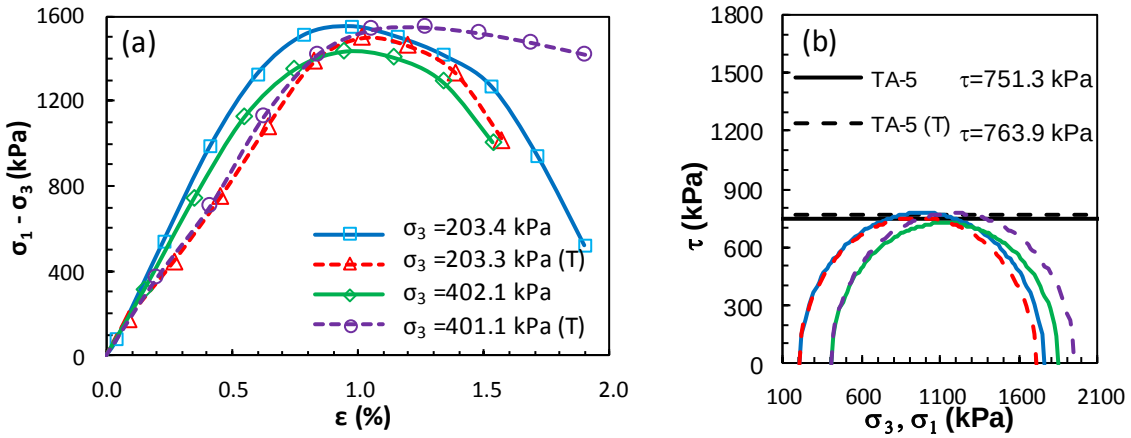
Şekil Ek 6.18. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



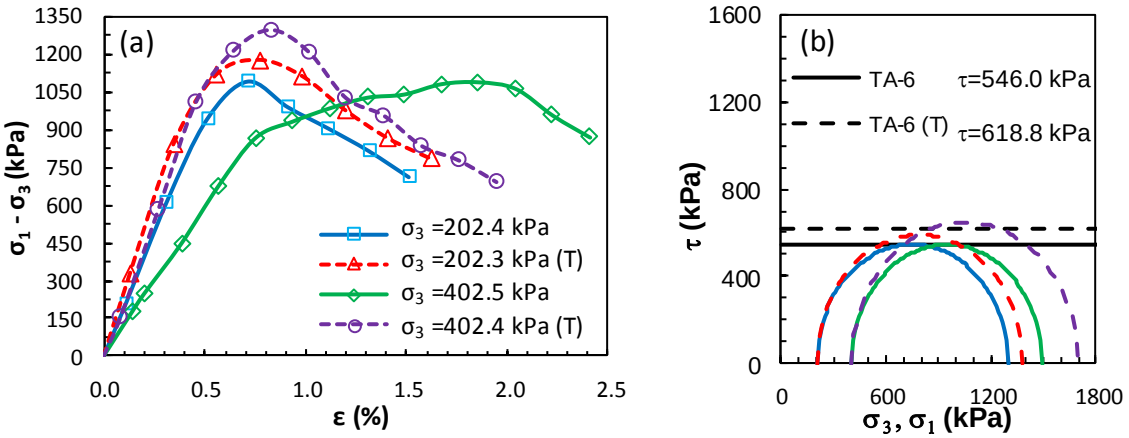
Şekil Ek 6.19. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



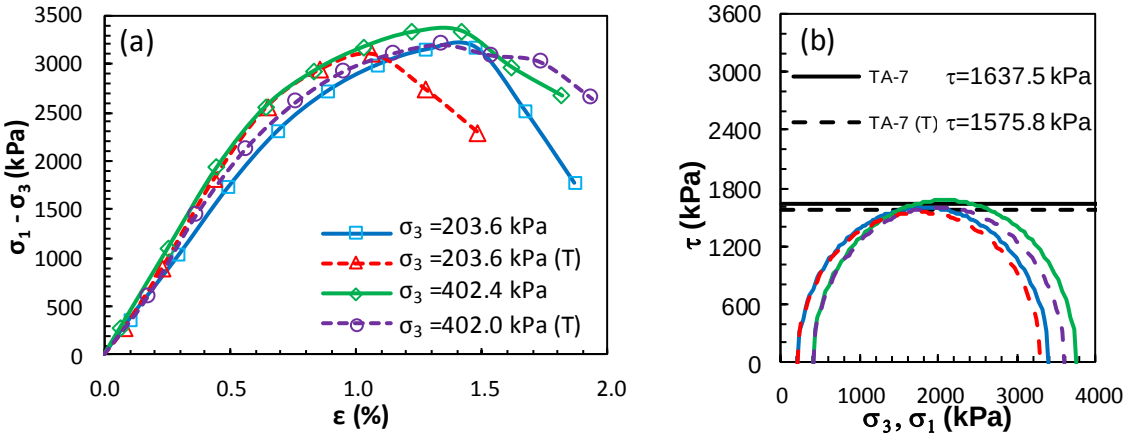
Şekil Ek 6.20. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



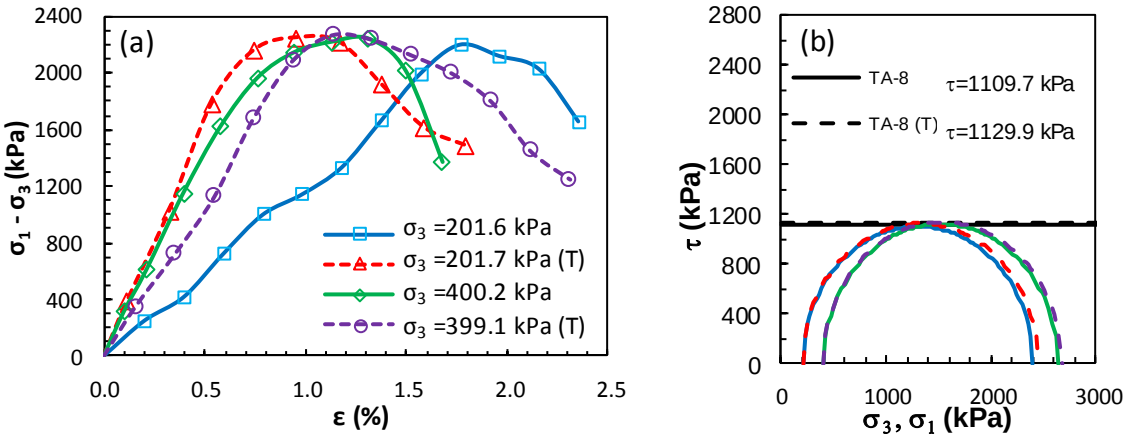
Şekil Ek 6.21. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



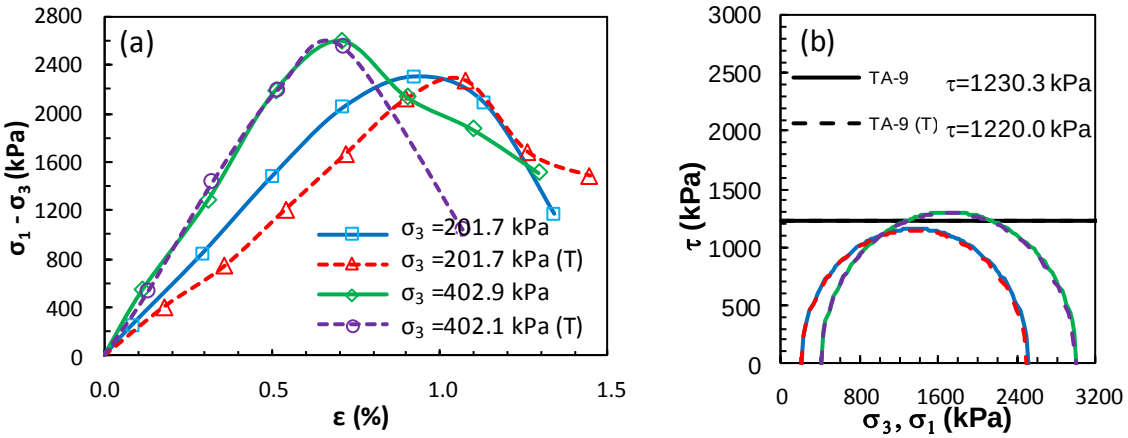
Şekil Ek 6.22. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



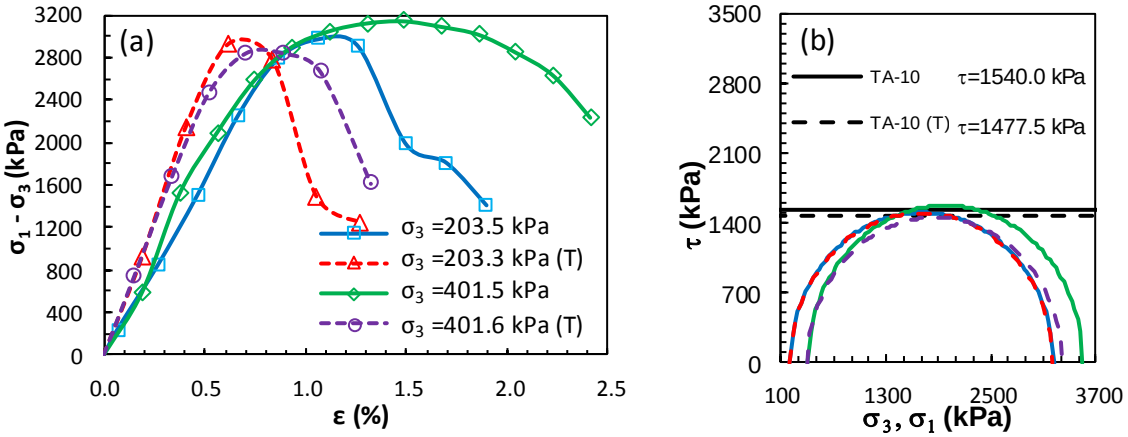
Şekil Ek 6.23. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



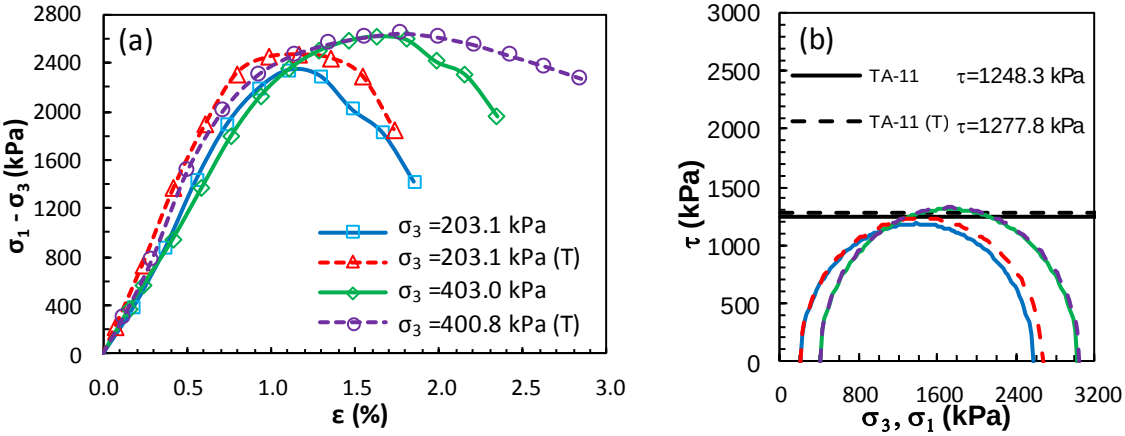
Şekil Ek 6.24. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



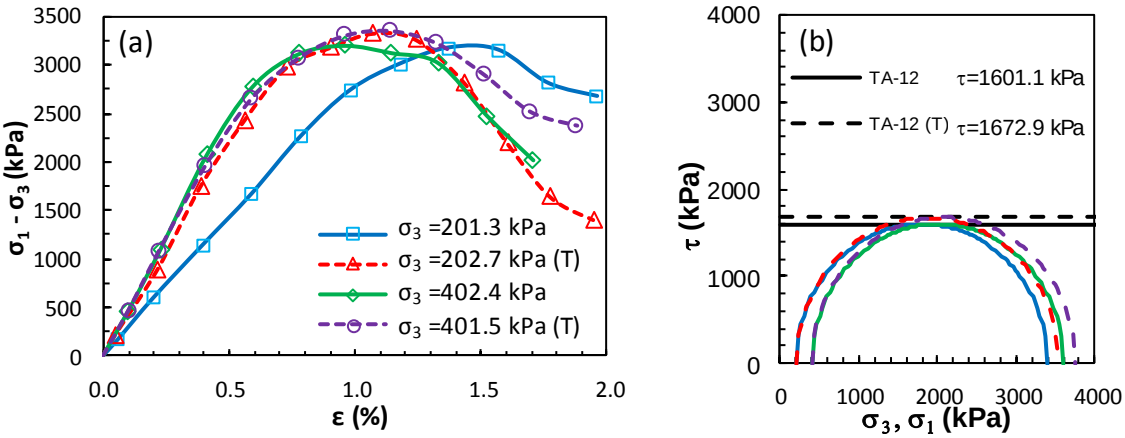
Şekil Ek 6.25. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



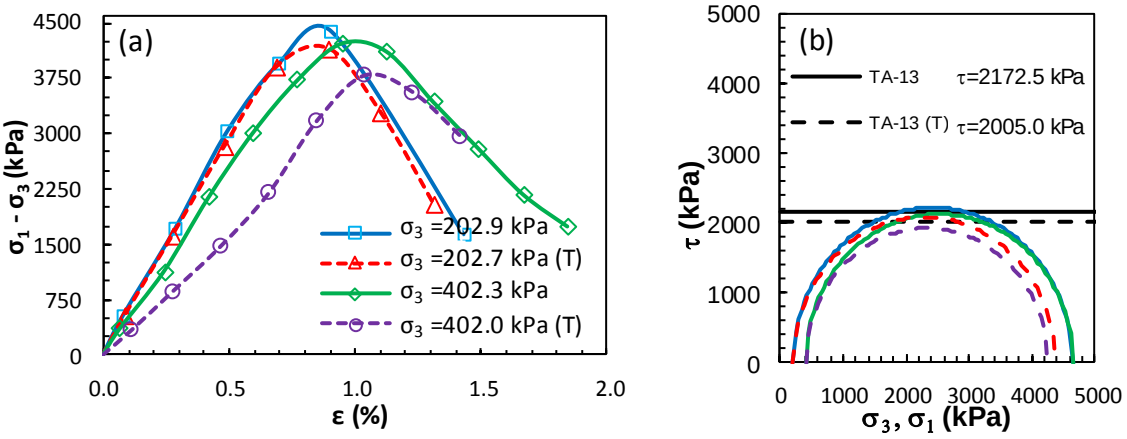
Şekil Ek 6.26. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



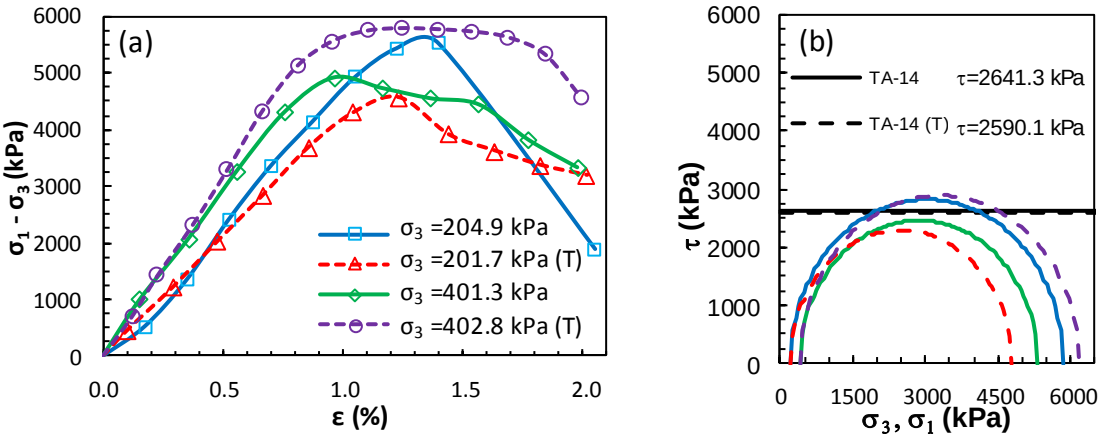
Şekil Ek 6.27. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



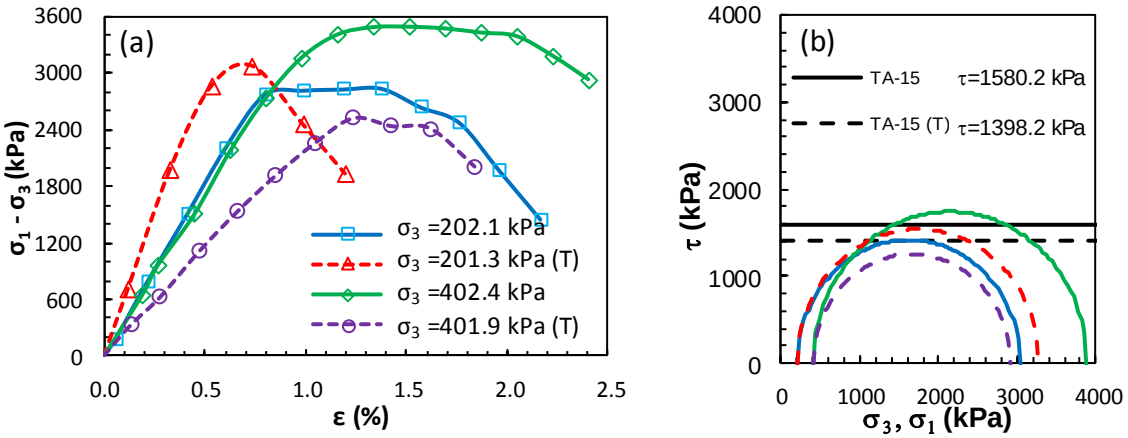
Şekil Ek 6.28. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



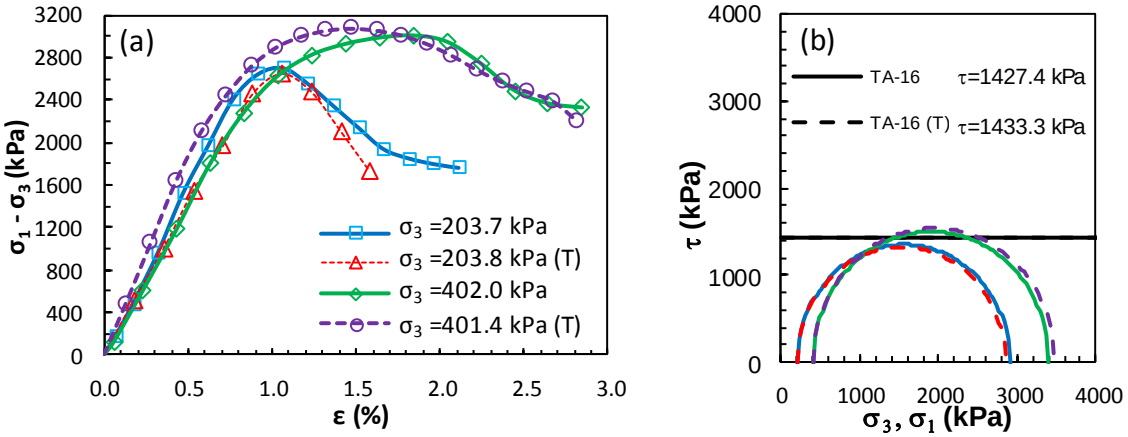
Şekil Ek 6.29. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)



Şekil Ek 6.30. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

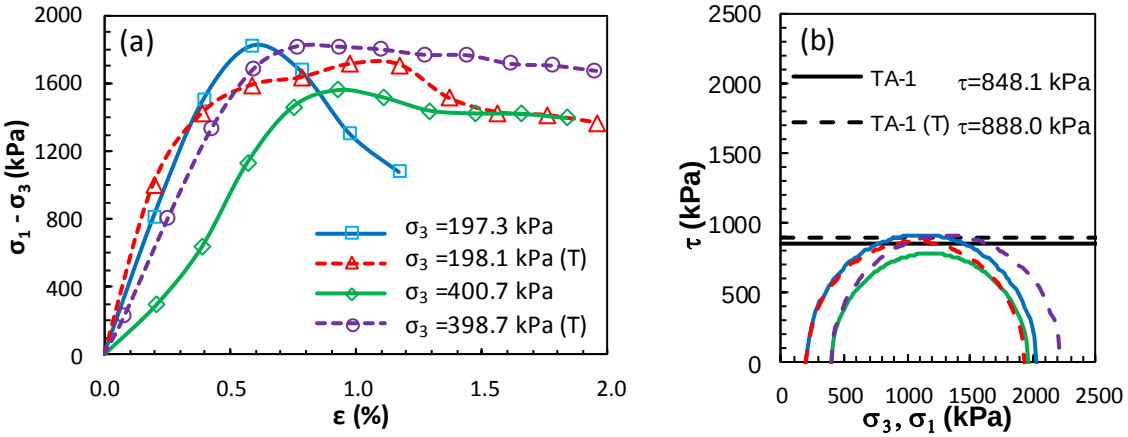


Şekil Ek 6.31. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

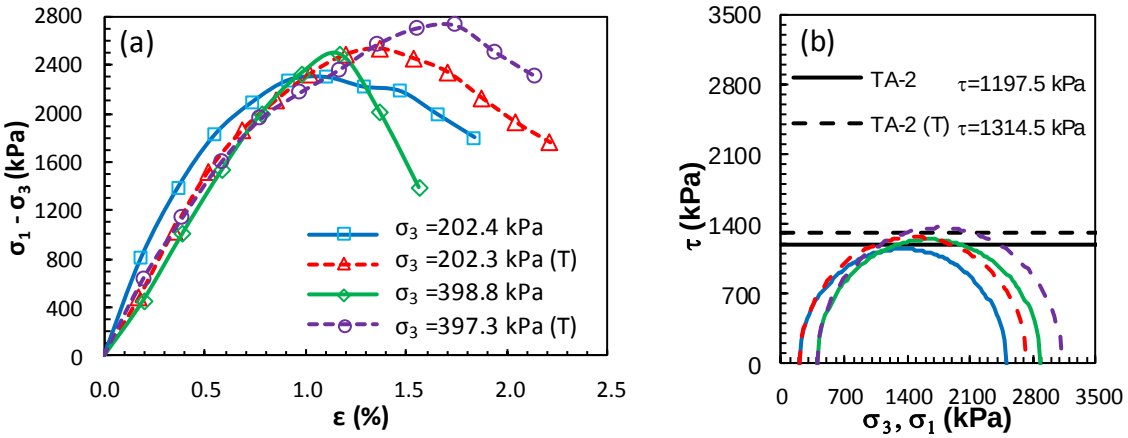


Şekil Ek 6.32. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 28 gün)

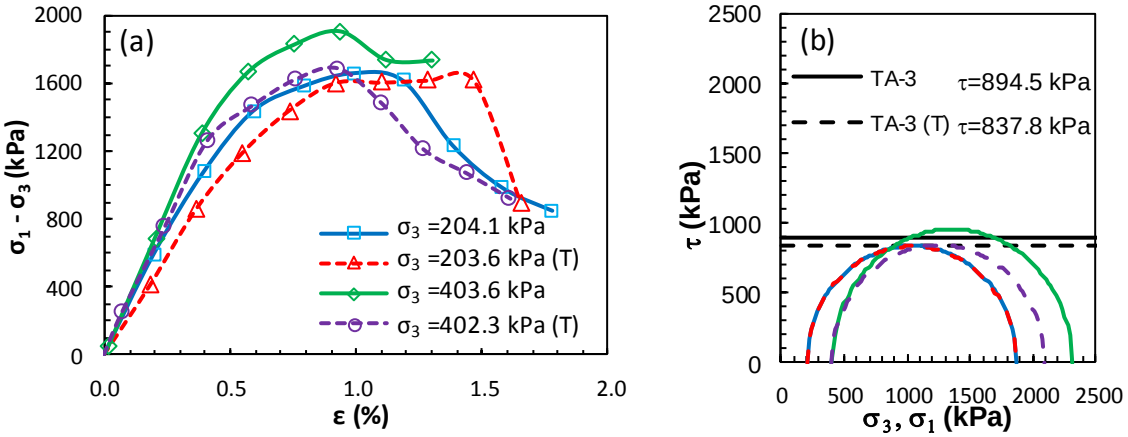
Kür süresi: 56 gün



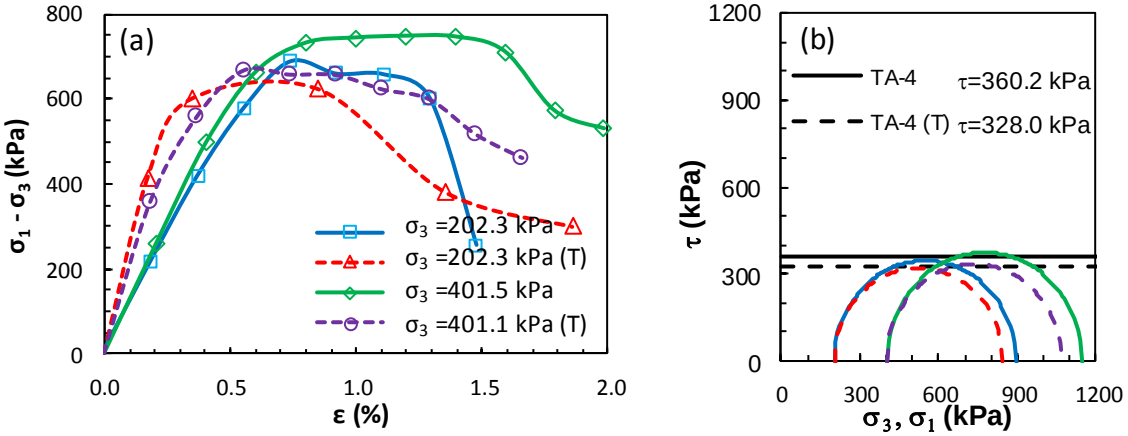
Şekil Ek 6.33. KÖ-1 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



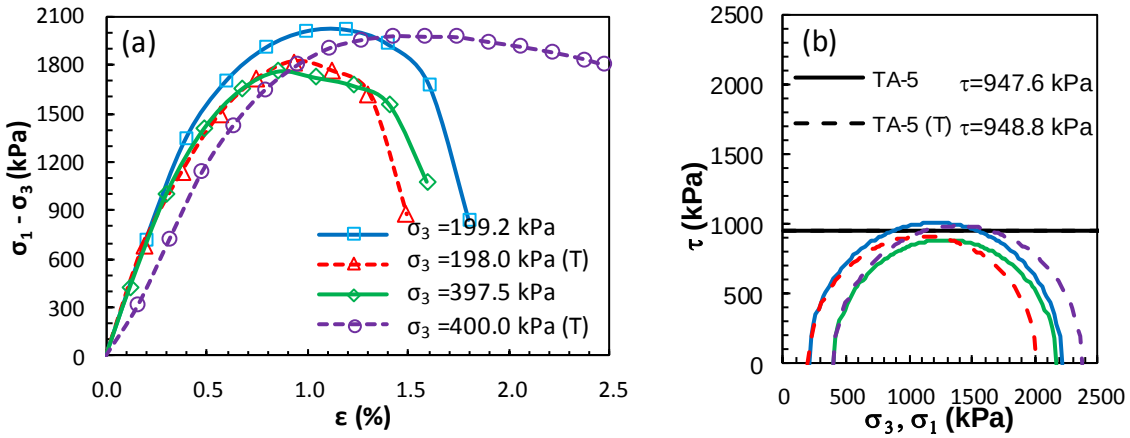
Şekil Ek 6.34. KÖ-2 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



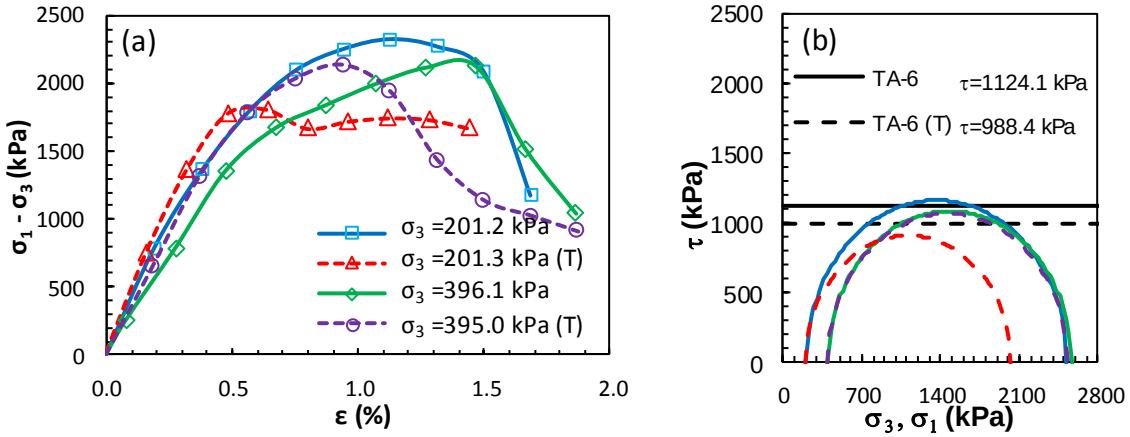
Şekil Ek 6.35. KÖ-3 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



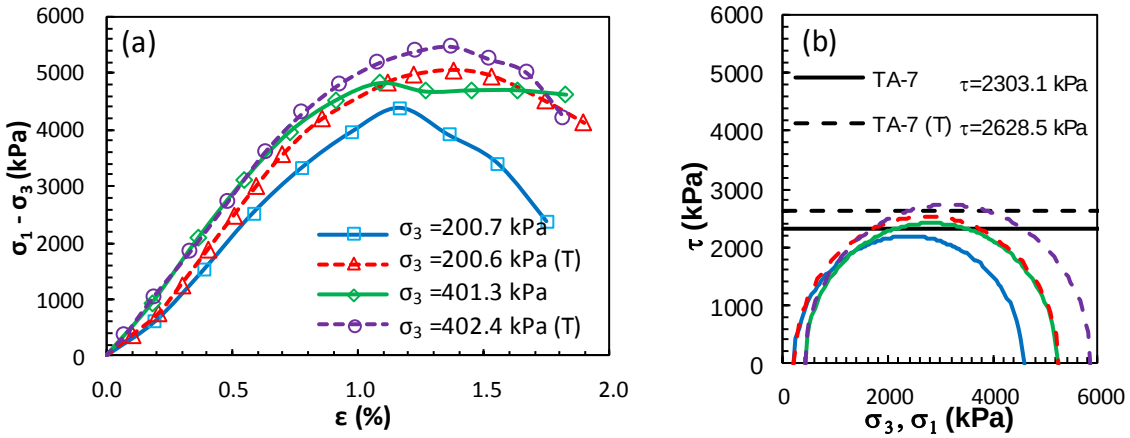
Şekil Ek 6.36. KÖ-4 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



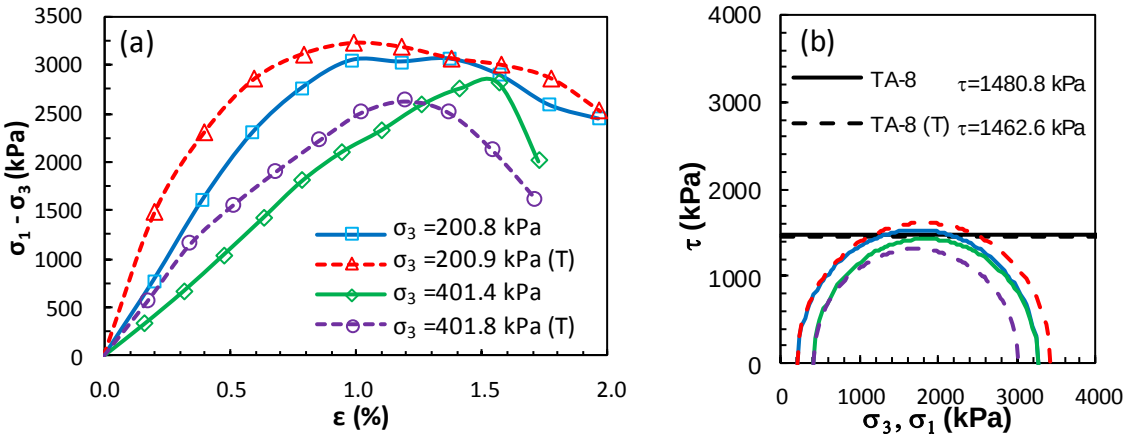
Şekil Ek 6.37. KÖ-5 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



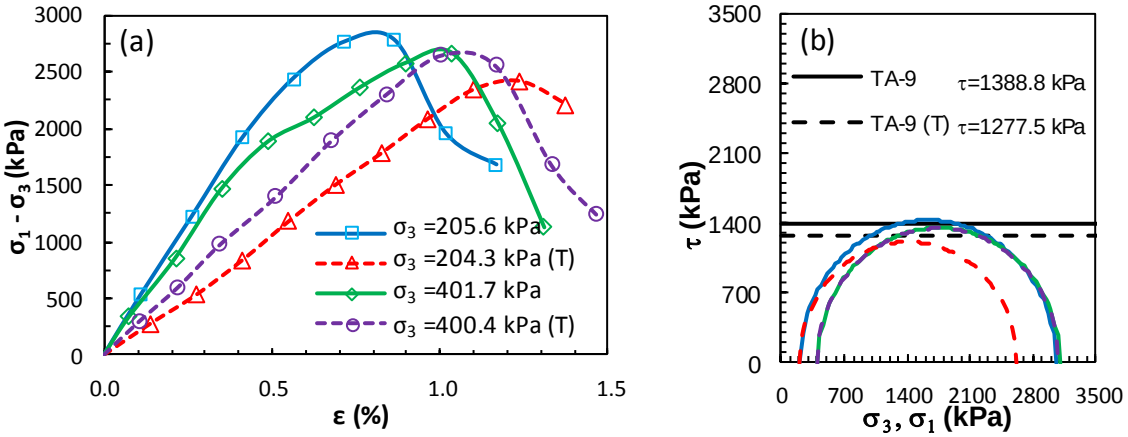
Şekil Ek 6.38. KÖ-6 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



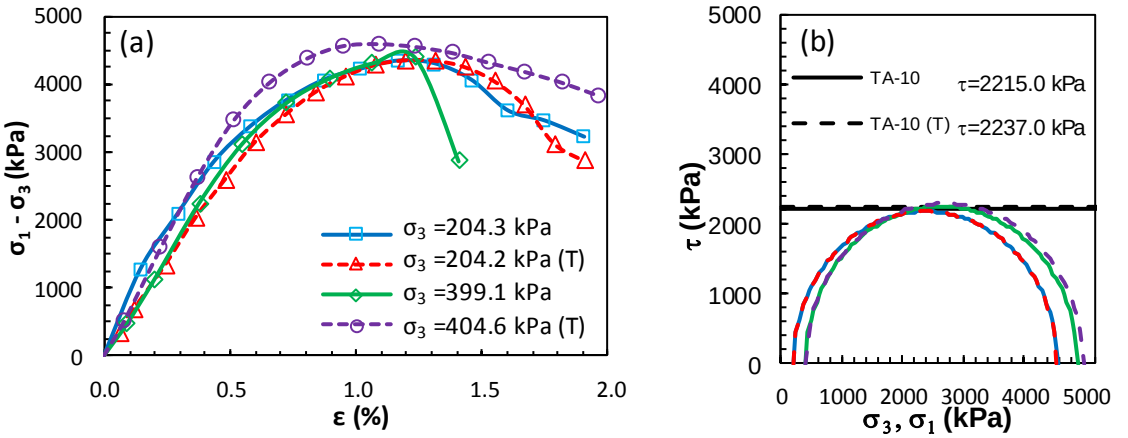
Şekil Ek 6.39. KÖ-7 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



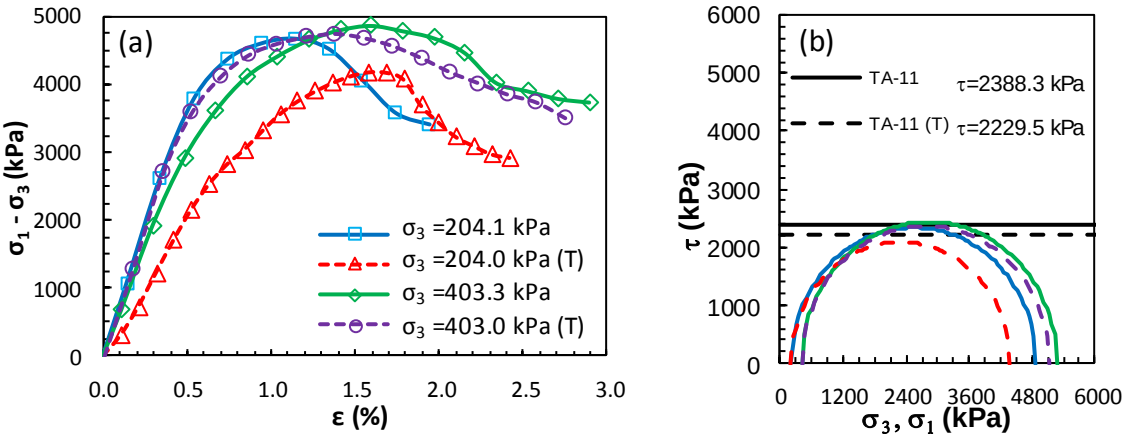
Şekil Ek 6.40. KÖ-8 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



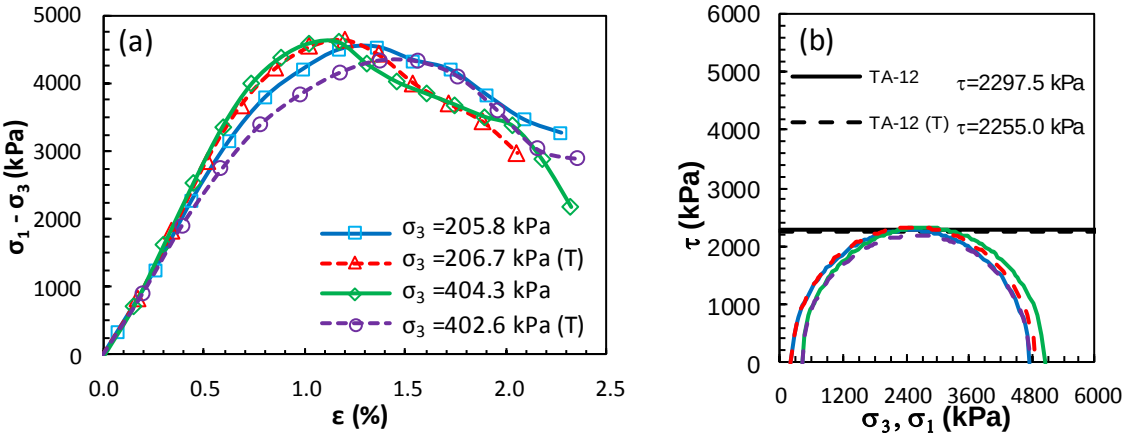
Şekil Ek 6.41. KÖ-9 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



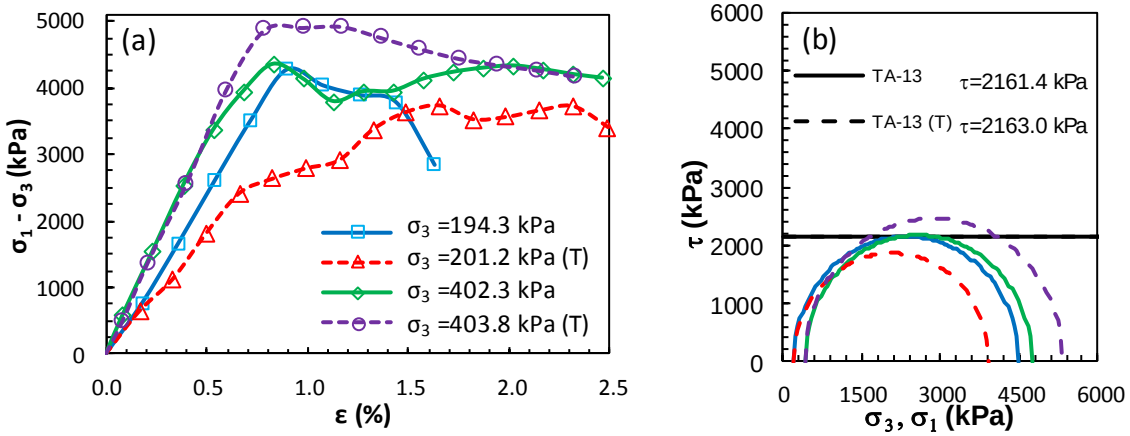
Şekil Ek 6.42. KÖ-10 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



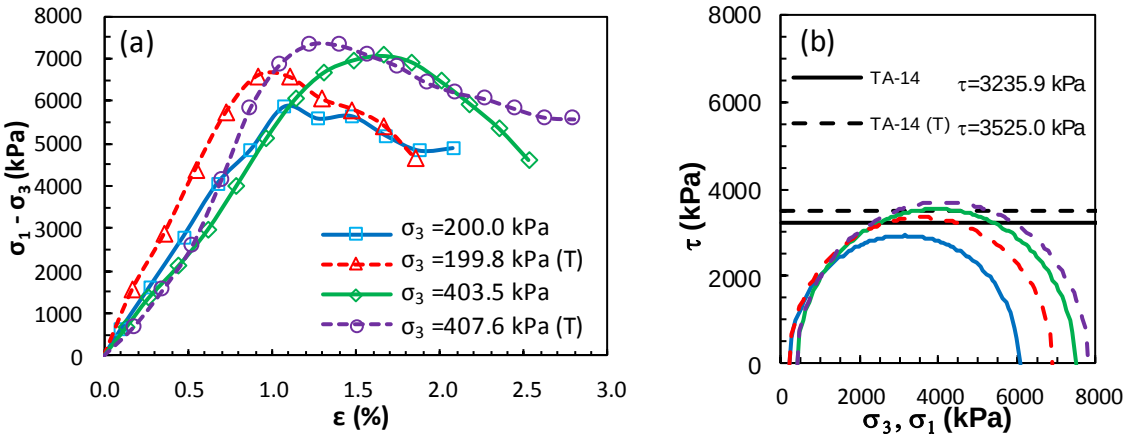
Şekil Ek 6.43. KÖ-11 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



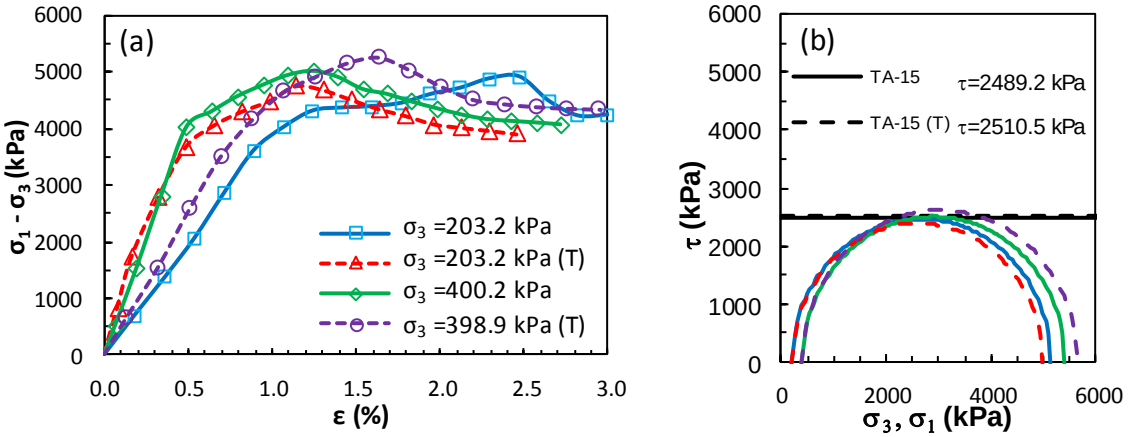
Şekil Ek 6.44. KÖ-12 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



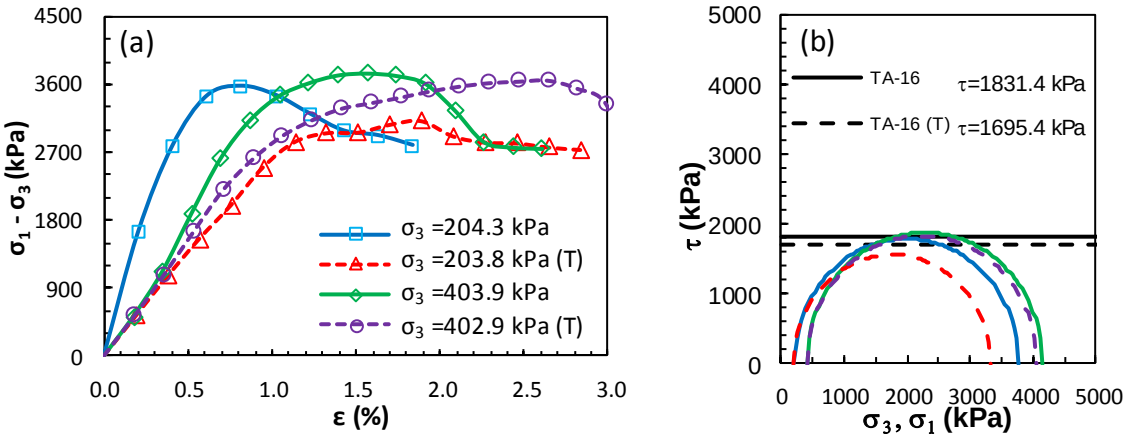
Şekil Ek 6.45. KÖ-13 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



Şekil Ek 6.46. KÖ-14 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



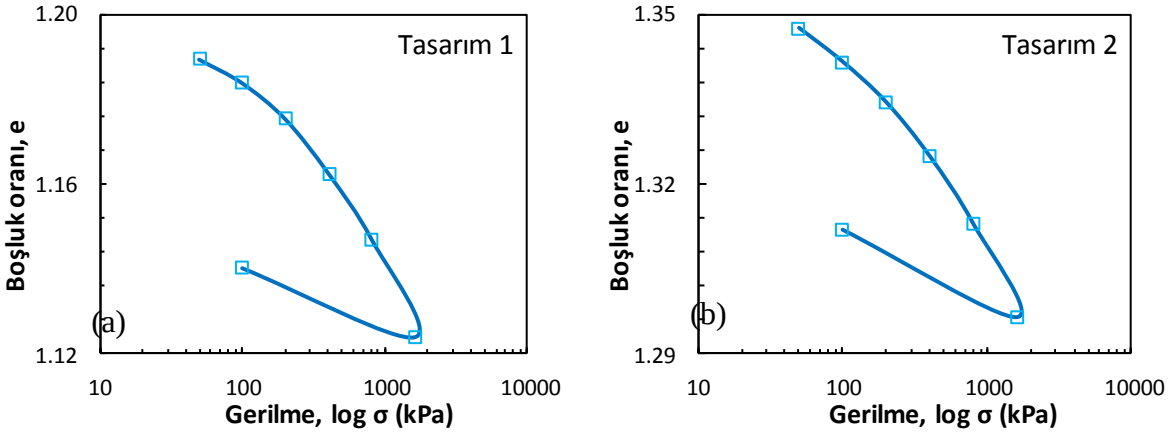
Şekil Ek 6.47. KÖ-15 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)



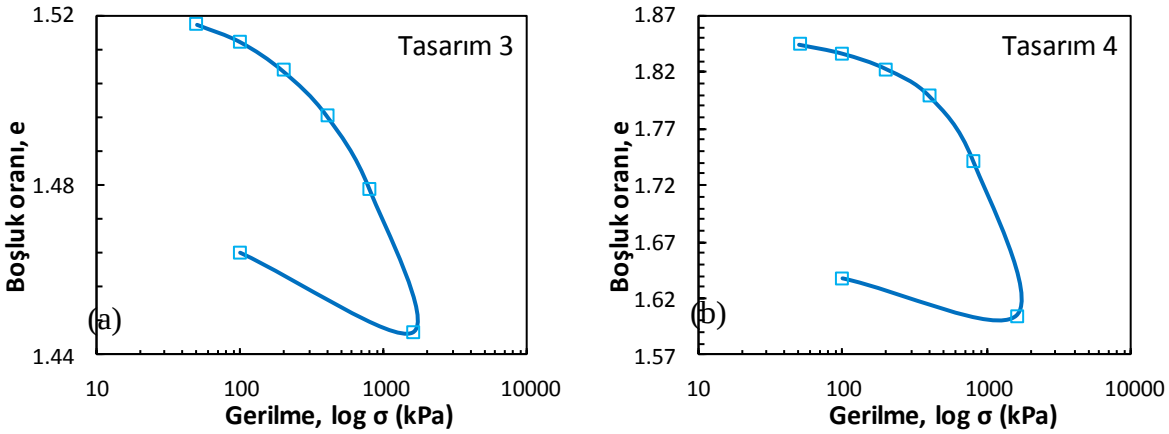
Şekil Ek 6.48. KÖ-16 numaralı tasarım: a) deviatör gerilme-birim deformasyon grafikleri ve b) Mohr daireleri (Küçük ölçekli DKK, UU, 56 gün)

EK-7: Küçük Ölçekli DKK Tasarımı: Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

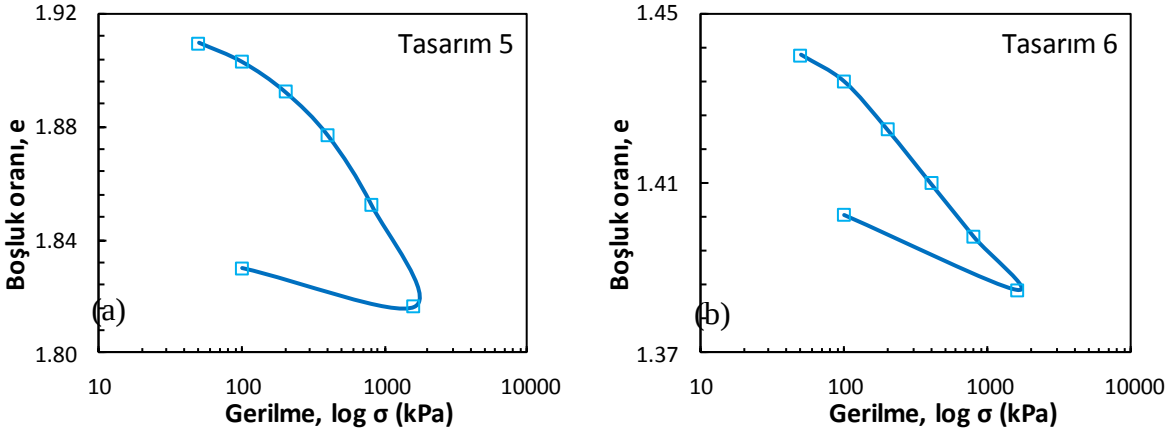
Kür süresi: 28 gün



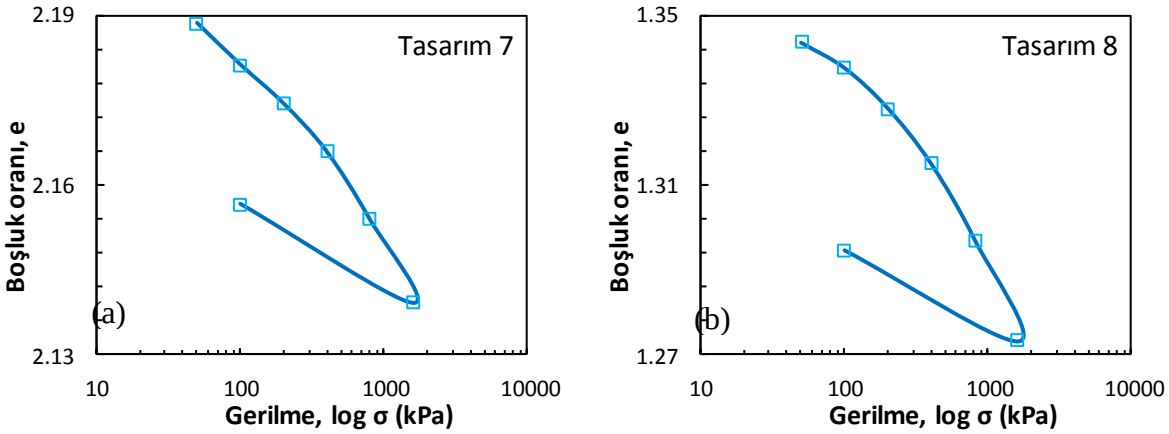
Şekil Ek 7.1. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 1 ve b) Tasarım 2



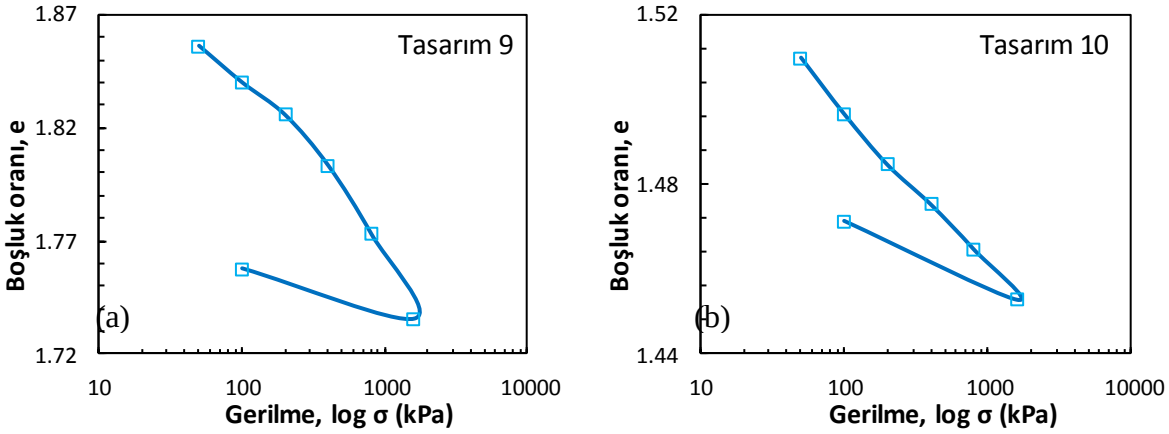
Şekil Ek 7.2. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 3 ve b) Tasarım 4



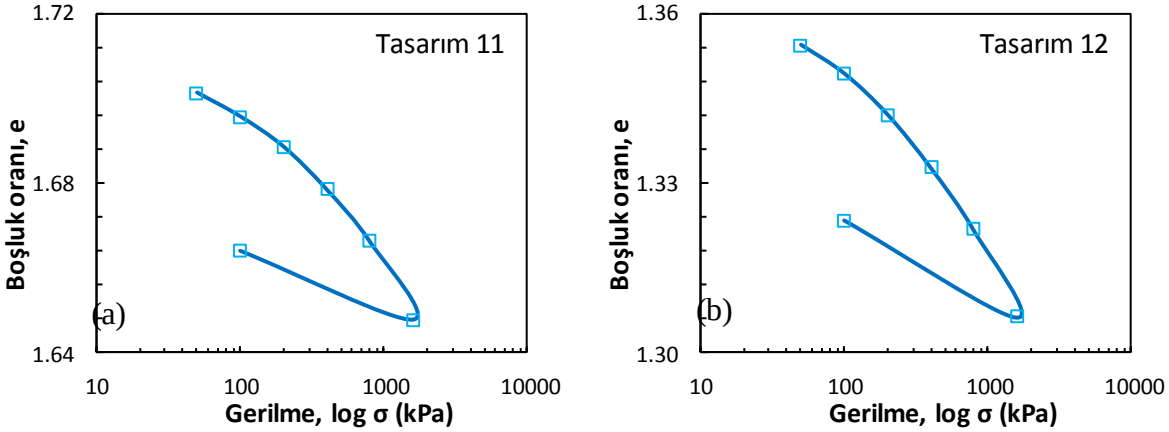
Şekil Ek 7.3. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 5 ve b) Tasarım 6



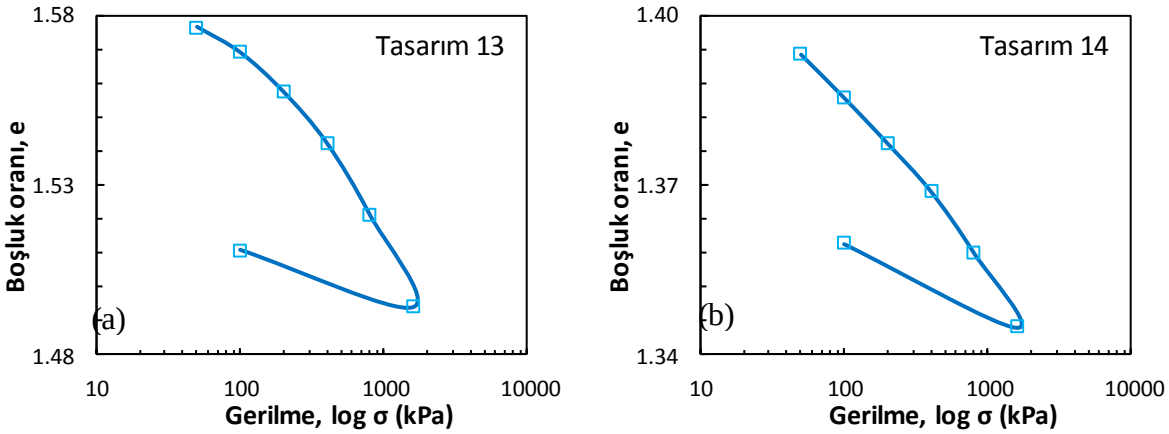
Şekil Ek 7.4. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 7 ve b) Tasarım 8



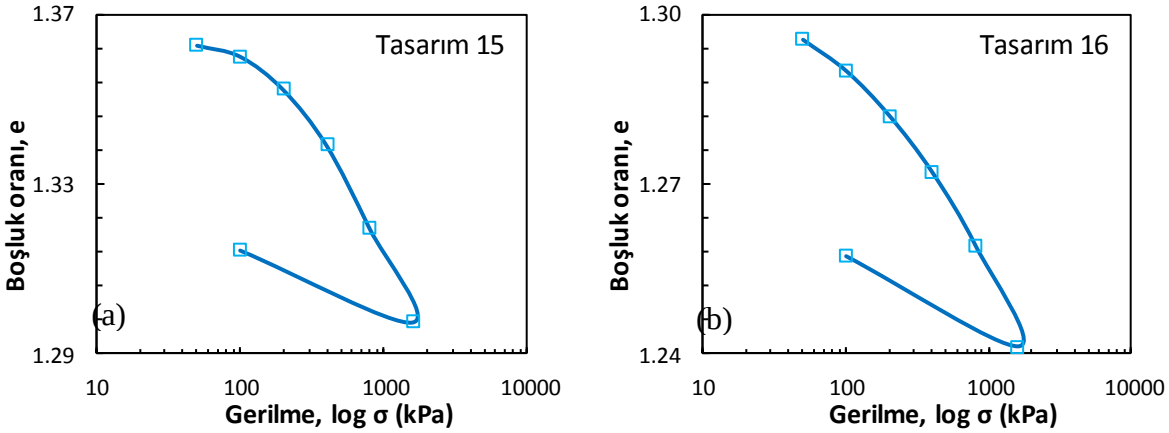
Şekil Ek 7.5. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 9 ve b) Tasarım 10



Şekil Ek 7.6. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 11 ve b) Tasarım 12

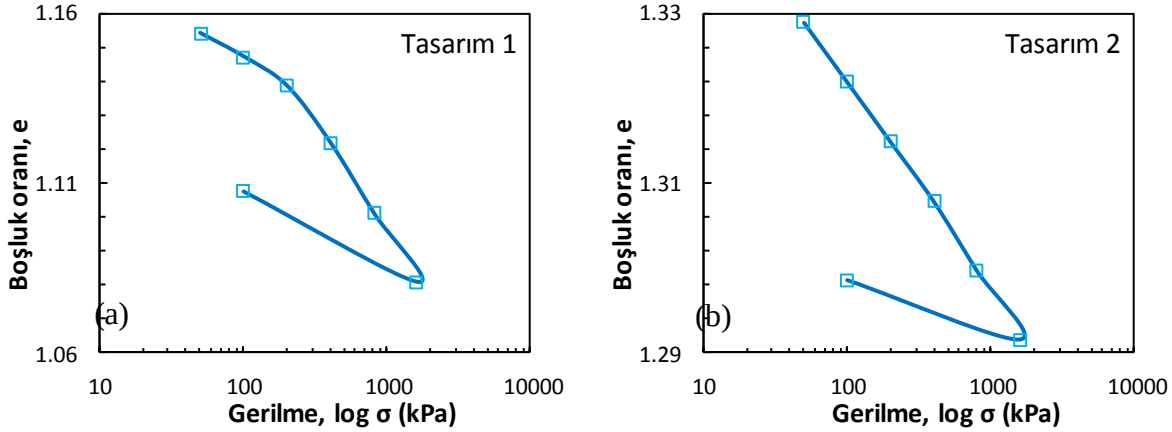


Şekil Ek 7.7. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 13 ve b) Tasarım 14

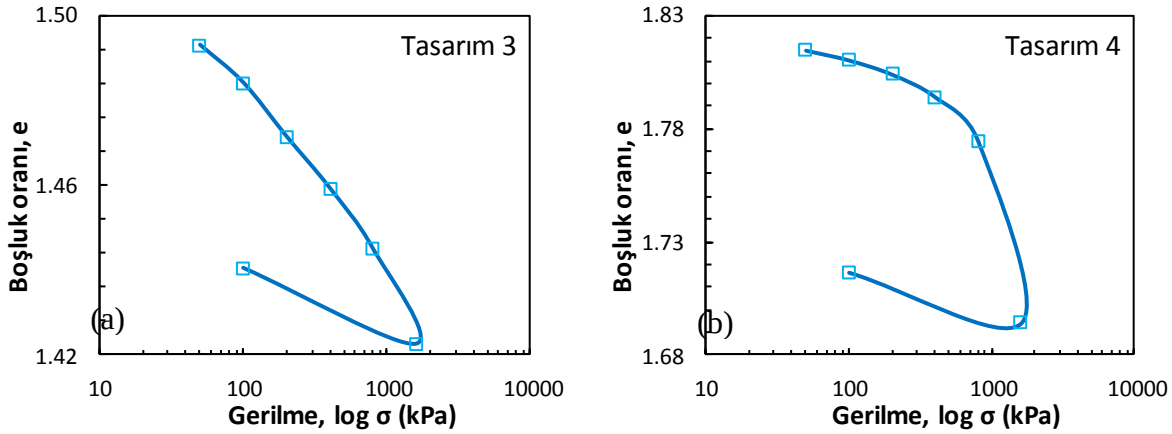


Şekil Ek 7.8. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 28 gün: a) Tasarım 15 ve b) Tasarım 16

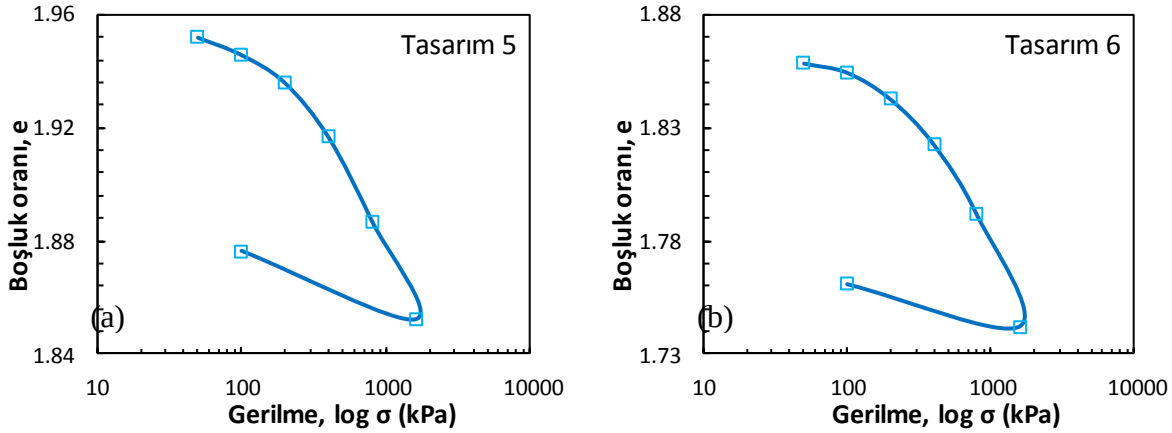
Kür süresi: 56 gün



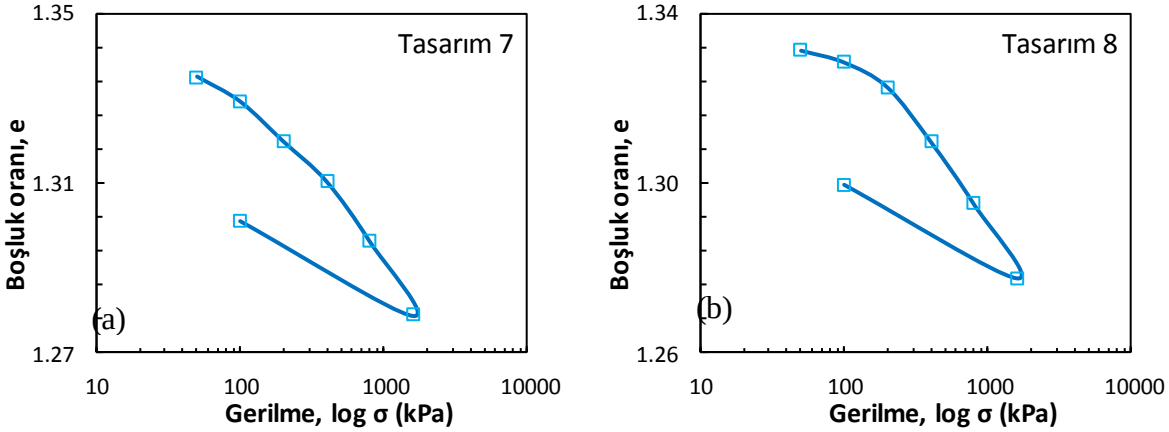
Şekil Ek 7.9. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 1 ve b) Tasarım 2



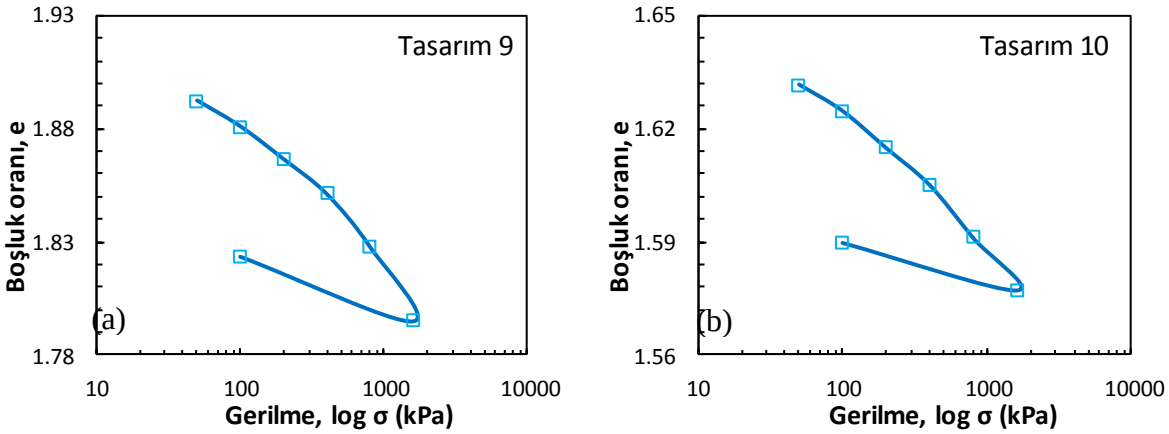
Şekil Ek 7.10. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 3 ve b) Tasarım 4



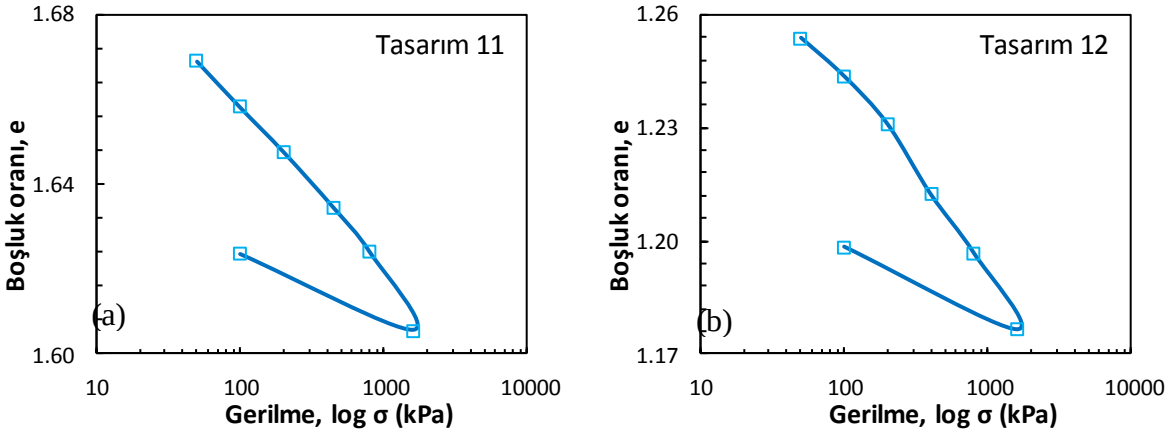
Şekil Ek 7.11. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 5 ve b) Tasarım 6



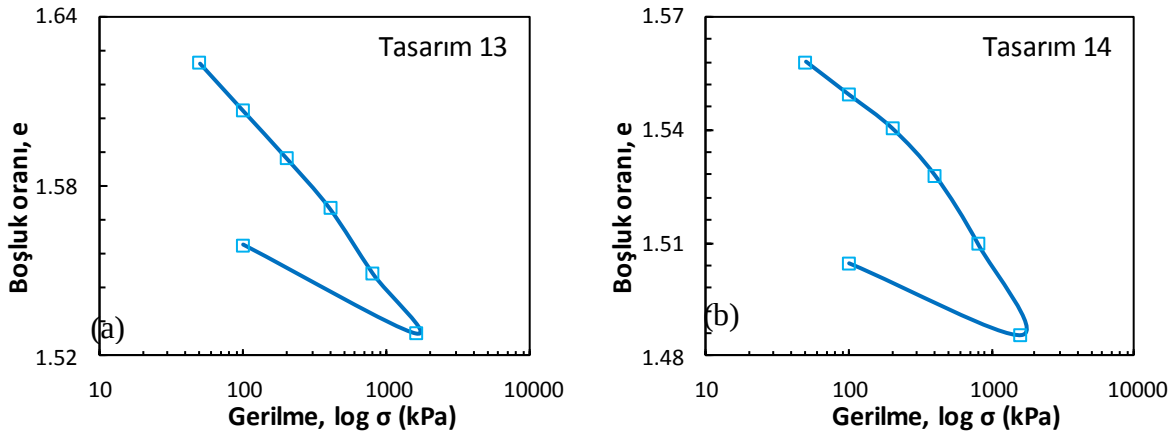
Şekil Ek 7.12. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 7 ve b) Tasarım 8



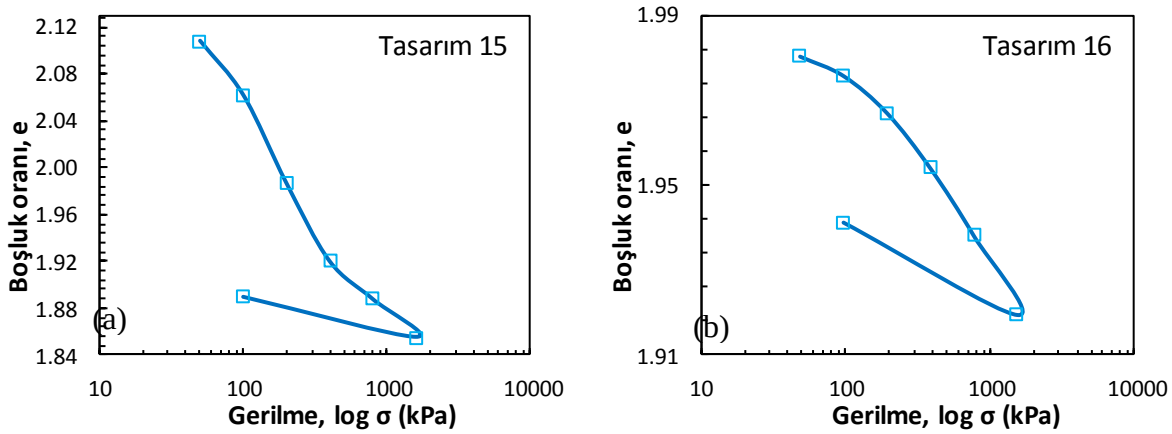
Şekil Ek 7.13. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 9 ve b) Tasarım 10



Şekil Ek 7.14. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 11 ve b) Tasarım 12



Şekil Ek 7.15. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 13 ve b) Tasarım 14



Şekil Ek 7.16. Küçük ölçekli DKK, konsolidasyon deneyi, 56 gün: a) Tasarım 15 ve b) Tasarım 16

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. MURAT OLGUN
Proje No:	217M946
Proje Başlığı:	Uçucu Kül Ve Akışkanlaştırıcı Katkılı Derin Karıştırma Kolonlarının Performansını Etkileyen Faktörlerin Model Deneylerle Araştırılması
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KONYA TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2018 - 01/05/2020
Onaylanan Bütçe:	100000.0
Harcanan Bütçe:	73801.42
Öz:	Bu proje ile killi bir zeminde imal edilen uçucu kül katkılı derin karıştırma kolonlarının (DKK) performansını etkileyen parametreler araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, derin karıştırma makinesiyle imal edilen kolonlar (büyük ölçekli DKK) ve mikserle hazırlanan zemin-enjeksiyon karışımları (küçük ölçekli DKK) üzerinde yürütülmüştür. Deneysel çalışmaların tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Her bir araştırma alanında ve ilgili kür süreleri sonunda DKK?nın performans değerleri belirlenerek elde edilen sonuçlar S/N ve çok değişkenli varyans analizleri (ANOVA) ile değerlendirilmiş, regresyon analizleri ile matematiksel modeller kurulmuş, sonrasında optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Büyük ölçekli DKK imalatlarının yapılabilmesi için öncesinde homojen ve sürekli DKK oluşumu için gerekli imalat parametreleri araştırılmıştır. Optimum imalat parametreleri olarak; çimento dozajı 325 kg/m3, karıştırma bıçaklarının dönme hızı 80 devir/dk, enjeksiyon deliklerinin çapı 3 mm ve zeminin likitlik indisi 1 şeklinde belirlenmiştir. Uçucu kül katkılı DKK tasarımlarında 7, 28 ve 56 gün kür süreleri sonunda DKK?nın serbest basınç (qu) ve üç eksenli basınç dayanımları (quu), zemin iyileştirme derecesi (RI), sıkışma indisi (Cc) ve permeabilite katsayısı (k) değerleri belirlenmiştir. DKK performansının en iyi olduğu durum için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı 425 kg/m3, uçucu kül oranı %40, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı %3, su/bağlayıcı oranı 0.8 ve zeminin likitlik indisi 1 olarak belirlenmiştir. DKK uygulamalarında %40 uçucu kül kullanılması ile çimento kullanımı ve enjeksiyon maliyeti %40 oranında azalmış olacaktır. Küçük ölçekli DKK?nın dayanım performansı büyük ölçekli DKK?nın performansına göre qu ve quu değerleri bakımından sırasıyla %40 ve %30 daha fazla iken, konsolidasyon ve permeabilite özelliklerini temsil eden Cc ve k değerlerine göre sırasıyla %20 ve %45 daha az elde edilmiştir. Küçük ve büyük ölçekli DKK tasarımlarında; kür süresi (t), bağlayıcı faktörü (?) ve içeriği (aw) arttığında qu, quu ve RI artarken, Cc ve k azalmaktadır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı (WT:Wb) ve/veya likitlik indisi (IL,mix) arttıkça qu ve quu azalırken, Cc ve k artmaktadır. DKK performansının en iyi olduğu durum IL,mix=(1.2-1.3)IL olduğunda elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile DKK içyapısındaki boşlukların durumu, C-S-H, C-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğnelerinin oluşumu gözlenerek DKK performansı ile ilişkilendirilmiştir. Deneysel ve istatistiki çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olmuştur.
Anahtar Kelimeler:	derin karıştırma kolonu, kil, optimizasyon, Taguchi yöntemi, uçucu kül
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK