Tekrarlı Yükler Altında Kum Zeminlerde Boşluk Suyu Basıncı Gelişiminin Hibrit ve Sembolik Regresyon Yöntemleriyle Modellenmesi

Berkay Ertekin

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025

Hybrid and Symbolic Regression-Based Modeling of Pore Water Pressure Generation in Sands Under Cyclic Loading

Berkay Ertekin

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

May 2025

Tekrarlı Yükler Altında Kum Zeminlerde Boşluk Suyu Basıncı Gelişiminin Hibrit ve Sembolik Regresyon Yöntemleriyle Modellenmesi

Berkay Ertekin

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

Mayıs 2025

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Berkay Ertekin'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Tekrarlı Yükler Altında Kum Zeminlerde Boşluk Suyu Basıncı Gelişiminin Hibrit ve Sembolik Regresyon Yöntemleriyle Modellenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

Üye : Prof. Dr. Derviş Volkan Okur

Üye : Prof. Dr. Murat Türköz

Üye : Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eren Balaban

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma Tümsek
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan danışmanlığında hazırlamış olduğum "Tekrarlı Yükler Altında Kum Zeminlerde Boşluk Suyu Basıncı Gelişiminin Hibrit ve Sembolik Regresyon Yöntemleriyle Modellenmesi" başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamada yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 12/05/2025

Berkay Ertekin

İmza

ÖZET

Doygun kum zeminlerde tekrarlı kayma gerilmeleri altında gelişen boşluk suyu basıncı artışı, zeminin efektif gerilmesini azaltarak sıvılaşma davranışını tetikleyen temel mekanizmalardan biridir. Bu sürecin doğru modellenmesi, mühendislik uygulamalarında zemin davranışının güvenilir biçimde öngörülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, mevcut literatürde yer alan ampirik boşluk suyu basıncı modelleri incelenmiş gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen veriler temel alınarak yeni iki model önerilmiştir. Geliştirilen modeller, literatürden derlenen deneysel veri setleri kullanılarak oluşturulmuş ve daha önce yüksek lisans kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneyleriyle karşılaştırılarak test edilmiştir. Modellerin tahmin performansı istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş ve mevcut literatür modelleriyle karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen modellerin çeşitli zemin koşulları altında güvenilir ve uygulanabilir bir yapı sunduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Ampirik Modelleme, Boşluk Suyu Basıncı, Dinamik Davranış, Zemin Sıvılaşması, Dinamik Üç Eksenli Deney

SUMMARY

The increase in pore water pressure induced by cyclic shear stresses in saturated sandy soils is one of the fundamental mechanisms that triggers liquefaction by reducing the effective stress within the soil. Accurate modeling of this process is critical for reliably predicting soil behavior in geotechnical engineering applications. In this doctoral study, empirical pore water pressure models available in the literature were reviewed, and two new models were proposed based on data obtained from stress-controlled cyclic triaxial tests. The developed models were constructed using experimental datasets compiled from the literature and were tested by comparison with laboratory experiments previously conducted within the scope of a master's thesis. The predictive performance of the models was evaluated using statistical methods and benchmarked against existing models from the literature. The results demonstrate that the proposed models offer a reliable and applicable framework for predicting pore pressure generation under various soil conditions.

Keywords: Empirical Modeling, Pore Water Pressure, Dynamic Behavior, Soil Liquefaction, Dynamic Triaxial Test

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim süresince bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle her zaman yanımda olan, çalışmamın her aşamasında değerli katkılarını esirgemeyen, bilimsel yaklaşımı ve akademik desteğiyle beni yönlendiren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Kâmil Bekir Afacan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, akademik hayatım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, zamanlarını ayırarak bilgi birikimlerini bizlerle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Gülgün Yılmaz'a, Prof. Dr. D. Volkan Okur'a, Prof. Dr. Murat Türköz'e ve Doç. Dr. Hasan Savaş'a teşekkür eder, kendilerine duyduğum saygı ve minnettarlığı ifade etmek isterim.

Hayatım boyunca bana inanan, destekleyen ve her koşulda yanımda olan sevgili annem Fatma Ertekin'e, babam Yalçın Ertekin'e ve ağabeyim Tolga Burak Ertekin'e; eğitim hayatımda bana her zaman güç veren, sabrıyla ve sevgisiyle yanımda duran kıymetli eşim Müge Ertekin'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvii**
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xix**
1. GİRİŞ ve AMAÇ **1**
2. SIVILAŞMA **3**
2.1. Genel Bilgiler 3
2.1.1. Çevrimsel gerilme oranı (csr) 4
2.1.2. Çevrimsel yük direnç oranı (crr) 8
2.1.3. Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı 13
2.1.4. Düşey gerilme düzeltmeleri 16
2.1.5. Güncellenmiş sıvılaşma eşik denklemleri 20
2.2. İnce Taneli Zeminlerde Sıvılaşma Davranışı 23
2.2.1. Plastisite indisi 23
2.2.2. İnce tane oranı 26
2.3. Laboratuvar Deneylerine Dayalı Sıvılaşma Değerlendirmeleri 32
2.3.1. Dinamik üç eksenli basınç deneyleri 32
2.3.2. Basit kesme (dss) ve burulmalı kesme deneyleri 36
2.3.3. Santrifüj deneyleri 41
2.4. Sıvılaşma Potensiyelinin Tahmini 45
2.4.1. Olasılıksal yaklaşım 45
2.4.2. Güvenlik katsayısı yaklaşımı 50
2.4.3. Cpt, spt ve çok parametreli regresyon yaklaşımı 53
2.5. Sıvılaşma Sonrası Zemin Davranışı 58

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.5.1. Rezidüel kayma dayanımı 58
2.5.2. Sıvılaşma sonrası yanal yayılma ve deformasyon analizi 63
2.5.3. Sıvılaşma sonrası stabilite sınırlarının değerlendirilmesi 66
3. BOŞLUK SUYU BASINCI GELİŞİMİNİN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 70
3.1. Gerilme Tabanlı Modeller Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri 70
3.2. Birim Deformasyon Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri 71
3.3. Enerji Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri 72
3.4. Veri Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri 74
3.5. Modellerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi 76
3.6. Boşluk Suyu Basıncı Denklemleri 78
3.6.1. Gerilme esaslı modeller 78
3.6.2. Birim deformasyon tabanlı modeller 81
4. MATERYAL VE YÖNTEM 84
4.1. Materyal 84
4.1.1. Deneysel veri kaynağı ve seçimi 84
4.1.2. Kullanılan deney tipi 86
4.1.3. Zemin özellikleri ve bağımsız değişkenler 88
4.1.4. Nihai veri setinin yapısı 90
4.2. Yöntem 93
4.2.1. Verilerin dijitalleştirilmesi ve gürültü azaltma işlemi 93
4.2.2. R_u-N dönüşümü ve veri yapısının oluşturulması 102
4.2.3. Lineer regresyon denemeleri 103
4.2.4. Korelasyon ve değişken önem analizi 106
4.2.4.1. Pearson korelasyon katsayısı 106
4.2.4.2. Spearman korelasyon katsayısı 111
4.2.4.3. Karşılıklı bilgi analizi 114

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.2.4.4. Random forest ve xgboost ile değişken önem analizi 118
4.2.4.5. Kullanılan algoritma yapıları..... 122
4.2.5. Sembolik regresyon..... 125
4.2.6. PySR modelinin oluşturulması..... 130
4.2.7. Hibrit modelin oluşturulması 139
4.2.8. Model doğrulama ve test süreci 172
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 177
5.1. Geliştirien Sembolik Regresyon Modelinin Sunumu 177
5.2. 35 kPa Deviator Gerilme için Test Sonuçları 180
5.3. 50 kPa Deviator Gerilme İçin Test Sonuçları..... 189
5.4. 80 kPa Deviator Gerilme için Test Sonuçları 197
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 209
KAYNAKLAR DİZİNİ..... 212
EK AÇIKLAMALAR 223
Ek Açıklamalar-A: Model 1 (PySR) Veri Seti Grafikleri..... 223
Ek Açıklamalar-B: Model 2 (Hibrit) Veri Seti Grafikleri 239

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Derinliğe bağlı olarak önerilen gerilme indirgeme katsayısı (r_d) değişimi (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 6

2.2. Farklı deprem ivme spektrumlarında oluşan zamana bağlı kayma gerilmesi gelişimi grafikleri, a) ivme 1, b) ivme 2, c) ivme 3, d) ivme 1'in oluşturduğu kayma gerilmeleri e) ivme 2'nin oluşturduğu kayma gerilmeleri, f) ivme 3'ün oluşturduğu kayma gerilmeleri (Yang vd.'den, 2023) 8

2.3. SPT-N verilerine dayalı sıvılaşma eşik eğrileri CRR–M_w=7.5 için (Boulanger ve Idriss'den, 2014). 9

2.4. CRR–$(N_1)_{60}$ bağıntısı ve sıvılaşan–sıvılaşmayan örneklerin dağılımı (Boulanger ve Idriss'den, 2014). 11

2.5. Saha verilerindeki belirsizlik ve CRR sınır eğrisinin konumu (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 12

2.6. Deprem büyüklüğüne bağlı MSF–M_w ilişkileri (Idriss & Boulanger'den, 2008). 15

2.7. Statik kayma gerilmesi oranı (α) ile çevrimsel direnç oranı (CRR) arasındaki ilişki. a) basit kesme deneyi b) dinamik üç eksenli basınç deneyi (Idriss & Boulanger'den, 2008). 18

2.8. Farklı α değerleri için K_α değişimi (Idriss & Boulanger'den, 2008) 19

2.9. Güncellenmiş sıvılaşma sınır eğrisi M_w=7,5 için (Idriss ve Boulanger'den, 2004). 21

2.10. Plastisite insidisine göre sıvılaşma davraşının sınıflandırılması (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 24

2.11. Plastisite indisi ve su muhtevasının likit limit oranına göre sıvılaşma potansiyeli sınıflaması. a) Bray ve Sancio (2006) üç eksenli dinamik basınç verileri, b) Bray vd. (2004a) saha verileri, c) Ptrero Kanyonu saha verileri (Bennet vd. (1998), d) Wang (1979) saha verileri, e) Chu vd. (2004) Saha verileri (Bray ve Sancio'dan, 2006). 26

2.12. Farklı ince dane oranları (FC) için SPT darbe sayısı düzeltme katsayısı olan $\Delta(N_1)_{60}$ davranışı (Idriss & Boulanger'den, 2008). 27

2.13. İnce taneler için darbe sayısı düzeltme katsayısı $\Delta(N_1)_{60}$'ın FC ile değişimi (Idriss ve Boulanger'den, 2004). 28

2.14. İnce dane oranı (FC) ve düzeltilmiş uç direncine (q_{c1N}) bağlı olarak ince dane oranına bağlı CPT düzeltme katsayısının (Δq_{c1N}) değişimi (Idriss & Boulanger'den, 2008). 30

2.15. CPT temelli CRR – q_{c1Ncs} ilişkisi; a) Robertson & Wride (1997), b) Suzuki vd. (1997)'nin önerdiği sıvılaşma sınır eğrileri (Idriss ve Boulanger'den, 2004). 31

2.16 Üç eksenli çevrimsel yükleme (CU-CTX) testi için kullanılan tipik deney düzeneği ve örnek gerilme-yerdeğişme davranışı (Ishihara'dan, 1996) 33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.17. Farklı CSR seviyelerinde yapılan CU-CTX testlerinde sıvılaşma durumu (Zhu vd.'den, 2022) 34

2.18. Farklı ince dane oranı içeren kumlar için CSR – N_{liq} ilişkileri. Rölatif sıkılık a) %30, b) %50, c) %80 (Gobbi vd.'den, 2022). 36

2.19. Basit kesme (DSS) test düzeneği (Ishıhara, 1996'dan) 38

2.20. Burulmalı kesme test düzeneği (Ishıhara, 1996'dan). 38

2.21 Farklı zeminler için CU-CTX ve DSS testlerinden elde edilen CSR – N_{liq} ilişkileri a) Baie-Saint-Paul Kumu, b) Ottowa Kumu, c) Quebec Kumu (Khashila'dan, 2019). 39

2.22. Tipik bir santrifüj deney düzeneği ve yerleştirilen zemin modeli (Zhu'dan, 2023). 42

2.23 Santrifüj testinde sıvılaşma sonrası ve boşluk suyu basıncı gelişimi (Maharjan ve Takashi'den, 2013). 44

2.24. Lojistik regresyon modeliyle elde edilen PL–FS ilişkisi (Toprak vd.'den, 1999). 47

2.25. Gözlemsel verilerle kalibre edilen PL eğrisi ve hata sınırları (Cetin vd.'den, 2004). 49

2.26. Boşluk suyu basıncı oranı güvenlik katsayısı (Marcuson vd., 1990) 51

2.27. CPT temelli sıvılaşma sınır eğrisi: q_{c1N} – CSR ilişkisi (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 54

2.28. CPT tabanlı PL modeli c katsayısı kalibrasyon eğrisi (Moss vd.'den, 2006) 56

2.29. Rezidüel kayma dayanımının normalize efektif gerilmeye göre saha verileri ile ilişkisi (Idriss & Boulanger'den, 2008). 59

2.30. Rezidüel dayanım ile düzeltilmiş SPT direnci arasındaki ilişki (Seed ve Harder'dan, 1990). 60

2.31 Sıvılaşma öncesi–sonrası zemin stabilite davranışı şematik gösterimi (Kaynak: Idriss & Boulanger'den, 2008). 62

2.32. Sıvılaşma sonrası yerdeğiştirme modeli: rijit cisim yaklaşımı (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 64

2.33. Sıvılaşma sonrası yanal yayılma, rijit cisim hareketi modeli (Rauch'dan,1997). 64

2.34. Regresyon temelli yer değiştirme tahmini eğrileri (Youd vd.'den, 2002)..... 66

2.35. Olson ve Stark (2002) tarafından tanımlanan sıvılaşma sonrası stabilite sınır eğrileri (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 67

4.1. Veri dijitalleştirilmesinin akış diagramı. 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.2. Grafik görüntüsünün yüklenmesi. 94
4.3. Eksen tipinin belirlenmesi. 95
4.4. Eksen sınırlarının belirlenmesi. 95
4.5. Eksen değerlerinin girilmesi. 96
4.6. Veri çıkartma evresi. 96
4.7.Çıkarılacak verinin seçilmesi. 97
4.8. Veri noktalarının elde edilmesi. 97
4.9. R_u-N verilerinin csv formatında alımı. 98
4.10. Deney veri grafiği. 98
4.11. Çıkartılan verinin tekrardan çizimi. 99
4.12. Sabarmati nehir kumu a) D_r %30 CSR:0,250, b) D_r %60 CSR:0,400, c) D_r %60 CSR:0,400 numuneleri r_u-N grafikleri (Chavan'dan, 2022). 99
4.13. Sabarmati nehir kumu deney verilerinin çıkartılmış halinin yeniden çizdirilmiş hali. 100
4.14. Solani nehir kumu a) D_r %35, b) D_r %50, c) D_r %65 numuneleri r_u-N grafikleri (Chauhan'dan, 2022). 100
4.15. Solani nehir kumu deney verilerinin çıkartılmış halinin yeniden çizdirilmiş hali. 100
4.16. Gürültü azaltma işlemi 101
4.17. Veri N düzeltme. 103
4.18. Pearson korelasyon matrisi. 107
4.19. Pearson korelasyonu p-değeri matrisi. 108
4.20. Tahmin-Gerçek Ru dağılımı. 109
4.21. Ru-N dağılımı. 110
4.22.R_u-FC dağılımı. 111
4.23. Spearman korelasyon matrisi. 112
4.24. Spearman p-değerleri. 113
4.25. Karşılıklı bilgi analizi. 116
4.26. Spearman R_u-N/N_{liq} dağılımı. 117
4.27. Random forest ile değişken önem analizi. 119
4.28. XGBoost ile değişken önem analizi. 119
4.29. QQ verileri a) RandomForest analizi sonucu, b) XGBoost analizi sonucu. 121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.30. Hata dağılımları a) RandomForest analizi sonucu, b) XGBoost analizi sonucu. 121
4.31. Shap değerleri a) Random Forest, b) XGBoost. 122
4.32. Pearson pseudo kodu. 123
4.33. Spearman pseudo kodu. 124
4.34. Random Forest ve XGBoost pseudo kodu. 125
4.35. PySR pseudo kodu. 128
4.36. Hata dağılım histogramı. 132
4.37. Denklem 4.8 QQ verileri. 133
4.38. Gerçek ve tahmin edilen Ru dağılımı. 134
4.39. Deney 108 R_u-N eğrileri karşılaştırması 136
4.40. Deney 164 Ru-N eğrileri karşılaştırması 137
4.41. Deney 196 Ru-N eğrileri karşılaştırması. 138
4.42. Deney 208 Ru-N eğrileri karşılaştırması. 139
4.43. R_u-N/N_{liq} veri nokta dağılımı. 139
4.44. R_u-N/N_{liq} veri hexbin dağılımı. 140
4.45. R_u-N/N_{liq} veri KDE grafiği. 140
4.46. Deney 155 verisi tüm denklem yapıları için eğri uydurma sonuçları 143
4.47. Deney 164 verisi tüm denklem yapıları için eğri uydurma sonuçları 144
4.48. Deney 155 verisi omurga eğriler. 144
4.49. Deney 164 verisi omurga eğriler. 144
4.50. Ortalama nokta dağılımı 147
4.51. Medyan nokta dağılımı. 147
4.52. Ortalama petek dağılımı 148
4.53. Medyan petek dağılımı. 148
4.54. Ortalama KDE dağılımı. 149
4.55. Medyan KDE dağılımı. 149
4.56. Sigmoid yapı ortalama KDE dağılımı. 150
4.57. Sigmoid yapı medyan KDE dağılımı. 153
4.58. Logaritmik yapı ortalama KDE dağılımı 155
4.59. Logaritmik yapı medyan KDE dağılımı. 157
4.60. Polinomsal yapı ortalama KDE dağılımı. 159

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.61. Polinomsal yapı medyan KDE dağılımı. ... 162
4.62. Kareköksel yapı ortalama KDE dağılımı ... 164
4.63. Kareköksel yapı medyan KDE dağılımı. ... 166
4.64. Model 2 Deney 164 R_u-N eğrileri karşılaştırması. ... 168
4.65. Model 2 Deney 196 R_u-N eğrileri karşılaştırması. ... 170
4.66. Model 2 Deney 208 R_u-N eğrileri karşılaştırması. ... 171
4.67. Podima kumu granülometre eğrisi (Ertekin, 2019'dan). ... 173
4.68. Deprem ivme-zaman grafikleri: a) Coyote depremi, b) Gilroy depremi, c) Kobe depremi, d) Kocaeli depremi, e) Northridge depremi (Ertekin'den, 2019). ... 174
4.69. Yükleme şekilleri (Ertekin'den, 2019). ... 175
5.1. 35 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları. ... 180
5.2. 35 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları. ... 182
5.3. 35 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları. ... 184
5.4. 35 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları. ... 185
5.5. 35 kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları. ... 186
5.6. 35 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları. ... 188
5.7. 50 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları. ... 189
5.8. 50 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları. ... 191
5.9. 50 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları. ... 192
5.10. 50 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları. ... 193
5.11. 50kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları. ... 195
5.12. 50 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları. ... 196
5.13. 80 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları. ... 197
5.14. 80 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları. ... 199
5.15. 80 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları. ... 200
5.16. 80 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları. ... 201
5.17. 80 kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları. ... 203
5.18. 80 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları. ... 204

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Çeşitli araştırmalardan CU-CTX deney sonuçları (Kaynak: Idriss & Boulanger, 2008; Tatsuoka vd., 1986; Yoshimi & Tokimatsu, 1977; Silver & Seed, 1971; Seed & Lee'den, 1966). 35

2.2. DSS ve burulmalı kesme deneylerinden elde edilen CSR– N_{liq} verileri. 40

2.3 Santrifüj deneylerinde kullanılan modelleme parametrelerinin ölçekleme oranları (Zeng & Schofield'dan, 1996). 43

2.4 Cetin vd. (2004) formül değişkenleri 48

2.5. FS ve PL değerleri arasındaki tipik karşılaştırmalar. 49

2.6. Deprem büyüklüğüne göre önerilen MSF katsayıları (Boulanger & Idriss'den, 2008). 52

2.7. Moss vd. (2006) denklem parametreleri. 55

2.8. CPT ve SPT temelli yöntemlerin karşılaştırılması. 57

2.9. Kum zemin sıkılıklarına göre önerilen S_r Oranları (Idriss ve Boulanger'den, 2008). 61

2.10. Zemin tipine göre önerilen S_r-σ_v' aralıkları ve karşılık gelen stabilite durumu (Olson & Stark'dan, 2002). 68

3.1. θ ve β katsayıları (Baziar vd.'den, 2011). 80

3.2. Matasovic ve Vucetic (1993) tarafından kum numuneleri üzerinde geliştirilen boşluk suyu basıncı üretim modeline ait parametre değerleri (Carlton'dan, 2014). 83

4.1. Ham veri seti örneği. 85

4.2. Verilerin frekans ve çevre basıncı dağılımları. 88

4.3. Bağımsız değişkenleri olarak kullanılacak zemin özellikleri. 89

4.4. Verilerin FC ve D_r dağılımları. 90

4.5 Analizlerde kullanılacak değişkenler. 90

4.6. Uzun formata dönüştürülmüş veri seti. 91

4.7. Literatürden alınan veriler. 92

4.8. Lineer regresyon denemeleri. 105

4.9. Önem dereceleri. 120

4.10. Sembolik regresyon kütüphanelerinin karşılaştırılması. 129

4.11. Oluşturulan model denklemleri. 131

4.12. İstatistik verileri. 132

4.13. Çekirdek denklem yapıları. 141

4.14. Omurga denklem yapıları. 142

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.15. Omurga ve çekirdek denklem istatistikleri. 143
4.16. Eğri uydurma katsayıları hesap denklemleri. 145
4.17. Eğri uydurma parametreleri. 146
4.18. Omurga denklem istatistikleri. 167
4.19. Zemin özellikleri. 173
4.20. Deney koşulları ve malzeme özellikleri. 174
5.1. Sunulan modeller. 177
5.2. 35-50 kPa yüklemeler için istatistik verileri. 207

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
V_s	Kayma Dalgası Hızı
τ_{avg}	Ortalama Çevrimsel Kayma Gerilmesi
σ_v	Toplam Düşey Gerilme
σ_v'	Düşey Efektif Gerilme
α_{max}	Yer Yüzeyindeki Maksimum Yatay İvme
g	Yerçekimi İvmesi
r_d	Gerilme Azaltma Katsayısı
z	Derinlik
M_w	Moment Magnitüdü
MSF	Deprem Büyüklüğü Düzeltme Katsayısı
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı
$CRR_{7,5}$	7.5 Magnitüt Değeri için Çevrimsel Yük Direnç Oranı
CSR_M	M Magnitüt için Hesaplanan Çevrimsel Gerilme Oranı
σ_z	Düşey Gerilme
γ	Birim Hacim Ağırlığı
CRR_{1atm}	Efektif Gerilme=1atm için Çevrimsel Gerilme Oranı
CRR_{1atm}	Efektif Gerilme=1atm için Çevrimsel Gerilme Oranı

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
CRR_{α}	Belirli Bir Statik Gerilme için Çevrimsel Gerilme Oranı
$CRR_{\alpha=0}$	Statik Kayma Gerilmesi=0 için Çevrimsel Gerilme Oranı
C_N	Yük Düzeltme Katsayısı
C_E	Enerji Düzeltme Katsayısı
C_B	Sondaj Çapı Düzeltme Katsayısı
C_R	Tij Uzunluğu Düzeltme Katsayısı
C_S	Numune Alıcı Kılıf Düzeltme Katsayısı
K_{α}	Statik Kayma Gerilmesi Düzeltme Katsayısı
K_{σ}	Düşey Gerilme Düzeltme Katsayısı
P_{α}	Atmosfer Basıncı
τ_{static}	Statik Kayma Gerilmesi
ξ_R	Durum İndeksi
$(N_1)_{60cs}$	İnce Dane Düzeltmesi Yapılmış Düzeltilmiş SPT-N Sayısı
$\Delta(N_1)_{60}$	İnce Dane Oranına Bağlı Düzeltme Değeri
$\bar{E}_r$	Geri Tepme Modülü
ε_{vd}	Hacimsel Birim Deformasyon
γ_c	Tekrarlı Yük Kayma Birim Deformasyonu

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
R_u	Boşluk Suyu Basıncı Oranı
u	Boşluk Suyu Basıncı
γ	Birim Deformasyon
γ_{tvp}	Eşik Birim Deformasyon
f	Frekans
w_c	Su Muhtevası
σ_3'	Çevre Basıncı
q_{cyc}	Deviator Gerilme
τ_{cyc}	Çevrimsel Kayma Gerilmesi
N_{liq}	Sıvılaşma için Gerekli Çevrim Sayısı
N	Çevrim Sayısı
σ'_c	Konsolidasyon Gerilmesi
D	Hasar Parametresi
$D_{ru=1,0}$	Sıvılaşma Başlangıcındaki Kritik Hasar Düzeyi
CSR_t	Eşik Çevrimsel Gerilme Oranı
Δu	Boşluk Suyu Basıncındaki Artış
σ'_{v0}	Başlangıç Anındaki Efektif Gerilme

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
S_r	Rezidüel Dayanım Oranı
G_s	Özgül Tane Ağırlığı
r_d	Gerilme Azalım Faktörü
N_L	Sıvılaşma Oluşması için Gerekli Yükleme Devir Sayısı
Φ	Standart Normal Dağılım Fonksiyonu
f_s	Sleeve Sürtünme Direnci
C_q	Düzeltme Katsayısı
$q_{c,1}$	Düzeltilmiş CPT Uç Direnci
R_f	CPT sürtünme oranı
D_r	Rölatif Sıkılık
e	Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
D_{10}	Zeminin %10'unun Geçtiği Tane Çapı
D_{30}	Zeminin %30'unun Geçtiği Tane Çapı
D_{50}	Zeminin %50'sinin Geçtiği Tane Çapı
D_{60}	Zeminin %60'ının Geçtiği Tane Çapı

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
C_u	Uniformluk Katsayısı
C_c	Eğrilik Katsayısı
σ_1	Deviator Gerilme
σ_3	Çevre Basıncı
q_c	Konik Uç Direnci
q_{c1N}	Düzeltilmiş Konik Uç Direnci
q_{c1Ncs}	İnce Dane Oranına Göre Düzeltilmiş Konik Uç Direnci
Δq_{c1N}	İnce Dane Oranından Gelen Düzeltme Değeri
$(N_1)_{60cs-Sr}$	İnce dane Etkisine Göre Düzeltişmiş SPT Darbe Sayısı
$\Delta(N_1)_{60-Sr}$	İnce Dane İçeriğine Göre İlave Düzeltme Katsayısı
$\tau_{residual}$	Rezidüel Kayma Gerilmesi
S_r	Rezidüel Gerilme Dayanımı

Kısaltmalar	**Açıklama**
CSR	Çevrimsel Gerilme Oranı
CRR	Çevrimsel Yük Direnç Oranı
CPT	Konik Penetrasyon Testi

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
SPT	Standart Penetrasyon Testi
PI	Plastisite İndisi
LL	Likit Limit
FC	İnce Dane Oranı
CU-CTX	Konsolide Edilmiş Drenajsız Üç Eksenli Dinamik Deney
DSS	Basit Kesme Deneyi
FS	Güvenlik Katsayısı
PL	Sıvılaşma Olasılığı
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Ajansı
USGS	Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu
DMT	Dilometre Deneyi
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
EPOLLS	Empirical Prediction of Liquefaction-Lateral Spreading
ML	Makine Öğrenmesi
DL	Derin Öğrenme
ANN	Yapay Sinir Ağları
SVM	Destek Vektör Makineleri

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
DT	Karar Ağaçları
RF	Rastgele Orman
LSTM	Uzun-Kısa Süreli Bellek
CNN	Evrişimsel Sinir Ağları
mm	Milimetre
m	metre
cm	santimetre
ANOVA	Varyans Analizi
SRR	Regresyon Varyansı
SEE	Hata Varyansı
AI	Yapay Zekâ
GP	Genetik Programlama
PySR	Python Sembolik Regresyon
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MSE	Ortalama Kare Hata
RMSE	Karekök Ortalama Kare Hata
KDE	Yoğunluk Tahmin Grafiği

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Deprem etkisi altındaki doygun ve tanecikli yapıdaki zeminlerde sıvılaşma oluşumu, geoteknik deprem mühendisliğinin en karmaşık sorunlarından biri olmaya devam etmektedir. Bu tür zeminlerinin maruz kaldığı tekrarlı gerilmeler, zeminde aşırı boşluk suyu basıncı birikimi oluşturmaktadır. İlk kez geniş ölçekte 1964 Niigata Depremi sonrasında kayıtlara geçen sıvılaşma kaynaklı yapı hasarları, mühendislik camiasında konunun önemini vurgulamış ve bu alanda yoğun araştırmaların başlamasına neden olmuştur. Sıvılaşma, efektif gerilmenin sıfırlanmasına neden olan boşluk suyu basıncı artışı ile tetiklenir ve zemin, ani taşıma gücü kaybı yaşar. Bu durum yapı temellerinde oturma, yanal yayılma, zemin akması, temel hasarı gibi çok sayıda mühendislik problemini beraberinde getirir.

Zeminde gelişen bu boşluk suyu basıncı artışının temel nedeni, drenajsız koşullar altında tekrar eden kayma gerilmelerinin hacimsel deformasyonu engelleyerek tüm deformasyonun boşluk suyu içerisinde bir basınç artışı olarak gerçekleşmesidir. Bu durum, zeminin efektif gerilmesinin düşmesine ve nihayetinde sıfırlanmasına neden olur. Gevşek tanecikli zeminlerde bu süreç kısa sürede tamamlanırken daha sıkı durumlarda çevrimsel hareketlilik olarak bilinen sınırlı şekil değiştirme rejimi ortaya çıkar. Efektif gerilmenin azalması, parçacıklar arası sürtünme kaybına yol açar ve nihayetinde zemin sıvılaşmaya uğrar.

Boşluk suyu basıncının zamanla gelişimini ifade etmek amacıyla birçok teorik, yarı ampirik ve ampirik model geliştirilmiştir. Bu modeller, genel olarak tekrarlı kayma gerilmelerine karşı zeminin verdiği tepkiyi matematiksel olarak tanımlamayı hedeflemektedir. Bu amaçla kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanlar, gerilme tabanlı modeller ve birim deformasyon tabanlı modeller ve enerji tabanlı modellerdir. Özellikle sınırlı sayıda parametreye dayalı olması ve uygulama kolaylığı nedeniyle ampirik temelli yapılar hâlen tercih edilmektedir. Ancak bu modellerin geçerliliği ve güvenilirliği, çoğu zaman belirli deneysel veri kümeleri ile sınırlıdır.

Son yıllarda tekrarlı yükleme deneylerinin sayısal ve donanımsal açıdan gelişmesiyle birlikte, özellikle gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deney sistemleri aracılığıyla güvenilir veriler elde edilmiştir. Bu deney sistemleri zeminlerin yüksek çevrim sayılarındaki

davranışlarını da ortaya koyabilmekte, klasik birim deformasyon kontrollü sistemlerin erişemediği deformasyon seviyelerinde dahi boşluk suyu basıncı gelişimini izleme imkânı sunmaktadır. Bu sayede daha gerçekçi tahminler yapılabilmekte ve model kalibrasyonu için kullanılabilecek geniş bir veri tabanı oluşturulmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, doygun kum zeminlerde çevrimsel yükleme altında gelişen boşluk suyu basıncı davranışını temsil edebilecek bir ampirik model önermek ve bu modelin güvenilirliğini değerlendirmektir. Bu kapsamda literatürde yer alan çok sayıda tekrarlı üç eksenli deney verisi incelenmiş olup farklı malzeme ve deney şartlarıyla elde edilmiş sonuçlardan oluşan bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Çalışmada önerilen model, özellikle gerilme tabanlı bir yapıdadır ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına karşı değişimini temsil edecek şekilde kurgulanmıştır. Bu modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, yüksek lisans çalışmaları kapsamında daha önce yürütülmüş laboratuvar deneyleri kullanılmıştır. Bu deneylerde, kum numunelerine çeşitli çevrimsel gerilme oranlarında yükleme uygulanmış, farkı deprem ivmeleri girilmiş ve gelişen boşluk suyu basıncı değişimleri ayrıntılı şekilde kaydedilmiştir.

Modelin tahmin başarısı, deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiş, literatürde yer alan diğer modellerle kıyaslamalı analizler yapılmıştır. Bu kapsamda modelin hem istatistiksel uyumu hem de mühendislik uygulamaları açısından kullanılabilirliği irdelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, önerilen modelin farklı zemin koşulları altında genellenebilirliği ve sınırlılıkları ortaya konmuştur. Araştırmanın uzun vadeli amacı, sıvılaşma analizlerinde kullanılabilecek, güvenilir, sade ve uygulaması kolay ve değişkenlere erişimin daha rahat olduğu bir ampirik model yapısı oluşturmaktır.

2. SIVILAŞMA

2.1. Genel Bilgiler

Sıvılaşma, doygun ve gevşek yapıdaki kum zeminlerin, genellikle çevrimsel yükler altında taşıma gücünü önemli ölçüde kaybederek geçici olarak sıvı benzeri davranış göstermesi durumudur. Bu olgu, çoğunlukla depremler sırasında meydana gelir ve yapılarda ciddi hasarlara yol açabilir. İlk kez 1964 yılında Niigata (Japonya) ve Alaska (ABD) depremleri sonrası saha gözlemleriyle dikkat çeken sıvılaşma, yer bilimleri ve geoteknik mühendisliği alanında en çok araştırılan konulardan biri haline gelmiştir (Youd ve Idriss, 2001).

Sıvılaşma süreci, zemin tanelerinin çevrimsel yükler altında yeniden düzenlenmesi ve bu esnada boşluk suyu basıncının artmasıyla ilişkilidir. Boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfıra yaklaştırması sonucunda zemin, taşıma gücünü kaybederek plastik akma davranışı sergiler. Bu süreçte zemin yüzeyinde kum kaynaması, zemin oturmaları, yapı devrilmeleri gibi mühendislik problemleri gözlemlenebilir.

Sıvılaşma potansiyeli, yalnızca yer altı su seviyesinin yüksek olmasıyla sınırlı değildir. Zemin yapısı (sıkılık derecesi), tane boyu dağılımı, çevrimsel kayma gerilmesi düzeyi ve yükleme süresi gibi birçok parametre bu davranışı doğrudan etkiler. Özellikle gevşek, düşük rölatif sıkılığa sahip kumlar ve siltli kumlar bu duruma daha yatkındır (Seed vd., 1975).

Sıvılaşmanın anlaşılması hem arazi hem de laboratuvar verilerinin yorumlanmasıyla mümkündür. Arazi gözlemlerinden elde edilen veriler, sıvılaşma sınırlarının tanımlanmasına yardımcı olurken laboratuvar daha kontrollü analiz imkânı sunar. Günümüzde sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde sayısal modelleme ve deneysel yöntemler bir arada kullanılmaktadır.

Sıvılaşmanın etkileri sadece yüzeydeki deformasyonlarla sınırlı kalmamaktadır. Zemin içi yer değiştirmeler, yapı temellerinin oturması, boru hatlarının yüzeye çıkması ve kazık temelli yapıların rijitlik kaybı gibi ciddi mühendislik sorunları da ortaya çıkabilir. Bu

nedenle sıvılaşma, yalnızca teorik bir konu olmamakla beraber doğrudan yapısal güvenliği etkileyen bir mühendislik problemidir.

Sıvılaşma tetiklenme potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme tabanlı yaklaşım, Seed ve Idriss (1967) tarafından başlatılmıştır ve deprem kaynaklı çevrimsel gerilme oranları (CSR) ile zeminin çevrimsel direnç oranları (CRR) karşılaştırılarak uygulanır. Zeminin CRR değeri genellikle CPT (konik penetrasyon testi) dayanımı, SPT (standart penetrasyon testi) darbe sayısı veya kayma dalgası hızı (V_s) gibi yerinde ölçülen parametrelerle ilişkilendirilir.

Boşluk suyu basıncı gelişiminin için oluşturulan model gerilme tabanlı esaslıdır. Bu sebeple sıvılaşma mekanikleri gerilme esaslı sunulacaktır. Deformasyon esaslı yaklaşım sadece boşluk suyu basıncı gelişiminde incelenecektir.

2.1.1. Çevrimsel gerilme oranı (csr)

Zemin sıvılaşmasının tetiklenip tetiklenmeyeceğinin değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri, deprem sırasında meydana gelen çevrimsel gerilme oranının (CSR) belirlenmesi ve bu değerin çevrimsel direnç oranı (CRR) ile karşılaştırılmasıdır. CSR değeri, yüzeyde ölçülen sismik kuvvetin zemin içerisindeki efektif gerilme seviyelerine oranlanması ile tanımlanır ve bu sayede sıvılaşmayı tetikleyen yükleme düzeyinin nicel bir göstergesi elde edilir. Bu yaklaşım, ilk olarak Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilmiş ve saha gözlemleriyle ilişkilendirilerek mühendislik pratiğine kazandırılmıştır.

Depremler sırasında zeminlerde gelişen kayma gerilmeleri, yerin yüzeyine yakın bölgelerdeki ivme ve zemin profiline bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu kayma gerilmeleri çevrimsel karakterdedir ve zemin içerisinde boşluk suyu basıncının artmasına neden olarak sıvılaşmayı tetiklemektedir. Seed ve Idriss (1971) çevrimsel gerilme oranını aşağıdaki bağıntı ile ifade etmiştir.

$$CSR = \frac{\tau_{\text{avg}}}{\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \tag{2.1}$$

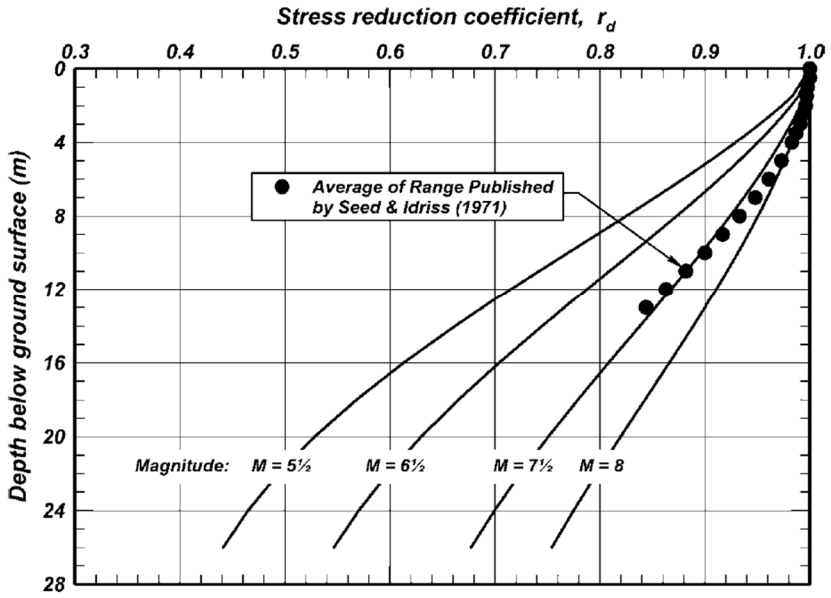
Burada:

- τ_{avg} : Ortalama çevrimsel kayma gerilmesi
- σ_v : Toplam düşey gerilme
- σ_v' : Efektif dikey gerilme
- α_{max} : Yer yüzeyindeki maksimum yatay ivme
- g : Yerçekimi ivmesi
- r_d : Gerilme azaltma katsayısıdır.

Bu bağıntı, yer ivmesinin en büyük değerinin kullanılması nedeniyle güvenli tarafta kalınmasını sağlamaktadır. 0.65 katsayısı, tam pik ivmenin ortalama etkisini temsil eden ampirik bir değerdir ve genellikle yeterli doğruluğu sağlamaktadır. Gerilme azaltma faktörü olan r_d, özellikle sığ derinliklerde daha büyük değerlere sahipken, derinlikle birlikte azalan bir yapıya sahiptir. Seed ve Idriss (1971), bu değeri zemin profilinin rijitliğine göre ampirik olarak belirlemişlerdir.

Gerilme azaltma katsayısı r_d , depremler sırasında zemin profilinin derinliğine bağlı olarak zeminin alt katmanlarında kayma gerilmelerinin düşmesini temsil eden önemli bir parametredir. Bu katsayının değeri yüzeye yakın bölgelerde 1,0'a yakınken derinlik arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, özellikle yüzeye yakın zemin katmanlarının sismik enerjiden daha fazla etkilendiğini ve sıvılaşma riskinin üst katmanlarda daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Seed ve Idriss (1971), r_d katsayısının derinlikle değişimini belirlemek amacıyla zemin profilleri üzerinde çözümlemeler yapmış ve bu çözümlemeleri ampirik bağıntılarla ifade etmiştir.



Şekil 2.1. Derinliğe bağlı olarak önerilen gerilme indirgeme katsayısı (r_d) değişimi (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.1'de, farklı deprem büyüklükleri için önerilen r_d eğrileri gösterilmiştir. Bu eğriler, laboratuvar ve araziden elde edilen verilerle kalibre edilmiştir.

Idriss (1999) tarafından önerilen ve yaygın şekilde kullanılan ampirik r_d bağıntısı ise aşağıda verilmiştir:

$$r_d = 1,0 - 0,015 \cdot z \tag{2.2}$$

Burada:

- z: metre cinsinden derinlik ($0 \leq z \leq 9,15$ m)

Bu formül, özellikle sığ zemin katmanları için yeterli hassasiyet sağlamakla birlikte daha derin profillerde lineer olmayan modellerle değiştirilmesi önerilmektedir. Idriss ve Boulanger (2008), daha güncel çalışmalarda r_d değerinin aynı zamanda deprem büyüklüğüne (M_w) ve zemin rijitliğine bağlı olarak tanımlanması gerektiğini vurgulamışlardır.

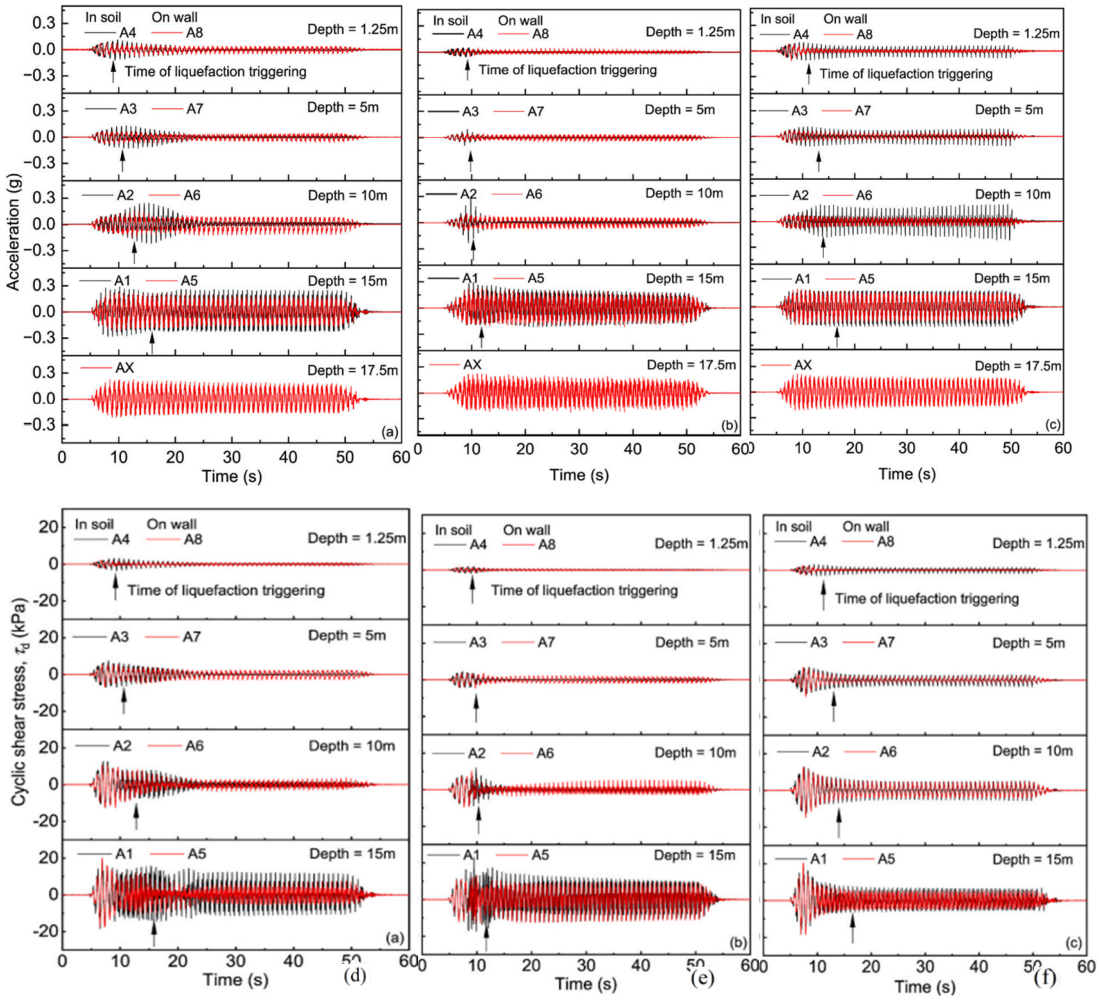
Buna karşılık, Moss vd. (2006) ve Andrus vd. (2004) gibi bazı araştırmacılar, r_d katsayısının değişimini, sismik dalga yayılım modelleri kullanarak daha farklı şekilde modellemeye çalışmışlardır. Ancak arazi uygulamalarında bu tür gelişmiş modellerin karmaşıklığı, Idriss ve Boulanger tarafından önerilen yaklaşım tercih edilmektedir.

Zeminlerde gelişen kayma gerilmeleri, pik ivme değeri ve bu ivmenin zaman içindeki dağılımına bağlıdır. Bir başka ifadeyle depremin süresi, çevrim sayısı ve çevrim genliği gibi parametreler sıvılaşmanın başlaması üzerinde belirleyici rol oynar. Ancak CSR formülünde yalnızca tek bir çevrimsel gerilme üzerinden değerlendirme yapıldığından bu yaklaşım gerçekte meydana gelen çok sayıda çevrimin etkisini tam olarak yansıtmamaktadır.

CSR değeri belirlenirken sınırların farkında olmak ve ilave düzeltme katsayıları ya da çevrim sayısına bağlı değerlendirmeler yapmak gerekmektedir. Sıvılaşma analizinde kullanılan bu tip idealize edilmiş CSR değerleri, eşdeğer tek çevrimli etki prensibine dayanır. Karmaşık dinamik yükleme yerine eşdeğer tek bir çevrimlik kayma gerilmesi değeri kullanılarak pratik bir tahmin yapılır.

Zamanla değişen gerilme büyüklüğünün zemin davranışına etkisi üzerine yapılan araştırmalar, bu konuda çok sayıda çevrimin (örneğin 10, 20, 30 çevrim) küçük genlikli dahi olsa da sıvılaşma potansiyelini artırabileceğini göstermektedir. Bu durum özellikle orta büyüklükte depremler için geçerlidir. Bu nedenle bazı ileri düzey analizlerde, enerji tabanlı yöntemler ya da çevrim sayısı düzeltmeleri kullanılarak CSR hesaplamaları iyileştirilmektedir.

Şekil 2.2'de, farklı karakteristiklere sahip depremlerde kayma gerilmesinin zamana göre nasıl değiştiği gösterilmiştir. Yang vd. (2023) tarafından farklı ivme spektrumları kullanılarak santrifüj deneyi gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere bazı depremlerde kısa sürede yüksek genlikli çevrimler gelişirken bazı depremlerde ise uzun süren, düşük genlikli çevrimler söz konusudur. Her iki durumda da zemin davranışına etkili olan parametre sadece pik değer değil aynı zamanda çevrim sayısı ve enerji birikimidir.



Şekil 2.2. Farklı deprem ivme spektrumlarında oluşan zamana bağlı kayma gerilmesi gelişimi grafikleri, a) ivme 1, b) ivme 2, c) ivme 3, d) ivme 1'in oluşturduğu kayma gerilmeleri e) ivme 2'nin oluşturduğu kayma gerilmeleri, f) ivme 3'ün oluşturduğu kayma gerilmeleri (Yang vd.'den, 2023)

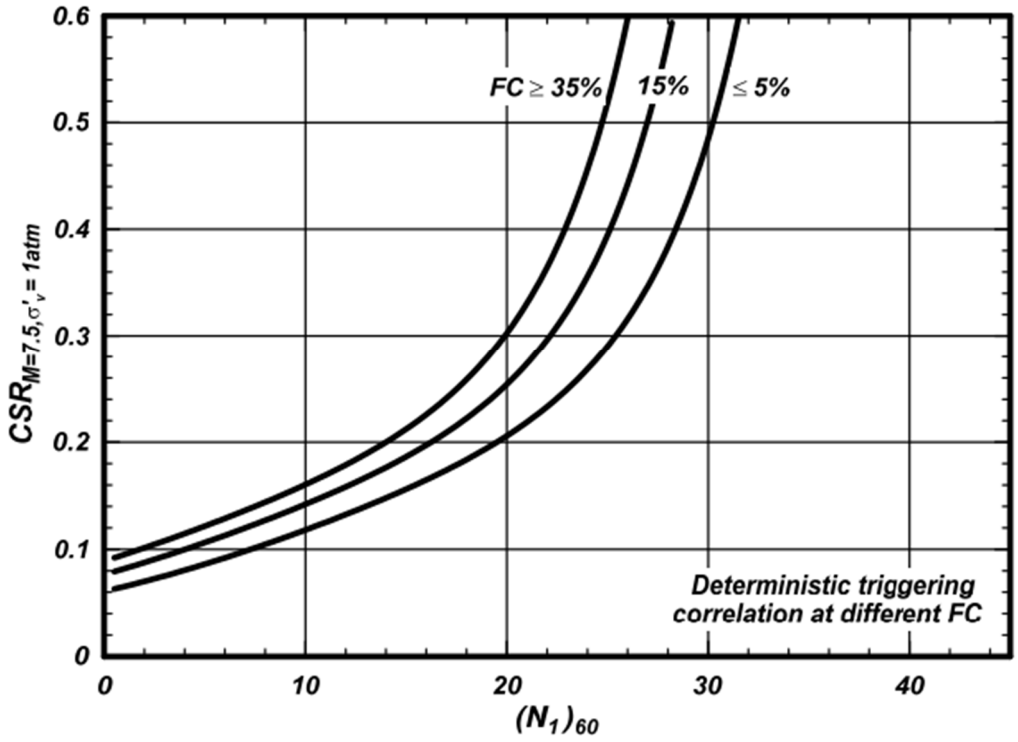
Bu bağlamda, Idriss ve Boulanger (2008) CSR yaklaşımını kullanırken depremin büyüklüğüne göre düzeltme (MSF) yapmanın zorunlu olduğunu vurgulamışlardır. Bu konu ileriki başlıklarda detaylandırılacaktır.

2.1.2. Çevrimsel yük direnç oranı (crr)

Arazi gözlemlerine dayalı sıvılaşma değerlendirmelerinde çevrimsel yük direnç oranı (CRR), belirli bir deprem yüklemesi altında zeminlerin sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnci tanımlamak amacıyla kullanılan temel parametrelerden biridir. Bu yaklaşım, yüzlerce farklı yerleşim yerinde, geçmiş depremler sırasında gözlenen sıvılaşma ve sıvılaşmama durumlarının detaylıca analiz edilmesi yoluyla geliştirilmiştir.

Bu yöntem, özellikle standart penetrasyon deneyi (SPT) verilerine dayalı olarak sıvılaşma eşiğini tanımlamak üzere geliştirilmiştir. Saha gözlemleri, bir bölgede meydana gelen depremin büyüklüğü, maksimum yer ivmesi, yeraltı su seviyesi, zemin profili ve SPT darbe sayısı gibi verilerle birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda, belirli bir CSR seviyesinde sıvılaşma gerçekleşen veya gerçekleşmeyen örneklerin bulunduğu SPT değerleri belirlenmiş ve bunlardan ampirik eğriler elde edilmiştir. SPT temelli sıvılaşma sınır eğrilerinin oluşturulmasında ilk sistematik çerçeve, Seed vd. (1985) tarafından saha gözlemlerine dayalı olarak önerilmiş ve sonraki çalışmalara temel teşkil etmiştir.

Şekil 2.3'te gösterilen eğriler, moment magnitüdü M_w = 7,5 olan depremler için normalize edilmiş çevrimsel direnç oranı (CRR) ile düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($(N_1)_{60}$) arasındaki ilişkileri göstermektedir. Eğriler, gözlenen sıvılaşma olayları ile gözlenen sıvılaşma dışı örnekler arasındaki sınırları tanımlar. Bu sınırlar, genellikle sıvılaşma olasılığı %15–20 olan eşik seviyeleri temsil eder.



Şekil 2.3. SPT-N verilerine dayalı sıvılaşma eşik eğrileri CRR–M_w=7.5 için (Boulanger ve Idriss'den, 2014).

Şekil 2.3'te $(N_1)_{60}$, düzeltilmiş SPT darbe sayısı; $CRR_{7.5}$ çizgileri, M_w=7.5 için normalize edilmiş çevrimsel direnç oranı; FC, İnce tane oranı olarak tanımlanır.

CRR–SPT ilişkisi, zeminlerin sıkılık derecesi ile sıvılaşma direnci arasındaki doğrudan ilişkiyi tanımlar. Daha sıkı zeminler, daha yüksek $(N_1)_{60}$ değerlerine sahiptir ve buna karşılık gelen $CRR_{7.5}$ seviyeleri de yüksektir. Bu da söz konusu zeminlerin daha büyük çevrimsel gerilmeler altında dahi sıvılaşmaya karşı dayanım göstereceği anlamına gelir.

Saha esaslı değerlendirme yöntemleri, sadece SPT verileriyle sınırlı kalmayıp CPT (Koni penetrasyon testi) ve V_s (dalga hızı) temelli yaklaşımlarla da genişletilmiştir. Ancak SPT tabanlı eğriler, en yaygın kullanılanlar arasında yer almakta ve çok sayıda bağımsız saha verisi ile desteklenmektedir.

Saha gözlemlerine dayalı CRR eğrilerinin oluşturulmasında SPT darbe sayılarının farklı düzeltmelere tabi tutulması gerekmektedir. Bu düzeltmeler arazide elde edilen ham SPT değerlerinin, standart koşullara getirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla kullanılan başlıca düzeltme katsayıları şunlardır:

- C_N : Yük düzeltmesi
- C_E : Enerji düzeltmesi
- C_B : Sondaj çapı düzeltmesi
- C_R : Tij uzunluğu düzeltmesi
- C_S : Numune alıcı kılıf düzeltmesi

Bu katsayılar kullanılarak Denklem 2.3'te gösterildiği üzere, düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($(N_1)_{60}$) elde edilir:

$$(N_1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \tag{2.3}$$

Burada:

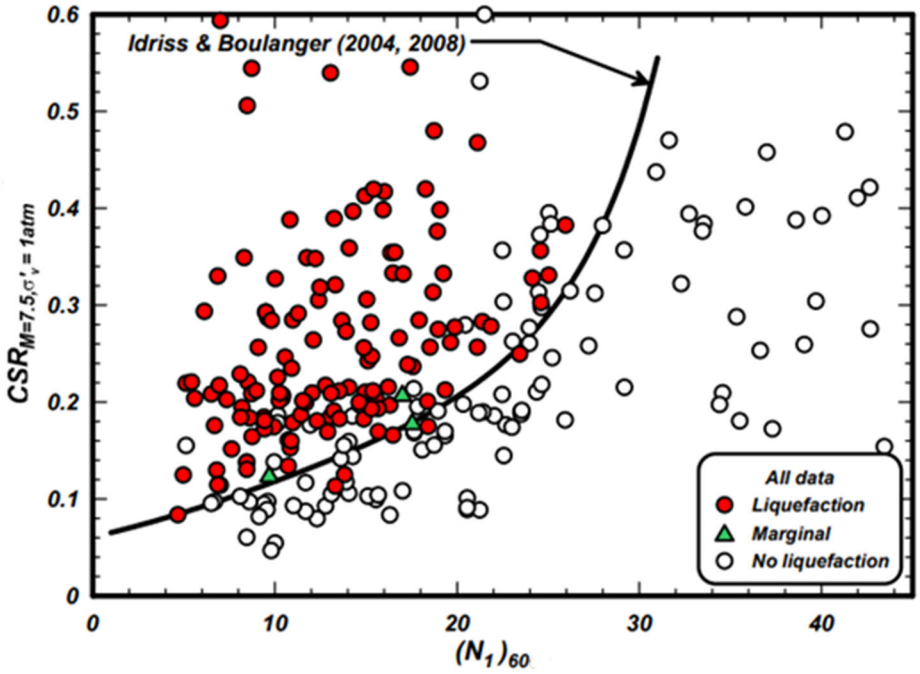
- N : SPT arazide ölçülen ham darbe sayısı (15 cm başına),
- $(N_1)_{60}$: Düzeltilmesi yapılmış darbe sayısıdır.

Bu düzeltmeler yapıldıktan sonra sıvılaşma sınırlarını tanımlayan CRR–$(N_1)_{60}$ bağıntıları oluşturulabilir. Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen eğrilere dayalı olarak şu ampirik ifade ile CRR değerini vermektedir:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(N_1)_{60}^2+45} - \frac{1}{200} \tag{2.4}$$

Bu denklem, M_w=7,5 büyüklüğündeki depremler için geçerli olan ve %15–20 sıvılaşma olasılığına karşılık gelen sıvılaşma sınır eğrisini tanımlar. Daha düşük veya daha yüksek büyüklükteki depremler için elde edilen CSR değerleri, MSF (deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı) ile düzeltildikten sonra bu $CRR_{7.5}$ eğrisiyle karşılaştırılır.

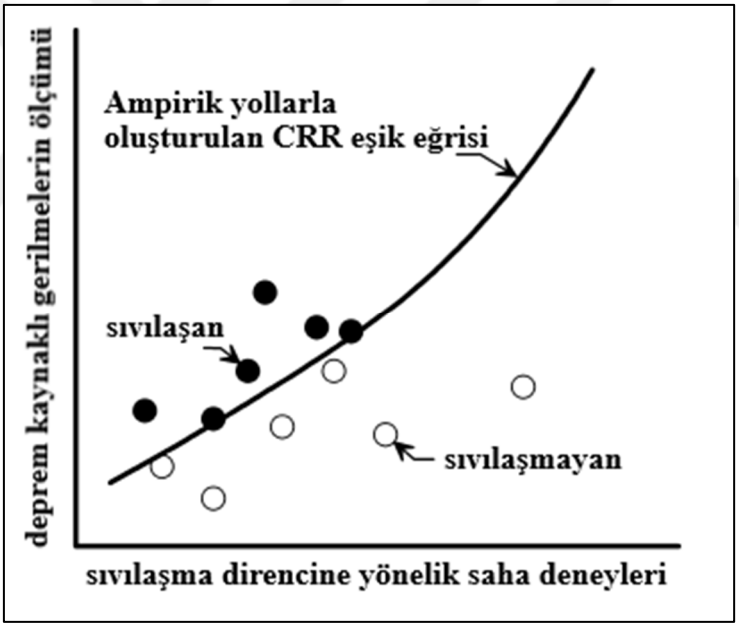
Şekil 2.4'te, farklı saha verilerine dayalı olarak oluşturulmuş bu eğri, sıvılaşma ve sıvılaşmayan örneklerin dağılımını ve modellemenin genel uyumunu göstermektedir.



Şekil 2.4. CRR–$(N_1)_{60}$ bağıntısı ve sıvılaşan–sıvılaşmayan örneklerin dağılımı (Boulanger ve Idriss'den, 2014).

Bu tür saha temelli regresyonlar çok sayıda araştırmacı tarafından doğrulanmış olup mühendislik uygulamalarında pratik ve güvenilir sınır değerler sağlamaktadır.

CRR eğrilerinin yorumlanmasında saha verisinin içerdiği belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Gözlemlenen sıvılaşma olayları ve sıvılaşmayan alanlar her ne kadar ayrık kümeler olarak tanımlansa da bunların çevrimsel yüklemeye verdikleri tepki arasında bazı belirsizlik alanları bulunmaktadır. Örneğin, aynı CSR seviyesinde bazı zeminler sıvılaşırken bazıları sıvılaşmayabilir. Bu durum, zeminin heterojenliği, ölçüm hataları, yeraltı su seviyesindeki değişkenlikler, test uygulama farklılıkları ve geçmiş dinamik yükleme geçmişi gibi etkenlere bağlı olarak ortaya çıkar. Bu nedenle saha temelli CRR eğrileri genellikle tek bir sınır çizgisi değildir. Olasılıksal dağılımlar temelinde değerlendirilmelidir. Bu yaklaşımda, belirli bir $(N_1)_{60}$ ve CSR seviyesi için sıvılaşma olasılığı tahmin edilebilir. Eğrinin üzerindeki zeminler sıvılaşmayabilirken eğrinin altındaki bazı zeminler yine de sıvılaşabilir. Bu bağlamda $CRR_{7,5}$ eğrisi, genellikle %15–20 sıvılaşma olasılığına karşılık gelen eşik çizgisi olarak kullanılır.



Şekil 2.5. Saha verilerindeki belirsizlik ve CRR sınır eğrisinin konumu (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi saha yapılan ölçüm ve deneylerde bazen sıvılaşan ve sıvılaşmayan zemin CRR eğrisi üzerinde olabilmektedir. Bu dağılım içerisinde eşik eğrisi ampirik olarak yerleştirilmiştir. Ancak doğrusal regresyon veya maksimum olabilirlik yöntemleriyle eğri pozisyonunun istatistiksel güvenirliği daha fazla artırılabilir.

Saha verilerine dayalı olarak yapılan bu tür değerlendirmelerin mühendislik açısından en önemli avantajı, doğrudan gözlem temelli olmalarıdır. Diğer yandan en önemli kısıtlaması, zemin profilinin yalnızca bir noktasına ait darbe sayısı üzerinden tüm tabakanın davranışının temsil edilmeye çalışılmasıdır. Bu nedenle, bu yöntemler sadece uygun koşullarda yapılmalı ve dikkatli yorumlanmalıdır.

2.1.3. Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı

Farklı büyüklüklerdeki depremler, zemine farklı çevrim sayısı oluşturur ve farklı sürelerde enerji aktarımı yapar. Aynı maksimum çevrimsel kayma gerilmesine sahip olsalar bile büyük bir deprem, küçük bir depreme kıyasla daha fazla çevrim sayısı ve daha uzun sismik süre içerdiği için sıvılaşma potansiyeli daha yüksektir. Bu nedenle sıvılaşma başlangıcının doğru bir şekilde değerlendirilmesi için deprem büyüklüğünün etkisi dikkate alınmalıdır.

Deprem büyüklüğünün bu etkisi, genellikle deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı ile ölçeklendirilir. MSF katsayısı, küçük büyüklükteki bir depremin sıvılaşma etkisini, referans büyüklükteki (genellikle M_w=7,5) bir depremle karşılaştırılabilir hale getiren çarpan olarak tanımlanır. Başka bir deyişle küçük depremlerin etkisi MSF ile büyütülerek M_w=7,5 için normalize edilmiş CSR değeri elde edilir:

$$CSR_{7.5} = \frac{CSR_M}{MSF.K_\sigma} \tag{2.5}$$

Burada:

- CSR_M : Gerçek deprem büyüklüğü M için hesaplanan çevrimsel gerilme oranı,
- $CSR_{7.5}$: Büyüklük etkisinden arındırılmış, normalize CSR,
- MSF : Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı (ölçekleme faktörü),
- K_σ : Düşey gerilme düzeltme katsayısı.

MSF katsayısının değeri, küçük depremler için 1'den büyük, büyük depremler için 1'e yakın veya küçük olur. Örneğin, M_w=6,0 büyüklüğündeki bir deprem için MSF≈1,7 civarındayken, M_w=8,0 büyüklüğündeki bir deprem için MSF ≈ 0,9 olabilir. Bu durum, daha

büyük depremlerin daha fazla çevrim sayısı ve dolayısıyla daha yüksek boşluk suyu basıncı artışı oluşturduğunu gösterir.

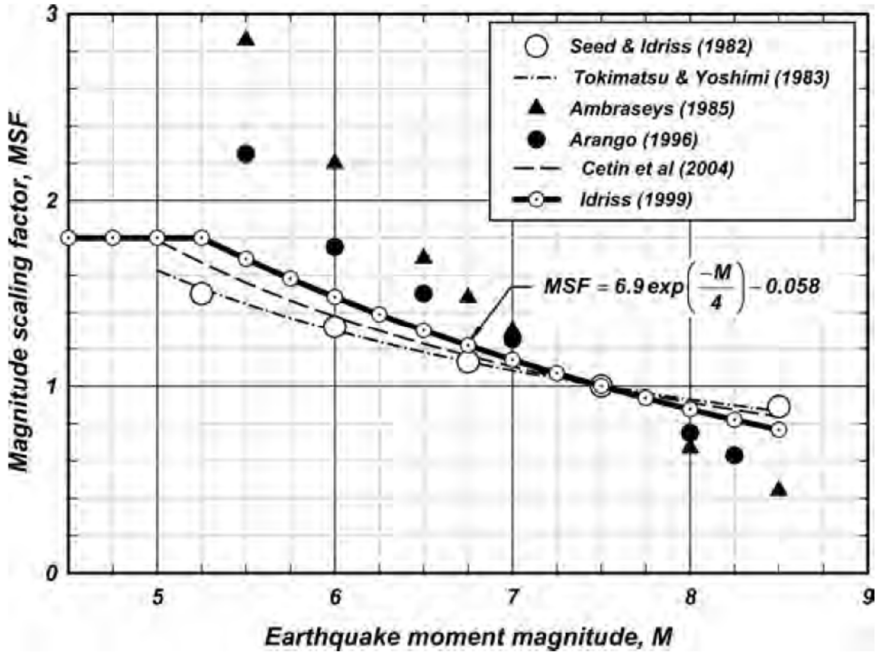
MSF katsayısının hesaplanması veya belirlenmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler, laboratuvar deneyleri, saha verileri ve enerji esaslı analizler üzerinden geliştirilmiştir. Deprem büyüklüğünün etkisini dikkate alan MSF katsayısı, Idriss (1999) tarafından sunulan sadeleştirilmiş ampirik bir bağlantı olarak formülleştirilmiştir. Andrus ve Stokoe (2000) ise kayma dalgası hızı verilerine dayalı olarak daha dengeli bir MSF önerisi sunmuşlardır. Bu öneri Denklem 2.6'da gösterilmiştir.

$$MSF = \left(\frac{M}{7,5} \right)^{-2,56} \tag{2.6}$$

Bu bağıntı $M_w = 7,5$ olan referans büyüklüğe göre MSF'nin nasıl değiştiğini gösterir. Ancak bu formül her büyüklük aralığında aynı güvenilirliği sağlamadığı için daha sonra çeşitli güncellenmiş öneriler geliştirilmiştir.

Seed ve Idriss (1982) tarafından önerilen MSF bağıntısı uzun yıllar boyunca mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. Ancak saha verilerinin artması ve daha gelişmiş analiz yöntemlerinin geliştirilmesiyle birlikte, farklı MSF–M_w ilişkileri önerilmiştir. Bu çalışmalar, özellikle moment magnitüdü 6,0 ile 8,0 arasındaki depremler için daha iyi uyum sağlamayı amaçlamıştır.

Youd vd. (2001) tarafından önerilen MSF eğrisi, geniş çaplı saha verilerinin istatistiksel değerlendirmesine dayanmaktadır. Bu eğri, büyük depremlerde orijinal Seed–Idriss eğrisine kıyasla daha düşük MSF değerleri önermektedir. Benzer şekilde Andrus ve Stokoe (2000) tarafından önerilen ilişki de daha yumuşak (daha düşük eğimli) bir azalma eğrisi çizmektedir.



Şekil 2.6. Deprem büyüklüğüne bağlı MSF–M_w ilişkileri (Idriss & Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.6'da farklı kaynaklardan elde edilen MSF önerileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tüm bu önerilerin ortak noktası, büyük depremler (M_w>7,5) için MSF değerinin 1,0'ın altına düşmesi gerektiği yönündedir. Bu durum, büyük depremlerin daha yüksek çevrim sayısı ve dinamik yükleme süresi nedeniyle daha şiddetli boşluk suyu basıncı gelişimine yol açtığını doğrulamaktadır.

Idriss ve Boulanger (2008), bu farklı eğriler arasında mühendislik uygulamaları için en uygun olanın seçilmesinin önemini vurgulamıştır. Tek bir formülasyon yerine, kullanılan veri tipi (SPT, CPT, V_s), zemin profili ve güvenlik yaklaşımı doğrultusunda en uygun MSF eğrisinin seçilmesi önerilmektedir.

Deprem büyüklüğüne bağlı olarak MSF kullanımı oldukça yaygın ve pratik bir düzeltme yaklaşımı olsa da bu yöntemin çeşitli sınırlamaları ve belirsizlikleri vardır. Öncelikle, MSF–M_w ilişkilerinin tamamı ampirik verilere dayandığından, belirli büyüklük aralıklarının dışında (örneğin M_w <5,5 veya M_w> 8,0) kullanımlarına dikkat edilmelidir.

Ayrıca, MSF katsayısı yalnızca çevrim sayısı ile ilgili düzeltme olarak ele alınmakta olup enerji birikimi, ivme süresi, frekans gibi diğer yükleme karakteristikleri dikkate

alınmamaktadır. Bu nedenle, bazı araştırmacılar enerji esaslı yöntemleri veya gelişmiş çevrim etkisi analizlerini MSF yerine kullanmayı önermektedir.

Referans büyüklük olarak M_w = 7,5'in seçilmiş olması tarihsel bir sonuçtur. Bu büyüklük, geçmişte yapılan saha gözlemlerinin büyük çoğunluğunun M_w = 7,5 civarındaki depremlerden gelmiş olması nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, 0,65 katsayısıyla birlikte CSR hesaplamasında kullanılan maksimum çevrimsel gerilme de bu büyüklük için kalibre edilmiştir.

Mühendislik hesaplarında MSF kullanılırken depremin tekrarlanma olasılığı, yüzey yakınında oluşan ivme büyüklüğü, zemin profilinin rijitliği ve drenaj koşulları gibi parametrelerle birlikte değerlendirme yapılmalıdır. MSF değerinin tek başına kullanılması yeterli olmayabilmektedir. Bu nedenle, CRR eğrileri ile birlikte CSR–MSF düzeltmeleri yapılırken belirsizlik aralıkları da dikkate alınmalıdır.

Boulanger ve Idriss (2014), MSF'nin en etkin kullanımının, M_w = 7,5 için normalize edilmiş CRR eğrileri ile birlikte uygulanması olduğunu belirtmişlerdir. CSR değeri, MSF ile çarpılarak normalize edilir ve ardından bu değer, saha temelli $CRR_{7,5}$ eğrileriyle karşılaştırılarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilir.

2.1.4. Düşey gerilme düzeltmeleri

Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direnci, yalnızca çevrimsel yüklemeye değil aynı zamanda başlangıçtaki statik gerilme durumuna da bağlıdır. Bu nedenle CRR eğrilerinin kullanımı sırasında zeminin maruz kaldığı başlangıç durumundaki düşey gerilmeye ve mevcut statik kayma gerilmelerine göre düzeltme yapılması gereklidir. Bu düzeltmeler sırasıyla K_σ ve K_α katsayıları ile ifade edilir.

CRR değerlerinin normalize edilmesinde K_σ katsayısı, efektif düşey gerilmenin (σ_v') sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini tanımlar. Bu katsayı, zemin tabakalarının derinliği arttıkça artan efektif gerilmenin sıvılaşmaya karşı direnci nasıl artırdığını temsil etmektedir. Özellikle sığ derinliklerde CRR daha düşükken daha derin tabakalarda daha yüksek CRR değerleri elde edilir.

Yüzeye yakın zeminlerde CRR–SPT ilişkileri geliştirilmiş olduğundan daha derin katmanlara bu ilişkileri uygulayabilmek için K_σ düzeltmesi gereklidir. K_σ katsayısı, CRR_{1atm} efektif gerilmenin 1atm olduğundaki CSR değeri ile gerçek CRR arasındaki ilişkiyi şu şekilde verir:

$$CRR_{1atm} = \frac{CRR}{K_\sigma} \tag{2.7}$$

- CRR_{1atm} : Efektif gerilmenin 1 atm olduğundaki CSR değeri
- K_σ : Düşey efektif gerilme düzeltme katsayısı.

K_σ için farklı öneriler bulunmakla birlikte, Idriss & Boulanger (2008) tarafından özetlenen en yaygın bağıntılardan biri zemin tipi ve rölatif sıkılık gibi etkenlerle değişen aşağıdaki formüldür:

$$K_\sigma = 1 - C \cdot \log\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \tag{2.8}$$

- σ_v' : Düşey efektif gerilme.
- P_α : Atmosfer basıncı (genellikle 100 kPa).
- C : Rölatif sıkılık ve zemin tipi ile değişen katsayı.

C katsayısı, gevşek kumlar için yaklaşık 0,3, sıkı kumlar için ise yaklaşık 0,1–0,2 aralığında olabilir. Bu nedenle K_σ katsayısı, sıkı zeminlerde küçük düzeltmelere neden olurken, gevşek zeminlerde CRR değerinde önemli farklar yaratabilmektedir.

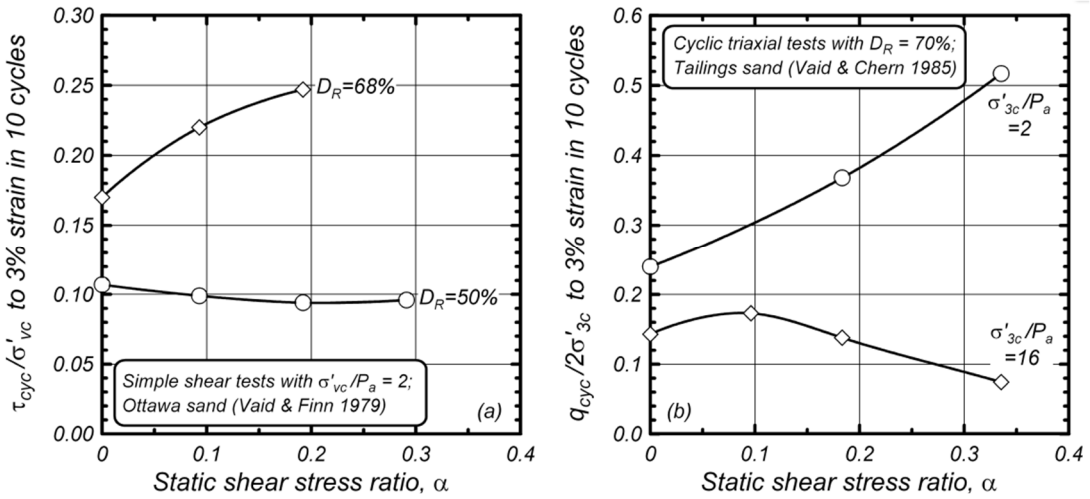
Zeminlerin sıvılaşma direnci, efektif düşey gerilmenin yanında zeminde önceden halihazırda bulunan statik kayma gerilmesine de bağlıdır. Bu tür statik gerilmeler genellikle eğimli arazilerde, su yapılarının gövde kemerlerinde ya da temel altındaki yatay olmayan yükleme durumlarında gelişir.

Zeminin sıvılaşma direnci, belirli bir düzeyde statik kayma gerilmesiyle yüklendiğinde azalabilmektedir. Bu nedenle, arazi koşullarında CRR değerlendirmesi yapılırken bu statik etkiyi göz önüne alan K_α düzeltme katsayısı kullanılmalıdır. Bu katsayı, CRR değerinin statik kayma gerilmesine bağlı olarak ne ölçüde azaldığını belirtir.

Idriss ve Boulanger (2008), bu etkiyi ampirik olarak tanımlamak için aşağıdaki ilişkileri önermişlerdir. Bu ilişkilerde tanımlanan düzeltme, statik kayma gerilmesi oranı (α) üzerinden gerçekleştirilir. α değeri şu şekilde tanımlanır:

$$\alpha = \frac{\tau_{static}}{\sigma'_v} \tag{2.9}$$

- τ_{static} : Statik kayma gerilmesi.
- σ_v' : Efektif düşey gerilme.



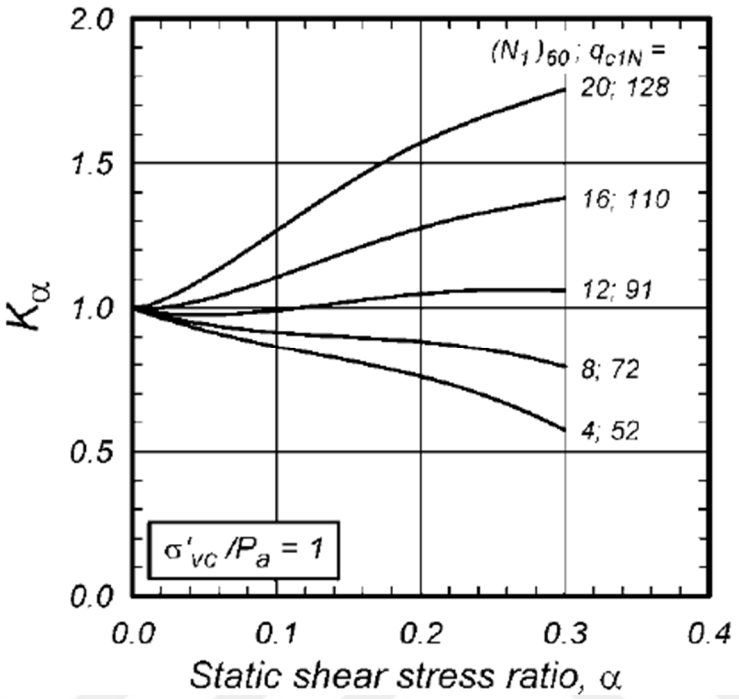
Şekil 2.7. Statik kayma gerilmesi oranı (α) ile çevrimsel direnç oranı (CRR) arasındaki ilişki. a) basit kesme deneyi b) dinamik üç eksenli basınç deneyi (Idriss & Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.7'de görüldüğü üzere başlangıç statik kayma gerilmesi oranı (α) arttıkça CRR değeri zemin koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Düşük efektif gerilme veya gevşek zeminlerde α'nın artışı CRR'yi azaltırken sıkı zeminlerde veya düşük gerilme düzeylerinde bu etki daha sınırlı ya da ters yönde olabilmektedir. Bu durum, sıvılaşma analizlerinde statik gerilme etkisinin dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

K_α, Idriss ve Boulanger (2008) tarafından Denklem 2.10'daki şekliyle tanımlanmıştır. Burada a, b ve c katsayıları statik kayma gerilmesi oranı (α) değişkenine bağlı regresyon yöntemleriyle elde edilen katsayılardır. ξ_R ise durum indeksi olarak geçmektedir.

$$K_a = a + b.\exp\left(\frac{\xi_R}{c}\right) \tag{2.10}$$

Bu parametre zeminin rölatif sıkılığı, düşey efektif gerilmesi ve statik kayma gerilmesine bağlı bir fonksiyondur. Denklem 2.10 sınırlı bir aralıkla çalışmaktadır. $\alpha \leq 0{,}35$ ve $-0{,}6 \leq \xi_R \leq 0{,}1$ sınırları sağlandığında bu formül geçerlidir.



Şekil 2.8. Farklı α değerleri için K_α değişimi (Idriss & Boulanger'den, 2008)

Şekil 2.8'de, çeşitli α değerleri için önerilen K_α katsayısı değişimleri gösterilmiştir. Bu grafik, mühendislik hesaplarında statik yüklemelerin ve eğim faktörünün nasıl dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Statik kayma gerilmesi etkileri düşünüldüğünde, CRR dönüşümü aşağıdaki şekilde yapılmaktadır:

$$K_\alpha = \frac{CRR_a}{CRR_{a=0}} \tag{2.11}$$

Burada CRR_α belirli bir statik kayma gerilmesi altındaki yük direncini temsil ederken $CRR_{\alpha=0}$ ise statik kayma gerilmesinin olmadığı durumdaki sıvılaşma direncini temsil eder.

2.1.5. Güncellenmiş sıvılaşma eşik denklemleri

Önceki bölümlerde açıklanan çevrimsel gerilme oranı (CSR), çevrimsel direnç oranı (CRR), deprem büyüklüğü düzeltmesi (MSF) ve gerilme düzeltmeleri (K_σ, K_α) gibi kavramlar sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde birbiriyle ilişkili olarak kullanılmaktadır. Idriss ve Boulanger (2008) bu parametreleri kullanarak standart penetrasyon deneylerine (SPT) dayalı olarak sahada sıvılaşma potansiyelini değerlendirmeye yönelik güncellenmiş bir eşik bağıntısı önermişlerdir.

Bu yeni eşik eğrileri, geçmişte geliştirilen ve genellikle M_w=7,5 büyüklüğündeki depremler için oluşturulan klasik CRR eğrilerinin üzerine inşa edilmiştir. Olasılıksal yaklaşımlı sıvılaşma değerlendirmelerinde ise Cetin vd. (2004) tarafından önerilen yöntem, özellikle $(N_1)_{60cs}$ parametresi ile SPT verisinin çok değişkenli regresyon analizleriyle ilişkilendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak bu kez modern veri setleri, gelişmiş istatistiksel analizler ve sahadaki ölçüm belirsizlikleri de dikkate alınarak güncellenmiştir. Bu sayede daha güvenilir ve parametrik kullanıma uygun denklemler elde edilmiştir.

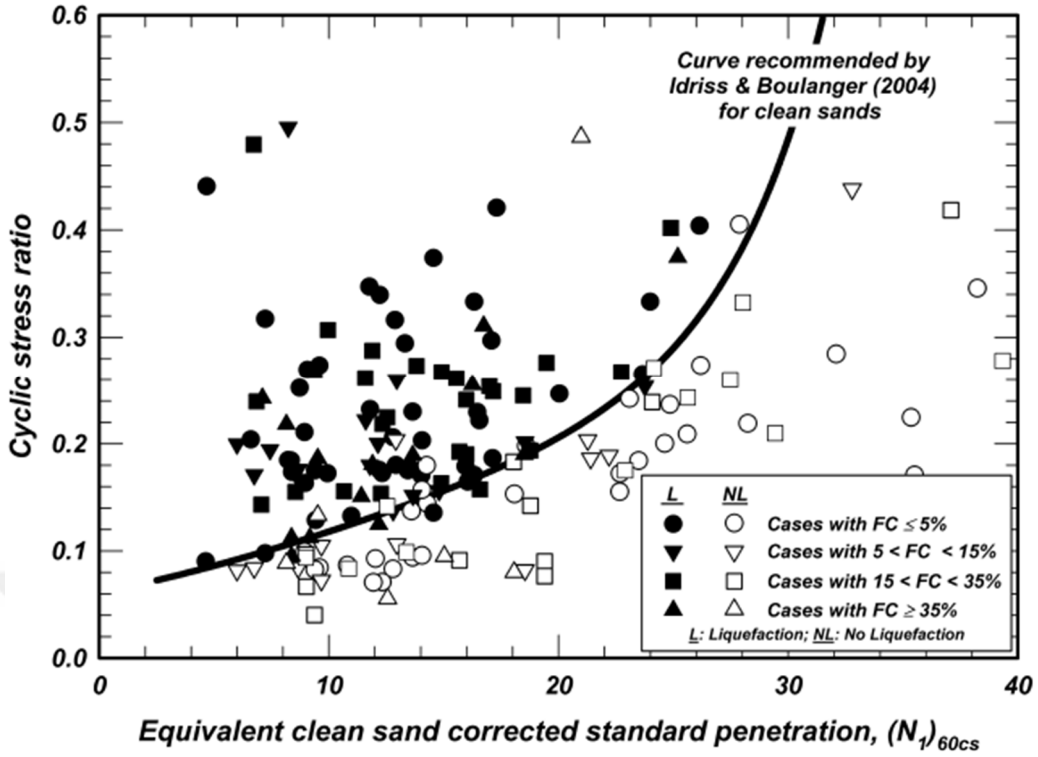
Güncellenmiş eşik denkleminde, SPT-N değerinin tüm düzeltmeleri yapılmış ve normalize edilmiş hali olan $(N_1)_{60cs}$ kullanılmaktadır. Bu denklemdeki parametreler:

- 60% enerji seviyesine göre düzeltilmiş,
- Yük düzeltmesi yapılmış,
- Saha ekipmanına özgü düzeltilmiş,
- Temiz kum eşdeğerine dönüştürülmüştür.

CRR'yi ifade etmek için önerilen güncellenmiş eşik bağıntısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(N_1)_{60cs}^2 + 45} \tag{2.12}$$

Bu ifade, önceki versiyon olan Seed vd. (1985) bağıntısının modernleştirilmiş ve kalibre edilmiş halidir. Eğrinin geçerli olduğu aralık genellikle $4 \leq (N_1)_{60cs} \leq 30$ şeklindedir.



Şekil 2.9. Güncellenmiş sıvılaşma sınır eğrisi M_w=7,5 için (Idriss ve Boulanger'den, 2004).

Şekil 2.9'da önerilen denklem ile elde edilen eğri, sıvılaşan ve sıvılaşmayan saha örnekleriyle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Semboller verilerini temsil ederken, siyah eğri sıvılaşma eşiğini gösterir. Semboller ince dane oranına göre farklı şekillerde gösterilmiştir. Sıvılaşma verileri siyah, sıvılaşma olmayan veriler beyaz ile ifade edilmiştir.

Güncellenmiş CRR denklemi (Denklem 2.12), M_w = 7,5 büyüklüğünde, yüzeye yakın, temiz kum zeminlerde yapılan saha gözlemlerine dayanır. Bu nedenle eğrinin başka zemin profillerine veya farklı deprem büyüklüklerine uygulanabilmesi için aşağıdaki düzeltmelerin yapılması gerekir:

- Deprem büyüklüğü düzeltmesi → MSF
- Düşey efektif gerilme düzeltmesi → K_σ

Bu düzeltmelerin birleşik uygulanmasıyla gerçek CRR tahmini şu şekilde hesaplanır:

$$CRR = CRR_{7.5}.MSF.K_\sigma \tag{2.13}$$

Bu denklemde:

- $CRR_{7.5}$: M_w = 7.5 çevrimsel yük direnci
- MSF : Deprem büyüklüğü düzeltmesi
- K_σ : Düşey efektif gerilme düzeltme katsayısı
- CRR : Çevrimsel yük direnci

Bu yapı sayesinde farklı saha koşullarındaki zeminler için sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Güncellenmiş denklem özellikle SPT verisi bulunan sahalar için geliştirilmiş olsa da CPT veya V_s gibi alternatif saha deneyleriyle elde edilen verilerle de kullanılabilmektedir. Ancak bu durumda farklı deney türlerine özel kalibrasyon katsayılarının dikkate alınması gerekir.

Mühendislik hesaplamalarında şu adımlar izlenerek sıvılaşma değerlendirmesi yapılabilir:

- Saha verisinden $(N_1)_{60cs}$ hesaplanır.
- Denklem 2.12 ile $CRR_{7.5}$ bulunur.
- Deprem büyüklüğüne göre MSF belirlenir.
- Gerilme durumu için K_σ ve K_α katsayıları hesaplanır.
- Denklem 2.13 ile nihai CRR hesaplanır.
- CSR değeri ile karşılaştırma yapılır.

CSR>CRR ise Sıvılaşma riski vardır. CSR<CRR ise sıvılaşma riski düşük veya yoktur.

Denklem geniş veri tabanlarına dayansa da sınır değerleri bulunmaktadır. Gevşek siltli zeminler için doğrudan uygulanması uygun değildir $4<(N_1)_{60cs}<30$ aralığı dışındaki değerlerde doğruluğu azalabilmektedir. Derin katmanlarda uygulanmadan önce K_σ düzeltmesinin dikkatle yapılması gerekmektedir. Statik yüklemeye duyarlı alanlarda K_α etkisi belirleyici olabilmektedir. Idriss ve Boulanger (2008), bu sınırların dikkatle yorumlanması gerektiğini ve her durumda mühendislik deneyimi ile birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır.

2.2. İnce Taneli Zeminlerde Sıvılaşma Davranışı

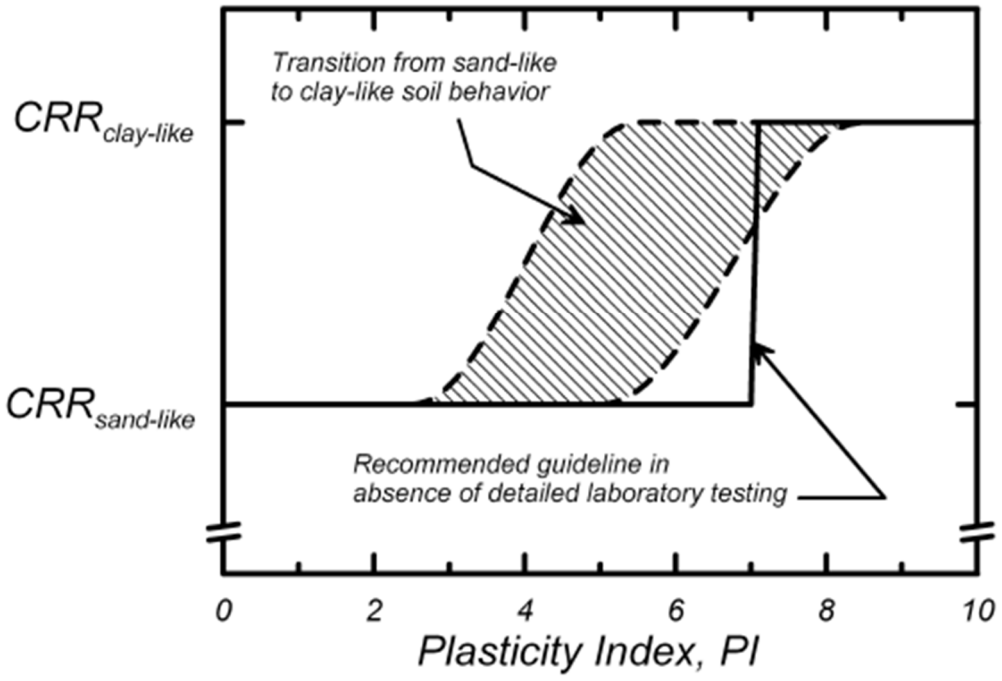
İnce taneli zeminlerin sıvılaşma davranışı, kumlara kıyasla daha karmaşık ve değişkendir. Siltli zeminlerde sıvılaşma potansiyeli, yalnızca rölatif sıkılık ve çevrimsel gerilme büyüklüğüne bağlı değildir. Aynı zamanda plastisite indisi, ince dane oranı ve su muhtevası gibi faktörlere de bağlı olarak belirgin şekilde farklılaşmaktadır. Bu tür zeminler çoğu zaman klasik sıvılaşma kriterlerinin altında kalan gerilme seviyelerinde dahi çevrimsel hareketlilik sergileyerek kalıcı deformasyonlara neden olabilmektedir. Idriss ve Boulanger (2008) ile Ishihara (1996) tarafından yapılan sınıflandırmalarda plastisite indisi düşük olan siltli zeminler, gevşek kumlarla benzer sıvılaşma riski taşıyan malzemeler arasında değerlendirilmiştir. Ayrıca bu tür zeminlerde suya doygunluk oranı ve konsolidasyon geçmişi gibi faktörler de sıvılaşma davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin doğru belirlenebilmesi için klasik SPT/CPT temelli yöntemlerin ötesinde, plastisite özelliklerini ve drenaj koşullarını da dikkate alan değerlendirmelere ihtiyaç vardır.

2.2.1. Plastisite indisi

Birçok saha gözlemi ve laboratuvar çalışması, zemindeki ince daneli malzemenin plastik davranış özelliklerinin sıvılaşma üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. İnce taneli malzemenin miktarı kadar, bu malzemenin plastisite karakteri de sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirlemede etkili olmaktadır (Idriss ve Boulanger, 2008).

Seed vd. (1985), plastisite indisinin sıvılaşma potansiyelini azaltabileceğini ortaya koymuş ve PI>12 olan zeminlerin, PI=0 olanlara kıyasla çok daha düşük sıvılaşma eğilimi gösterdiğini raporlamıştır. Benzer şekilde, Bray ve Sancio (2006) ile Andrus ve Stokoe (2000) tarafından yapılan çalışmalar da plastisite arttıkça zeminlerin çevrimsel yüklemelere karşı daha dirençli davrandığını göstermektedir.

Bu gözlemler, plastisite indisinin sıvılaşma açısından kritik bir sınır parametresi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle PI=7 civarındaki sınır değeri, mühendislik uygulamalarında zeminlerin sıvılaşma açısından sınıflandırılmasında pratik bir eşik olarak önerilmiştir.



Şekil 2.10. Plastisite insidisine göre sıvılaşma davraşının sınıflandırılması (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.10'da ince daneli zeminlerin plastisite özelliklerine bağlı olarak kum benzeri davranıştan kil benzeri davranışa geçişini kavramsal olarak açıklamak için sunulmuş şematik bir geçiş diagramıdır. Ayrıca, plastisite indisine göre yapılan sınıflandırmalar, bazı ince daneli zeminlerin sıvılaşma davranışının, klasik kum sıvılaşması mekanizmalarından farklı olduğunu göstermiştir. Bu tür zeminlerde su içeriği, konsolidasyon seviyesi ve gerilme geçmişi gibi faktörler sıvılaşma eğilimini belirlemede daha baskın hale gelebilmektedir.

Idriss ve Boulanger (2008), plastisite indisi ve sıvılaşma davranışı arasındaki ilişkiyi yorumlarken düşük plastisiteli siltlerin (PI<7) geleneksel sıvılaşma potansiyeli analizlerinde belirsizlik oluşturabileceğini vurgulamıştır. Bu tür zeminlerin mühendislik analizlerinde daha dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bazı araştırmacılar, sıvılaşma eğiliminin değerlendirilmesinde yalnızca plastisite indisi tek başına bir faktör olmayıp aynı zamanda Atterberg limitlerinden elde edilen diğer parametrelerin de dikkate alınması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Örneğin, Polito ve Martin (2001), sıvılaşma davranışını etkileyen kritik faktörlerden diğerinin de likit limit (LL)

olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, bazı sınıflandırmalarda zeminlerin hem LL hem de PI değerine göre değerlendirilmesi önerilmektedir.

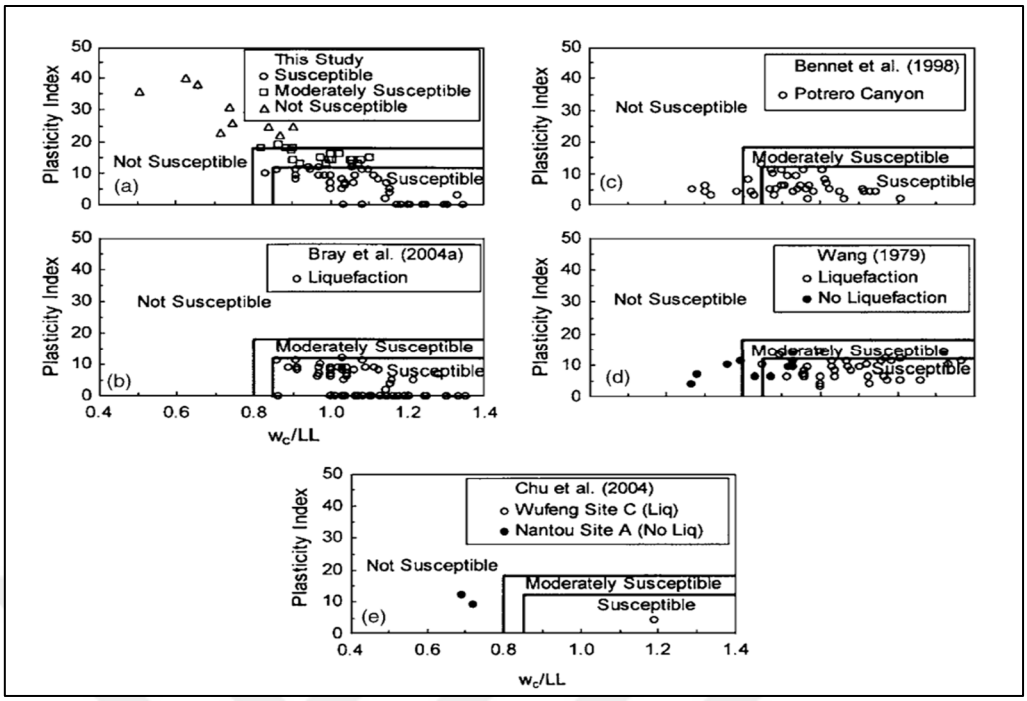
Saha sınıflandırmalarında, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminleri ayırt etmek amacıyla genellikle şu pratik sınırlar önerilmektedir:

- PI<7 → Sıvılaşmaya karşı duyarlı ince daneli zeminler
- 7≤PI≤12 → Belirsiz geçiş bölgesi
- PI>12 → Sıvılaşmaya karşı dayanıklı ince daneli zeminler

Bu sınırlar, farklı araştırmalar tarafından önerilen değerlere dayanmaktadır. Idriss ve Boulanger (2008), bu değerlerin yalnızca genel bir rehber olarak kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Zira saha koşulları, zemin geçmişi ve doygunluk derecesi gibi faktörler sıvılaşma davranışında belirleyici rol oynamaktadır.

Idriss ve Boulanger (2008), plastisiteye dayalı bu tür sınıflandırma sistemlerinin, CPT veya SPT gibi arazi testleriyle birlikte kullanıldığında daha doğru sonuçlar vereceğini belirtmiştir. Örneğin, yüksek PI değerine sahip bir zemin, SPT-N değerinin düşük olması halinde yine de çevrimsel deformasyonlara karşı hassasiyet gösterebilir. Bu nedenle, zemin sınıflandırması yapılırken tek bir kritere dayanmaktan ziyade çoklu parametre yaklaşımı benimsenmelidir.

Şekil 2.11'da Bray ve Sancio (2006) tarafından, plastisite indisi (PI) ile su muhtevası likit limit oranı (w_c/LL) dikkate alınarak yeni bir sınıflandırma önerilmiştir. Grafik, sıvılaşabilir, sınırlı sıvılaşabilir ve sıvılaşmaz olarak üç ana bölge tanımlar. Buna göre PI≤12 ve w_c/LL≥0.85 olan zeminler sıvılaşma açısından riskli kabul edilmekte, PI>18 olan zeminler ise genellikle sıvılaşmaya karşı dirençli sayılmaktadır. Aradaki geçiş bölgesinde kalan zeminler için ise ayrıntılı laboratuvar ve mikroskobik analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sınır eğrileri, 1999 Adapazarı, 1999 Chi-Chi ve 1994 Northridge gibi depremlerden elde edilen saha verileriyle desteklenmiştir.



Şekil 2.11. Plastisite indisi ve su muhtevasının likit limit oranına göre sıvılaşma potansiyeli sınıflaması. a) Bray ve Sancio (2006) üç eksenli dinamik basınç verileri, b) Bray vd. (2004a) saha verileri, c) Ptrero Kanyonu saha verileri (Bennet vd. (1998), d) Wang (1979) saha verileri, e) Chu vd. (2004) Saha verileri (Bray ve Sancio'dan, 2006).

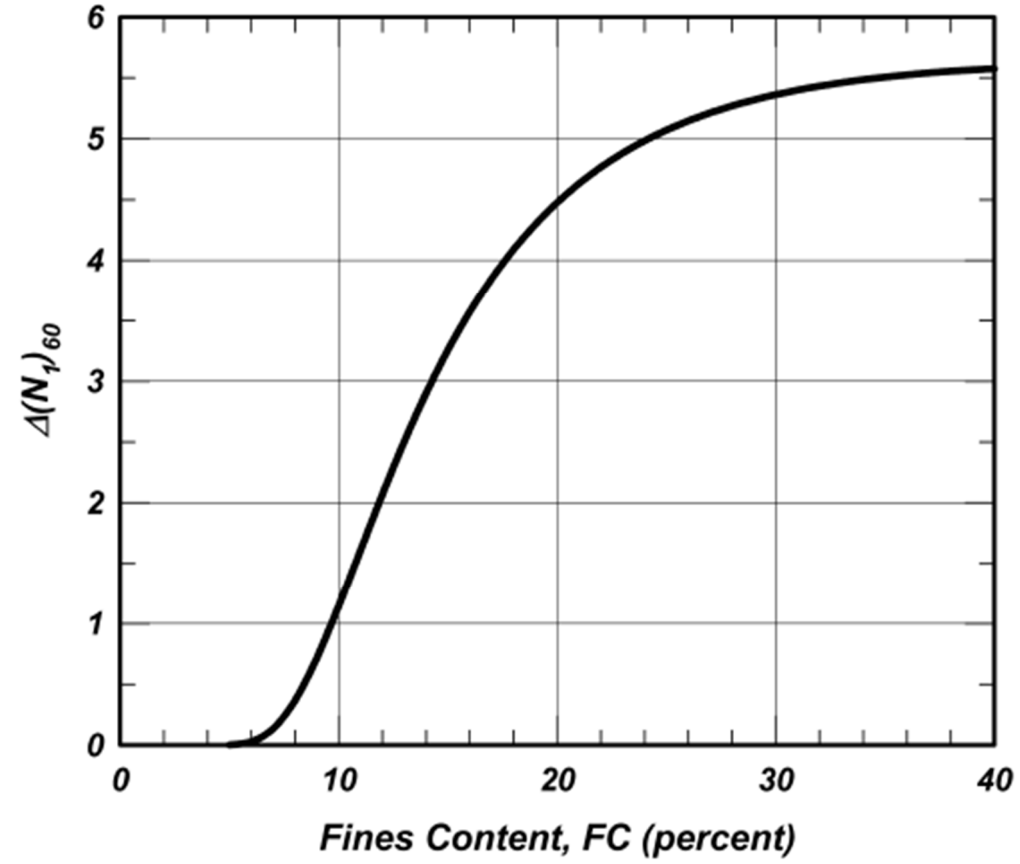
Plastisite indisi sıvılaşma potansiyelinin tahmin edilmesinde değerli bir göstergedir. Ancak bu parametrenin mutlak bir sınır olarak yorumlanmaması, zemin davranışının çok daha karmaşık faktörlerden etkilendiği göz önünde bulundurularak dikkatli mühendislik yorumları yapılması önerilmektedir.

2.2.2. İnce tane oranı

İnce tanelerin (silt ve kil) kum zemine dahil edilmesi, yalnızca plastisite özellikleriyle ve oranlarıyla sıvılaşma direnci üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Deneysel ve saha esaslı araştırmalar, ince dane oranı arttıkça sıvılaşma davranışının doğrusal olmayan şekilde değiştiğini göstermiştir. Kum sınıflı zeminlerde, belirli bir kritik ince dane oranının ötesinde zemin davranışı klasik kumlardan farklılık göstermeye başlamaktadır (Idriss ve Boulanger, 2008).

Bu geçiş noktasına kadar ince danelerin boşlukları doldurarak dolgu görevi gördüğü, ancak kritik oran aşıldıktan sonra karışım yapısını baskıladığı kabul edilmektedir. Mitchell ve Soga (2005), bu geçişin zemin davranışını kökten etkileyerek boşluk oranı, drenaj

özellikleri ve su gözeneklerinin yapısal düzeninde önemli değişimlere neden olduğunu belirtmiştir.



Şekil 2.12. Farklı ince dane oranları (FC) için SPT darbe sayısı düzeltme katsayısı olan $\Delta(N_1)_{60}$ davranışı (Idriss & Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.12'de, Idriss ve Boulanger (2008) tarafından sunulan ve ince dane içeriğinin, darbe sayısı düzeltme katsayısına etkisini gösteren ampirik ilişki yer almaktadır. Bu grafik doğrultusunda, özellikle %35'ten daha fazla ince dane içeren zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin düşmeye başladığı ve bu nedenle SPT temelli analizlerde $\Delta(N_1)_{60}$ değerine sabit bir düzeltme uygulanmasının yeterli olabileceği belirtilmektedir. İnce dane oranı arttıkça zemin yapısı değişmekte, sıvılaşma dayanımı farklılaşmaktadır.

Standart Penetrasyon Testi (SPT) verilerine dayalı sıvılaşma analizlerinde, ince dane oranı arttıkça $\Delta(N_1)_{60}$ değeri, temiz kuma göre farklı şekilde yorumlanmalıdır. Bu nedenle FC'ye bağlı düzeltme katsayıları önerilmiştir. Cetin vd. (2004) bu düzeltmelerin ampirik olarak tanımlanmasını önermiş ve saha verilerine dayalı öneriler geliştirmiştir. Bu

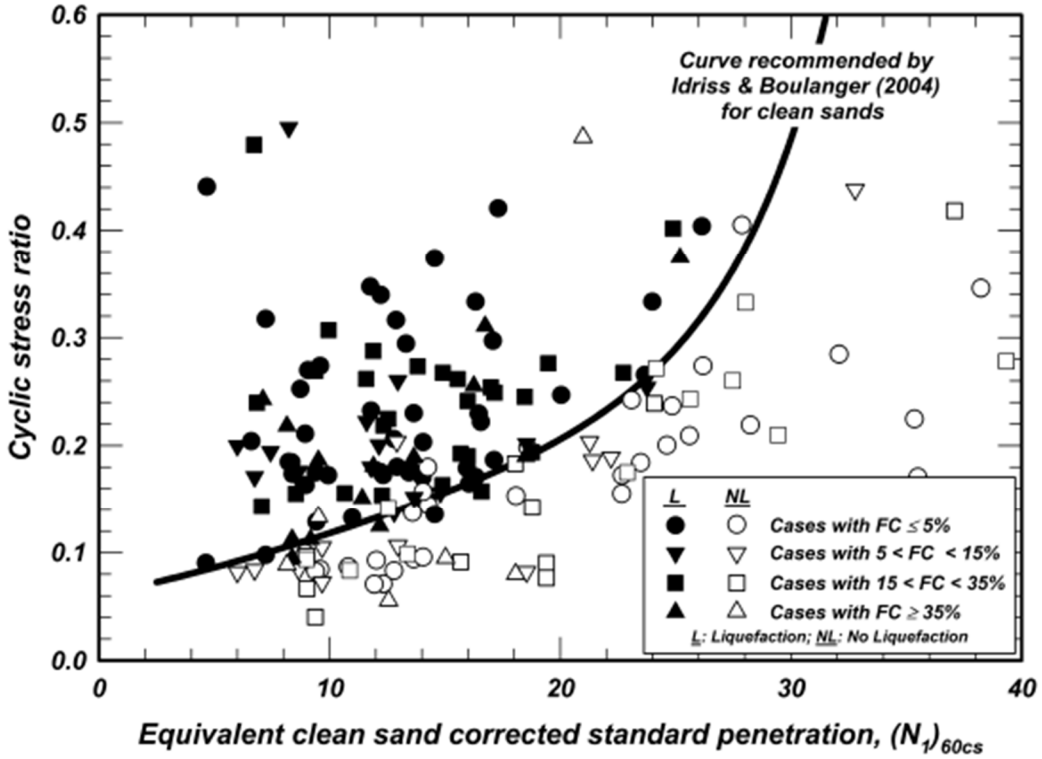
düzeltmeler, zemini FC≈0 olan temiz kum referansına göre normalize edebilmek için kullanılır.

İnce tane içeren kumların sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde, klasik $\Delta(N_1)_{60}$ değeri yerine, ince danelerin etkisini içeren düzeltilmiş bir değer olan $\Delta(N_1)_{60}$ kullanılmalıdır. Bu değer aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \tag{2.14}$$

Burada $\Delta(N_1)_{60}$, ince dane oranına bağlı düzeltme katsayısıdır ve ampirik olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1{,}63 + \frac{9{,}7}{FC + 0{,}01} - \left(\frac{15{,}7}{FC + 0{,}01}\right)^2\right) \tag{2.15}$$



Şekil 2.13. İnce taneler için darbe sayısı düzeltme katsayısı $\Delta(N_1)_{60}$'ın FC ile değişimi (Idriss ve Boulanger'den, 2004).

Şekil 2.13'de Idriss ve Boulanger (2004) tarafından sunulan saha verileri ile oluşturulan sıvılaşma sınır eğrisi gösterilmektedir. Eğride yatay eksende enerji ve derinlik düzeltmeleri yapılmış, ince dane etkisiyle düzeltilmiş darbe sayısı $(N_1)_{60cs}$, dikey eksende ise

zemin profilinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) yer almaktadır. Farklı semboller, zeminlerdeki ince dane oranlarına göre sınıflandırılmıştır.

Eğri, sıvılaşma riski yüksek ve düşük zeminleri ayırt etmek üzere $CRR_{7,5}$ – SPT ilişkisinin ampirik olarak tanımlandığı sınırdır. Verilerden de görüldüğü üzere, özellikle $(N_1)_{60cs}<15$ ve CSR>0,2 olan bölgelerde sıvılaşma gözlemleri ağırlıktadır. İnce dane içeriği arttıkça zeminin sıvılaşmaya karşı direnci artmakta ve sıvılaşmayan veri noktalarının sayısı artmaktadır. Bu durum, FC'nin zemin yapısı üzerindeki etkisini ve sıvılaşma analizinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

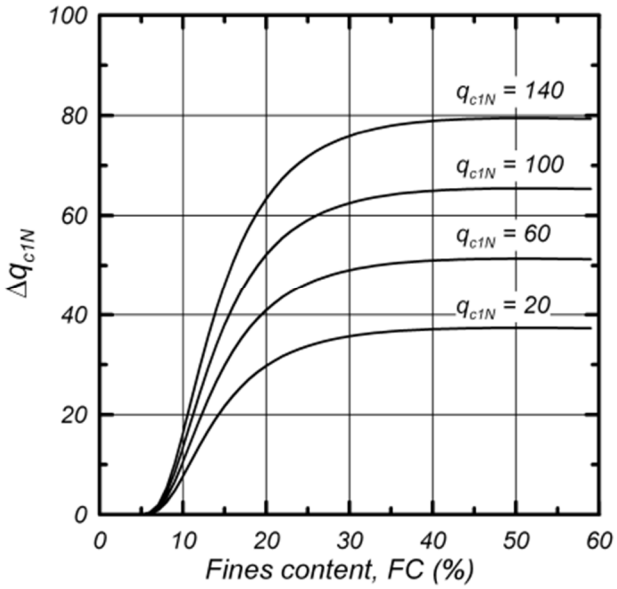
SPT'ye benzer şekilde, CPT temelli analizlerde de ince dane oranı (FC) arttıkça zemin davranışı değişmektedir ve bu nedenle düzeltme yapılması gereklidir. Bu amaçla, CPT'de kullanılan düzeltilmiş konik direnç parametresi q_{c1N} için, FC'ye bağlı düzeltme katsayısı önerilmiştir. Bu düzeltmeyle birlikte elde edilen parametre q_{c1Ncs} olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \tag{2.16}$$

Bu denklemde, Δq_{c1N} FC'ye bağlı düzeltmeyi ifade eder ve aşağıdaki ampirik ilişkiyle hesaplanır:

$$\Delta q_{c1N} = \left(5,4 + \frac{q_{c1N}}{16}\right) \cdot \exp\left(1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01}\right)^2\right) \tag{2.17}$$

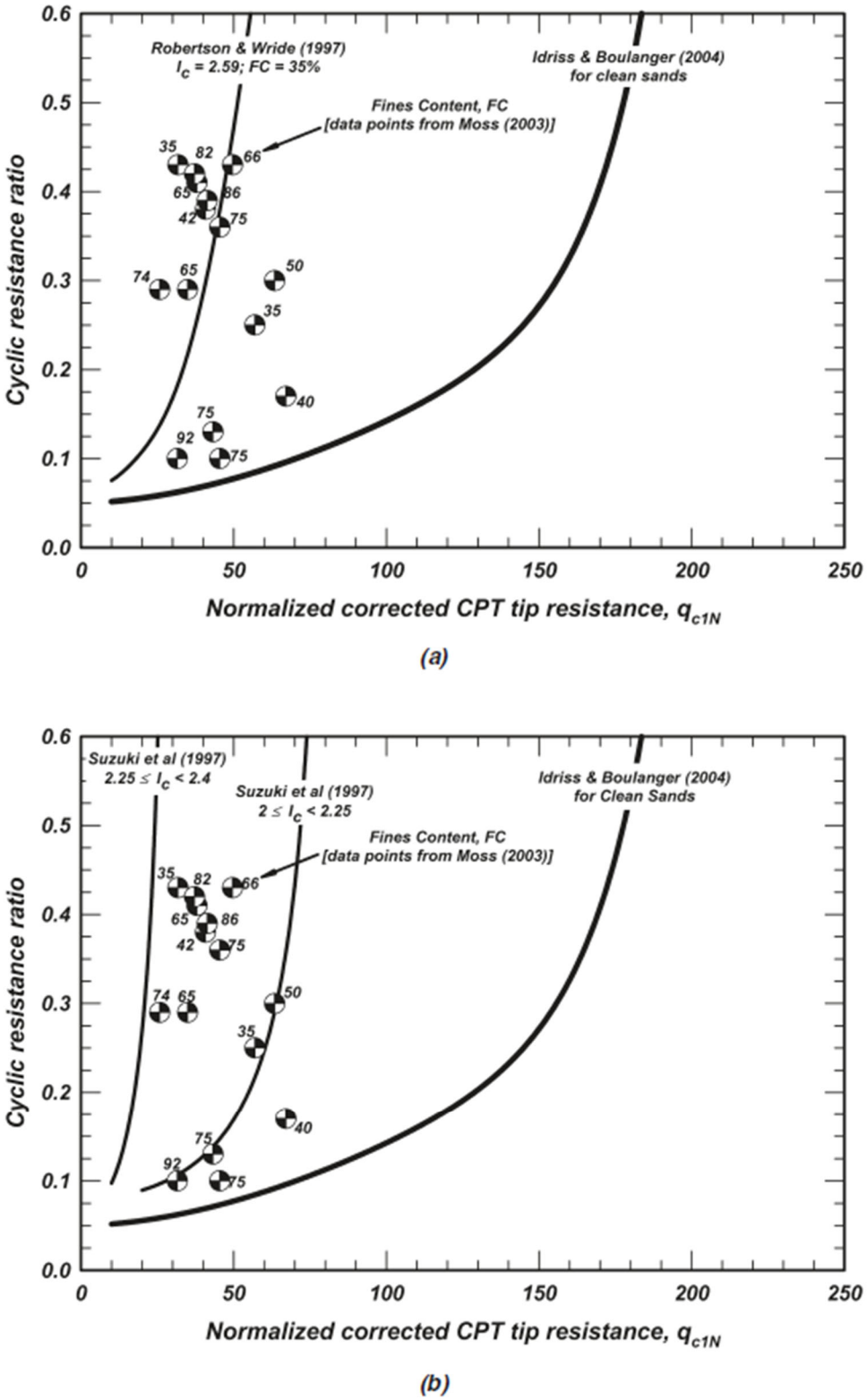
Bu formül, Boulanger ve Idriss (2004) tarafından önerilen SPT düzeltme yapısının CPT'ye uyarlanmış versiyonudur.



Şekil 2.14. İnce dane oranı (FC) ve düzeltilmiş uç direncine (q_{c1N}) bağlı olarak ince dane oranına bağlı CPT düzeltme katsayısının (Δq_{c1N}) değişimi (Idriss & Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.14'de CPT tabanlı sıvılaşma analizlerinde kullanılan düzeltişmiş uç direnci (q_{c1N}) için, ince dane oranına (FC) bağlı olarak yapılması gereken ince dane düzeltme katsayısı (Δq_{c1N}) değerleri sunulmaktadır. Her eğri sabit bir q_{c1N} seviyesine karşılık gelir ve bu değere sahip zeminin ince dane içeriğine göre ne kadar düzeltme yapılması gerektiğini gösterir. Özellikle FC>%35 seviyesinden sonra eğriler lineerleşme yaparak düzeltmenin artık sabit değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu grafik, CPT verilerinin temiz kum eşdeğeri uç direncine dönüştürülmesinde kullanılmakta olup sıvılaşma sınır eğrilerinin doğru uygulanabilmesi için önemlidir. Ayrıca zemin davranışının FC'ye göre geçiş bölgelerinde farklı çalışmalarda benzer eğilimler gösterdiği gözlenmiştir (Seed vd., 1985; Cetin vd., 2004; Moss vd., 2006).

Şekil 2.15'te CPT verilerine dayalı olarak geliştirilen CRR eğrilerini göstermektedir. Robertson ve Wride (1997) tarafından önerilen eğriler, FC içeriği artırıldığında CRR değerlerinin yükseldiğini belirtmektedir. Benzer şekilde, Suzuki vd. (1997) de, yüksek FC içeriğine sahip siltli kum zeminlerde CRR'yi belirlemek için bu tür düzeltmelerin kullanılmasını önermektedir.



Şekil 2.15. CPT temelli CRR – q_{c1Ncs} ilişkisi; a) Robertson & Wride (1997), b) Suzuki vd. (1997)'nin önerdiği sıvılaşma sınır eğrileri (Idriss ve Boulanger'den, 2004).

2.3. Laboratuvar Deneylerine Dayalı Sıvılaşma Değerlendirmeleri

2.3.1. Dinamik üç eksenli basınç deneyleri

Suya doygun kumların sıvılaşma direncini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen konsolide edilmiş drenajsız üç eksenli dinamik basınç deneyleri (CU-CTX), günümüzde en yaygın kullanılan laboratuvar yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Bu testlerde, tipik olarak doygun bir zemin numunesi, belirli bir konsolidasyon basıncı altında izotropik olarak konsolide edilir ve ardından drenajsız koşullar altında çevrimsel gerilmeye maruz bırakılır. Bu deney süreci boyunca boşluk suyu basıncındaki artış gözlemlenir. Bu artış, etkili gerilmenin azalmasına ve sonunda sıfırlanmasına neden olabilmektedir (Idriss ve Boulanger, 2008).

Bu tür laboratuvar deneylerinde uygulanan çevrimsel gerilme genellikle sinüzoidal biçimdedir. Ancak bazı araştırmalarda düzensiz dalga şekilleri de tercih edilmiştir (Seed ve Lee, 1966; Silver ve Seed, 1971). Deneyin temel amacı, belirli bir çevrimsel gerilme oranı altında zemin numunesinin sıvılaşmaya ne kadar çevrimde ulaştığını belirlemektir. Sıvılaşmanın tanımı genellikle şu kriterlerden biri ile yapılır:

- Boşluk suyu basıncı oranı (r_u) yaklaşık olarak 1,0 olur,
- Efektif gerilme sıfıra yaklaşır,
- Ani şekil değiştirme ve deformasyon birikimi gözlemlenir.

Zemin numunesi üzerinde sıvılaşmanın meydana geldiği çevrim sayısı, genellikle sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı N_{liq} olarak tanımlanır. τ_{cyc} çevrimsel kayma gerilmesi, σ_v' düşey efektif gerilmedir. Deney sırasında kullanılan çevrimsel deviator gerilme değerinin (q_{cyc}), çevre basıncı değerine (σ_3') göre normalize edilerek çevrimsel gerilme oranı (CSR) hesaplanır. CSR aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma_v'} \tag{2.18}$$

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{2 \cdot \sigma_3'} \tag{2.19}$$

Bu eşitlikler kullanılarak farklı CSR seviyeleriyle yapılan testlerden, zeminin sıvılaşmaya ulaşma süresi (çevrim sayısı olarak) belirlenir. Bu sayede CSR– N_{liq} ilişkisi oluşturulur.

CSR– N_{liq} ilişkisini ortaya koymak amacıyla yapılan CU-CTX testleri, çeşitli araştırmacılar tarafından farklı kum türleri, rölatif sıkılıklar, frekanslar ve çevre basınçları altında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları, belirli bir çevrimsel gerilme oranına karşılık gelen sıvılaşma çevrim sayısının) nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 2.17'de, tipik bir CU-CTX test düzeni ve bu test sırasında elde edilen boşluk suyu basıncı eğrileri sunulmaktadır.

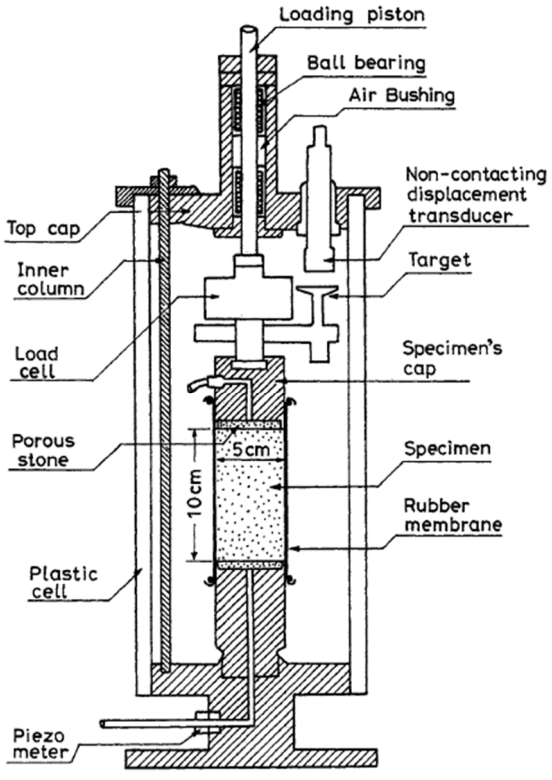
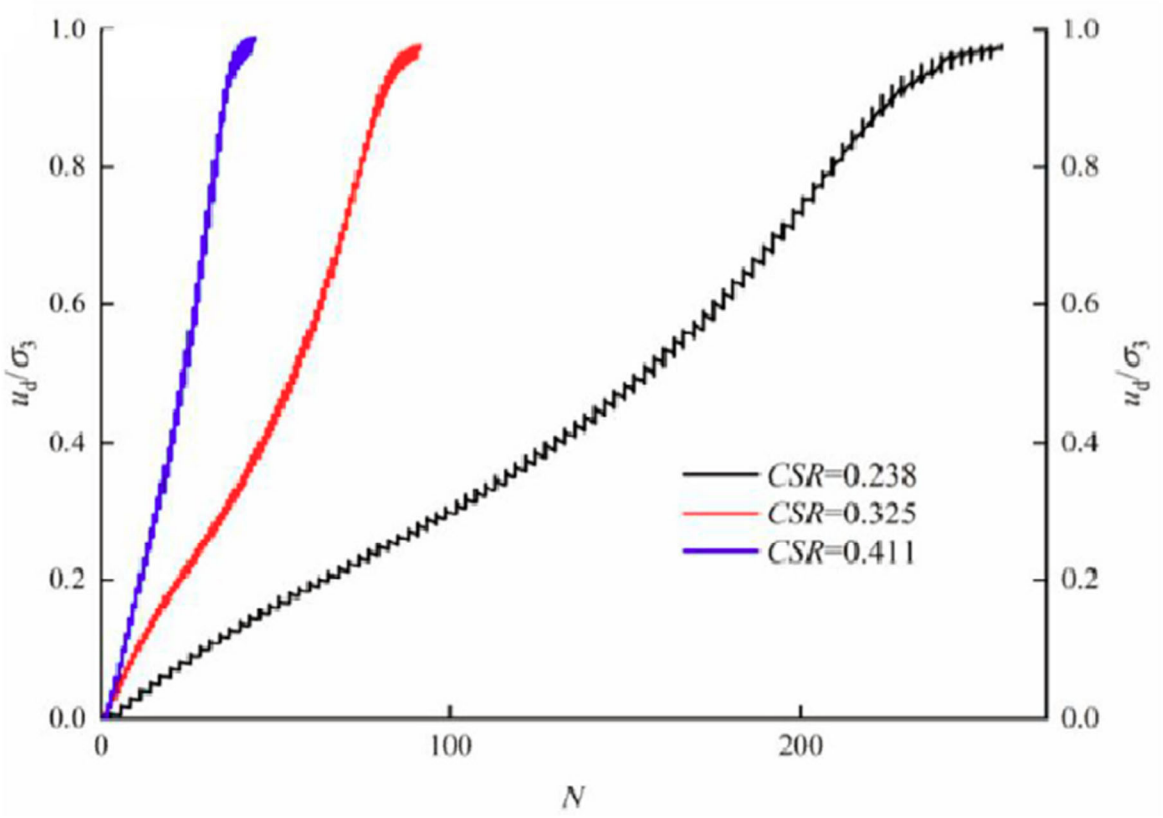


Fig. 4.1 Triaxial test apparatus.

Şekil 2.16 Üç eksenli çevrimsel yükleme (CU-CTX) testi için kullanılan tipik deney düzeneği ve örnek gerilme-yer değiştirme davranışı (Ishihara'dan, 1996).

Şekil 2.16'da gösterilen düzeneği kullanılarak yapılan testlerde, çevrim sayısı arttıkça boşluk suyu basıncı birikir ve efektif gerilme zamanla sıfıra yaklaşır. Bu noktada,

zemin numunesi sıvılaşmış kabul edilir. Bu davranış, aşağıdaki gibi CSR seviyesine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.17. Farklı CSR seviyelerinde yapılan CU-CTX testlerinde sıvılaşma durumu (Zhu vd.'den, 2022)

Şekil 2.17'te gösterildiği üzere, CSR arttıkça sıvılaşmaya ulaşmak için gereken çevrim sayısı önemli ölçüde azalmaktadır. Yani yüksek gerilme oranlarında zemin daha hızlı sıvılaşır. Bu ilişki, laboratuvar verileri ile sayısal olarak doğrulanmış ve aşağıdaki şekilde modellenmiştir.

$$CRR = a \cdot N^{-b} \tag{2.20}$$

Burada α ve *b*, zemine ve test koşullarına bağlı olarak belirlenen regresyon katsayılarıdır. N, sıvılaşma için gerekli çevrim sayısıdır. Bu ampirik form, deney verilerinden sıvılaşma eşiğinin kestirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1'de farklı araştırmalardan derlenen CU-CTX test sonuçları sunulmuştur. Bu çizelge, farklı kum türlerinde yapılan testlerde uygulanan CSR seviyeleri ve bunlara karşılık gelen N_{liq} değerlerini içerir.

Çizelge 2.1 Çeşitli araştırmalardan CU-CTX deney sonuçları (Kaynak: Idriss & Boulanger, 2008; Tatsuoka vd., 1986; Yoshimi & Tokimatsu, 1977; Silver & Seed, 1971; Seed & Lee'den, 1966).

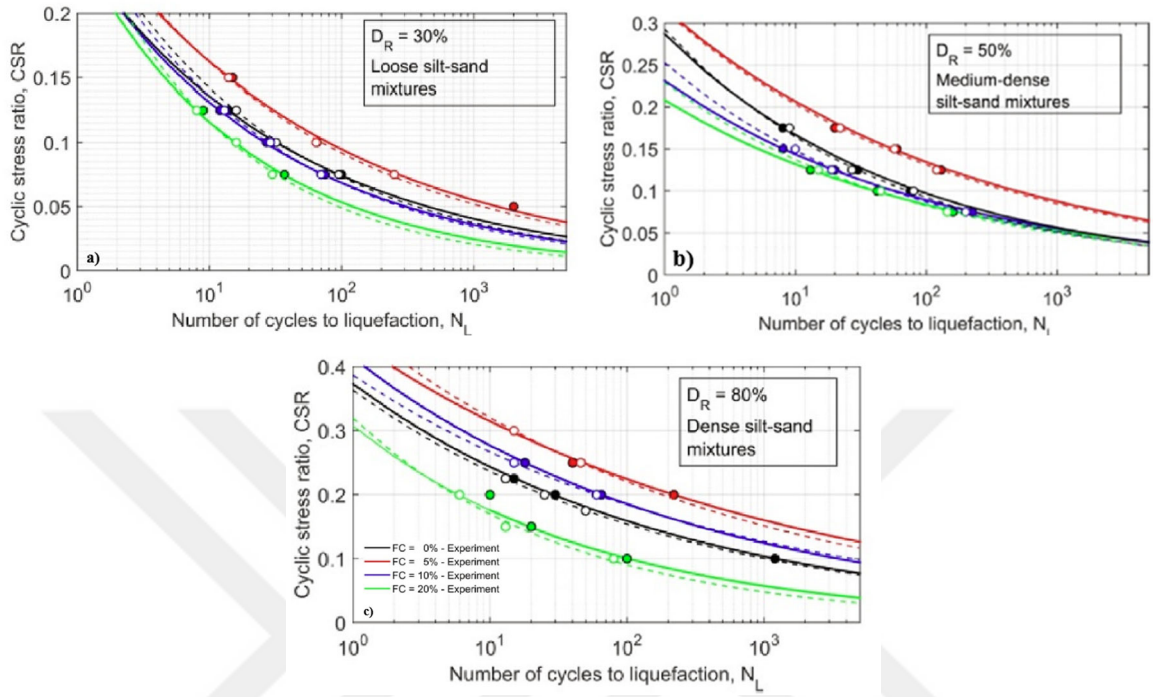
Kaynak	Kum Türü	D_r (%)	σ_3' (kPa)	CSR	N_{liq}
Tatsuoka vd. (1986)	Toyoura	60	100	0,18	20
Tatsuoka vd. (1986)	Toyoura	60	100	0,20	10
Yoshimi & Tokimatsu (1977)	Narita	50	100	0,21	15
Silver & Seed (1971)	Monterey	45	120	0,22	12
Seed & Lee (1966)	Ottawa	40	100	0,23	8

Bu veriler, farklı zemin özelliklerinin ve gerilme koşullarının sıvılaşma davranışına etkisini göstermektedir. Özellikle sıkılığı düşük kumlarda daha az çevrimde sıvılaşma gözlenirken, daha sıkı kumlarda aynı CSR değerinde sıvılaşmaya ulaşmak için daha fazla çevrim gerekmektedir. Toyoura kumu (Tatsuoka vd., 1986) düşük CSR değerlerinde dahi nispeten az çevrimde sıvılaşmaya ulaşmaktadır. Monterey kumu (Silver & Seed, 1971), Toyoura'ya kıyasla daha yüksek çevrim sayısı gerektirir bu da daha yüksek sıvılaşma direncine işaret etmektedir. Ottawa kumu (Seed & Lee, 1966), yüksek CSR değerlerinde bile nispeten daha az çevrimde sıvılaşmaktadır ki bu durum daha gevşek yapısal düzenle açıklanabilmektedir.

Farklı araştırmalarca gerçekleştirilen CU-CTX testleri sonucunda elde edilen CSR–N_{liq} verileri, yarı logaritmik düzlemde grafiksel olarak sunularak zeminlerin sıvılaşma sınır eğrileri oluşturulabilir. Şekil 2.18'de bu tür verilere dayalı olarak çeşitli kum türlerine ait sıvılaşma eğrilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Şekil 2.18'de Farklı rölatif sıkılık değerlerine göre (D_r = a) 30%, b) 50%, c) 80%) ve ince dane içeriklerine (FC = 0%, 5%, 10%, 20%) sahip siltli kum karışımları için çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile sıvılaşmaya ulaşana kadar geçen çevrim sayısı (N_{liq}) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Grafikler, artan ince madde oranının ve azalan sıkılığın sıvılaşma dayanımını belirgin şekilde düşürdüğünü göstermektedir. Özellikle düşük sıkılıklarda

(%30), CSR-N_{liq} eğrileri daha dik seyretmekte; bu da zeminin sıvılaşmaya daha yatkın olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.18. Farklı ince dane oranı içeren kumlar için CSR – N_{liq} ilişkileri. Rölatif sıkılık a) %30, b) %50, c) %80 (Gobbi vd.'den, 2022).

Bu grafikler sayesinde, aynı laboratuvar düzeneğiyle farklı zemin örneklerinde yapılan testler arasında sistematik karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu da sahada karşılaşılabilecek çeşitli zemin koşulları için sıvılaşma analizlerinin temelini oluşturmaktadır.

CU-CTX testlerine dayalı CSR değerlendirmeleri, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini karakterize etmek ve sayısal modellemeye temel oluşturmak açısından en güvenilir yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ancak bu yöntem, numune hazırlama koşulları, drenaj sınırları ve yükleme şekli gibi deneysel detaylara oldukça duyarlıdır. Bu nedenle, test sonuçları dikkatle değerlendirilmelidir.

2.3.2. Basit kesme (dss) ve burulmalı kesme deneyleri

Basit kesme (DSS) ve burulmalı kesme deneyleri, zeminlerin sıvılaşma davranışını ve çevrimsel mukavemet özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılan laboratuvar yöntemleri arasında yer alır. Bu deneyler, özellikle drenaj koşullarının ve gerilme yollarının

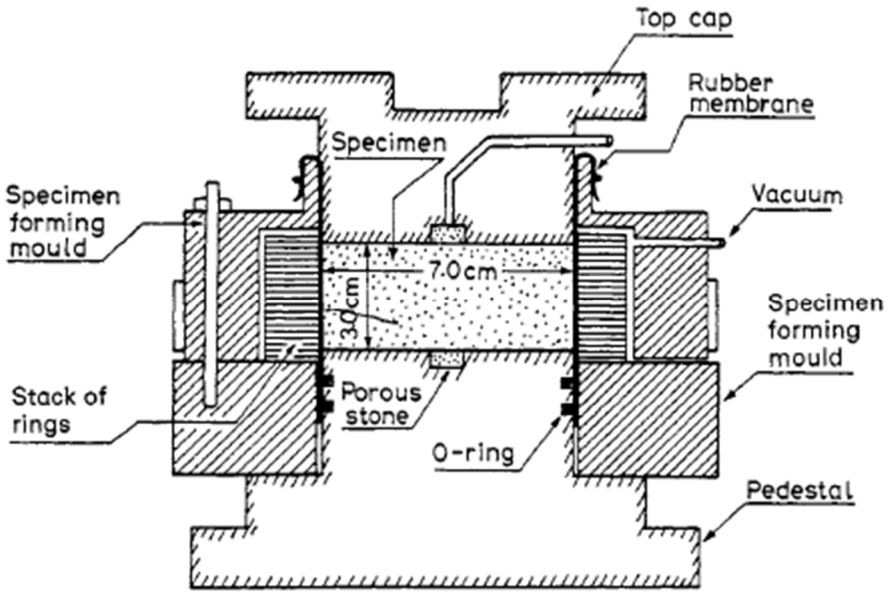
gerçek saha koşullarına daha yakın olmasını sağlayarak üç eksenli deneylere göre bazı avantajlar sunar. Bununla birlikte, bu testlerin uygulanması ve yorumlanması daha karmaşık olabilmektedir.

DSS deneyleri, numuneye sabit hacim koşulu altında saf kayma gerilmesi uygulanmasını esas almaktadır. Deney düzeneği, numunenin üst ve alt yüzeylerinin yatay yönde kaymasına olanak tanırken düşey yönde yer değiştirmeye izin vermez. Böylece numune üzerinde neredeyse saf kayma gerilmesi oluşur. DSS testlerinde genellikle sinüzoidal gerilme uygulanır ve bu gerilmenin çevrim sayısına bağlı olarak boşluk suyu basıncı birikimi gözlemlenir.

Burulmalı kesme deneyleri ise numunenin silindirik ekseni etrafında burulmasına dayalıdır. Bu yöntemle zemin, çevrimsel burulma momentiyle yüklenir. Numune sabit hacim koşuluna yakın şekilde sınırlandırılarak uygulanan bu burulma gerilmesi hem drenajsız çevrimsel mukavemet hem de boşluk suyu basıncı gelişimini incelemeye olanak sağlar (Silver & Seed, 1971; Tatsuoka vd., 1986).

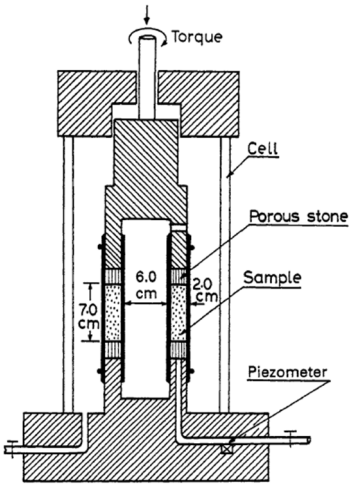
Bu tür deneylerin avantajları bulunmaktadır. Zemin davranışının daha doğal kesme yolları boyunca ölçülmesini sağlar. Numune hazırlanışı, üç eksenli deneylere kıyasla daha az bozulmaya maruz kalmaktadır. Deney düzeneğinin hacim değişimi kısıtlamaları daha hassas kontrol edilebilmektedir. Ancak bu yöntemler, test düzeneğinin daha karmaşık olması, deformasyonların üç eksenli karşılaştırmalarla doğrudan bağdaştırılamaması ve bazı analizlerin özel düzeltmeler gerektirmesi nedeniyle dikkatli bir şekilde uygulanmalı ve yorumlanmalıdır.

DSS ve burulmalı kesme deneylerinden elde edilen veriler, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede oldukça değerlidir. Aşağıdaki şekilde, tipik bir DSS deney düzeneği ile deney sırasında gözlemlenen boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonu gelişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Basit kesme (DSS) test düzeneği (Ishıhara, 1996'dan)

Şekil 2.19'da DSS test düzeneği gösterilmiştir. Numune üzerine uygulanan çevrimsel kayma gerilmesi ile boşluk suyu basıncı zamanla artmakta, aynı zamanda artan çevrim sayısıyla birlikte kalıcı kayma deformasyonu gelişmektedir. Bu süreç, zemin numunesinin sıvılaşmaya yaklaşmasını temsil eder.



Şekil 2.20. Burulmalı kesme test düzeneği (Ishıhara, 1996'dan).

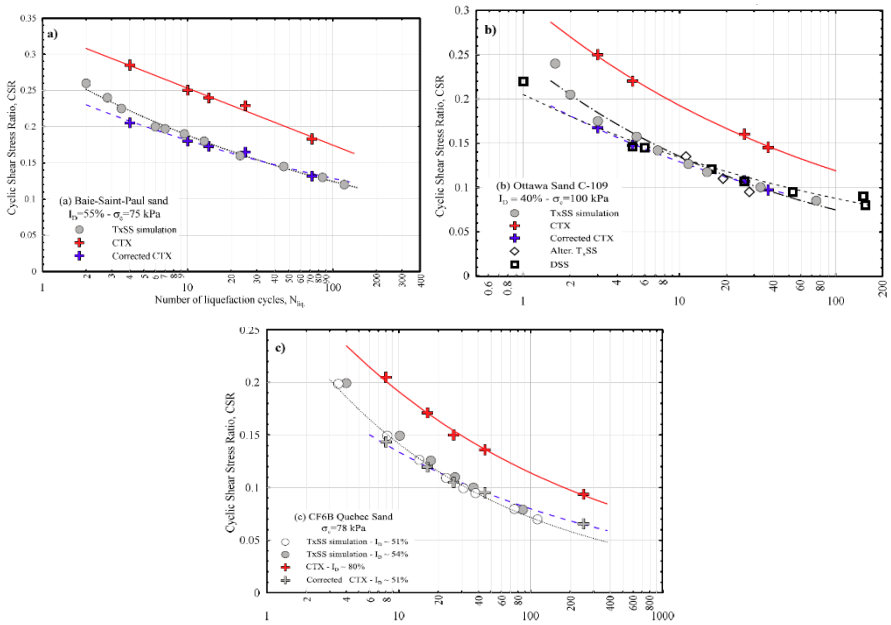
Şekil 2.20'de Burulmalı kesme deney düzeneği şematik gösterilmiştir. Bu deney düzeneği, silindirik bir zemin numunesine çevrimsel burulma momenti uygulanarak zeminin kesme halindeki davranışının incelenmesini sağlar. Numune, alt ve üst uçlarında poroz taşlarla donatılmış olup drenaj kontrolü sağlanmaktadır. Numune hazırlanır

ve test hücresinde düşey yönde sabitlenir. Sistem, çevre basıncı uygulanan bir hücre içinde yer alır ve doygunluk durumunun izlenmesi amacıyla bir piezometre bağlantısı içerir. Piezometre, boşluk suyu basıncındaki değişimleri doğrudan ölçer. Üstteki çelik mil aracılığıyla uygulanan burulma momenti sayesinde, numune kesme deformasyonuna maruz kalır. Bu sayede zeminlerin sıvılaşma davranışları, dinamik yükleme altında gerçekçi bir şekilde modellenebilir.

Çevrimsel mukavemet değerlendirmelerinde, CSR değeri doğrudan ölçülmez. Bunun yerine, uygulanan kayma gerilmesi (τ_{cyc}) ve konsolidasyon sonrası efektif gerilme (σ_v') kullanılarak CSR hesaplanır. Bu ifade Denklem 2.18'de belirtilmiştir.

Kesme deneylerinde CSR–N_{liq} ilişkisi, üç eksenli deneylere benzer şekilde modellenebilir. Bu ilişkinin eğimi ve pozisyonu, numunenin sıkılığına, tane boyu dağılımına ve yapısal özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Idriss & Boulanger (2008), DSS deney verilerini kullanarak çeşitli zemin türlerine ait CSR–N_{liq} eğrilerini yarı logaritmik düzlemde sunmuştur. Bu tür grafikler, zeminlerin sıvılaşma direncinin karşılaştırılması açısından oldukça açıklayıcıdır.



Şekil 2.21 Farklı zeminler için CU-CTX ve DSS testlerinden elde edilen CSR – N_{liq} ilişkileri a) Baie-Saint-Paul Kumu, b) Ottowa Kumu, c) Quebec Kumu (Khashila'dan, 2019).

Şekil 2.21'de farklı kum tiplerine ait sıvılaşma, DSS ve CU-CTX testlerinden elde edilen verilere dayalı olarak Şekil 2.21'de sunulmaktadır. Grafikler, CSR ile sıvılaşmaya ulaşmak için gerekli çevrim sayısı N_{liq} arasındaki ilişkileri ortaya koymaktadır. Şekil 2.21a Baie-Saint-Paul kumuna, Şekil 2.21b Ottawa Sand C-109 kumuna ve Şekil 2.21c Quebec CF6B kumuna ait sonuçları içermektedir. Grafikler incelendiğinde, test tipi ve zemin özelliğine bağlı olarak farklı CSR- N_{liq} ilişkileri gözlemlenmiştir. Bu durum, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin yalnızca çevrimsel gerilme büyüklüğüne değil aynı zamanda kumun mineralojik yapısı, sıkılık derecesi ve deneysel koşullara da duyarlı olduğunu göstermektedir. Her üç kum türü için CTX ve DSS testleri arasında belirli farklar saptanmış, bu da saha davranışlarının daha güvenilir tahmini için çoklu deney yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur Burulmalı kesme deneyleriyle elde edilen sonuçlar da benzer eğilimler göstermektedir. Tatsuoka vd. (1986) tarafından yapılan deneylerde, Toyoura kumu üzerinde çevrimsel burulma gerilmesi uygulanarak benzer CSR–N_{liq} ilişkileri elde edilmiştir. Bu çalışmalarda, CSR tanımı benzer biçimde kullanılmış ve deney verileri ile ampirik ilişkiler doğrulanmıştır.

Bu başlıkta bahsedilen verilerin bir kısmı aşağıdaki Çizelge 2.2'te sunulmuştur.

Çizelge 2.2. DSS ve burulmalı kesme deneylerinden elde edilen CSR– N_{liq} verileri.

Araştırma Kaynağı	**Kum Türü**	**D_r (%)**	**σ_c' (kPa)**	**CSR**	**N_{liq}**
Silver & Seed (1971)	Monterey kumu	45	100	0,18	18
Tatsuoka vd. (1986)	Toyoura kumu	60	100	0,22	10
Yoshimi & Tokimatsu (1977)	Narita kumu	50	100	0,20	15

DSS ve burulmalı kesme deneylerinden elde edilen CSR– N_{liq} ilişkileri, zeminlerin sıvılaşma davranışına dair güvenilir öngörüler sağlasa da bu yöntemlerin uygulanmasında dikkate alınması gereken bazı önemli sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamalar, yorumların hassasiyetini ve doğruluğunu doğrudan etkileyebilir.

Bu deney tiplerinin avantajlarından bahsedersek deneysel koşulların, sahada oluşabilecek kayma düzlemi doğrultularına benzer biçimde düzenlenebilmesi nedeniyle zemin davranışı daha gerçekçi şekilde temsil edilebilmektedir. Numune hazırlama süreci daha kısa olup homojen numunelerin elde edilmesi daha kolaydır. Özellikle siltli veya doğal zeminlerin çevrimsel davranışının izlenmesinde DSS yöntemleri oldukça kullanışlıdır.

Bu deney tiplerinin sınırlarından bahsedersek basit kesme koşulunun ideal düzeyde sağlanması zordur. Gerçek deneylerde, kesme düzlemi boyunca gerilme dağılımı tam homojen olmayabilir. Uygulanan çevrimsel deformasyonun rijitliği nedeniyle, özellikle büyük deformasyonlar altında testin kararlılığı bozulabilir. CSR hesaplamaları, sabit hacim varsayımına dayandığı için boşluk suyu basıncı artışı ile hacim değişiminin doğrudan ilişkilendirilmesi zorlaşabilir. Burulmalı kesme deneyleri, özel düzeneğe ve yüksek deneysel hassasiyete ihtiyaç duyar; test düzeneği karmaşıktır ve her laboratuvarda bulunmaz.

Bu nedenlerle, DSS ve burulmalı kesme deneylerinin sonuçları yalnızca kendi bağlamında değerlendirilmeli; üç eksenli dinamik deneylerle doğrudan karşılaştırmalarda dikkatli olunmalıdır. Ancak, bu deneylerin sunduğu veriler, özellikle boşluk suyu basıncı gelişiminin izlenmesi ve deformasyon özelliklerinin değerlendirilmesinde çok değerli katkılar sağlar.

Idriss & Boulanger (2008), bu testlerin sıvılaşma modellemesi için önemli referans veriler sunduğunu ve üç eksenli dinamik basınç deney verileriyle birlikte kullanılmasının, saha davranışlarının daha doğru temsil edilmesini sağlayacağını vurgulamaktadır.

2.3.3. Santrifüj deneyleri

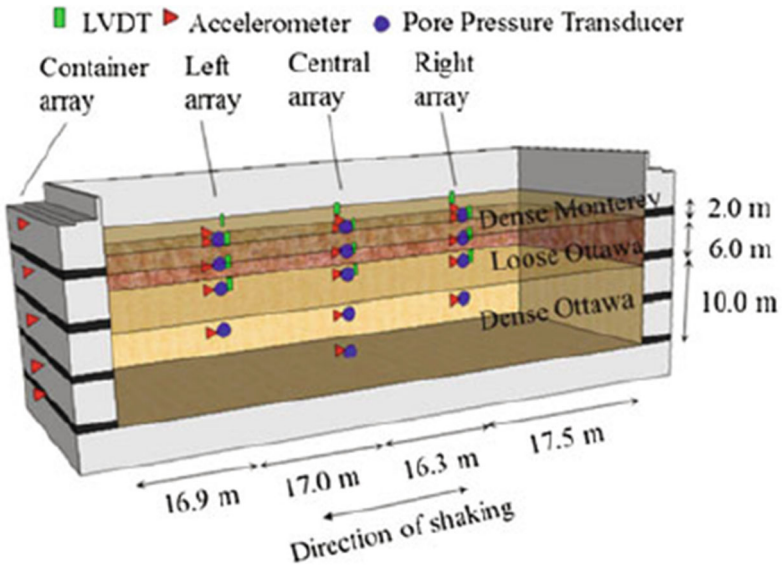
Santrifüj modelleme teknikleri, zeminlerin sıvılaşma davranışını gerçek saha koşullarına daha yakın ölçeklerde inceleyebilmek adına son yıllarda yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntem, zemin davranışının hem çevrimsel yükleme altındaki tepkilerini hem de sıvılaşma sonrası deformasyonları değerlendirme açısından büyük avantajlar sunar (Kutter, 1992; Zeng & Schofield, 1996).

Santrifüj deneylerinde temel prensip, küçük ölçekli fiziksel modellerin belirli bir çarpan oranında artırılmış yerçekimi ortamında test edilmesidir. Bu sayede, küçük boyutlu modellerin gerilme dağılımları, sahadaki prototip boyutuna karşılık gelen değerlere

ölçeklenebilir. Özellikle sıvılaşma gibi dinamik davranışlarda, doğru gerilme düzeylerinin sağlanarak 50g–100g seviyelerinde yapılan santrifüj testleriyle mümkün hâle gelmektedir. (Ishihara & Tsukamoto, 2022).

Sıvılaşma anının belirlenmesi ve tetiklenme koşullarının modellenmesi; sıvılaşma sonrası oturma, kayma, yer değiştirme ve taşıma gücü kaybı gibi etkilerin gözlemlenmesi; yüzey yapıların, şevlerin ve zemin iyileştirme yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesi amacıyla genellikle santrifüj testleri kullanılmaktadır (Şekil 2.22).

Zemin modelleri genellikle kum kutuları içinde yerleştirilmiş sismik yükleme sistemleriyle veya darbe çekiçleriyle dinamik olarak uyarılır. Bu sırada gömülü boşluk suyu basınç hücreleri, ivmeölçerler, deformasyon ölçerler ve kamera gibi sistemler kullanılarak detaylı veri toplanır (Kutter vd., 1994; Brennan & Madabhushi, 2005).



Şekil 2.22. Tipik bir santrifüj deney düzeneği ve yerleştirilen zemin modeli (Zhu'dan, 2023).

Bu testlerde sismik uyarım genellikle temel frekansı belirlenmiş bir dalga formunda uygulanır. Uyarı süresi ve büyüklüğü değiştirilerek farklı çevrimsel yükleme senaryoları modellenebilir. Özellikle sıvılaşma sonrası deformasyon davranışının gözlemlenmesinde santrifüj testlerinin eşsiz avantajları bulunmaktadır. Gerçek ölçekte sahada görülmesi zor olan yer değiştirmeler, bu deneylerde büyütülerek açık biçimde izlenebilir.

$$\sigma_z = \gamma \cdot z \tag{2.21}$$

Burada σ_z düşey gerilme, γ zemin birim hacim ağırlığı, z derinliktir. Bu denklem, santrifüjde uygulanan yerçekimi ivmesinin (g-faktörü) doğru ayarlanması hâlinde, gerçek zemin ve numunenin aynı düzeylerde aynı düşey gerilmenin elde edilecektir. Bu eşitlik, sıvılaşma gibi gerilme tabanlı fenomenlerin incelenmesinde santrifüj deneylerinin doğruluğunu teyit etmektedir. (Ishihara ve Tsukamoto, 2022).

Santrifüj testlerinde numune zemin davranışını ölçekli bir modelde yeniden üretebilmek için, fiziksel modelleme ilkeleri doğrultusunda uygun ölçeklendirme kuralları uygulanmalıdır. Örneğin, ivme, yer değiştirme, gerilme ve zaman gibi parametreler, santrifüjün uyguladığı yerçekimi çarpanı (g) ile doğru orantılı veya ters orantılı olarak ölçeklenir (Zeng & Schofield, 1996). Aşağıda tipik ölçekleme kuralları gösterilmiştir:

Çizelge 2.3 Santrifüj deneylerinde kullanılan modelleme parametrelerinin ölçekleme oranları (Zeng & Schofield'dan, 1996).

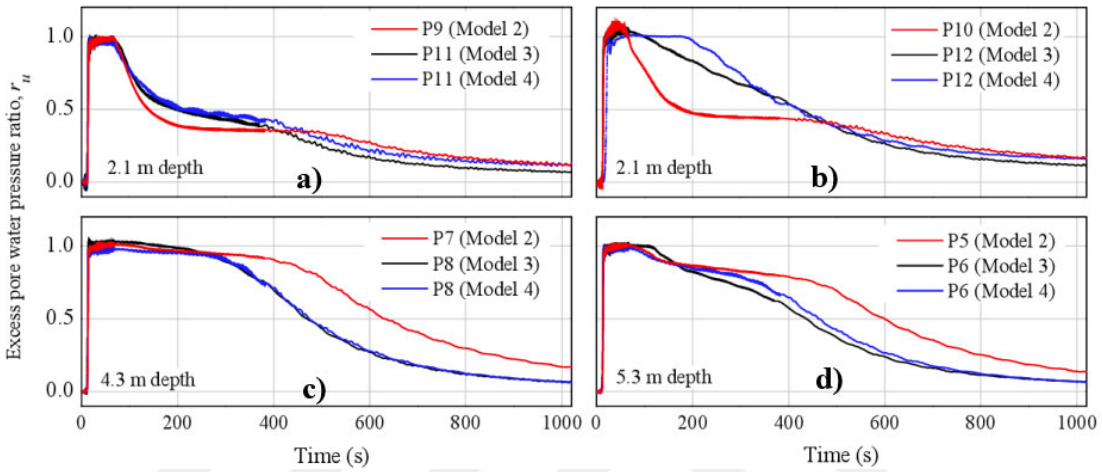
Parametre	**Ölçekleme Oranı (N: g-faktörü)**
Uzunluk (L)	1/N
Gerilme (σ)	1
İvme (a)	N
Zaman (t)	1/N
Yer değiştirme (u)	1/N
Kuvvet (F)	$1/N^2$

Çizelge 2.3'de, deney tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken temel ölçekleme ilişkilerini ortaya koymaktadır. Özellikle zamansal ölçeklemenin 1/N oranında olması, sıvılaşma gibi zamana bağlı olayların santrifüj testlerinde kısa sürede gerçekleşmesini sağlar. Bu sayede, saha davranışı birkaç saniye içinde modellenebilir.

Santrifüj deneylerinde sıvılaşma davranışını değerlendirmek için genellikle aşağıdaki ölçüm parametreleri izlenir:

- Boşluk suyu basıncı (u): Sıvılaşmanın başlaması, su basıncının etkili gerilme seviyesine ulaşması ile tanımlanır.

- Zemin yüzeyindeki oturma miktarı (ΔH): Sıvılaşma sonrası zemin deformasyonunu gösterir.
- İvme kayıtları (a_z, a_x): Sismik uyarının zemin içinde nasıl yayıldığını ve amplifikasyon etkilerini gösterir.
- Yanal yer değiştirmeler (Δx, Δy): Özellikle sıvılaşma sonrası istinat duvarı veya temel altı deformasyonların gözlemlenmesini sağlar.



Şekil 2.23 Santrifüj testinde sıvılaşma sonrası ve boşluk suyu basıncı gelişimi (Maharjan ve Takashi'den, 2013).

Şekil 2.23'te siltli kum bir zemin modelinde santrifüj altında yapılan bir sıvılaşma testi sırasında gözlemlenen ve boşluk suyu basıncı artışını göstermektedir. Deneyin ilerleyen anlarında boşluk suyu basıncı hızla artmakta ve zeminin taşıma gücü zayıflayarak ani deformasyonlara neden olmaktadır.

Bu tür veriler, yapı-zemin etkileşimini değerlendirmek amacıyla, örneğin şev stabilitesi, temelin oturması, boru hatlarının yüzmesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Santrifüj deneylerinin sıvılaşma mühendisliğinde sağladığı katkılar yalnızca laboratuvar doğrulamalarıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda farklı sıvılaşma modelleme tekniklerinin (örneğin; üç eksenli deneyler, DSS, saha gözlemleri) sonuçlarıyla karşılaştırmalı analiz yapabilme olanağı sunar. Bu karşılaştırmalar, sıvılaşma sınır eğrilerinin doğruluğunu değerlendirme ve gerçeğe daha yakın tahminler geliştirme açısından oldukça önemlidir (Ishihara & Tsukamoto, 2022).

Örneğin, Kutter vd. (1994) tarafından yürütülen bir çalışmada, sıvılaşma sonrası meydana gelen yanal yayılma ve temeldeki oturmalar hem santrifüj hem de saha verileriyle karşılaştırılarak başarıyla modellenmiştir. Bu çalışma, santrifüj testlerinin deformasyon temelli analizlerde ne derece etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Santrifüj testleri ayrıca; zemin iyileştirme tekniklerinin (drenaj, vibro-kompaksiyon, kolon uygulamaları vb.) etkinliğini doğrulamada, şev stabilitesi analizlerinde, sıvılaşma sonrası göçme potansiyelinin belirlenmesinde, yüzey yapılarının (bina, temel, istinat duvarı) davranışını incelemede, yüzer boru hatları ve zemin gömülü sistemlerin stabilitesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Madabhushi ve Zeng, 2007).

Bu kapsamda santrifüj deneyleri yapı-zemin etkileşimli davranışın tüm yönlerini değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Gerçek zemin davranışının sahaya uygun şekilde ölçeklendirilerek izlenebilmesi, bu yöntemi özellikle büyük mühendislik projelerinde sıklıkla kullanılan bir hale getirmiştir.

Bu yöntemlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Deney altyapısı yüksek maliyetlidir ve çoğu araştırma merkezinde mevcut değildir. Ölçekli modellemelerde bazı özelliklerin sahadaki kadar gerçeğe uygun elde edilmesi zor olabilmektedir. Deney düzeneğinde sensörlerin yerleştirilmesi, yerçekimi altında deformasyonları gerçek zamanlı olarak izlemek için yüksek çözünürlüklü sistemler gerekmektedir.

2.4. Sıvılaşma Potansiyelinin Tahmini

Bu başlıkta sıvılaşma tahmini yöntemleri üzerinde durulacaktır. Sıvılaşma olayının gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini ön görmek adına çok önemlidir. Alt başlıklarda olasılıksal yaklaşımlar, güvenlik katsayısı ile tahkik yöntemi ve önceki bölümlerde bahsedilen saha deneyleri bağıntılarına devam edilerek lojistik regresyon ile alakalı bilgiler sunulacaktır.

2.4.1. Olasılıksal yaklaşım

Sıvılaşma değerlendirmelerinde geleneksel olarak deterministik yöntemler (örneğin, CSR–CRR tabanlı FS yaklaşımları) uzun yıllar boyunca yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu tür analizlerin tekil bir eşik değerine dayalı olması, sahadaki belirsizlikleri yeterince yansıtamaması nedeniyle eleştirilmiştir. Bu nedenle son yıllarda istatistiksel

yöntemlerle desteklenen olası sıvılaşma (PL: Sıvılaşma Olasılığı) analizleri geliştirilmiştir (Seed vd., 2003; Cetin vd., 2004).

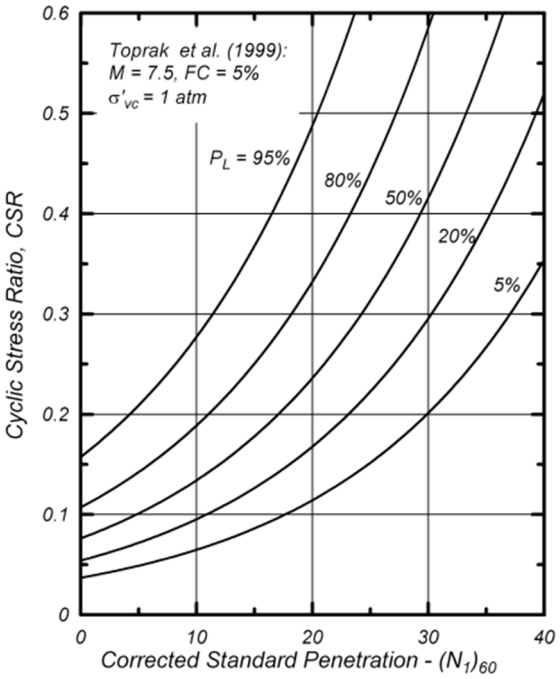
PL yaklaşımı, belirli bir sismik yükleme düzeyi ve zemin direnci kombinasyonu için sıvılaşma olasılığını (0 ile 1 arasında bir değer) tahmin eder. Bu tür yöntemler genellikle saha verilerine dayalı olarak oluşturulan lojistik regresyon analizleriyle gerçekleştirilir. Idriss & Boulanger (2008), bu yaklaşımın teorik temelini özetleyerek, farklı saha verisi kümelerine dayalı PL modellerinin nasıl geliştirildiğini detaylandırmıştır.

Lojistik regresyon modeli aşağıdaki genel formülle tanımlanır:

$$PL = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n)}} \tag{2.22}$$

Burada PL sıvılaşma olasılığı, β_0, β_1,...,, β_n regresyon katsayıları, x_1, x^2,..., x_n bağımsız değişkenlerdir (örneğin: CSR, $(N_1)_{60}$, PI, FC).

Bu modelde kullanılan bağımsız değişkenler hem zemin direnci hem de yükleme parametrelerini içerecek şekilde seçilir. Örneğin; CPT veya SPT tabanlı direnç göstergeleri, ince dane içeriği (FC), plastisite indeksi (PI), çevrimsel gerilme oranı (CSR), ve deprem büyüklüğü gibi parametreler regresyona dahil edilir.



Şekil 2.24. Lojistik regresyon modeliyle elde edilen PL–FS ilişkisi (Toprak vd.'den, 1999).

Şekil 2.24'de Toprak vd. (1999) modeli, CSR – $(N_1)_{60}$ eğrileri arasındaki farkın oldukça yüksek olması nedeniyle sıvılaşma olasılıklarının tahmininde daha geniş varyans içermektedir. Bu, P =%5 ile %95 arasındaki eğrilerin aralık farkının büyük olmasıyla kendini gösterir. Dolayısıyla, zemin direnci aynı olsa bile farklı CSR seviyelerinde daha belirsiz tahmin aralıkları söz konusudur.

PL yaklaşımlarının uygulanabilirliğini artırmak amacıyla geliştirilen modeller, saha gözlem verileriyle kalibre edilmiştir. Özellikle Cetin vd. (2004) tarafından sunulan geniş veri kümesi, PL tahmininde kullanılan parametrelerin önem düzeyini ortaya koymuştur. Bu çalışmada 210'dan fazla saha gözleminden oluşan bir veri seti kullanılarak, çoklu regresyon analizleriyle en uygun parametre kombinasyonları belirlenmiştir.

$$PL = \Phi\left(\frac{(N_{1,60}(1+0,004FC) - 13,32\ln(CSR_{eq}) - 29,53\ln(M_w) - 3,70\ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0,05FC + 16,85}{2,70}\right) \quad (2.23)$$

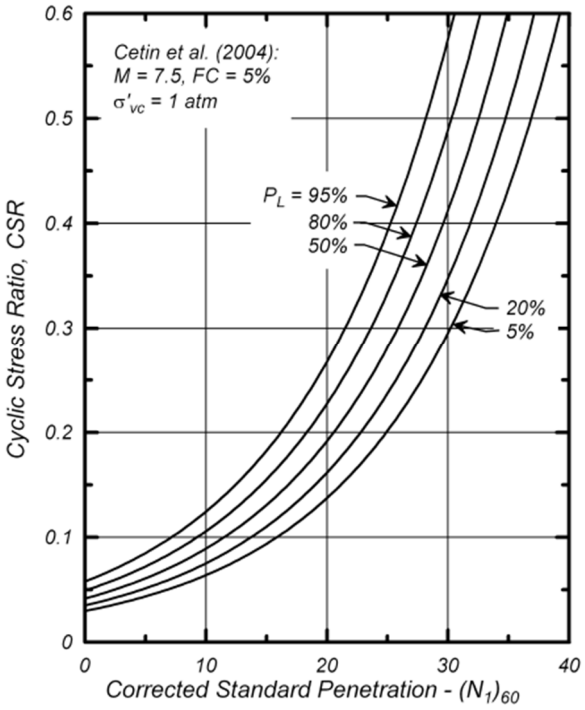
$$CRR = \exp\left(\frac{\left(N_{1,60}(1+0,004FC) - 29,53\ln(M_w) - 3,70\ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0,05FC + 16,85 - 2,70\Phi^{-1}(PL)\right)}{13,32}\right) \quad (2.24)$$

Çizelge 2.4 Cetin vd. (2004) formül değişkenleri

Sembol	Açıklama	Birim
PL	Sıvılaşma olasılığı	0-1
CSR	Çevrimsel gerilme oranı	Boyutsuz
$(N_1)_{60}$	Düzeltmeli SPT darbe sayısı (enerji, eğim vb. düzeltmeleri yapılmış)	Ad.
FC	İnce dane oranı (fine content)	%
σ_v'	Efektif düşey gerilme	kPa
P_a	Referans atmosferik basınç	101 kPa
M_w	Deprem moment magnitüdü	Mw (5–8)
CSR	Eşdeğer çevrimsel gerilme oranı	Boyutsuz
Φ(...)	Standart normal dağılım fonksiyonu	-

Cetin vd. (2004) modeline göre geliştirilen PL denkleminde yer alan parametreler Çizelge 2.4'te sunulmuştur. CSR değerleri herhangi bir yük, magnitüt düzeltmesi içermez.

Bu regresyon modeli sonucunda elde edilen PL değerleri, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi saha verileriyle test edilmiştir. Şekil 2.25'te bu PL eğrileri gösterilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde herhangi bir zemin profilinde belirli bir CSR – CRR oranına karşılık gelen olası sıvılaşma riski % olarak ifade edilebilmektedir. Eğri aralıkları Toprak vd. (1999)'a göre daha dardır.



Şekil 2.25. Gözlemsel verilerle kalibre edilen PL eğrisi ve hata sınırları (Cetin vd.'den, 2004).

PL modellerinin mühendislik tasarımlarında kullanılması, özellikle güvenlik katsayısı FS değerinin belirsizlik içerdiği sınırlarda (örneğin FS≈0,9–1,1) daha sağlıklı yorumlar yapılmasını sağlar. Bu geçiş bölgesi için deterministik yöntemler keskin sınırlar sunarken, PL eğrisi mühendislik riskini kademeli olarak sunar.

Çizelge 2.5. FS ve PL değerleri arasındaki tipik karşılaştırmalar.

FS Değeri	PL	Durum
0,6	0,90	Yüksek sıvılaşma riski
0,85	0,65	Orta düzey risk
1,0	0,50	Kararsız/Geçiş bölgesi
1,15	0,35	Düşük risk
1,3	0,20	Güvenli bölge

Çizelge 2.5'te bir sonraki bölümde işleyeceğimiz güvenlik katsayının olasılıksal yaklaşımda hangi değere geldiğini ve risk durumunu özetlemektedir.

Olasılıksal yaklaşım, risk temelli tasarım felsefelerine daha uygundur ve önleyici iyileştirme çalışmalarında maliyet-optimum çözüm arayışına katkı sağlar (Juang vd., 2003).

PL yöntemlerinin mühendislik uygulamalarındaki en önemli avantajı, karar alma süreçlerinde belirsizliği sayısallaştırarak daha esnek ve bilinçli çözümler sunmasıdır. Özellikle FS≈1,0 çevresinde kararsız sonuçlar üreten deterministik yöntemler yerine, PL eğrisinin sunduğu olası risk aralıkları, zemin iyileştirme, temel tasarımı ve şev stabilitesi gibi kritik mühendislik kararlarında tercih edilen yöntem hâline gelmiştir (Boulanger ve Idriss, 2006).

Özellikle karar destek sistemlerinde ve olay sonrası hasar senaryosu oluşturmada, PL yaklaşımı kritik avantajlar sunar. FEMA, USGS ve çeşitli deprem mühendisliği kurumlarının önerileri de son yıllarda FS tabanlı deterministik yaklaşımlara ek olarak PL analizlerinin de yapılmasını önermektedir (Youd vd., 2001).

PL yaklaşımı deterministik hesaplamaların yerini almak yerine onları tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilmelidir. Zemin özelliklerinin güvenilir şekilde belirlenebildiği durumlarda PL–FS birlikte kullanılarak hem sıvılaşma riski hem de bu riskin mühendislik kararları üzerindeki etkisi sayısal olarak değerlendirilebilir.

2.4.2. Güvenlik katsayısı yaklaşımı

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile çevrimsel direnç oranı (CRR) arasındaki orana dayanan güvenlik katsayısı (FS) hesaplamasıdır. Bu yöntem, ilk olarak Seed & Idriss (1971) tarafından geliştirilmiş olup, günümüze kadar çeşitli zemin türleri ve deneysel yöntemlerle uyarlanarak yaygınlaştırılmıştır. Idriss ve Boulanger (2008), bu yöntemin temel varsayımlarını, geçerlilik aralığını ve sınırlılıklarını kapsamlı şekilde incelemiştir.

Güvenlik katsayısı şu şekilde tanımlanır:

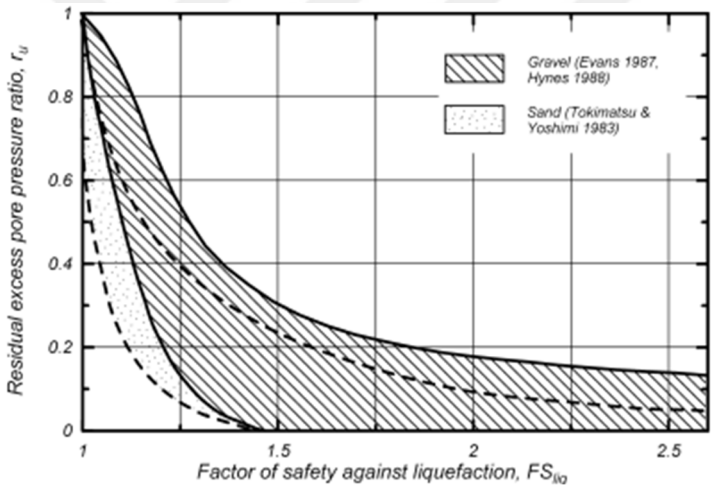
$$FS = \frac{CRR}{CSR} \tag{2.25}$$

Burada:

- FS : Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı,
- CRR : Sıvılaşma direnci (saha veya laboratuvar verisinden),
- CSR : Çevrimsel gerilme oranı (deprem yüklemesinden).

Bu tanım, sıvılaşmaya neden olan sismik yükleme (CSR) ile zeminin bu yüklemeye dayanma kapasitesi (CRR) arasındaki oranın 1,0'dan büyük olması hâlinde sıvılaşma meydana gelmeyeceği, 1,0'dan küçük olması durumunda ise sıvılaşma ihtimalinin bulunduğu varsayımına dayanır.

Bu yaklaşımda, farklı laboratuvar ve arazi deneylerine (örneğin SPT, CPT, BDT, CU-CTX) bağlı olarak CRR değerleri ampirik olarak elde edilir. Elde edilen bu CRR–CSR oranı, saha ölçümleri ve geçmiş deprem gözlemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilir.



Şekil 2.26. Boşluk suyu basıncı oranı güvenlik katsayısı (Marcuson vd., 1990)

Şekil 2.26'da düz zemin koşullarında sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı çevrimsel yükleme sonrası zeminde kalan rezidüel boşluk suyu basıncı oranı göstermektedir. Grafik, FS değeri arttıkça r_u değerinin azaldığını; ancak FS=1,2 gibi güvenli kabul edilen koşullarda bile zeminde 0,1–0,65 aralığında kalıcı boşluk suyu basıncının var olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sıvılaşma oluşmasa dahi deformasyon riskinin tamamen ortadan kalkmadığını göstermektedir.

Bununla birlikte, tekil bir eşik değeri kullanılması bazı sınırlamaları da beraberinde getirir. Çünkü saha verilerinde FS=1,0 sınırında dahi hem sıvılaşan hem sıvılaşmayan örneklere rastlanmaktadır. Bu nedenle, FS yaklaşımı mühendislik kararlarında tek başına

yeterli bir ölçüt olarak değil, genellikle PL yöntemiyle birlikte değerlendirilmelidir (Seed vd., 2003).

FS yönteminin uygulama başarısı, CRR eğrisinin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu eğriler, farklı saha deneylerine dayalı olarak zemin özellikleriyle ilişkilendirilmiş olup, çeşitli deprem büyüklükleri için büyüklük düzeltme katsayısı (MSF) ile birlikte kullanılmaktadır. Laboratuvar tabanlı yaklaşımlarda CRR değeri doğrudan deneyle belirlenirken, arazi testlerine dayalı sistemlerde aşağıdaki formül kullanılır.

$$FS = \frac{CRR_{M=7,5}}{CSR \times MSF} \tag{2.26}$$

Idriss & Boulanger (2008) tarafından önerilen bu formülasyon, saha verilerine dayalı CRR eğrilerinin M=7,5 büyüklüğüne kalibre edilmesini esas alır. Bu sayede, deprem büyüklüğüne göre değişen yükleme süresi ve çevrim sayısı etkisi MSF ile telafi edilerek analizde tutarlılık sağlanır. Tipik MSF değerleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.6. Deprem büyüklüğüne göre önerilen MSF katsayıları (Boulanger & Idriss'den, 2008).

Deprem Büyüklüğü (M_w)	**MSF Değeri**
6,5	1,45
7,0	1,15
7,5	1,00
8,0	0,85

M_w büyüdükçe MSF azalmaktadır. Çünkü büyük depremler daha uzun sürede daha fazla çevrim oluşturduğundan, aynı CSR düzeyinde bile sıvılaşma olasılığı artar. FS yaklaşımının bu şekilde MSF ile entegre edilmesi, farklı deprem senaryoları arasında karşılaştırma yapılabilmesini sağlar.

Saha verilerinin belirsizlik içermesi durumunda FS hesaplamaları üzerinde hata aralıkları oluşabileceğinden, CRR ve CSR değerleri arasında ±%10–20 varyasyonlar mühendislik uygulamalarında göz önünde bulundurulmalıdır (Seed vd., 2003).

2.4.3. Cpt, spt ve çok parametreli regresyon yaklaşımı

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde saha deneylerine dayalı yaklaşımlar, mühendislik uygulamalarında geniş kabul görmektedir. Bu yöntemlerin başında Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) gelmektedir. Her iki yöntem de zemin direncinin yerinde ölçülmesini sağlar; ancak CPT, sürekli profil elde etmesi, daha düşük operatör etkisi ve gelişmiş sensör teknolojileriyle son yıllarda daha fazla tercih edilmektedir (Idriss & Boulanger, 2008).

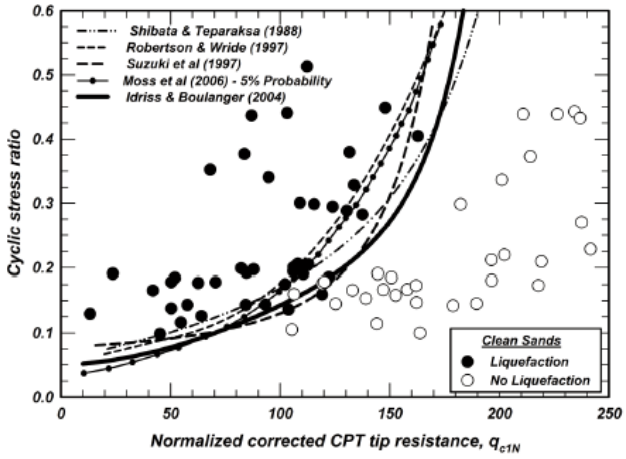
SPT tabanlı sıvılaşma analizlerinde, genellikle $(N_1)_{60}$ ve $(N_1)_{60cs}$ değerleri kullanılarak CRR değerleri ampirik olarak belirlenir. CPT tabanlı değerlendirmeler ise, sürekli veri sağlaması ve modern elektronik sistemlerle hassas ölçüm yapabilmesi nedeniyle daha istikrarlı sonuçlar üretmektedir. CPT'de kullanılan temel parametre, düzeltilmiş edilmiş konik uç direncidir.

$$q_{c1N} = q_c \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^n \tag{2.27}$$

Burada:

- q_{c1N} : düzeltilmiş konik uç direnci,
- q_c : konik uç direnci
- σ_v' : efektif düşey gerilme,
- P_α : atmosfer basıncı,
- n : 0,5–1,0 arasında değişen ampirik katsayıdır.

Bu normalize edilmiş direnç değeri, CSR değerine göre değişimi çizdirilerek sıvılaşma sınır eğrisi oluşturulur.



Şekil 2.27. CPT temelli sıvılaşma sınır eğrisi: q_{c1N} – CSR ilişkisi (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.27'de düzeltilmiş konik uç direnci q_{c1N} ile çevrimsel gerilme oranı (CSR) arasındaki ilişkiyi farklı araştırmacılar tarafından önerilen sıvılaşma sınır eğrileri çerçevesinde sunmaktadır. Grafik, temiz kumlar için hazırlanmış saha verilerinden oluşmaktadır. Dolu daireler sıvılaşma gözlenen boş daireler ise sıvılaşma gözlenmeyen durumları temsil etmektedir. Eğriler, Shibata & Teparaksa (1988), Robertson & Wride (1997), Suzuki vd. (1997), Moss vd. (2006) ve Idriss & Boulanger (2004) grafikte yer almaktadır. Idriss & Boulanger (2004) tarafından önerilen eğri, M_w=7,5 ve σ'_v>=1atm koşullarına göre normalize edilmiş olup CPT tabanlı sıvılaşma tahmininde en güncel ve mühendislikte yaygın kullanılan modellerden biridir. Grafik, q_{c1N} değerinin artışıyla zemin direncinin arttığını ve dolayısıyla sıvılaşma riskinin azaldığını açıkça göstermektedir. Özellikle Moss vd. (2006) tarafından önerilen 5% sıvılaşma olasılığı eğrisi ile Idriss ve Boulanger (2004) eğrisinin birbirine yakınlığı, farklı yöntemlerle ulaşılan modellerin benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.

CPT verileri ile elde edilen bu eğriler, farklı ince dane oranı ve plastisite indeksi koşulları için ayrı ayrı çizilebilir. Ayrıca CPT verilerine dayalı regresyon formülleri ile PL hesaplaması da yapılabilir.

CPT ve SPT tabanlı analizlerin sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesinde sunduğu verilerin anlamlı hâle gelmesi, yalnızca tek bir parametreyle açıklanamamaktadır. Çok sayıda zemin ve yükleme parametresine dayalı regresyon modellerine bağlıdır. Bu bağlamda, çoklu regresyon analizi ile geliştirilen modellerde CSR, CRR, $(N_1)_{60cs}$, $q_{c1N,}$ FC,

PI, σ_v', M_w gibi değişkenler bir arada değerlendirilerek daha güvenilir sıvılaşma tahminleri yapılabilir (Moss vd., 2006). Çetin vd. (2004) olasılıksal denklemi Bölüm 2.4.1'de sunulmuştu. Bu model SPT deney verilerini baz alan bir denklemdi. Moss vd. (2006) CPT deney verilerini esas olarak aşağıdaki modeli geliştirmiştir:

$$PL = \Phi\left(\frac{\left(q_{c,1}{}^{1,045} + q_{c,1}(0,110R_f) + (0,001R_f) + c\cdot(1+0,850R_f) - 7,177\ln(CSR) - 0,848\ln(M_w) - 0,002\ln(\sigma_v') - 20,923\right)}{1,632}\right) \tag{2.28}$$

$$CRR = \exp\left(\frac{\left(q_{c,1}{}^{1,045} + q_{c,1}(0,110R_f) + (0,001R_f) + c(1+0,850R_f) - 0,848\ln(M_w) - 0,002\ln(\sigma_v') - 20,923 + 1,632\Phi^{-1}(PL)\right)}{7,177}\right) \tag{2.29}$$

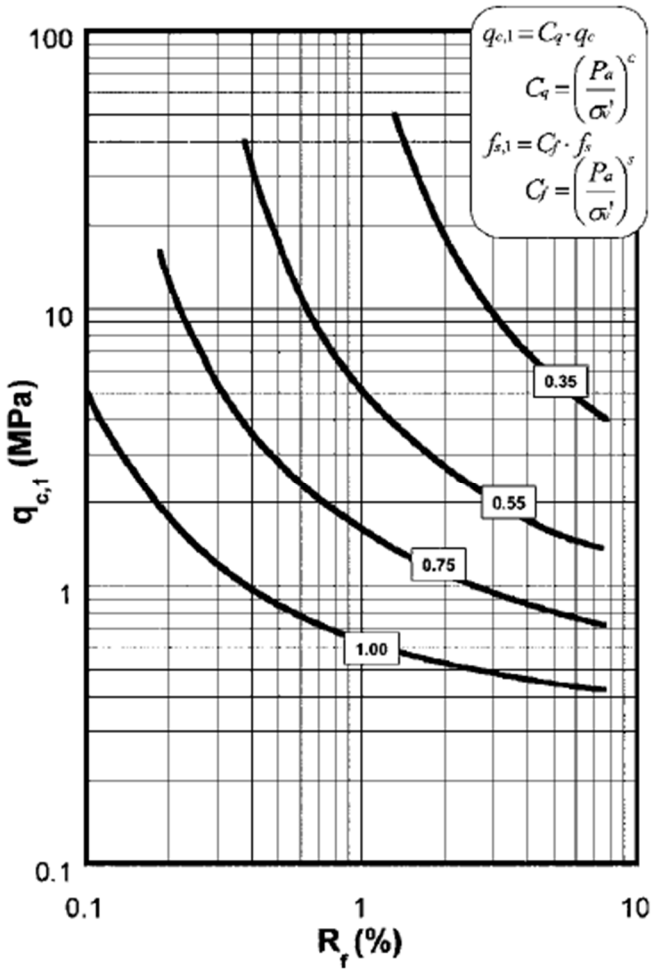
$$q_{c1} = C_q \cdot q_c \tag{2.30}$$

$$C_q = \left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^c \tag{2.31}$$

$$Rf = \left(\frac{f_s}{q_c}\right)\cdot 100 \tag{2.32}$$

Çizelge 2.7. Moss vd. (2006) denklem parametreleri

Sembol	**Açıklama**
PL	Sıvılaşma olasılığı
Φ	Standart normal dağılım fonksiyonu
f_s	Sleeve sürtünme direnci
q_c	Ölçülen CPT uç direnci
C_q	Düzeltme katsayısı
$q_{c,1}$	Düzeltilmiş CPT uç direnci
R_f	CPT sürtünme oranı
c	CPT analizinden türetilmiş sabit
CSR	Çevrimsel gerilme oranı
M_w	Deprem moment büyüklüğü
σ_v'	Efektif gerilme
P_a	Atmosfer Basıncı



Şekil 2.28. CPT tabanlı PL modeli c katsayısı kalibrasyon eğrisi (Moss vd.'den, 2006)

Moss vd. (2006) modeline göre PL ve CRR denklemlerinde yer alan parametreler Çizelge 2.7'de sunulmuştur. CSR değerleri herhangi bir yük, magnitüt düzeltmesi içermemektedir. Ayrıca Şekil 2.28'de c katsayısı bulunması adına abak sunulmuştur.

Literatürde bu denklemlere benzer birçok model bulunmaktadır. Boulanger ve Idriss (2008) CPT/SPT uyumlu PL ve FS modelleri, Juang vd. (2002) karar-ağaçları temelli PL modelleri bunlara örnek olarak verilebilir.

Bu tür modellerin başarısı, kullanılan veri setinin kalitesine ve değişkenler arası korelasyonun doğru modellenmesine bağlıdır.

Bu tür çok parametreli modeller, yalnızca saha verisiyle uyumlu değil, aynı zamanda belirsizlikleri de içine alan probabilistik tahminler sundukları için mühendislik açısından daha uygundur.

CPT ve SPT temelli modellerin her biri, saha koşullarına bağlı olarak avantajlar ve sınırlamalar sunar. CPT'nin veri yoğunluğu ve daha düşük kullanıcı bağımlılığı gibi avantajlarına karşın, bazı zemin türlerinde (örneğin çakıllı zeminler) penetrasyonun zorlaşması gibi sınırlamaları vardır. Öte yandan SPT, özellikle dünya genelindeki zemin araştırmalarında çokça kullanıldığından, geçmiş deprem gözlemleriyle doğrudan ilişkilendirilebilecek güçlü bir referans sağlar (Idriss ve Boulanger, 2008).

Çizelge 2.8. CPT ve SPT temelli yöntemlerin karşılaştırılması.

	CPT	**SPT**
Veri	Sürekli	Noktasal
Operatör Etkisi	Düşük	Yüksek
Kum Zemin Uygunluk	Yüksek	Yüksek
Çakıllı Zemin Uygunluk	Düşük	Orta–Yüksek
PL/FS Hesaplamaları	Gelişmiş	Gelişmiş

Çizelge 2.8'de model karşılaştırma tablosu sunulmuştur. Çok parametreli regresyon modelleri, bu iki test yönteminden elde edilen verileri birleştirerek melez modellemeler geliştirilmesine de olanak tanır. Örneğin, CPT tabanlı q_{c1N} değerine ek olarak yerel SPT verileriyle kalibre edilen modeller, sahada karar destek sistemi olarak çalışacak şekilde yapılandırılabilir (Juang & Jiang, 2000; Boulanger & Idriss, 2006).

Bu modellerin avantajlarını sıralarsak; sahaya özel PL hesaplamaları yapılabilmektedir, hem gerçek bir durum ve tahmin senaryosu bazlı analiz yapılabilir, belirsizlik içeren verilerle dahi mantıklı tahminler üretilebilir.

Bu modelin dezavantajlarını sıralarsak; kalibrasyon dışı kullanıldığında yanıltıcı sonuçlar verebilmesi, ampirik modelin geçerli olduğu parametre aralıklarının dışına çıkılamaması, giriş verilerindeki ölçüm hataları PL/FS sonuçlarını etkilemesi olarak sayılabilir.

CPT ve SPT temelli sıvılaşma modelleri, güçlü saha verisi ile desteklenmeli ve her zaman deneysel/istatistiksel sınırları içinde kullanılmalıdır. Özellikle çok değişkenli regresyon yapılarının uygulanmasında model sınırlarının, veri kalitesinin ve istatistiksel geçerliliğin net biçimde tanımlanması, sıvılaşma mühendisliğinde güvenilirliğin temelidir.

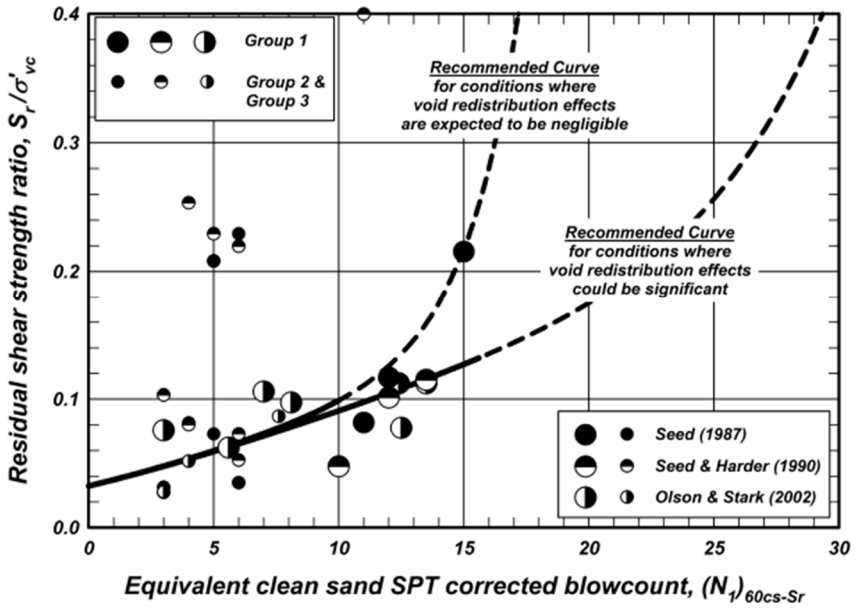
2.5. Sıvılaşma Sonrası Zemin Davranışı

2.5.1. Rezidüel kayma dayanımı

Zemin sıvılaştıktan sonra zemin tanecikleri arasındaki efektif gerilmeler büyük ölçüde azalır ve boşluk suyu basıncı neredeyse toplam gerilmeye yaklaşır. Bu durum, kayma dayanımının belirli bir sınır değere düşmesine neden olur. Bu düşüş sonrasında zemin, sıvılaşmış halde iken çevresel yüklemelere artık sabit veya düşük seviyeli bir kayma dayanımı ile karşı koyar. Bu değer, rezidüel kayma dayanımı olarak adlandırılır.

Rezidüel kayma dayanımı, sıvılaşmış zeminlerde meydana gelebilecek akma veya yanal yayılma gibi olayların analizinde kritik öneme sahiptir. Bu dayanım seviyesi, sıvılaşma sonrasında zeminin stabiliteyi sürdürüp sürdüremeyeceğini belirler. Eğer dış yüklemeler bu artık dayanımı aşarsa zemin kütlesi kayma hareketine geçer.

Rezidüel kayma dayanımı, efektif gerilmenin sıfıra yaklaştığı koşullarda bile zemin taneciklerinin yeniden yapılanması ve sürtünme temaslarıyla sağlanan direnç seviyesidir. Bu direnç hem laboratuvar deneylerinde hem de gerçek saha olaylarında gözlemlenebilmektedir. Şekil 2.29'da sıvılaşma sonrası zemin davranışının karakteristik direnci gösterilmiştir. Şekilde, sıvılaşma sonrası meydana gelen artık dayanımın normalize hali SPT'ye dayalı $(N_1)_{60cs}$ değeri ile ilişkilendirilmiştir. Grafik, boşluk suyu dağılımının etkisine göre iki farklı zemin davranışını temsil eden eğrileri içerir. Üst eğri daha sıkı, geçirgen ve drenaj koşulları olan zemini ifade eder. Alt eğri ise gevşek ve drenajsız koşulları olan zemini ifade eder. Bu yaklaşım, saha verilerine dayalı olarak sıvılaşma sonrası stabilite değerlendirmelerinde kullanılabilecek pratik bir gösterim sunar. Rezidüel kayma dayanımı analizlerinde kullanılan saha verileri güvenilirliklerine göre üç gruba ayrılmıştır. Grup 1 en güvenilir verileri temsil ederken, Grup 3 daha belirsiz ve tamamlayıcı nitelikteki örnekleri kapsamaktadır. Idriss ve Boulanger (2008) tarafından sunulan grafiklerde genellikle Grup 1 ve 2 verileri esas alınmıştır.

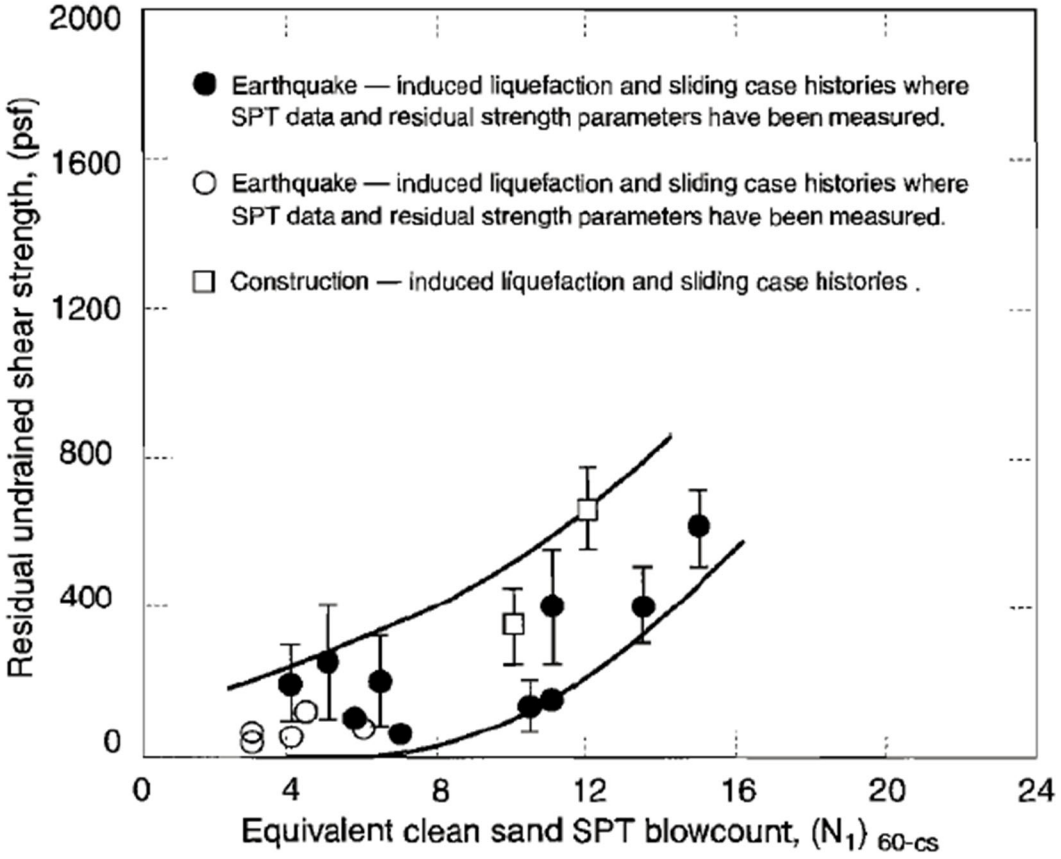


Şekil 2.29. Rezidüel kayma dayanımının normalize efektif gerilmeye göre saha verileri ile ilişkisi (Idriss & Boulanger'den, 2008).

Sıvılaşma sonrası analizlerde kritik nokta zemin kütlesinin bu artık dayanım ile stabil kalıp kalamayacağıdır.

Rezidüel kayma dayanımının belirlenmesi için başlıca iki yöntem vardır. Bunlar saha gözlemlerine dayalı ampirik tahminler ve laboratuvar deneyleridir. Saha gözlemleri, daha çok geçmişte sıvılaşma sonrası meydana gelmiş akma tipli zemin hareketlerinin analizine dayanır. Bu analizlerde, zemin hareketi sırasında mevcut topoğrafya, kayma yüzeyi eğimi, geometri ve zemin parametreleri kullanılarak geriye dönük artık kayma dayanımı tahmin edilir.

Laboratuvar deneyleri ise numune üzerinde doğrudan sıvılaşma koşulları oluşturularak yapılan testlerdir. Bu testlerde, numune önce sıvılaştırılır ve ardından uygulanan kayma gerilmesine karşı verdiği kalıcı direnç değeri ölçülür. Özellikle kesme halkası deneyleri rezidüel dayanımın laboratuvar ortamında güvenilir şekilde belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.30. Rezidüel dayanım ile düzeltilmiş SPT direnci arasındaki ilişki (Seed ve Harder'dan, 1990).

Seed ve Harder (1990) çoğu akma kaymalarını yeniden incelemiş ve yeni veriler de ekleyerek rezidüel dayanım ile eşdeğer temiz kumun SPT direnci arasında bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 2.30).

Idriss ve Boulanger (2008), çok sayıda saha ve laboratuvar verisini bir araya getirerek, artık kayma dayanımının rölatif sıkılık (D_r) ve boşluk oranı (e) gibi zemin parametreleriyle ilişkisini incelemişlerdir. Bununla birlikte, mühendislik uygulamaları açısından daha pratik ve kullanılabilir bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Rezidüel dayanım, genellikle statik kayma dayanım oranı olarak ifade edilir. Bu oran, efektif gerilme cinsinden normalize edilmiş kayma dayanımı olup şu şekilde tanımlanır:

$$(N_1)_{60cs-Sr} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60-Sr} \tag{2.33}$$

$$\frac{S_r}{\sigma'_v} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs-Sr}}{16} + \left(\frac{(N_1)_{60cs-Sr} - 16}{21.2}\right)^3 - 3.0\right) \times \left(1 + \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs-Sr}}{2.4} - 6.6\right)\right) \leq \tan\phi' \quad (2.34)$$

$$S_r = \frac{\tau_{residual}}{\sigma'_v} \quad (2.35)$$

Burada $(N_1)_{60cs-Sr}$ rezidüel kayma dayanımı tahmini amacıyla kullanılan ince dane içeriği etkisine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı, $\Delta(N_1)_{60-Sr}$ ince dane içeriğine göre ilave düzeltme katsayısı, $(N_1)_{60}$ düzeltilmiş SPT darbe sayısı, σ_v' efektif düşey gerilme, S_r rezidüel gerilme, $\tau_{residual}$ rezidüel kayma gerilmesidir. Bu oran, çoğu mühendislik analizinde sabit bir değer olarak kabul edilir. Stark ve Mesri (1992), normalize edilmiş rezidüel dayanım oranı S_r/σ_v' kullanımı ile sıvılaşma sonrası stabilite analizlerinde yön veren ilk kapsamlı çerçeveyi sunmuşlardır. Idriss & Boulanger (2008) sahada karşılaşılan tipik zeminler için aşağıdaki Çizelge 2.9'da önerilen aralıkları sunmuşlardır.

Çizelge 2.9. Kum zemin sıkılıklarına göre önerilen S_r Oranları (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Zemin Tipi	**Önerilen S_r Oranı**
Gevşek kum	0,05 – 0,10
Orta sıkı kum	0,10 – 0,15
Sıkı kum	0,15 – 0,20
Siltli kum	0,07 – 0,12

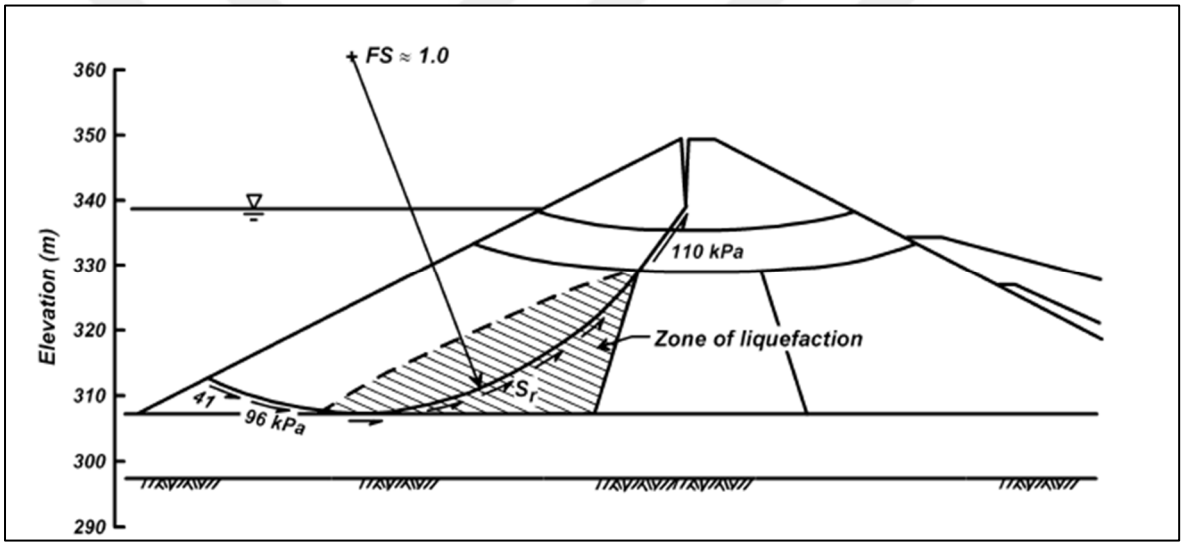
Bu değerler, özellikle zemin akmalarının ve büyük yanal yayılmaların değerlendirilmesinde doğrudan stabilite analizlerine için kullanılmaktadır. Akma tipi zemin hareketlerinin geriye dönük analizlerinde Olson ve Stark (2002) tarafından San Fernando Barajı gibi yapılar üzerinde yapılan saha bazlı artık dayanım tahminleri sıkça referans alınmaktadır.

Rezidüel kayma dayanımı (S_r) değerinin en kritik kullanım alanı sıvılaşma sonrası stabilite analizleridir. Akma tipi sıvılaşma riski bulunan eğimli alanların güvenliğinin belirlenmesi, kazıklı temellerin sıvılaşmış zeminlerde davranışlarının analizi, baraj ve dolgu

yapılarında sıvılaşma sonrası potansiyel göçme değerlendirmeleri için bu analizler gerçekleştirilmektedir.

Bu analizlerde genellikle aşağıdaki iki durum ele alınır. Sıvılaşma başlamadan önceki denge durumu bunların ilkidir. Zemin CRR değeri ile sıvılaşmaya karşı koymaktadır. Sıvılaşma sonrası denge durumu içinse CRR aşılmış, zemin sıvılaşmış, artık dayanım olan S_r ile stabil kalmaya çalışmaktadır.

Eğer dış yüklemeler, zemin tarafından S_r ile karşılanamıyorsa zemin kütlesi akma yönünde hareket eder. Bu durum özellikle sahil dolguları, liman platformları ve nehir yamaçları gibi bölgelerde yıkıcı sonuçlar doğurabilmektedir.



Şekil 2.31 Sıvılaşma öncesi–sonrası zemin stabilite davranışı şematik gösterimi (Kaynak: Idriss & Boulanger'den, 2008).

Şekil 2.31'de görüldüğü üzere, zemin sıvılaşmadan önce yük–dayanım eğrisinde bir denge noktasındayken, sıvılaşma sonrası aynı yük seviyesinde S_r ile dengenin sağlanamadığı ve hareketin başladığı gösterilmektedir.

Rezidüel kayma dayanımı, çoğu zaman tekil bir sayı ile ifade edilse de bu parametrenin belirsizlik aralığı geniştir. Numune hazırlığı ve çevresel koşullar laboratuvar sonuçlarını etkilemektedir. Sahada oluşan drenaj koşulları da S_r'yi doğrudan etkiler. Zeminin yeniden toparlama kabiliyeti tanecik şekline, sıkılığa ve mineralojik yapıya bağlıdır. Bu nedenle Idriss ve Boulanger (2008), mühendislik projelerinde rezidüel dayanım

değerinin daha seçici alınmasını, Farklı zemin tipleri için önerilen aralıklar dışına çıkılmamasını ve olası akma analizlerinin sınır durum olarak modellenmesini önermektedir. Ayrıca, mümkünse sahaya özgü kalibrasyon yapılması ve kritik yapıların altında bulunan zeminler için doğrudan halka kesme deneyi önerilmektedir.

2.5.2. Sıvılaşma sonrası yanal yayılma ve deformasyon analizi

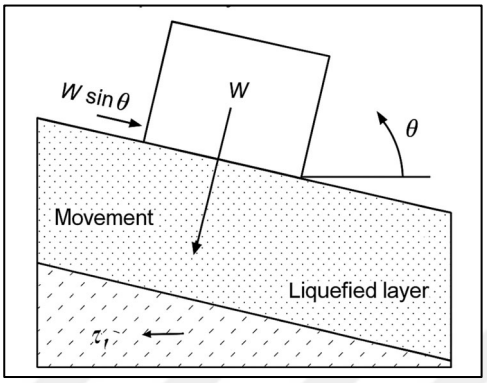
Sıvılaşma sonrasında zemin, artık kayma dayanımı seviyesine (S_r) düşer ve etkin gerilmeler büyük ölçüde ortadan kalkar. Bu koşullarda, zemine etkiyen dış kuvvetlerin mevcut artık dayanımı aşması durumunda, eğim doğrultusunda kayma hareketi meydana gelir. Bu tip davranışlar, özellikle eğimli arazilerde veya serbest yüzey yakınlarında ortaya çıkan ve akma sıvılaşması ya da yanal yayılma olarak bilinen zemin hareketleriyle sonuçlanabilir (Idriss ve Boulanger, 2008).

Bu tür deformasyonları değerlendirmek için geliştirilen yer değiştirme bazlı analiz yöntemleri, zemin kütlesinin sıvılaşma sonrası ne ölçüde yatay hareket göstereceğini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Yöntemler özellikle yanal yayılma ve yüzeysel akma sıvılaşması gibi farklı senaryolar için kullanılır. Bu kapsamda yapılan çok sayıda çalışma, saha gözlemlerine dayalı ampirik modellerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Youd vd. (2002), Bartlett ve Youd (1995) ve Rauch ve Martin (2000) tarafından önerilen modeller zemin tipi, eğim, sıvılaşan tabaka kalınlığı gibi parametrelere bağlı olarak yanal yayılmayı çok değişkenli regresyon denklemleri ile tahmin etmektedir. Tokimatsu ve Asaka (1998), yanal yayılma seviyesinin yüzeye olan mesafeden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmiştir. Zhang vd. (2004) ve Faris vd. (2006) ise deprem büyüklüğü, yüzey topografyası ve statik kayma gerilmesi gibi parametrelerin etkisini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir.

Idriss ve Boulanger (2008), bu geniş literatür temelinde, yanal yayılma analizini rijit cisim modeli ile açıklamışlardır. Bu modelde sıvılaşmış zemin kütlesi, rezidüel kayma dayanımı ile sınırlanmış bir dirençle eğim doğrultusunda hareket eder. Hareketin başlaması, eğim yönündeki momentin rezidüel dayanım tarafından sağlanan direnç momentini aşması ile mümkün olur. Bu durum, rijit bir cisim varsayımı altında moment dengesiyle ifade edilmektedir.

$$\sum M = (W \cdot \sin\theta - \tau_{residual} \cdot A) \cdot l \tag{2.36}$$

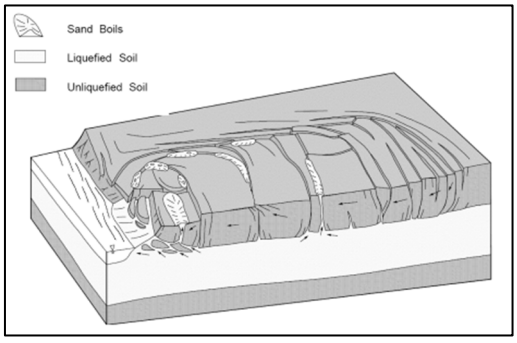
Denklemde W zemin kütlesinin ağırlığını, θ eğim açısını, $\tau_{residual}$ artık kayma dayanımını, A kayma yüzeyinin alanını ve l moment kolunu temsil eder. Eğer bu moment dengesi pozitif yönlü ise, zemin kütlesi harekete geçer ve belirli bir yer değiştirme meydana gelir. Bu yaklaşımın kavramsal temsili Şekil 2.32'de gösterilmiştir.



Şekil 2.32. Sıvılaşma sonrası yer değiştirme modeli: rijit cisim yaklaşımı (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Burada sıvılaşan zemin tabakası, daha yüksek yerlerde konumlanan ve eğim etkisi altında hareket edebilecek durumda olan bir rijit kütle gibi modellenmiştir. Bu kütle, artık dayanımıyla sınırlı bir direnç gösterirken, eğim doğrultusunda net moment fazlalığı oluştuğunda hareket eder. Böylece analiz, sıvılaşma sonrası zemin davranışının yalnızca kararlı olup olmadığını değil, aynı zamanda ne ölçüde yatay yer değiştirme göstereceğini de tahmin etmeyi sağlar.

Yanal yayılma durumlarında zemin kütlesi genellikle düşük eğimli (%0,5–5 arası) alanlarda yüzeysel olarak sıvılaşmakta ve dış kuvvetlerin etkisiyle yatay yönde hareket etmektedir. Bu tür durumlarda rijit kütle yaklaşımı, zemin hareketinin yaklaşık büyüklüğünü tahmin etmede pratik ve yeterli bir ilk yaklaşım sağlar.



Şekil 2.33. Sıvılaşma sonrası yanal yayılma, rijit cisim hareketi modeli (Rauch'dan,1997).

Şekil 2.33'te zemin sıvılaşmasının ardından meydana gelen yanal yayılma olaylarındaki yer değiştirme desenlerini göstermektedir. Genellikle yüzeysel veya hafif eğimli arazilerde, açık yüzeyler veya kanal kenarlarına doğru gelişen bu deformasyonlar, farklı yönlerde ve şiddetlerde dağılmıştır.

Yanal yayılma analizlerinde analizlerde hareketin büyüklüğü, zemin profilinin eğimi, tabaka kalınlığı, artık dayanım seviyesi ve jeoteknik parametreler ile ilişkilendirilerek hesaplanır. Rijit davranış varsayımı altında kütle, denge sınırının ötesinde moment kazandığı sürece kaymaya devam eder. Bu yer değiştirme, hareket boyunca ivme-zaman bağımlı bir çözüm gerektirmeden, toplam net kuvvet etkisine göre hesaplanabilir.

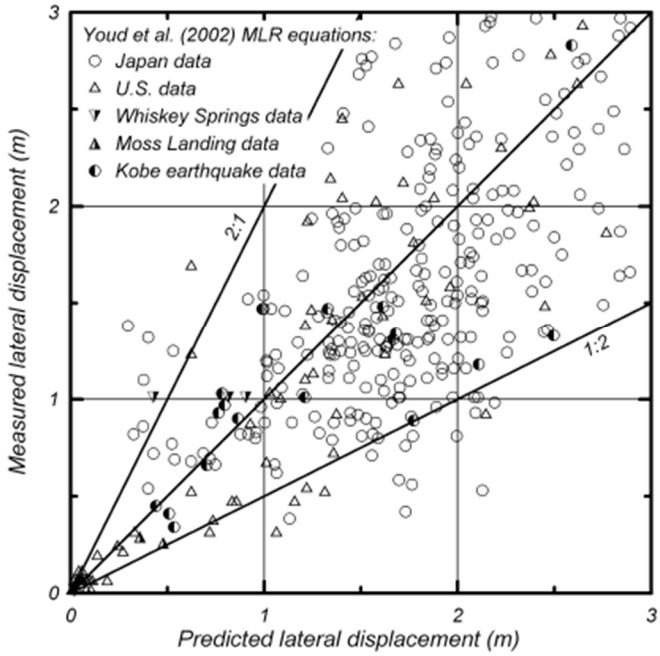
Bu bağlamda önerilen yer değiştirme miktarı, aşağıdaki basit enerji-denge yaklaşımıyla tahmin edilir:

$$\Delta x = \frac{2 \cdot (W \cdot \sin\theta - \tau_{residual} \cdot A) \cdot l}{m \cdot g} \tag{2.37}$$

Burada; Δx yer değiştirme, m hareket eden kütlenin kütlesi, g yerçekimi ivmesidir.

Bu denklemde, rijit cisim üzerindeki net kuvvet momenti belirli bir süre boyunca harekete dönüşürken enerji kayıpları göz önüne alınmadan yer değiştirmeye aktarılmış olur. Uygulamada, hareketin başlama koşulu Denklem 2.36 ile test edilirken, oluşacak yer değiştirme büyüklüğü Denklem 2.37 ile tahmin edilir.

Saha verilerine dayanan regresyon modelleri, bu teorik çerçevenin kalibre edilmesini sağlar. Youd vd. (2002) tarafından geliştirilen model, 1990'lara kadar kaydedilmiş deprem sonrası yanal yayılma olaylarını kapsayan geniş bir veri tabanı kullanılarak türetilmiştir. Model, sıvılaşan tabakanın kalınlığı, serbest yüzeye olan mesafe, su tablası konumu, eğim, zemin türü ve moment büyüklüğü gibi değişkenleri içeren çok parametreli bir yapıya sahiptir. Özellikle siltli kumlu zeminlerde eğimin %3'ten az olduğu alanlarda modelin doğruluğu yüksektir. Şekil 2.34'te yer değiştirme tahmin eğrileri sunulmuştur.



Şekil 2.34. Regresyon temelli yer değiştirme tahmini eğrileri (Youd vd.'den, 2002).

Benzer şekilde Rauch ve Martin (2000) tarafından önerilen EPOLLS modeli (Empirical Prediction of Liquefaction-induced Lateral Spreading) de çeşitli zemin türleri için yer değiştirme tahmini sağlar. Zhang vd. (2004) ise CPT verileri kullanarak sıvılaşma sonrası yer değiştirmeleri öngören farklı bir ampirik yapı sunmuştur.

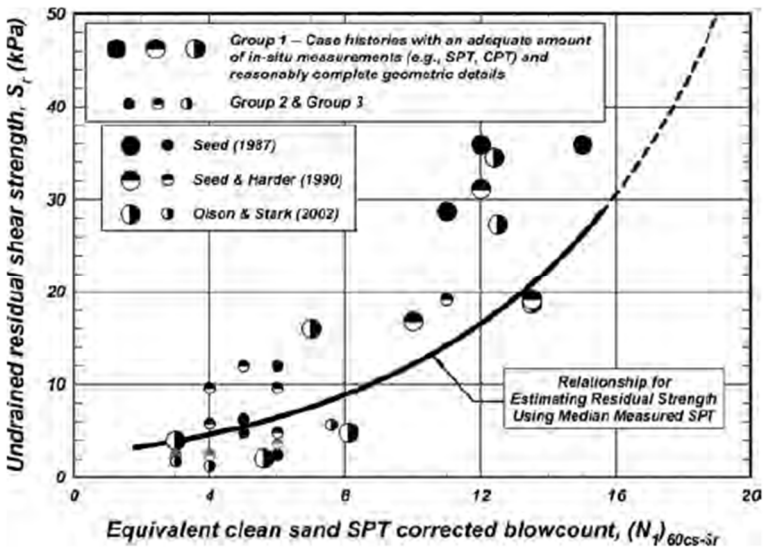
Bu model farklılıkları, analiz yapılacak zemin profilinin türüne ve verilerin mevcudiyetine göre mühendislik yaklaşımını şekillendirmektedir. Idriss ve Boulanger (2008), rijit cisim yaklaşımının yukarıda sayılan saha modelleriyle uyumlu biçimde kullanılması gerektiğini ve analizde her zaman en az iki farklı modelle karşılaştırmalı tahmin yapılmasının güvenilirliği artıracağını vurgulamıştır.

2.5.3. Sıvılaşma sonrası stabilite sınırlarının değerlendirilmesi

Sıvılaşma sonrası zemin davranışına ilişkin mühendislik analizlerinde en kritik aşamalardan biri, zemin kütlesinin artık kayma dayanımı (S_r) ile stabil olup olmadığının belirlenmesidir. Bu değerlendirme, özellikle eğimli zeminlerde, dolgu barajlarında, nehir kenarı dolgularında ve yanal yayılmaya açık alanlarda güvenliğin temelini oluşturur (Idriss ve Boulanger, 2008).

Bir zemin birimi, sıvılaşma sonrasında S_r seviyesinde sınırlı bir direnç göstereceğinden, herhangi bir ek dış kuvvetin bu dayanımı aşması durumunda akma şeklinde yer değiştirme meydana gelir. Bu nedenle mühendislik tasarımlarında, zemin kütlesinin mevcut eğim ve dış yükleme koşullarında sıvılaşma sonrası stabilitesini sağlayıp sağlayamayacağı özel olarak değerlendirilmelidir.

Bu tür stabilite analizlerinde sıklıkla Olson ve Stark (2002) tarafından önerilen kritik sınır eğrileri kullanılmaktadır. Bu eğriler, geçmiş saha gözlemlerine ve deneysel verilere dayalı olarak, sıvılaşma sonrası zeminlerin stabil kalıp kalamayacağına ilişkin ampirik sınırları ortaya koymaktadır. Olson ve Stark (2002) tarafından yürütülen çalışmalarda bu sınırların kalibrasyonunda temel alınmıştır. Şekil 2.35'te bu sınır eğirişi sunulmuştur.



Şekil 2.35. Olson ve Stark (2002) tarafından tanımlanan sıvılaşma sonrası stabilite sınır eğrileri (Idriss ve Boulanger'den, 2008).

Bu eğriler, zemin profilinin eğimi ve zemin tipiyle ilişkili olarak rezidüel kayma dayanımının efektif gerilme ortamındaki stabiliteyi sağlayıp sağlayamayacağını belirler. Eğrilerin altında kalan bölgelerde zemin genellikle stabil kabul edilirken, eğrilerin üstünde kalan alanlarda zemin stabil değildir ve yer değiştirme potansiyeli yüksektir.

Idriss ve Boulanger (2008), bu sınır eğrilerinin farklı zemin türleri (gevşek kum, orta sıkı kum, siltli kum) için değişebileceğini ve mühendislik projelerinde bu farklılıkların dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu kapsamda geliştirilen örnek zemin

profilleri, sıvılaşma sonrası S_r seviyesinde karşılaşılan farklı stabilite senaryolarını analiz etmeye olanak sağlar.

Çizelge 2.10. Zemin tipine göre önerilen S_r-σ_v' aralıkları ve karşılık gelen stabilite durumu (Olson & Stark'dan, 2002)

Zemin Tipi	Önerilen S_r / σ_v' Oranı	Stabilite Durumu
Gevşek kum	0,05 – 0,10	Kötü
Orta sıkı kum	0,10 – 0,15	Sınır
Sıkı kum	0,15 – 0,20	Orta
Siltli kum	0,07 – 0,12	Orta

Çizelge 2.10'da farklı zemin türleri için artık dayanım düzeyinin efektif gerilme ortamında stabiliteyi sağlayıp sağlayamayacağına dair mühendislik öngörüsü sunar. Ancak, bu değerlerin her zaman saha koşullarıyla kalibre edilmesi ve mühendislik yargısıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Olson ve Stark (2002) tarafından geliştirilen stabilite sınır eğrileri, laboratuvar testlerinden ve aynı zamanda çok sayıda sahada gözlenen sıvılaşma sonrası deformasyon olaylarından da elde edilen verilerle kalibre edilmiştir. Bu sınırlar, özellikle zemin eğimi %0 ila %10 arasında değişen alanlarda kullanıma uygundur. Daha dik eğimler için ise, klasik stabilite analizleri ile karşılaştırmalı değerlendirme yapılması önerilmektedir.

Zemin profili içerisindeki sıvılaşabilir katmanın kalınlığı ve derinliği, sıvılaşma sonrası hareket potansiyelinin belirlenmesinde kilit rol oynar. Şayet sıvılaşma yüzeye yakın tabakalarda gelişirse yüzey deformasyonları daha belirgin hale gelir. Bu bağlamda, Holzer ve Bennett (2007) tarafından yapılan geniş kapsamlı saha çalışmaları, sığ sıvılaşmanın yer değiştirme büyüklüğü üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymuştur. Ayrıca, Zhang vd. (2004) tarafından CPT temelli yapılan analizler de benzer sonuçlar vermiştir.

Idriss ve Boulanger (2008), bu eğrilerin pratik mühendislikte şu şekilde kullanılmasını önermektedir. Mevcut zemin profiline ait artık kayma dayanımı (S_r) belirlenir ve bu değer, zemin profiline ait efektif dikey gerilme ile normalize edilerek (S_r / σ_v') oranı elde edilir. Bu oran, Olson ve Stark (2002) tarafından önerilen stabilite sınır eğrileri ile karşılaştırılır. Eğer oran, eğrinin altında kalıyorsa zemin stabil kabul edilir. Eğriye yakınsa sınırdadır. Eğrinin üzerindeyse stabil değildir.

Bu tür grafiksel karşılaştırmalar, mühendislik projelerinde hızlı ön değerlendirme sağlasa da zemin davranışının karmaşık yapısı göz önünde bulundurularak nihai değerlendirmelerin her zaman mühendislik yargısı ve ek hesaplamalarla desteklenmesi önerilmektedir. Özellikle sınıra yakın bölgelerde bulunan değerler için, parametre duyarlılığı çalışmaları yapılarak olası senaryolar gözden geçirilmelidir.

3. BOŞLUK SUYU BASINCI GELİŞİMİNİN LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Gerilme Tabanlı Modeller Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri

Gerilme tabanlı modellerle boşluk suyu basıncı gelişimini açıklamaya yönelik ilk yaklaşım, Lee ve Albasia (1974) tarafından ortaya konmuş ve boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile çevrim sayısı oranı (N/N_L) arasında bir ilişki kurularak bu alandaki ilk modelleme yapılmıştır. Bu çalışmayı takiben, Seed vd. (1975), mevcut deneysel veriler ışığında çevrim sayısı (N) ile sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N_L) arasındaki ilişkiye dayanan bir model geliştirmiştir. Söz konusu modelde, çevrim sayısı oranına bağlı olarak tanımlanan ampirik α parametresi, üstel bir fonksiyon içerisinde kullanılmış ve ortalama 0,7 değeriyle uygulanmıştır.

Seed vd. (1975) tarafından önerilen bu ifade, Booker vd. (1976) tarafından sadeleştirilerek yeniden düzenlenmiş ve aynı parametreler (N ve N_L) kullanılarak daha yalın bir formülasyon önerilmiştir. Bu tür sayısal modeller zaman içerisinde yaygın olarak kullanılmış, yakın dönemde ise Polito vd. (2008) tarafından istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Bu çalışmada, α parametresi; gerilme oranı (CSR), ince dane oranı (FC) ve rölatif sıkılık (D_r) gibi değişkenler cinsinden tanımlanmıştır. Temiz kum zeminler için, CSR'nin α değeri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu, ancak D_r değerine bağlı olarak α'nın 0,73 ile 1,14 arasında değiştiği belirtilmiştir. Model yaygın olarak benimsenmiş olsa da, bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Özellikle N_L değerinin tanımı ve tahmini konusundaki belirsizlikler, sıvılaşma ile kayma birim deformasyon birikimi arasındaki farkın açık biçimde ayrıştırılamaması ve gerçek deprem hareketlerinin eşdeğer çevrim sayılarına dönüştürülmesinde yaşanan zorluklar bu sınırlamalar arasında yer almaktadır.

Bu eksiklikleri gidermek amacıyla Baziar vd. (2011), mevcut modellere yeni parametreler ekleyerek geliştirilmiş bir yapı önermiştir. Bu çalışmada da N ve N_L parametreleri kullanılmakla birlikte, model üstel fonksiyonlar aracılığıyla ifade edilmiş ve yeni ampirik parametreler olarak β ve θ tanımlanmıştır. Saf kum zeminler için θ değeri 0,6–0,8 aralığında, β ise 0,00–0,25 aralığında önerilmiştir. Ayrıca kum–silt karışımı zeminler için ince dane oranına bağlı olarak ampirik katsayılar da geliştirilmiştir.

Gerilme tabanlı modeller arasında dikkat çeken bir diğer yaklaşım da Park ve Ahn (2013) tarafından sunulmuştur. Bu modelde, boşluk suyu basıncı üretimini tanımlamak üzere, hasar parametresi olarak adlandırılan bir kavram geliştirilmiş ve bu parametre kümülatif olarak hesaplanmıştır. Modelin temel girdileri CSR ve çevrim sayısı (N) olup α parametresi CSR–N eğrisinden elde edilen bir kalibrasyon katsayısı olarak tanımlanmıştır. Üstel fonksiyonda yer alan β parametresi ise ampirik bir değer olarak genellikle 0,7 alınmıştır. Model, sıvılaşma sırasında meydana gelen hasarı CSR, α ve çevrim sayısına bağlı olarak tanımlamaktadır.

3.2. Birim Deformasyon Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri

Birim deformasyon tabanlı modellemelere yönelik ilk çalışmalar, Martin vd. (1975) tarafından yürütülmüş ve bu kapsamda kuru kumlar üzerinde gerçekleştirilen birim deformasyon kontrollü laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu çalışmada, kuru kumların hacimsel deformasyon üretme eğilimi ile suya doygun kumlarda boşluk suyu basıncının gelişimi arasında yarı ampirik bir ilişki kurulmuştur. Geliştirilen bu ifade; boşluk suyu basıncındaki artış (Δu), başlangıç efektif gerilmeye karşılık gelen tek boyutlu boşaltma eğrisinin eğimi ($\bar{E}_r$) ve hacimsel birim deformasyon değişimi ($\Delta\varepsilon_{vd}$) parametrelerine dayandırılmıştır.

Martin vd. (1975), bu parametreleri tanımlarken başlangıç ve herhangi bir andaki düşey efektif gerilme değerlerini (σ'_v ve σ'_{vo}), model katsayıları olan k2 ve m ile ifade etmiş; hacimsel deformasyon değişimini, tekrarlı kayma birim deformasyonu (γ), eksenel hacimsel deformasyon (ε_{vd}) ile birlikte c1, c2, c3 ve c4 katsayılarını kullanarak formüle etmiştir. Bu yaklaşım, daha sonraki yıllarda Finn vd. (1976, 1977) tarafından geliştirilen efektif gerilme tabanlı bünye modellerinin temelini oluşturmuştur.

Byrne (1991), Martin vd. (1975) ve Finn vd. (1976) tarafından önerilen ifadelerden esinlenerek bu modelleri daha sade bir forma kavuşturmuş ve biriken hacimsel deformasyon ile kayma deformasyonu oranı arasındaki ilişkiyi daha az parametreyle açıklayan yeni bir denkleme ulaşmıştır. Böylece uygulamada daha pratik bir model önerilmiştir.

Dobry (1985), yine Dobry vd. (1982) tarafından yürütülen deneysel çalışmaların sonuçlarını esas alarak, Martin vd. (1975)'in modelinden türetilmiş yeni bir boşluk suyu basıncı ifadesi önermiştir. Bu modelde kullanılan ana parametreler; tekrarlı kayma deformasyonu (γ_c), eşik hacimsel deformasyon (γ_{tvp}), ve yüklemenin yönünü belirten f katsayısıdır. Bununla birlikte, F, p ve b gibi deneysel olarak belirlenebilen katsayılar da denklemde yer almaktadır.

Her ne kadar bu modeller fiziksel gerçekliğe dayalı ve çeşitli ticari yazılımlar içerisinde yaygın olarak kullanılıyor olsa da, malzeme parametrelerinin doğru ve hassas şekilde belirlenmesini zorunlu kılmaları, uygulamada bazı sınırlamalara yol açmaktadır. Özellikle saha koşullarında veya eksik deneysel veriyle çalışılan durumlarda modelin etkinliği azalabilmektedir.

Bu sorunları aşmak amacıyla Carlton (2014), F ve p katsayılarını ampirik korelasyonlarla tahmin etmeye yönelik bir yöntem önermiştir. Bu çalışmada, F parametresi kesme dalga hızı değişkeniyle ilişkilendirilmiş; b katsayısı ise ince dane oranının yüzde değişimi ile parametrik olarak ifade edilmiştir. p değeri ise, farklı kum türleri için ortalama değeri 1 olmak üzere ±%7 aralığında değişen bir sabit olarak önerilmiş ve bu parametrenin bilinmediği durumlarda 1 olarak alınması tavsiye edilmiştir.

3.3. Enerji Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri

Boşluk suyu basıncının birikimini açıklamak üzere geliştirilen modeller arasında enerji temelli yaklaşımlar, özellikle tekrarlı yükleme koşullarında deformasyon birikimini daha fiziksel temellere dayandırması açısından dikkat çekmektedir. Bu modellerde, boşluk suyu basıncı gelişimi, dışarıdan zemine uygulanan gerilme etkisiyle içsel enerji birikimi arasındaki ilişkiye dayalı olarak ifade edilmektedir.

Bu yaklaşıma yönelik ilk sistematik çalışmalardan biri, Towhata ve Ishihara (1985) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kum örneklerine uygulanan tekrarlı yüklemeler sırasında absorbe edilen plastik şekil değiştirme enerjisinin, boşluk suyu basıncı artışı ile doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir. Towhata vd. (1992), bu enerji birikimini esas alan bir model önererek, kum zeminlerde tekrarlı yüklemeye bağlı olarak meydana gelen boşluk suyu basıncı birikiminin, birim hacim başına sönümlenen enerji ile ifade edilebileceğini ileri sürmüştür. Sönümlenen enerjiyi efektif gerilme ile normalize ederek

edip bu değişkeni ampirik katsayılarla kalibre etmiştir. Uygulanan enerji ile boşluk suyu basıncı birikimi arasında üstel bir ilişki kurarak ve tekrarlı yükleme altında ortaya çıkan plastik deformasyon enerjisinin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini modellemiştir.

Enerji tabanlı modellerin sunduğu önemli avantajlardan biri, farklı frekans, şekil ve büyüklükteki gerilme döngülerinin eşdeğer enerjiye dönüştürülerek modelde kullanılabilmesidir. Böylece, geleneksel çevrim sayısı temelli modellerde olduğu gibi sabit çevrim koşullarının oluşturulması zorunluluğu ortadan kalkmakta, daha gerçekçi ve sismik hareketi temsil edebilecek yükleme senaryolarının değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir. Ancak bu tür modellerde kullanılan sönümlenen enerji miktarının deneysel olarak elde edilmesi, genellikle özel deney cihazlarını ve hassas ölçüm sistemlerini gerektirdiğinden, uygulamada bazı zorluklar söz konusu olmaktadır.

Green vd. (2000), tekrarlı yükleme altında boşluk suyu basıncı gelişimini enerji birikimi cinsinden ifade eden geliştirilmiş bir model sunmuş ve modelin hem laboratuvar verileri hem de saha gözlemleriyle uyumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Söz konusu çalışmada, geleneksel gerilme-temelli modellerin yetersiz kaldığı düzensiz ve asimetrik yükleme senaryolarında, enerji temelli modellerin daha güvenilir sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Benzer şekilde, Park ve Lee (2018), değişken genlikli yüklemeler altında kum zeminlerin sıvılaşma davranışını incelemiş ve enerji birikiminin boşluk suyu basıncı birikimi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada, yükleme frekansı ve dalga şekli gibi parametrelerin doğrudan enerji tüketimi üzerinde etkili olduğu, dolayısıyla bu parametrelerin enerji temelli modellemelerde mutlaka dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Bazı çalışmalarda ise, geleneksel enerji tanımlarının dışına çıkılarak, normalize edilmiş kümülatif sönümlenmiş enerji gibi türetilmiş parametreler kullanılmış ve bu sayede model doğruluğu daha da artırılmıştır. Ayrıca, enerji birikiminin sadece boşluk suyu basıncı gelişimini değil aynı zamanda kalıcı deformasyonları da tahmin etmede kullanılabileceği görüşü, son dönemdeki araştırmalarla güç kazanmaktadır.

Ancak enerji tabanlı modellerin yaygın mühendislik uygulamalarında kullanımı hâlen sınırlıdır. Bunun en önemli nedeni, bu modellerin enerji tüketimini hesaplamak için

detaylı yükleme geçmişine ve hassas ölçüm cihazlarına ihtiyaç duymasıdır. Özellikle saha koşullarında bu tür verilerin temini zor olmakta, bu durum modelin genelleştirilmesini engellemektedir. Ayrıca, farklı deney yöntemleriyle elde edilen enerji değerlerinin standart edilememiş olması, farklı çalışmalardan elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

Tüm bu gelişmelere rağmen, enerji tabanlı modeller, boşluk suyu basıncı gelişiminin anlaşılmasında alternatif ve fiziksel temelli bir yaklaşım sunmakta, özellikle düzensiz ve kompleks yükleme koşullarının hâkim olduğu zemin davranışlarının analizinde önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Bu nedenle, klasik gerilme veya deformasyon tabanlı modellere kıyasla, enerji odaklı yaklaşımlar günümüzde daha fazla araştırmacı tarafından tercih edilmekte ve geliştirilmektedir.

3.4. Veri Tabanlı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri

Geleneksel ampirik ve yarı-ampirik modellerin sınırlı doğruluk ve parametre bağımlılığı, araştırmacıları veri odaklı modelleme yaklaşımlarına yönlendirmiştir. Bu bağlamda, yapay zekâ tabanlı algoritmalar, özellikle boşluk suyu basıncı (r_u) gelişiminin tahmin edilmesinde etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) algoritmalarının, klasik model parametrelerini içeren büyük veri kümeleriyle eğitilerek yüksek doğrulukla tahmin yapılabileceğini ortaya koymuştur.

Veri tabanlı modelleme çalışmalarında en sık kullanılan algoritmalar arasında Yapay Sinir Ağları (ANN), Destek Vektör Makineleri (SVM), Karar Ağaçları (DT), Rassal Orman (RF) ve Derin Öğrenme (LSTM, CNN) mimarileri yer almaktadır. Bu algoritmalar; zemin tipi, boşluk oranı, bağıl sıkılık (D_r), çevrimsel gerilme oranı (CSR), tekrarlı kayma deformasyonu (γ), ince dane oranı (FC) gibi çok sayıda girdi parametresini kullanarak r_u değerini doğrudan veya zaman serisi olarak tahmin etmektedir.

Ghorbani vd. (2020), tekrarlı yükleme altında boşluk suyu basıncı gelişimini tahmin etmek üzere bir ANN modeli geliştirerek, klasik modellerle karşılaştırıldığında daha yüksek korelasyon katsayıları ve düşük hata değerleri elde etmişlerdir. Modelde kullanılan giriş parametreleri arasında CSR, σ'_3, FC, D_r ve N gibi değişkenler yer almıştır. Geliştirilen

model, özellikle çok değişkenli problemleri çözme kabiliyeti sayesinde sahada uygulanabilir tahminler sunmuştur.

Daha güncel çalışmada Choi ve Kumar (2023), çevrimsel yüklemeye maruz kalan sıvılaşabilir kumlarda boşluk suyu basıncı oranının (ru) tahminine yönelik olarak LSTM tabanlı bir derin öğrenme modeli geliştirmiş; özellikle gerilme geçmişinin modele dâhil edilmesinin tahmin doğruluğunu artırdığını ortaya koymuştur. Aynı çalışmada, geleneksel ampirik modellerin sınırlı sayıda parametreye dayalı olmasının, karmaşık zemin davranışlarını yeterince yansıtamadığı ve bu nedenle saha koşullarına uyum sağlama konusunda yetersiz kaldığı vurgulanmıştır.

Chen vd. (2022) tarafından geliştirilen bir CNN-LSTM tabanlı hibrid modelde ise, boşluk suyu basıncı-zaman grafikleri doğrudan veri seti olarak kullanılmış ve görüntü özellikleri üzerinden tahminleme yapılmıştır. Bu çalışma, özellikle grafiksel veri üzerinden eğitim yaparak klasik sensör verisine dayanmayan bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu tarz çalışmalar, sayısal modellemenin ötesine geçerek mühendislikte veri çeşitliliğiyle çalışan hibrit çözümlerin de mümkün olabileceğini göstermektedir.

Veri odaklı modellemenin en önemli avantajlarından biri, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerin davranışlarını yüksek doğrulukla tanımlayabilme kapasitesidir. Ayrıca, geleneksel modellerde olduğu gibi, her yeni zemin türü veya deprem senaryosu için yeniden parametre kalibrasyonu yapılması gerekmemektedir. Bunun yerine geniş veri kümesiyle eğitilmiş modeller genelleme yapma yeteneği kazanır. Ancak bu modellerin başarısı doğrudan doğruya eğitildikleri verinin kalitesine, dağılımına ve büyüklüğüne bağlıdır. Veri eksikliği, gürültü, dengesiz sınıflar gibi faktörler model performansını doğrudan etkileyebilir.

Veri tabanlı modelleme yöntemleri boşluk suyu basıncı gelişiminin tahmininde giderek daha fazla tercih edilmekte ve araştırmalara konu olmaktadır. Bu yöntemler, özellikle gerçek zamanlı izleme ve erken uyarı sistemlerinde klasik modellere göre daha hızlı ve doğru yanıtlar sunabilmekte, böylece geoteknik mühendisliğinde yenilikçi bir paradigma değişimini temsil etmektedir.

3.5. Modellerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Boşluk suyu basıncı gelişimini açıklamaya yönelik geliştirilen farklı modelleme yaklaşımları hem teorik altyapıları hem de pratik uygulama kapasiteleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu yaklaşımlar, zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışlarının anlaşılması ve sıvılaşma riskinin öngörülmesi açısından önemli araçlar sunmaktadır. Gerilme tabanlı, birim deformasyon tabanlı, enerji tabanlı ve veri tabanlı modeller farklı bakış açılarına dayanmakta ve her birinin güçlü ve zayıf yönleri uygulama alanlarını belirlemektedir.

Gerilme tabanlı modeller, boşluk suyu basıncı birikimini çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve çevrim sayısı oranı (N/N_L) gibi doğrudan ölçülebilir parametrelerle ilişkilendirerek pratik bir kullanım sağlamaktadır. Seed vd. (1975) tarafından önerilen temel modelde α katsayısının yaklaşık olarak 0,7 civarında olduğu belirtilmiş, bu basit yapı sayesinde model mühendislik pratiğinde hızlıca benimsenmiştir. Ancak N_L değerinin laboratuvar ve saha ortamlarında doğru belirlenememesi, özellikle yüksek ince dane içeren veya heterojen zeminlerde modelin güvenilirliğini sınırlamaktadır. Bununla birlikte, Polito vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalar, α değerinin CSR, D_r ve FC gibi parametrelere bağlı olarak değiştiğini ve sabit bir değer kullanımının önemli hata kaynaklarına yol açabileceğini göstermiştir. Örneğin, temiz kumlar için önerilen α değeri 0,73–1,14 arasında değişmekte iken, siltli kumlar için bu aralık daha da genişlemektedir. Bu durum, gerilme tabanlı modellerin kullanımında zemin özelliklerinin dikkatle değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Birim deformasyon tabanlı modeller, boşluk suyu basıncı birikimini kayma birim deformasyonu ve hacimsel deformasyon ilişkileri üzerinden tanımlayarak, zemin davranışını daha fiziksel bir temele oturtmaktadır. Martin vd. (1975) ve Finn vd. (1976) tarafından geliştirilen modellerde, boşluk suyu basıncındaki artış (Δu) ile hacimsel deformasyon arasında doğrudan bir ilişki kurulmuştur. Byrne (1991) tarafından önerilen sadeleştirilmiş formülasyon ise, pratik uygulamaları kolaylaştırmış ancak parametrelerin doğru belirlenmesi gerekliliğini ortadan kaldırmamıştır. Birim deformasyon temelli modeller, özellikle yüksek deformasyon potansiyeline sahip zeminlerin analizinde daha gerçekçi sonuçlar üretebilmekte, ancak sahada deformasyon verisi elde etmek her zaman mümkün olmadığından uygulamada bazı kısıtlamalar getirmektedir.

Enerji tabanlı modeller ise, tekrarlı yükleme altında sönümlenen enerjiyi temel alarak boşluk suyu basıncı artışını modellemektedir. Towhata vd. (1992) ve Green vd. (2000) tarafından geliştirilen bu yaklaşımlar, farklı yükleme büyüklükleri, frekansları ve şekillerini tek bir enerji parametresi altında birleştirerek sıvılaşma potansiyelinin daha bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Ancak, enerji parametrelerinin hassas ölçümü laboratuvar ortamında bile zorluk arz etmekte, saha uygulamalarında ise bu tür veri elde etmek büyük ölçüde güçleşmektedir. Bunun yanında, enerji tüketiminin doğrudan boşluk suyu basıncı artışıyla ilişkili olması, bazı durumlarda zemin deformasyon mekanizmalarının tam olarak temsil edilememesine yol açabilmektedir.

Veri tabanlı modeller, özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme tekniklerinin gelişmesiyle birlikte boşluk suyu basıncı modellemesinde yeni bir dönem açmıştır. Ghorbani vd. (2020) tarafından geliştirilen ANN tabanlı modeller, geleneksel ampirik modellere kıyasla daha düşük hata oranlarıyla r_u değerinin tahmin edilebileceğini göstermiştir. Wang vd. (2023) tarafından önerilen LSTM tabanlı modeller ise zamana bağlı boşluk suyu basıncı gelişimini başarılı bir şekilde yeniden üretmiş ve bu durum özellikle zaman serisi bazlı sıvılaşma analizlerinde klasik modellere göre büyük bir ilerleme sağlamıştır. Veri tabanlı modellerin temel avantajı, çok sayıda değişkeni aynı anda dikkate alabilmeleri ve doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri öğrenebilmeleridir. Ancak bu modellerin "kara kutu" yapıda olmaları, yani sonuç üretirken kullanılan iç mekanizmaların mühendislik bakış açısıyla yorumlanamaması önemli bir dezavantajdır. Ayrıca, veri tabanlı modellerin doğruluğu tamamen kullanılan eğitim verisinin çeşitliliği ve kalitesine bağlıdır.

Her modelleme yaklaşımı kendine özgü güçlü ve zayıf yönlere sahiptir. Gerilme tabanlı modeller hızlı ve pratik çözümler sunarken, deformasyon ve enerji temelli modeller fiziksel gerçekliğe daha yakın sonuçlar verebilmektedir. Veri tabanlı modeller ise doğruluk ve hız açısından önemli avantajlar sağlamalarına rağmen, yorumlanabilirlik ve veri bağımlılığı gibi sınırlamalara sahiptir. Bu tez çalışmasında, farklı modelleme yaklaşımlarının literatürdeki gelişimi dikkate alınarak, boşluk suyu basıncı gelişiminin modellenmesi sürecinde hem klasik hem de modern yöntemlerin avantajlarından yararlanılması hedeflenmektedir.

3.6. Boşluk Suyu Basıncı Denklemleri

Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri ile ilgili detaylar öndeki başlıklar altında detaylıca anlatılmıştı. Bu başlıkta bahsedilen modellerin denklemleri parametreleriyle birlikte sunulacaktır.

3.6.1. Gerilme esaslı modeller

Boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile normalize çevrim sayısı oranı (N/N_L) arasındaki ilişki ilk olarak Lee ve Albaisa (1974) tarafından incelenmiş ve bu çalışma, gerilme tabanlı modellerin temelini oluşturmuştur. Bu öncü çalışmanın bulgularını ve o dönemde mevcut deneysel verileri referans alan Seed vd. (1975), daha kapsamlı bir yaklaşım geliştirerek Denklem 3.1'de sunulan formülasyonu ortaya koymuştur.

$$r_u = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left\{ 2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/a} - 1 \right\} \right] \tag{3.1}$$

Burada α parametresi zemin özellikleri ve deney koşullarını temsil ettiği belirtilmiştir. Seed vd. (1975) bu parametrenin ortalama olarak kullanılmasını önerdiği değer 0,7 olmuştur. N ve N_L değerleri ise sırasıyla, uygulanan çevrim sayısı ve gerekli çevrim sayısını nitelemektedir.

Booker vd. (1976), Seed vd. (1975) 'in geliştirdiği formülü basitleştirerek şu Denklem 3.2'deki gibi sunmuştur.

Söz konusu modelde α katsayısının, zeminin fiziksel özellikleri ile deneysel koşulları temsil ettiği ifade edilmiştir. Seed vd. (1975) tarafından yapılan çalışmada, bu parametre için önerilen ortalama değer 0,7 olarak belirlenmiştir. Modelde yer alan N ve N_L terimleri ise, sırasıyla uygulanan çevrim sayısını ve belirli bir boşluk suyu basıncı seviyesine ulaşmak için gereken çevrim sayısını ifade etmektedir. Bu ifadeye dayalı olarak Booker vd. (1976), Seed vd. (1975) tarafından geliştirilen orijinal modeli daha sade hale getirerek Denklem 3.2'de sunulan yapıyı önermiştir.

$$r_u = \frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left[\left(\frac{N}{N_L}\right)^{1/2a}\right] \tag{3.2}$$

Denklem 3.2'de kullanılan parametreler, Seed vd. (1975) tarafından önerilen orijinal modeldeki değişkenlerle birebir örtüşmektedir.

Zaman içerisinde birçok araştırmacı tarafından farklı çalışmalar kapsamında benimsenen bu sayısal modeller, yakın dönemde Polito vd. (2008) tarafından istatistiksel yöntemler kullanılarak yeniden analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, α katsayısı; gerilme oranı (CSR), ince dane oranı (FC) ve bağıl sıkılık (D_r) gibi parametrelerle ilişkilendirilmiş ve Denklem 3.3'te verilen biçimiyle ifade edilmiştir.

$$\alpha = 0,01166.FC + 0,007397.D_r + 0,01034.CSR + 0,5058 \tag{3.3}$$

Bu modelleme yaklaşımı, ince dane oranı %35'in altında olan kumlu zeminler için geçerlidir. Yapılan analizler, gerilme oranındaki (CSR) değişimlerin α katsayısı üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur. Temiz kum numuneleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde ise, bağıl sıkılığa (D_r) bağlı olarak α değerinin 0,73 ile 1,14 arasında değiştiği belirlenmiştir. Her ne kadar Seed vd. (1975) tarafından önerilen ve ilerleyen yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından sadeleştirilerek geliştirilen bu model yaygın olarak kullanılmakta olsa da, N_L parametresinin tanımı ve öngörüsüne ilişkin belirsizlikler, modelin zemin sıvılaşması ile kayma birim deformasyonu birikimi arasındaki davranış farkını tam olarak yansıtamaması ve düzensiz deprem hareketlerinin eşdeğer çevrim sayısına dönüştürülmesinde yaşanan zorluklar gibi önemli sınırlılıkları beraberinde getirmektedir.

Baziar vd. (2011), literatürde yer alan bu denklemlerden hareketle aşağıda sunulan özgün matematiksel ifadeyi geliştirmiştir.

$$r_u = \frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left[\left(\frac{N}{N_L}\right)^{1/2\theta}\right] + \beta\sqrt{\left[1-\left(2\frac{N}{N_L}-1\right)^2\right]} \tag{3.4}$$

θ ve β katsayıları Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. θ ve β katsayıları (Baziar vd.'den, 2011).

Zemin	θ	β	R^2
Kum	0,60-0,80	0,00-0,25	0,94
Kum + %15 silt	0,30.0,60	0,20-0,30	0,92
Kum + %30 silt	0,20-0,40	0,25-0,30	0,90
Kum + %60 silt	0,20-0,40	0,45-0,60	0,91
Silt	0,60-0,80	0,10-0,20	0,92

Park ve Ahn (2013), gerilme tabanlı bir yaklaşıma dayanan ve hasar parametresini esas alan bir boşluk suyu basıncı gelişim modeli önermiştir. Zamana bağlı analizlerde, her bir zaman adımı için hasar parametresi, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Artımlı hesaplamalara dayalı bu yapı altında, boşluk suyu basıncı üretim modeli aşağıdaki formülasyonla ifade edilmektedir.

$$r_u = \frac{2}{\pi}\arcsin\left(\frac{D}{D_{r_u=1,0}}\right)^{\frac{1}{2\beta}} \tag{3.5}$$

$$D_{i+1} = D_i + \Delta D \tag{3.6}$$

$$\Delta D = 2(CSR_{i+1} - CSR_t)^a \tag{3.7}$$

$$dr_u = (r_u)_{i+1} - (r_u)_i = \frac{2}{\pi}\arcsin\left[\left(\frac{D_{i+1}}{D_{r_u=1,0}}\right)^{\frac{1}{2\beta}}\right] - \frac{2}{\pi}\arcsin\left[\left(\frac{D_i}{D_{r_u=1,0}}\right)^{\frac{1}{2\beta}}\right] \tag{3.8}$$

Bu modelde kullanılan r_u , boşluk suyu basıncı oranını; D, hasar parametresini; $D_{ru=1,0}$, sıvılaşma başlangıcındaki kritik hasar düzeyini; CSR_t , eşik kayma gerilmesi oranını; β, ampirik olarak 0,7 değeriyle alınan düzeltme katsayısını ve α, azaltma katsayısını ifade etmektedir. Buradaki α parametresi, laboratuvar ortamında elde edilen CSR–N ilişkisine dayalı olarak yapılan kalibrasyon süreciyle tanımlanmakta olup, aşağıdaki matematiksel ifade yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\alpha = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M-1}\left[\left(\frac{\log(N_i / N_{i+1})}{\log(CSR_{(i+1)} - CSR_t)}\right) - \log(CSR_i - CSR_t)\right] \tag{3.9}$$

Bu kapsamda M, CSR–N ilişkisinde yer alan toplam veri noktası sayısını ifade etmektedir. Hasar parametresi D, sıvılaşmanın başlangıcında tanımlanan kritik hasar düzeyiyle bağlantılı olarak, laboratuvar deneylerinden elde edilen CSR–N eğrileri temel alınarak aşağıdaki matematiksel formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$D_{r_u=1,0} = 4N(CSR - CSR_t)^{\alpha} \tag{3.10}$$

3.6.2. Birim deformasyon tabanlı modeller

Martin vd. (1975), kuru kumlar üzerinde gerçekleştirdiği birim deformasyon kontrollü laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerden yararlanarak alternatif bir model önerisinde bulunmuştur. Bu kapsamda, birim deformasyon çevrimleri sonucunda kuru kumlarda gözlenen hacimsel deformasyon üretimi ile suya doygun kumlarda meydana gelen boşluk suyu basıncı gelişimi arasında bağlantı kuran, yarı ampirik nitelikteki bir ifade Denklem 3.11'de sunulmuştur.

$$\Delta u = \bar{E}_r . \Delta \varepsilon_{vd} \tag{3.11}$$

Söz konusu denklemde, Δu boşluk suyu basıncındaki artışı, $\bar{E}_r$ tek boyutlu yükleme–boşaltma eğrisinin başlangıç efektif gerilmesine karşılık gelen eğimi, $\Delta\varepsilon_{vd}$ ise hacimsel birim deformasyondaki değişimi temsil etmektedir. Bu parametreler, yazarlar tarafından Denklem 3.12 ve Denklem 3.13'te tanımlanmış ve matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\bar{E}_r = \frac{(\sigma'_v)^{1-m}}{m.k_2.(\sigma'_{v0})^{n-m}} \tag{3.12}$$

$$\Delta\varepsilon_{vd} = c_1.(\gamma - c_2.\varepsilon_{vd}) + \frac{c_3.\varepsilon_{vd}^{\,2}}{\gamma.c_4.\varepsilon_{vd}} \tag{3.13}$$

Bu modelde, σ'_v ve σ'_{v0}, sırasıyla düşey efektif gerilmenin herhangi bir andaki ve başlangıçtaki değerlerini, γ ve ε_{vd} ise sırasıyla tekrarlı kayma deformasyonunu ve biriken hacimsel birim deformasyonu ifade etmektedir. Parametreler arasında yer alan c_1, m, n, k_2, modele özgü katsayılardır. Bu yapı, Finn vd. (1977) tarafından önerilen efektif gerilme tabanlı bünye modellerinin kuramsal temelini oluşturmuştur. Söz konusu model, daha

sonraki yıllarda Byrne (1991) tarafından sadeleştirilerek aşağıdaki formda yeniden düzenlenmiştir.

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = c_1 \exp\left(-c_2 . \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma} \right) \tag{3.14}$$

Dobry vd. (1985), daha önce Dobry vd. (1982) tarafından deneysel veriler ışığında yapılan çıkarımları esas alarak ve Martin vd. (1975) tarafından önerilen modele dayanan yaklaşımdan esinlenerek, Denklem 3.15'te sunulan boşluk suyu basıncı gelişim modelini geliştirmiştir.

$$r_{u,N} = \frac{p.f.N_c.F.(\gamma_c - \gamma_{tvp})^b}{1 + f.N_c.F.(\gamma_c - \gamma_{tvp})^b} \tag{3.15}$$

Bu modelde, γ_c ve γ_{tvp} sırasıyla tekrarlı kayma deformasyonu ve eşik hacimsel birim deformasyonu ifade etmektedir. f parametresi, uygulanan yüklemenin tek eksenli mi yoksa iki eksenli mi olduğuna dair bilgiyi temsil ederken; p, b ve F katsayıları, deneysel veriler üzerinden belirlenebilen model parametreleridir. Her ne kadar bu tür modeller fiziksel temellere dayandırılmış ve pek çok ticari analiz yazılımında yaygın olarak entegre edilmiş olsa da, içerdiği malzeme katsayılarının yüksek hassasiyetle belirlenmesini gerektirmesi, bu yöntemlerin uygulamadaki doğruluğu ve pratikliği açısından önemli bir sınırlayıcı unsur olarak değerlendirilmektedir.

Carlton (2014), kumlu zeminlerde ampirik korelasyon temelli bir yaklaşım kullanarak, F ve p parametrelerinin hesaplanmasını aşağıda sunulan formülasyonla ifade etmiş ve bu yöntemi Denklem 3.16 ve 3.17'de uygulamıştır.

$$F = 3810.V_S^{(-1,55)} \tag{3.16}$$

$$b = (FC + 1)^{0,1252} \tag{3.17}$$

Bu modelde V_s , zeminin kayma dalgası hızını; FC, yüzde cinsinden ifade edilen ince dane oranını; p ise farklı kum türlerine göre değişmekle birlikte, genellikle %7'lik bir varyasyonla 1 civarında alınan katsayıyı temsil etmektedir. Laboratuvar verilerinin mevcut

olmadığı durumlarda, p değeri varsayımsal olarak 1 kabul edilmektedir. Zemin türlerine göre bu parametrelere ait dağılımlar, Çizelge 3.2'de detaylı şekilde sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Matasovic ve Vucetic (1993) tarafından kum numuneleri üzerinde geliştirilen boşluk suyu basıncı üretim modeline ait parametre değerleri (Carlton'dan, 2014).

		Boşluk Suyu Basıncı Model Parametreleri						
Materyal	**Referans**	**K(ft/sec)**	**v**	**f**	**p**	**F**	**s**	**γ_{tvp}**
Heber Road alanı kumu PB; boşluk oranı 0,7; 15% ince dane oranı; Vs ≈ 500-600 ft/s	Vucetic ve Dobry (1989)	$1,4x10^{-4}$	1	2	1,05	1,706	1,09	0,024
Heber Road alanı kumu PB; boşluk oranı 0,7; 22% ince dane oranı; Vs ≈ 400-466 ft/s	Vucetic (1990)	$3,9x10^{-5}$	1	1	1,071	1,333	1,08	0,022
Wildlife alanı kumu A(WSA); boşluk oranı 0,84-0,85; 37% ince dane oranı; N≈5; V_s≈350ft/s	Vucetic ve Dobry (1987)	$3,8x10^{-4}$	1	2	1,04	2,60	1,70	0,020
Bangding Kumu Kötü Derecelendirilmiş D_r = %40	Dobry vd. (1985)	$5,5x10^{-4}$	1	1	1,00	10,90	1,00	0,017

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Deneysel veri kaynağı ve seçimi

Bu çalışmada kullanılmak üzere oluşturulan deneysel veri seti, literatürde yayımlanmış ve sayısallaştırılabilir nitelikteki dinamik üç eksenli deney grafiklerinden derlenmiştir. Bu grafikler, zeminlerin çevrimsel yüklemeler altında boşluk suyu basıncı (r_u) gelişimini gösteren yatay eksende çevrim sayısını (N), düşey eksende ise r_u değerini sunan Ru–N tipinde eğrisel grafiklerdir. Grafiklerin sayısallaştırılması amacıyla açık kaynaklı bir araç olan WebPlotDigitizer kullanılmıştır. Bu araç, grafik görüntülerinden sayısal veri elde etmeyi sağlayan hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda sıkça tercih edilen bir dijitalizasyon yazılımıdır. Her grafik, eksen kalibrasyonu yapıldıktan sonra yüksek çözünürlükle sayısallaştırılmış Ru–N eğrisinin nokta koordinatları elde edilmiştir.

Toplamda üç yüzün üzerinde çalışma incelenmiş bunlar arasında malzeme özellikleri, deney koşulları, eksen doğruluğu, veri çözünürlüğü ve grafik bütünlüğü bakımından uygun olanlar seçilmiştir. Özellikle sayısal veri çözünürlüğü düşük olan grafikler, eksen çizgileri içermeyen ya da interpolasyon hatası barındırabilecek düzeyde yetersiz veri sunan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca, şekil değiştirme kontrollü deneyler de veri setine işlense de analizlerde bu veriler kullanılamamıştır. Bunun temel nedeni, bu tür deneylerde yükleme sırasında belirli çevrim aralıklarına karşılık gelen şekil değiştirme değerlerine çoğu çalışmada yer verilmemiştir. Bu sebeple gerilme esaslı model tasarımına gidilmiştir. Diğer türlü elde edilecek veri azalacak ve regresyon analizi için yeterli sayıda deney elde edilemeyecekti. Nitekim Dobry vd. (1982) gibi çalışmalarda şekil değiştirme kontrollü sistemlerin belirli aralıklarla kesikli veri ürettiği, bu nedenle R_u değerlerinin sürekli izlenmesinde zorluklar oluştuğu belirtilmiştir. Bu nedenlerle analizlerde yalnızca gerilme kontrollü sistemle gerçekleştirilmiş deneylere ait veriler dikkate alınmıştır.

Literatürden seçilen deneylerin her biri için R_u = 0,0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 değerlerine karşılık gelen çevrim sayıları (N) belirlenmiş ve her deney için 11 farklı veri noktası çıkarılmıştır. 125 adet R_u–N ilişkili veri elde edilmiştir. Her deneyin zemin özellikleri (rölatif sıkılık, ince dane oranı, boşluk oranı, D_{10}, D_{50}, D_{60}, G_s, C_u, C_c vb.) ve deney koşulları (test türü, çevre basıncı, yükleme frekansı, gerilme genliği, CSR vb.) literatürde yer aldığı şekliyle titizlikle kayıt altına alınmıştır. Tez çalışmasının en büyük zaman aralığı veri setinin oluşturulmasında geçirilmiştir. Bazı çalışmalarda analizler için gerekli görülen parametrelere yer verilmemektedir. Bu da analizlerde veri boşluğu yaratmakta ve istenilen sonuçlar elde edilmemekteydi. Bu sebeple verilerin toplanması dinamik bir süreçten meydana gelmiştir. İstenilen parametrelerin tamamını içeren çalışmalar detaylıca araştırılmıştır. Oluşturulan bu veri seti ilerleyen aşamalarda oluşturulacak ampirik modelin değişken yapısını oluşturmak üzere kullanılmıştır. İlk oluşturulan veri setinin optimize edilmemiş ve ayıklanmamış bir kısmı örnek olması açısından Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Bağımsız değişkenleri oluşturacak zemin özelliklerine Bölüm 4.1.3.'te değinilecektir.

Çizelge 4.1. Ham veri seti örneği.

Literatür Deney No	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**39**
Makale No	Makale8	Makale8	Makale9	Makale9	Makale9	Makale14
Test Türü	CTX/CU	CTX/CU	CTX/CU	CTX/CU	CTX/CU	CTX/CU
σ_3 (kPa)	100	200	100	100	100	100
D_r (%)	90	90	30	60	60	50
f (Hz)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,00
G_s	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2.65
e_{min}	0,6	0,6	0,45	0,45	0,45	0,54
e_{max}	0,9	0,9	0,84	0,84	0,84	0,87
e	0,63	0,64	-	-	-	0,56
C_u	2,1	2,1	2,14	2,14	2,14	3,79
C_c	1	1	0,95	0,95	0,95	-
D_{10}	0,09	0,09	0,14	0,14	0,14	0,12
D_{30}	-	-	0,2	0,2	0,2	-
D_{50}	0,2	0,2	0,27	0,27	0,27	0,36
D_{60}	-	-	0,3	0,3	0,3	-
FC %	0	0	0	0	0	0,20
CSR	0,3	0,3	0,25	0,4	0,4	0,24

Literatür Deney No	27	28	29	30	31	39
N_{liq}	40	84	15	-	5	18
$Ru_{0,1}$	2	2	1	1	1	1
$Ru_{0,2}$	6	2	1	1	1	2
$Ru_{0,3}$	13	5	3	2	1	3
$Ru_{0,4}$	22	22	6	3	2	4
$Ru_{0,5}$	27	40	8	4	2	6
$Ru_{0,6}$	31	57	9	-	2	9
$Ru_{0,7}$	34	68	10	-	2	12
$Ru_{0,8}$	36	72	11	-	2	13
$Ru_{0,9}$	37	78	12	-	3	15
$Ru_{1,0}$	40	84	15	-	5	18

Çizelge 4.1'de literatürden toplanmış 6 adet deneyin malzeme özellikleri, deney koşulları ve her boşluk suyu basıncı oranına denk gelen çevrim sayıları paylaşılmıştır. Veri setine ileriki başlıklarda daha detaylı değinilecektir.

4.1.2. Kullanılan deney tipi

Boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiklerinin hangi deneyler ile elde edildiği üzerinde durulmuştu (Bkz. Bölüm 2.3.). Fakat bazı deney türlerinde istenilen parametrelere erişilememektedir. Örneğin veri setinin oluşturulması esnasında ilk başta kesme deneyleri alınsa da çevre basıncı parametresinin olmamasından dolayı bu veriler kullanılamamış ve veri setinin küçülmesine sebep olmuştur. Bu sebeple istenilen parametreleri karşılaması ve test verilerimizle uyumu açısından çalışmada kullanılan tüm deneysel verileri, doygun zemin numuneleri üzerinde uygulanan gerilme kontrollü dinamik üç eksenli (CU-CTX) deneylere dayanmaktadır. Bu deney yöntemi, zeminlerin çevrimsel yüklemeler altındaki davranışını laboratuvar ortamında simüle etme açısından en yaygın ve güvenilir yöntemlerden biridir. CU-CTX deneyinde silindirik bir zemin numunesi, drenajı kapalı şekilde çevrimsel eksenel gerilmelere maruz bırakılmadan önce, izotropik konsolidasyona tabi tutulur. Böylece numune, gerçek zemin koşullarını temsil edecek şekilde ilk gerilme koşullarına getirilmiş olur.

Gerilme kontrollü sistemlerde yükleme, sabit genlikli sinüzoidal ya da düzensiz frekanslı deprem ivmeleri girilerek kayma gerilmesi oluşturacak formda uygulanır.

Numunede gelişen eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı sürekli olarak izlenmektedir. Bu deneylerin en önemli özelliği, çevrim sayısına karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı (r_u) gelişiminin, zaman bağlı olarak ayrıntılı şekilde elde edilebilmesidir. Bu sayede r_u = 0,0'dan r_u = 1,0'a kadar olan gelişim süreci, çevrim bazında ayrıştırılabilir hale gelmektedir. Söz konusu yapı, bu çalışmanın ana hedefi olan r_u tahmin modellerinin oluşturulması için zorunlu bir gerekliliktir.

CU-CTX deneyleri, literatürde birçok önemli çalışmada temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Özellikle Seed vd. (1975), Dobry ve Ladd (1980), Baziar ve Dobry (1995), Polito (2001) ve Tsukamoto ve Ishihara (2022) gibi çalışmalar, bu deney türünü kullanarak zeminlerin sıvılaşmaya karşı dayanımlarını, boşluk suyu basıncı gelişimlerini ve çevrimsel deformasyon davranışlarını ampirik olarak modellemişlerdir. Bu tez kapsamında oluşturulan veri seti, bu tür çalışmalardan seçilmiş ve sadece CU-CTX deneyleri içeren grafiklerle sınırlı tutulmuştur.

Literatürden toplanan ve modelleme altyapımızı oluşturan verilerin tamamı sinüzoidal yüklemedir. Boşluk suyu basıncı oluşumu çalışmalarında düzensiz frekans ile yüklenme yapılan deneylerin azlığı tespit edilmiştir. Bu tarz çalışmaların artması literatürde bulunan veriyi arttıracak ve daha gerçekçi koşullarda daha tutarlı modeller tasarlanabilecektir.

Toplanan deneylerin verilerinin tamamı, doygun kum ve farklı ince dane oranı bulunan siltli kum zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyutları literatüre uygun şekilde genellikle 50 mm çap × 100 mm yükseklik oranında olup, izotropik konsolidasyon sonrası uygulanan çevrimsel yüklemelerin frekansı 0,02 z ile1,00 Hz, çevre basıncı (σ_3) 50-200 kPa, uygulanan çevrimsel gerilme genliği (σ_1) 10-120 kPa, CSR değeri 0,08-0,430 aralığındadır. Her 0,1 dilimlik boşluk suyu basıncı oranı için gerekli çevrim sayısı (N), sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N_{liq}) her bir deney için kayıt altına alınmış olup CSR değeri tüm veriler için doğrudan ya da dolaylı olarak hesaplanmıştır.

Boşluk suyu basıncı oranı- çevrim sayısı grafiklerinden verinin nasıl elde edildiği Bölüm 4.2.1'de detaylı şekilde açıklanacaktır.

Sonuç olarak kullanılan deney tipi, bu çalışmanın modelleme hedeflerine hem fiziksel hem de sayısal düzeyde en uygun veri yapısını sunmakta olup r_u gelişimini çevrim

bazında sürekli izleme imkânı sayesinde, modelleme için veri edinmek adına konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyinden elde edilmiş r_u-N grafikleri tercih edilmiştir. Çizelge 4.2'de toplanan verilerin frekans ve çevre basıncı dağılımları gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Verilerin frekans ve çevre basıncı dağılımları.

σ_3 (kPa)	**50 kPa**			**100 kPa**		**200 kPa**	
Adet	14			98		13	
f (Hz)	**0,02**	**0,05**	**0,1**	**0,3**	**0,5**	**0,6**	**1,0**
Adet	1	1	53	1	1	1	67

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere literatürde bulunan veriler belirli değerler üzerinde yığılmıştır. Farklı yüklemeler ve frekans değerleriyle deney yapılması çeşitliliği arttıracak ve modellerin iyileştirilmesi açısından fayda sağlayacaktır.

4.1.3. Zemin özellikleri ve bağımsız değişkenler

Bu başlıkta bağımsız değişken olarak kullanılacak zemin özelliği parametrelerine yer verilecektir. Literatürden toplanan deneyler, çoğunlukla temiz kumlar ve ince dane içeren siltli kumlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait zemin özellikleri ve deney koşulları, söz konusu deneylerin yayımlandığı literatürlerden alınarak her bir deney için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Modelleme sürecinde zemin karakteristiklerini temsil eden çok sayıda parametre değerlendirmeye alınmış ve bu parametreler regresyon analizlerinde bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir.

Kaydedilen zemin özellikleri, Çizelge 4.1'de sunulan ham veri setinde yer almaktadır. Bu veri seti dikkatle incelendiğinde, bazı çalışmalarda belirli zemin parametrelerinin raporlanmaması nedeniyle eksik veri noktalarının bulunduğu görülmektedir. Ancak, regresyon yöntemlerinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi ve anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için veri setinin eksiksiz olması gerekmektedir. Bu nedenle, birçok makale taranarak mevcut veriler derlenmiş olsa da bütünsel bir analiz yapabilmek amacıyla yalnızca ortak tanımlanmış ve eksiksiz şekilde raporlanmış özellikler değerlendirmeye alınmıştır. Özellikle bazı çalışmalarda granülometri eğrisinin sunulmaması nedeniyle, uniformluk katsayısı, eğrilik katsayısı, D_{10}, D_{30}, D_{50}, D_{60} gibi parametreler elde edilememiş ve hesaplanamamıştır. Bu tür parametrelerin yer aldığı çalışma sayısı sınırlı

kaldığı için, analiz kapsamını daraltmamak adına söz konusu özellikler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Aşağıda, analizlerde kullanılan ve yeterli veri sayısına ulaşılan bağımsız değişkenler detaylı biçimde açıklanacaktır.

Çizelge 4.3'te modelleme sürecinde kullanılan zemin özellikleriyle alakalı bağımsız değişkenler tanımı ve birimleri gösterilmiştir ve aşağıda hatırlatma amacıyla açıklanmıştır:

- D_r (Rölatif Sıklık, %): Numunenin yoğunluk derecesini gösterir. Aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \tag{4.1}$$

Burada e, mevcut boşluk oranı; e_{max} ve e_{min} ise maksimum ve minimum boşluk oranlarıdır. Sıkı numuneler genellikle sıvılaşmaya karşı daha dirençlidir.

- FC: İnce tane oranıdır. 0.075 mm elek altından geçen ince partiküllerin toplam ağırlığa oranıdır. Yüksek FC değerleri, drenaj koşullarını, boşluk oranını ve zemin deformasyon kapasitesini etkiler. Literatürde, kritik eşik değerin genellikle %20–35 aralığında olduğu kabul edilmektedir.

Çizelge 4.3. Bağımsız değişkenleri olarak kullanılacak zemin özellikleri.

Sembol	**Birim**	**Tanım**
D_r	%	Rölatif sıkılık
FC	%	İnce tane oranı

Yukarıdaki değişkenlerin her biri için sayısal değerler literatürdeki ilgili deney raporlarından alınmış ya da gerekli formüllerle hesaplanmıştır. CSR, D_r ve f gibi değişkenler özellikle R_u gelişiminin temel belirleyicileri olarak kabul edilmiş, korelasyon analizlerinde de yüksek önem düzeyine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu değişkenler, modelleme sürecinin ilerleyen aşamalarında ya doğrudan ampirik modellerde yer almış ya da regresyon algoritmalarının yapılandırılmasında kullanılmıştır. Veri setinde toplanan FC ve D_r dağılımları Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Verilerin FC ve D_r dağılımları.

FC %	**0**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**50**	**60**
Adet	85	2	3	6	11	2	5	2	2	5	2
D_r %	**0-30**		**40**	**50**		**60**	**70**		**80**	**90**	
Adet	27		24	32		18	14		5	5	

4.1.4. Nihai veri setinin yapısı

Üst başlıklarda, bağımsız değişken olarak kullanılacak deney koşulları ve malzeme özelliklerinin seçim kriterlerine ayrıntılı şekilde değinilmiştir. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler sonucunda nihai olarak seçilen bağımsız değişkenler, aşağıda Çizelge 4.5'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.5 Analizlerde kullanılacak değişkenler

Sembol	**Birim**	**Tanım**
Malzeme Özellikleri		
D_r	%	Rölatif sıkılık
FC	%	İnce tane oranı
f	Hz	Yükleme frekansı
Deney Şartları		
σ_1	kPa	Deviator Gerilme
σ_3	kPa	Çevre Basıncı
CSR	-	Çevrimsel Gerilme Oranı

Ham veri setinden, belirlenen bağımsız değişkenleri eksiksiz şekilde içeren deneyler seçilerek yeni bir liste oluşturulmuştur. Bu kapsamda elde edilen toplam R_u–N grafiği sayısı 125'tir. Ham veri yapısında, her bir deney için R_u oranının 0,1 aralıklarla karşılık gelen çevrim sayıları birlikte listelenmiş olsa da regresyon analizleri için bu yapının uzun formata dönüştürülmesi gereklidir. Çünkü regresyon işlemlerinde, her bir veri noktasının ilgili bağımsız değişkenlerle doğrudan eşleştirilmesi ve bu sayede doğrusal ya da doğrusal olmayan ilişkilerin kurulabilmesi esastır. Ancak ham formattaki yapı, bu tür analizlerde hem pratiklikten uzak kalmakta hem de olası hata risklerini artırmaktadır. Bu nedenle, nihai veri listeleri oluşturulurken her deneyin boşluk suyu basıncı oranı R_u 0,1 aralıklarla alt alta yazılmış; böylece her bir R_u noktası için ilgili bağımsız değişken kolayca atanabilmiş ve tahmin süreci sağlıklı bir şekilde yürütülebilmiştir. Dönüşüm yapıldığında r_u=0,0, 0,1, 0,2,

0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 ve 125 deney ile toplamda 1375 veri noktası elde edilmiştir. Deney 28'in uzun formata dönüştürülmüş nihai veri setinden bir kesit aşağıda Çizelge 4.6'da sunulmaktadır. Burada N_Nliq ifadesi çevrim sayısının sıvılaşma ile normalize edilmiş halidir.

Çizelge 4.6. Uzun formata dönüştürülmüş veri seti

CSR	Sigma1	Sigma3	FC	f	Dr	N_Nliq	R_u
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0	0
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,05	0,1
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,15	0,2
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,325	0,3
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,55	0,4
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,675	0,5
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,775	0,6
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,85	0,7
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,9	0,8
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	0,925	0,9
0,3	0,06	0,1	0	0,1	0,9	1	1

Her veri satırı, belirli bir deney numarasına hedeflenen r_u değerine ve bu r_u değerine ulaşmak için gereken çevrim sayısına karşılık gelmektedir. Ayrıca bu veriye karşılık gelen tüm zemin ve deney parametreleri aynı satırda yer almaktadır. Bu yapı sayesinde, r_u değerini tahmin etmeye yönelik çok değişkenli regresyon ve modelleme çalışmaları için uygun, standartlaştırılmış ve düzenli bir veri yapısı elde edilmiştir.

R_u değerlerinin oluşturulması sırasında, dijitalize edilen grafiklerden elde edilen verilerde yüksek veri çözünürlüğü nedeniyle oluşan gürültü etkisini azaltmak amacıyla her 10 satır için ortalama alınarak sadeleştirme uygulanmıştır (Bkz. Bölüm 4.2). Bu işlem, sinüzoidal yükleme altında ölçüm sıklığı yüksek olan deneylerde oluşan ani sapmaları filtrelemekte ve R_u gelişimindeki genel eğilimi daha kararlı şekilde temsil etmektedir. Gürültü azaltma işlemi sonrasında her 0,1'lik r_u değeri için gerekli çevrim sayıları veri setine işlenmiştir.

Veriler içerisinde hem sıkı hem de gevşek numuneler, düşük ve yüksek CSR değerleri, farklı frekanslar ve değişen ince dane oranları yer almaktadır. Bu çeşitlilik, geliştirilecek olan modelin genellenebilirliğini artırmakta ve zemin davranışını daha geniş

parametre aralıklarında temsil edebilmesine olanak tanımaktadır. Literatürden toplanan veriler Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Literatürden alınan veriler.

Çalışma	Deney Sayısı	Test Tipi	Malzeme	FC	Dr	f
Festugato vd. (2022)	2	CTX-CU	Osorio Kumu (Brezilya)	0	90	0,1
Chavan vd. (2022)	2	CTX-CU	Sabarmati Nehri Kumu (Hindistan)	0	30-60	0,1
Marzuni vd. (2022)	1	CTX-CU	Firuzkuh #161 Kumu (İran)	0	30	0.1
Chen vd. (2020)	6	CTX-CU	Fujian, Nankin, Nantong, Yünnan Kumu (Çin)	10-20	50	1
Ray ve Sahu (2021)	12	CTX-CU	Digha Kumu (Hindistan)	0	25-85	1
Tanrınıan vd. (2018)	1	CTX-CU	İzmir Siltli Kum (Türkiye)	30	60	0,1
Karabulut vd. (2023)	3	CTX-CU	Şile Kumu (Türkiye)	0	40	0,1
Zeybek (2022)	8	CTX-CU	Şile Kumu (Türkiye)	0	39-88	1
Amuthan vd. (2020)	1	CTX-CU	Belirtilmemiş	0	50	1
Pokhrel vd. (2024)	1	CTX-CU	New Brighton Kumu (Yeni Zellanda)	0	30	0,05
Jain vd. (2023a)	4	CTX-CU	Solani Nehir Kumu (Hindistan)	0	30-50	1
Rouholamin vd. (2017)	5	CTX-CU	İngiltere-Japonya-Hindistan Kumu	0	50	0,1
Wu vd. (2021)	1	CTX-CU	Ottowa Kumu (Kanada)	0	25	0,5
Zhang vd. (2024)	3	CTX-CU	ISO Standart Kumu (Çin)	0	60	1
Zachariah ve Jakka (2025)	5	CTX-CU	Solani Nehir Kumu (Hindistan)	0	70	1
Zhu vd. (2021)	4	CTX-CU	Hostun Kumu (Fransa)	0	70	0,02-0,6
Akosaha vd. (2024)	9	CTX-CU	Mercan Kumu (Çin)	0	50	0,1
Jain vd. (2023b)	2	CTX-CU	Solani Nehir Kumu (Hindistan)	0	30	1
Elzamel vd. (2023)	1	CTX-CU	Toyota Kumu (Japonya)	0	30	1
Dash vd. (2013)	25	CTX-CU	Ahmedabad Kumu (Hindistan)	0-60	30-90	0,1
Papadopoulou vd. (2021)	2	CTX-CU	Siros Kumu (Yunanistan)	0-15	45-70	0,1
Rangaswamy vd. (2010)	12	CTX-CU	Gucarat Kumu (Hindistan)	0-50	40	1
Kumar vd. (2018)	15	CTX-CU	Brahmaputra Kumu (Hindistan)	0	30-90	1

Veri seti, regresyon, korelasyon ve sembolik regresyon analizlerinin tamamında hem eğitim hem de test süreçleri için kullanıma uygun bir formatta yeniden yapılandırılacaktır. Her satır, bağımsız değişkenlerin model çıktısı olan R_u değerine etkisini analiz edebilecek nitelikte, istatistiksel bütünlüğü sağlanmış tekil bir gözlem birimi olarak tanımlanmıştır.

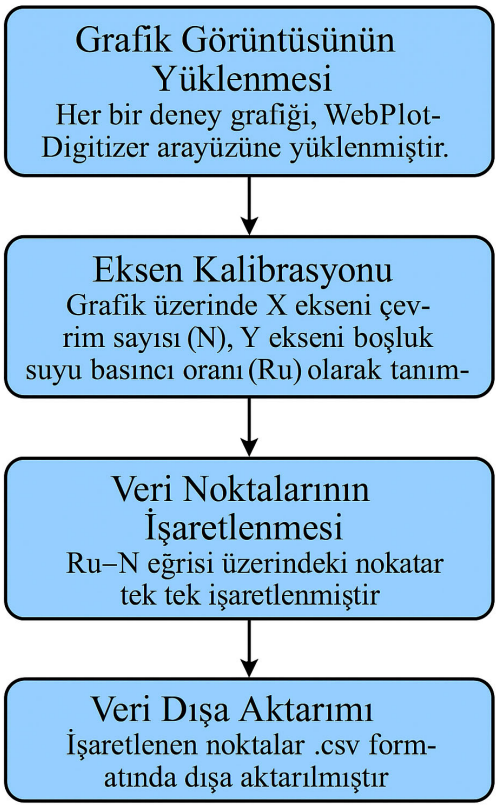
4.2. Yöntem

Bu kısımda yapılan analizlerde görselleri veriye dönüştürmek adına WebPlotDigitizer; verileri işleme ve ilgili analizleri yapmak adına Pyhton uygulaması kullanılmıştır.

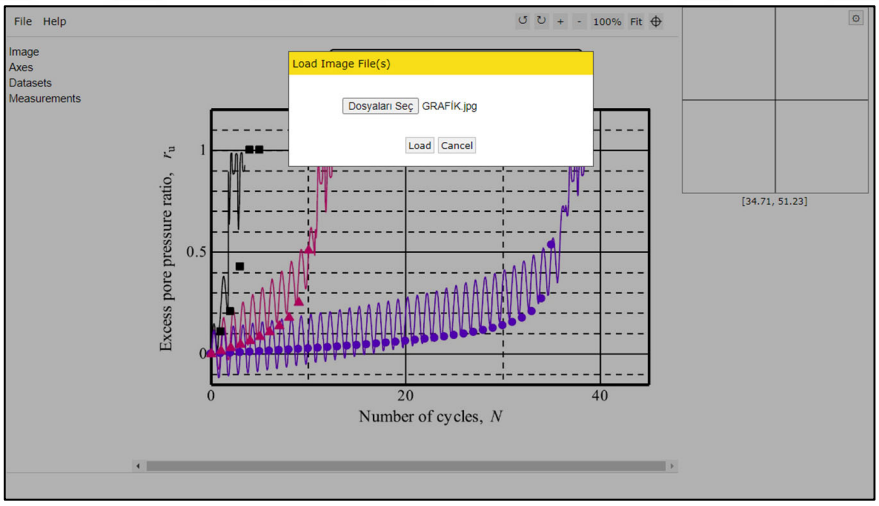
4.2.1. Verilerin dijitalleştirilmesi ve gürültü azaltma işlemi

Bu çalışmanın temelini oluşturan 125 adet CU-TX deneyine ait veriler, literatürde yayımlanmış grafiklerin sayısallaştırılması (dijitizasyonu) yoluyla elde edilmiştir. Sayısallaştırma işlemleri, açık kaynaklı ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir dijitalizasyon aracı olan WebPlotDigitizer yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, raster formatlı görüntüler (örn. JPEG, PNG, PDF) üzerinde bulunan grafiklerden sayısal veri noktalarının çıkarılmasını mümkün kılmaktadır. Verilerin dijitalleştirilmesinin akış diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir.

Şekil 4.1'deki akış diyagramını inceleyecek olursak literatürdeki makalelerden derlenmiş grafik görültüleri WebPlotDigitizer arayüzüne yüklenir. Yüklemeden sonra eksen kalibrasyon işlemine geçilir. Genellikle boşluk suyu basıncı y ekseni, çevrim sayısı x ekseninde olacak şekilde çalışmalar bulunmaktadır. Bazı makalelerde r_u değerinin, $N/Nl_{iq,}$ zaman ile değişimi grafikleri bulunmaktadır. Bu grafikler dijitalleştirilmesinin ardından gerekli dönüşümler yapılarak r_u-N verisi olacak şekilde veri setine katılır.

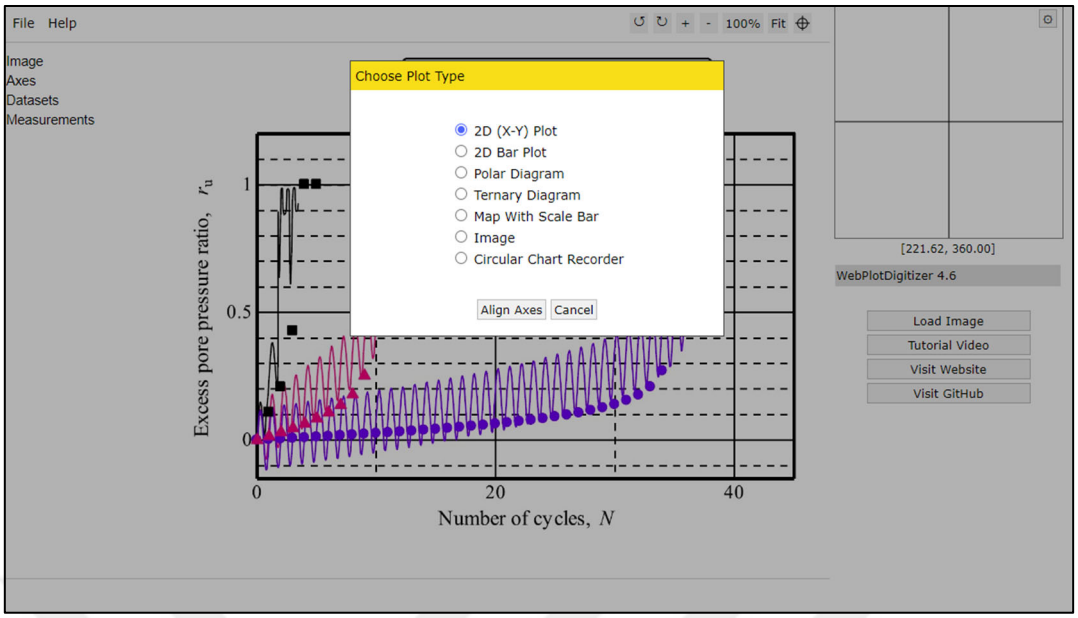


Şekil 4.1. Veri dijitalleştirilmesinin akış diagramı.



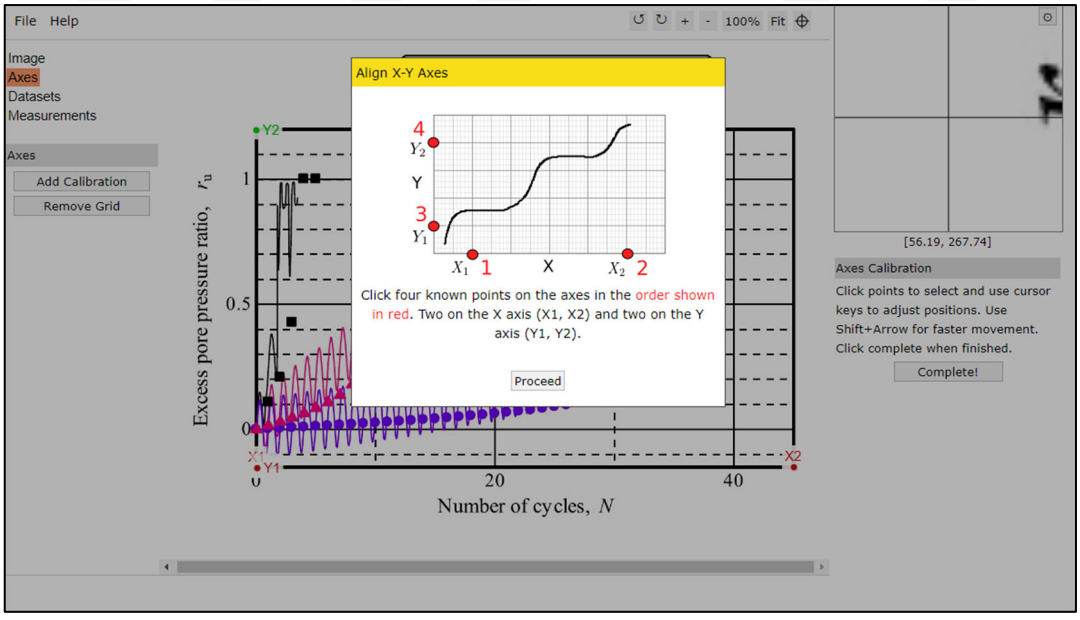
Şekil 4.2. Grafik görüntüsünün yüklenmesi.

İncelenen makalelerde istenilen deney şartları ve malzeme özellikleri irdelenir. Uyumlu olduğu görülünce boşluk suyu basıncı grafikleri kontrol edilir. Veri setine uygun olan grafikler için veri dijitalleştirme işlemi başlatılır. Şekil 4.2'te uygun grafiğin WebPlotDigitizer'a yüklenme aşaması gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Eksen tipinin belirlenmesi.

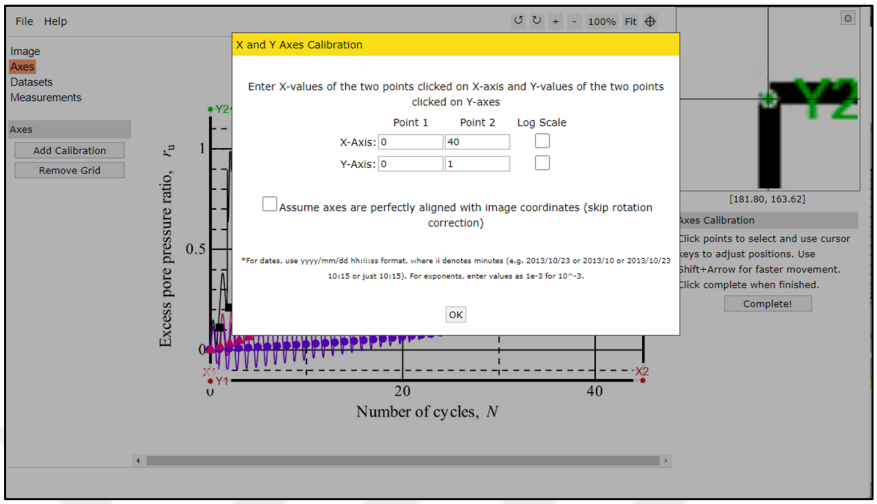
Grafik yükleme işlemi aşamasından sonraki adım grafik eksen tipi ve konumunun belirlenmesidir. WebPlotDigitizer birçok eksen çeşidini desteklemektedir. Boşluk suyu basıncı grafikleri için 2 boyutlu eksen takımı seçilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.4. Eksen sınırlarının belirlenmesi.

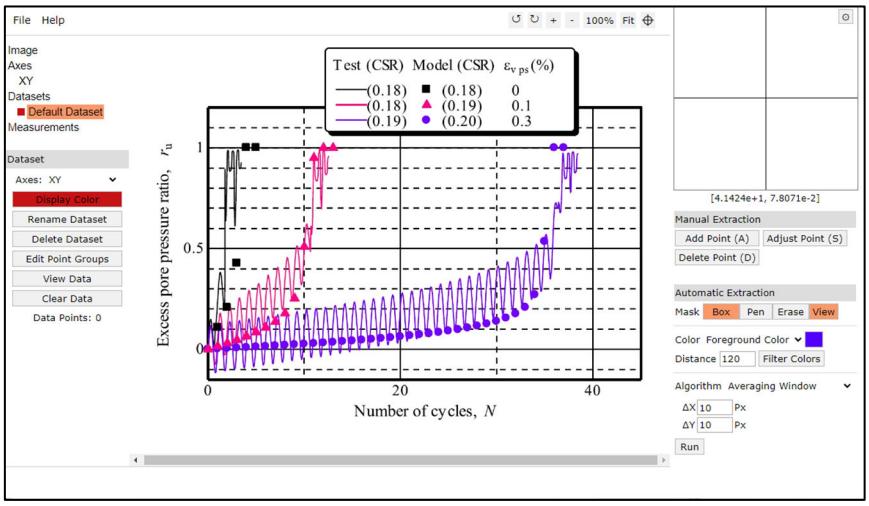
Sonraki aşamada eksen takımının başlangıç ve bitiş noktaları tanıtılır. Eksenleri hassasiyetle belirtmek adına programda bulunan büyüteç kullanılabilmektedir. Ayrıca

seçilen eksenin diğer yönünde yapılacak kaçıklıkları program otomatik olarak hizalamaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.5. Eksen değerlerinin girilmesi.

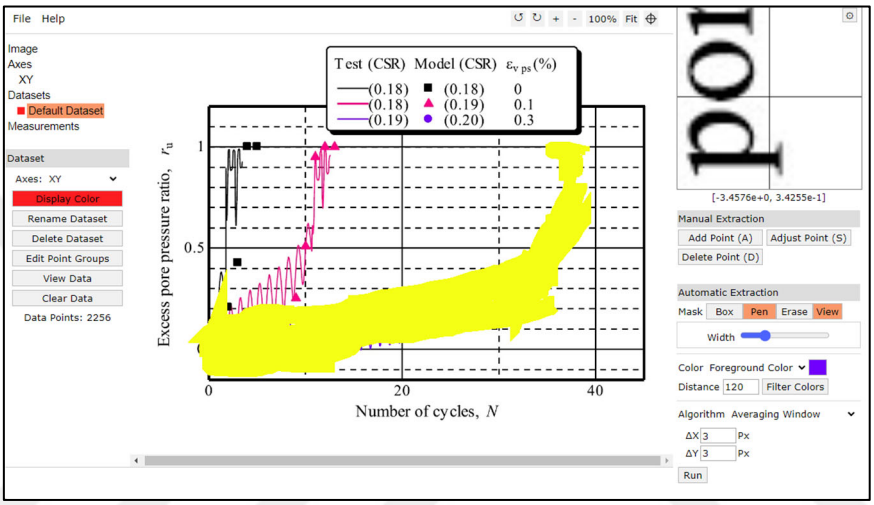
Şekil 4.5'da görüldüğü üzere tanımlanan koordinat noktalarına sayısal verilerin girilmesi işlemi yapılmaktadır. Bu işlem sonrasında program artık sınır noktalarını bilecek ve ara değerleri okuyabilecektir. Program logaritmik ölçekli eksenleri de desteklemektedir. Bazı çalışmalarda sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı yüksek değerlerde çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı önemli bir fonksiyondur.



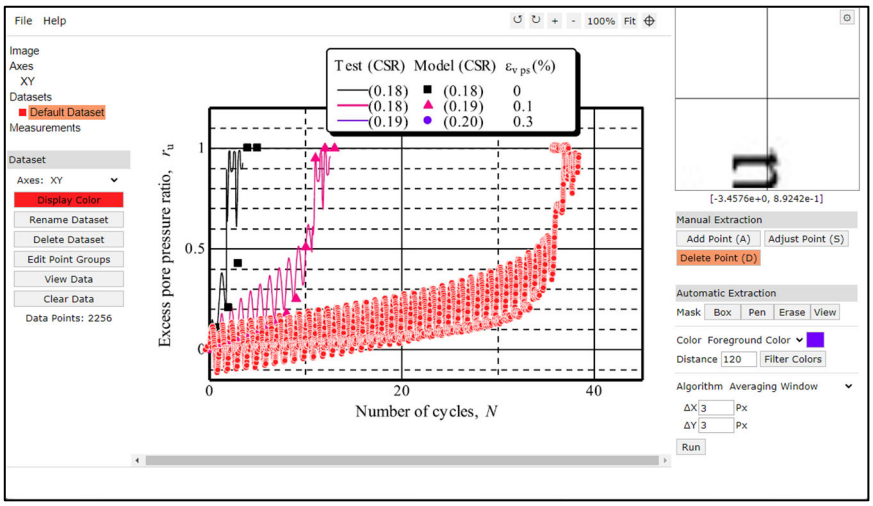
Şekil 4.6. Veri çıkartma evresi.

Koordinat sistemi tanımlanması ardından elde veri olarak elde edilmek istenen grafik seçilmesi işlemine başlanır. Program birkaç yöntem sunarak bu işlemleri

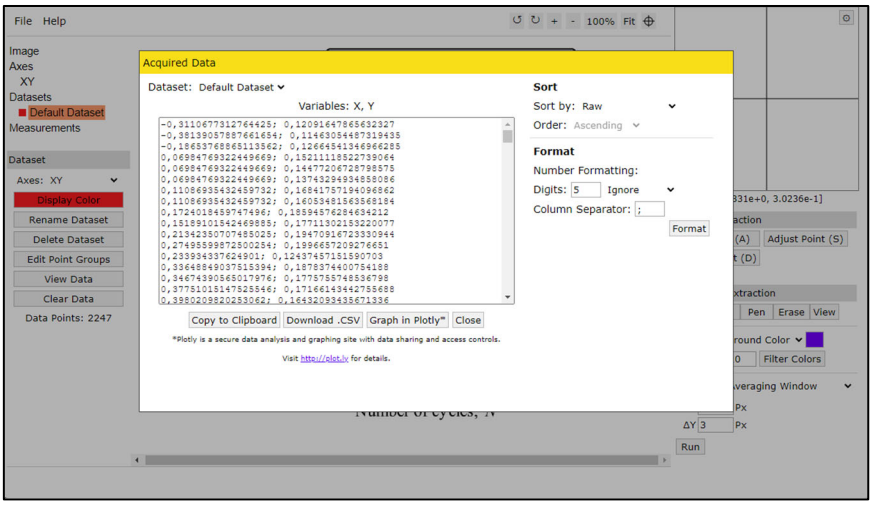
kolaylaştırmaktadır. İç içe geçmiş grafikler olsa bile rahatlıkla veriler ayıklanabilmektedir. Kalem ile tarama yapılarak tarama yapılan bölgedeki eğri renk kodu tanımlanarak edinilebilmektedir. Ayrıca direkt renk seçilerek de istenilen eğrinin verisi elde edilebilir. Fakat bu yöntemde antet ya da benzer renkli eğriler varsa noktalar hatalı yakalanabilmektedir. En güvenli yöntem istenilen eğrinin taranılıp rengine göre filtrelemektir. Bu aşamadan sonra nokta setleri çıkartılmaya hazırdır. Nokta sayısı ve seçim grafiği programın arayüzünde kullanıcıya sunulmaktadır. (Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8).



Şekil 4.7.Çıkarılacak verinin seçilmesi.

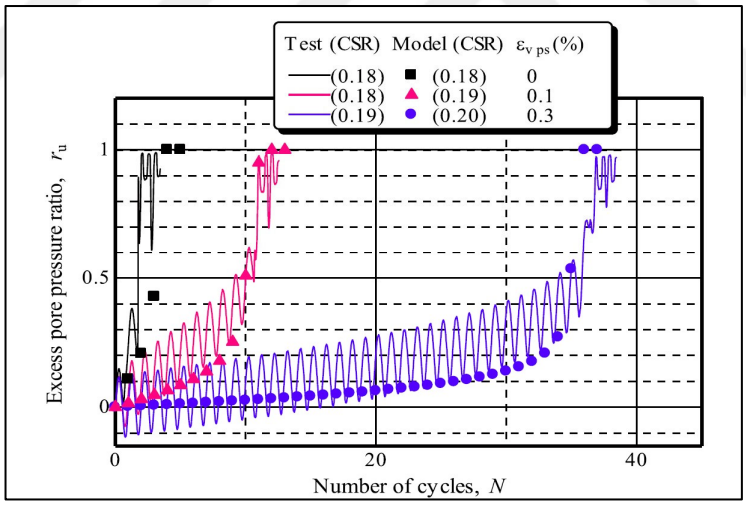


Şekil 4.8. Veri noktalarının elde edilmesi.



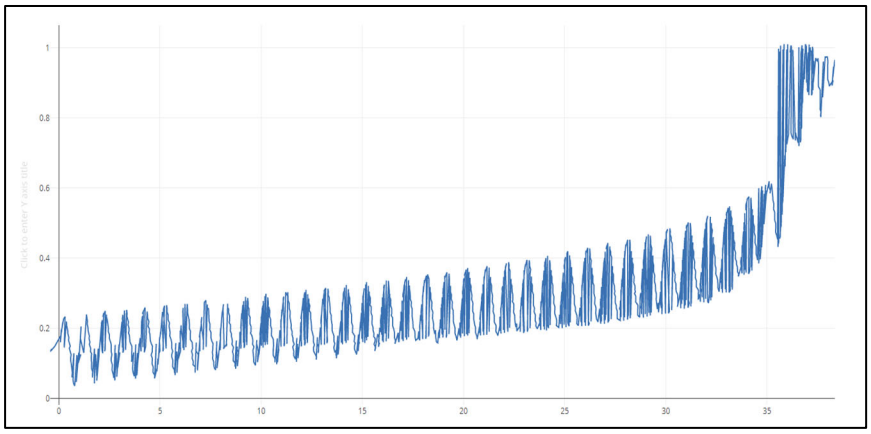
Şekil 4.9. R_u-N verilerinin csv formatında alımı.

Son kontroller yapıldıktan sonra verileri görüntüleme seçeneğinde Şekil 4.9'da gösterilen ekran gelmektedir. Bu kısımda çıkan grafik çevrimiçi olarak ön izlenebilmektedir. Bu aşamadan sonra veriler indirilir ve veri setine r_u ve N değerleri eklenmiş olur.



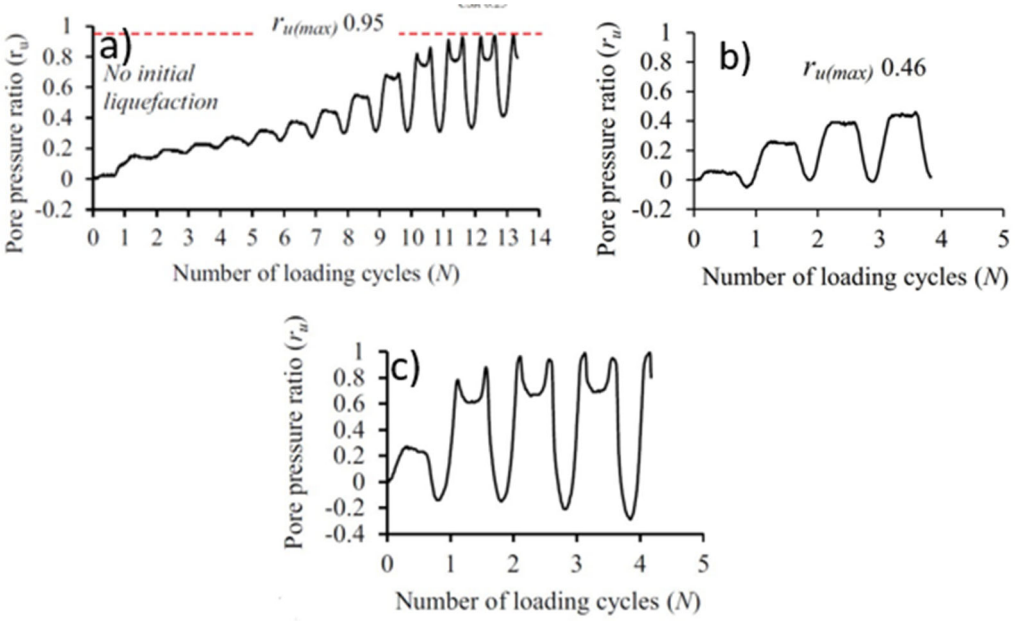
Şekil 4.10. Deney veri grafiği.

Şekil 4.10'da literatürden alınmış bir deney sonucudur. Şekil 4.11'de de bu grafikten çıkartılmış verilerle tekrardan çizdirilmiş boşluk suyu basıncı oranı-çevrim sayısı grafiği gösterilmiştir. Örnek olarak Model CSR değeri 0,20 olan numune için bu aşamalar gerçekleştirilmiştir. İki grafik incelendiğinde veri değerlerinin örtüştüğü görülmektedir. Bu da WebPlotDigitizer'ın hatasıza yakın bir şekilde verileri elde etmemize yaradığını göstermektedir.



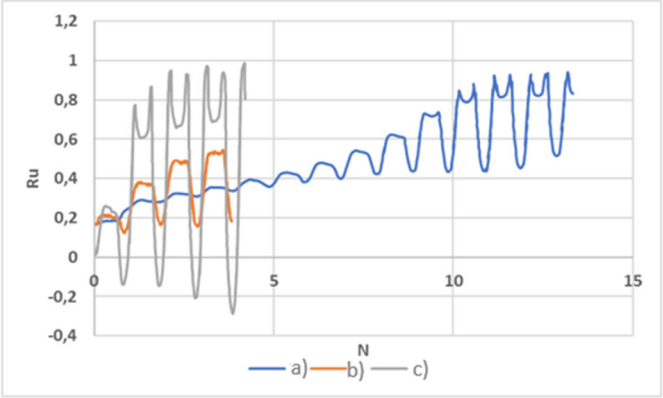
Şekil 4.11. Çıkartılan verinin tekrardan çizimi.

Bu yöntemle veri seti kapsamına alınmış deney sonuçları çalışmalarda sunulduğu hali ve veri halinde çıkartılıp yenilen çizdirilmiş halleri aşağıda paylaşılmıştır.

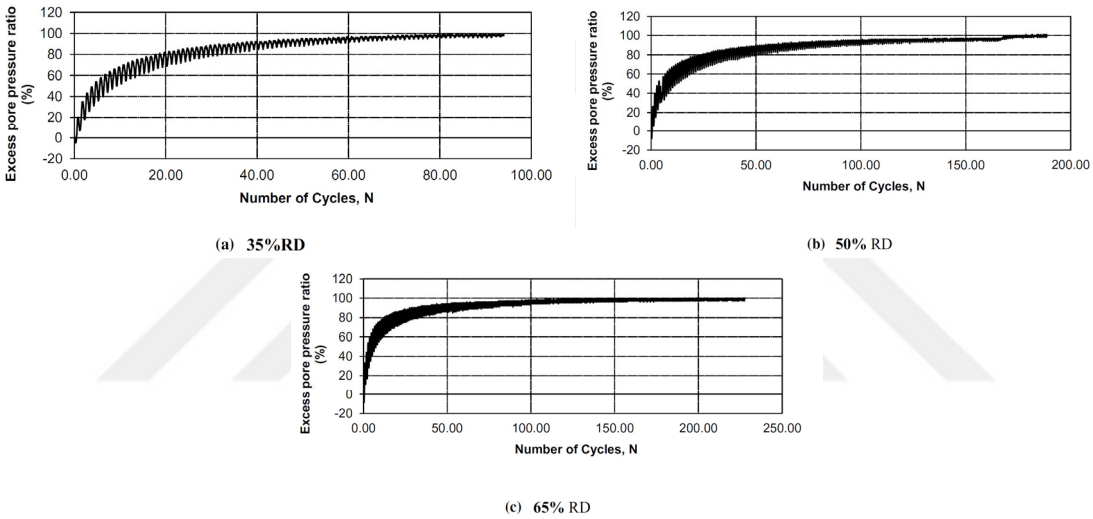


Şekil 4.12. Sabarmati nehir kumu a) D_r %30 CSR:0,250, b) D_r %60 CSR:0,400, c) D_r %60 CSR:0,400 numuneleri r_u-N grafikleri (Chavan'dan, 2022).

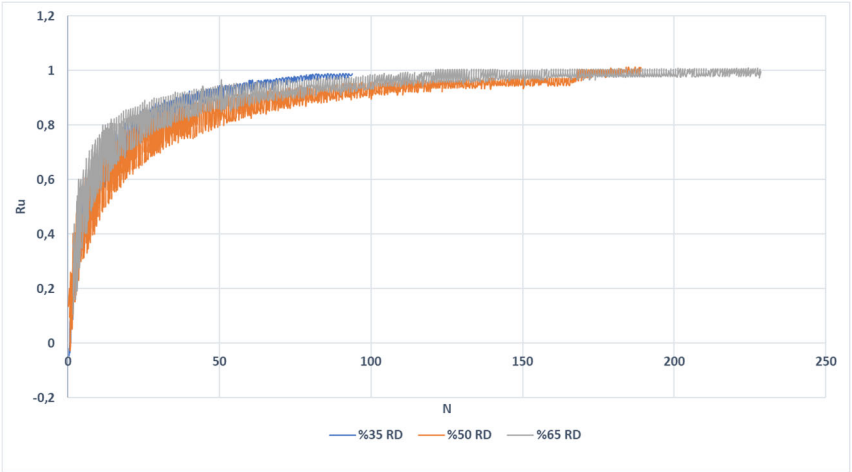
Şekil 4.13, Şekil 4.12'de ün farklı numune ile yapılan deneyler sonucu elde edilen verilerin tekrardan çizilmesi ile oluşturulmuştur. r_u ve N değerleri tutarlıdır.



Şekil 4.13. Sabarmati nehir kumu deney verilerinin çıkartılmış halinin yeniden çizdirilmiş hali.



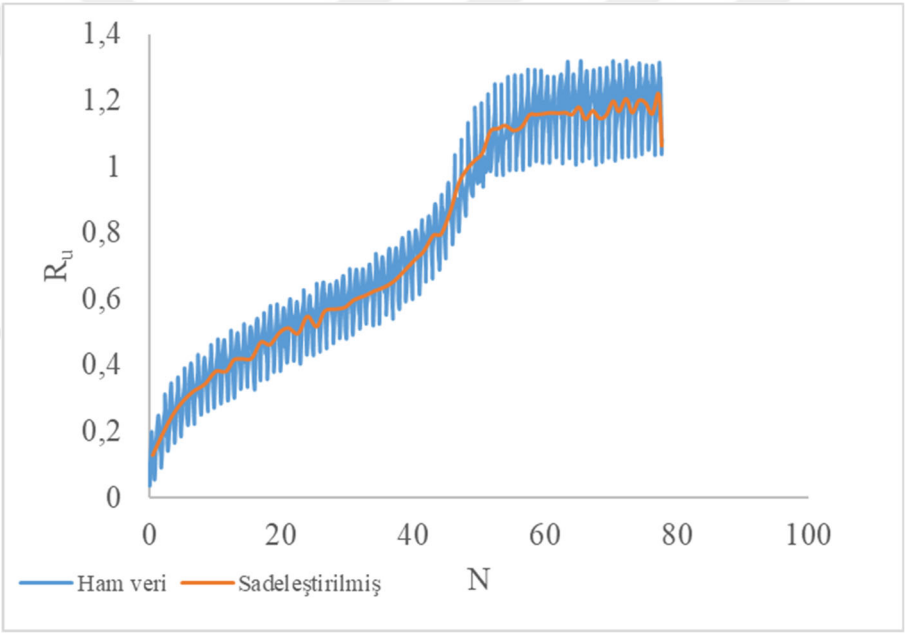
Şekil 4.14. Solani nehir kumu a) D_r %35, b) D_r %50, c) D_r %65 numuneleri r_u-N grafikleri (Chauhan'dan, 2022).



Şekil 4.15. Solani nehir kumu deney verilerinin çıkartılmış halinin yeniden çizdirilmiş hali.

Şekil 4.14'te farklı rölatif sıkılık derecelerine sahip kum numunelerin boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafikleri sunulmuştur. Şekil 4.15'de sunulan verilere göre yeniden çizilen grafikler tutarlıdır.

Sayısallaştırılmış veriler, özellikle yüksek çözünürlükle alınan grafiklerde çok sayıda veri noktası içermektedir. Bu durum, veri içerisinde dalgalanma (gürültü) oluşturmakta ve R_u gelişiminin gerçek eğrisinden sapmalara neden olabilmektedir. Bu etkiyi azaltmak amacıyla, her bir deney için sayısallaştırılan veri dosyasında her 10 satırlık grup ortalaması alınarak sadeleştirme yapılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Gürültü azaltma işlemi

Bu işlem sonucunda veri çözünürlüğü istatistiksel olarak homojen hale getirilmiş, grafiksel dalgalanmalardan kaynaklanan sapmalar baskılanmış, R_u–N gelişimi daha düzgün ve analize uygun bir form kazanmıştır.

Ortalamaların alınması sırasında, örneğin ilk 10 satırdaki R_u değerleri ve karşılık gelen çevrim sayıları aritmetik ortalamaya tabi tutulmuş; bu işlem, grafik üzerinde anlamlı ilerlemeler (örneğin R_u = 0,1, 0,2…) yakalanana kadar tekrar edilmiştir. Nihayetinde her bir deney için R_u=0,0'den başlayarak 0,1 artımlarla R_u = 1,0'a kadar olan 11 sabit R_u seviyesine karşılık gelen çevrim sayıları belirlenmiştir.

Bu yapısal dönüşüm sayesinde veri seti, regresyon ve sembolik modelleme işlemlerinde doğrudan kullanılabilecek şekilde yeniden yapılandırılmıştır.

4.2.2. R_u-N dönüşümü ve veri yapısının oluşturulması

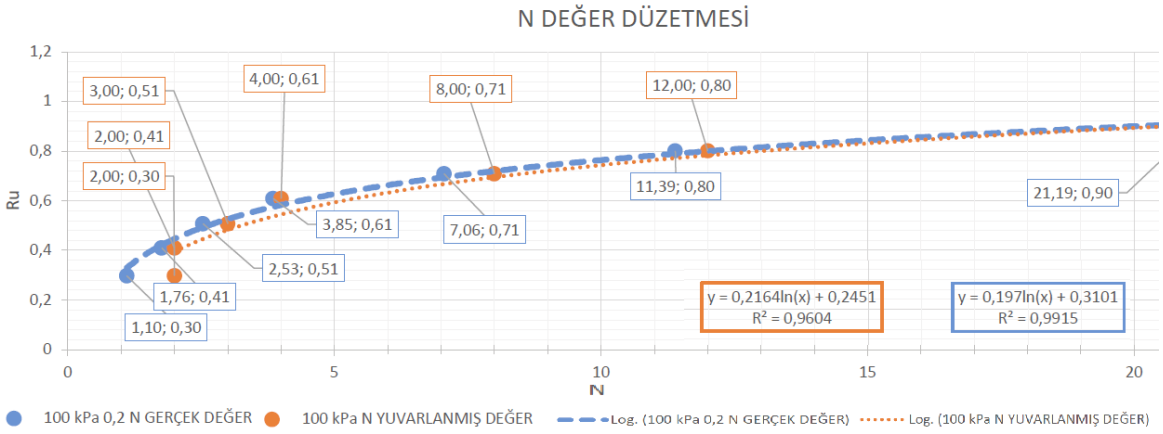
Bölüm 4.1'de veri dönüşümünden bahsedilmişti. Yöntem kısmının materyal kısmıyla daha da pekişmesi adına bu dönüşümden örnekleme ile bahsedilecektir.

WebPlotDigitizer aracılığıyla sayısallaştırılan ham veriler, her deney için R_u–N eğrisinin sürekli bir dağılımını içermekteydi. Ancak bu çalışmada amaçlanan modelleme yaklaşımı, r_u=f(N, CSR, σ_3, D_r, f, FC) gibi fonksiyonel yapıların kurulabilmesi için belirli R_u seviyelerine (örn. 0,1, 0,2, …, 1,0) karşılık gelen çevrim sayılarının kesin olarak belirlenmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, dijitize edilen veri noktaları arasından sabit R_u değerlerine karşılık gelen N değerler**i** çıkarılmak üzere dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Her deney için ortalama alınarak sadeleştirilmiş veri yapısı, Excel ortamına aktarıldıktan sonra şu işlemler uygulanmıştır. R_u=0,0–1,0 aralığı için eşik değerler tanımlanmıştır. Verilerdeki r_u sütunu temel alınarak bu eşik değerleri aşan ilk N çevrim sayısı otomatik olarak belirlenmiştir. Örneğin; R_u=0,3 değerine ulaşan ilk satırda karşılık gelen çevrim sayısı N = 73 ise, bu veri R_u = 0,3 için N = 73 olarak kaydedilmiştir. Çalışmada, grafik eğrileri üzerinden sayısallaştırılan değerlerde doğruluk payını korumak adına interpolasyon kullanılmamıştır. Sadece elde edilen veri içinde doğal olarak bulunan en yakın ölçüm kullanılmıştır. Bu yaklaşım, elde edilen çevrim sayılarının deneysel gerçekliğini bozmadığı gibi, yapay düzeltmelere maruz kalmamasını da sağlamaktadır. Her deney için 11 sabit r_u değeri elde edilmiştir. Bu işlem, r_u = 0,0, 0,2, ..., 1,0 olmak üzere 11 farklı hedef r_u değeri için ayrı ayrı uygulanmış ve her biri için karşılık gelen N çevrim sayısı tabloya işlenmiştir. Böylece her deney, 11 ayrı satır olarak yeniden tanımlanmış ve modelleme için 1375 satırlık nihai veri yapısı oluşturulmuştur. Yatay yapıda veri yeniden düzenlenmiştir. R_u değeri artık bağımlı değişken olarak diğer tüm zemin ve deney parametreleri ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır.

Elde edilen veriler piksel aralığı çok dar bir şekilde taranıp elde edilmiştir. Bu sebeple çok fazla ara değer de veri olarak yer almaktadır. Bu ara değerlerin bir standart şekle alınması gerekmektedir. Sebebi ise her deneyin farklı çevrim sayısına sahip olması regresyon

analizlerinde hata yaratacaktır. Bu sebeple ondalık haneye sahip olarak verilerde bulunan çevrim sayısı değerleri yukarı yuvarlanmıştır. Örnek verecek olursak Şekil 4.17'de R_u=0,8 değerine ulaşmak için gerekli için gerekli çevrim sayısının 11,39 olduğu gözükmektedir. 11,39'uncu çevrim demek 11. çevrimin tamamlandığı ve 12. çevrim içinde olduğumuzun göstergesidir ve N sayısı yukarı yuvarlanarak turuncu kutu içerisinde yer alan 12. çevrim olarak düzenlenmiştir. Standardize edilmiş eğrilerin tam olarak deney eğrileriyle örtüşmediği gözükmektedir. Fakat eğrilerin R^2 değerleri incelendiğinde çok büyük bir sapma olmadığı görülmektedir. Düzeltilmiş eğri R^2 0,9604 çıkarken ham veri R^2 değeri 0,9915 çıkmaktadır. Analizler için gerekli bir adım olduğu için bu işlem elzemdir.



Şekil 4.17. Veri N düzeltme.

4.2.3. Lineer regresyon denemeleri

Modelleme sürecine geçmeden önce bağımlı değişken olan R_u ile zemin/dinamik parametreler arasındaki ilişkiyi doğrudan tanımlayabilmek amacıyla, çok değişkenli lineer regresyon analizi yapılmıştır. Bu ilk deneme, verinin yapısını anlamaya yönelik bir keşif süreci niteliğindedir.

Lineer regresyon, bağımlı bir değişkenin (bu çalışmada r_u) bir veya daha fazla bağımsız değişkenle (CSR, D_r, f, σ_3, FC vb.) arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemek amacıyla kullanılan temel bir istatistiksel yöntemdir. Regresyon analizinin amacı, belirlenen açıklayıcı değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ölçmek, modelin genellenebilirliğini test etmek ve değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemektir.

Bu süreçte elde edilen temel çıktıların her biri, farklı bir istatistiksel amaca hizmet etmektedir. Aşağıda bu kavramlar detaylı olarak açıklanmıştır.

ANOVA, varyans analizi, regresyon modelinin genel olarak anlamlı olup olmadığını test eder. Regresyon modeli, toplam varyansı iki ana bileşene ayırır. Bunlar: regresyon varyansı (SSR): Modelin açıkladığı varyans; hata varyansı (SSE): Modelin açıklayamadığı varyanstır. Bu iki varyans karşılaştırılarak F testi yürütülür:

$$F=\frac{\text{Regresyon Kareler Toplamı (SSR)/Regresyon Serbestlik Derecesi}}{\text{Hata Kareler Toplamı (SSE)/Hata Serbestlik Derecesi}} \tag{4.2}$$

Bu oran ne kadar yüksekse, modelin genel olarak veri üzerinde anlamlı açıklama yaptığı kabul edilir.

F testi, regresyon modelinin en az bir bağımsız değişkeninin istatistiksel olarak anlamlı katkı sunup sunmadığını test eder. Hipotezlere değinecek olursak H_0 tüm katsayıların 0 olduğu yani modelin açıklayıcı olmadığıdır. H_1'de ise en az bir katsayı 0 olmadığı durumdur bu da modelin anlamlı olduğuna işarettir. F değerine karşılık gelen p değeri, bu hipotezi test eder: $p<0,05$ durumunda model anlamlıdır ve H_0 reddedilir. $p>0,05$ ise model anlamlı değildir ve H_0 kabul edilir.

Yapılan lineer regresyon çalışmasında CSR regresyonu için F=7,11 ve p=0,008 çıkmıştır. Bu, modelin genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. D_r değişkeni için F=4,37, p=0,038 olup anlamlılık kabul edilebilir seviyededir. Her bağımsız değişken için ayrıca bir t testi uygulanır. Bu test, ilgili değişkenin katsayısının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eder.

$$t=\frac{\beta}{\text{Standart Hata}} \tag{4.3}$$

H_0: $\beta = 0$ (değişken etkisiz), H_1: $\beta \neq 0$ (değişken anlamlı) anlamına gelmektedir.

Ortaya çıkan t değeri ile p değeri hesaplanır. $p<0,05$ ise, değişkenin R_u üzerinde anlamlı etkisi olduğu kabul edilir. Örneğin f değişkeni için p = 0,137 çıktığında, değişken modele katkı sunmuyor denir. Oysaki önemli bir parametredir lineer olmayan bir ilişkiye sahip olabilmektedir.

R^2, bağımlı değişkendeki toplam değişimin ne kadarının model tarafından açıklandığını gösterir. 0 ile 1 arasında değer alır. Ayarlanmış R^2, modele dahil edilen değişken sayısına bağlı olarak R^2'yi cezalandırır. Yani çok sayıda anlamsız değişkenin modele dahil edilmesini önler.

Bu çalışmada elde edilen R^2 değerleri 0,001–0,07 arasında düşük düzeylerde kalmış; bu da lineer modellerin açıklayıcılığının sınırlı olduğunu göstermiştir. Yapılan beş ayrı lineer regresyon denemesinde sadece D_r ve tüm değişkenli model istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. CSR, f ve σ_3 gibi değişkenlerin tek başına anlamlı sonuç üretmemesi, boşluk suyu basıncı gelişiminin klasik lineer modellerle açıklanamayacağını, daha karmaşık ve nonlineer ilişkilere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, sonraki aşamada sembolik regresyon yöntemlerine geçilmesi gerekli hale gelmiştir.

Çizelge 4.8. Lineer regresyon denemeleri.

Model	**F Anlamlılık (F Sig.)**	**p-değeri**
CSR	7,115258	0,008672
D_r	4,373074	0,038569
f	2,235652	0,137421
σ_3	0,229009	0,633109
Tüm Değişkenler	7,115258	0,008672

Yürütülen lineer regresyon analizleri sonucunda elde edilen F testi sonuçları, modelin genel anlamlılık düzeyini ortaya koymakta; p-değerleri ise her bir bağımsız değişkenin r_u üzerindeki katkısını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Aşağıda, beş farklı regresyon modeli için elde edilen F değerleri ve p-değerleri Çizelge 4.8'de sunulmuştur ve aşağıda sıralanmıştır:

- CSR değişkeni ile oluşturulan model, F=7,12 ve p=0,0087 değerleriyle istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç, CSR'nin R_u üzerindeki etkisinin lineer düzlemde anlamlı olduğunu göstermektedir.
- D_r (rölatif sıkılık) değişkenine ait modelde F=4,37 ve p=0,0386 elde edilmiştir. Bu değerler, %5 anlamlılık düzeyinin altında olduğundan, D_r'nin de bağımsız olarak R_u'ya katkı sağladığı sonucunu desteklemektedir.

- f (yükleme frekansı) için elde edilen F=2,24 ve p=0,1374 değerleri, %5 anlamlılık düzeyinin üzerinde olup modelin istatistiksel olarak anlamlı kabul edilemeyeceğini göstermektedir.
- σ_3 (çevre basıncı) ile oluşturulan modelin çıktısı F=0,229 ve p=0,6331 olup oldukça düşük anlamlılık göstermekte ve lineer modelde R_u üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığını ortaya koymaktadır.
- Tüm değişkenlerin birlikte yer aldığı çoklu modelde ise F=7,12 ve p=0,0087 elde edilmiştir. Bu sonuç, en az bir değişkenin modele anlamlı katkı sunduğunu ve tüm değişkenlerin birlikte değerlendirildiğinde modelin istatistiksel olarak güçlü hale geldiğini göstermektedir.

Bu analizler, lineer regresyon modellemesi kapsamında sadece CSR ve D_r değişkenlerinin bireysel olarak istatistiksel anlam taşıdığını, diğer değişkenlerin (özellikle f ve σ_3) lineer yapı içerisinde R_u'yu yeterince açıklayamadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, tüm değişkenlerin birlikte yer aldığı çoklu regresyon modeli, istatistiksel olarak anlamlı çıkmış; bu da değişkenler arasında olası etkileşimlerin veya bir arada değerlendirilme avantajının bulunduğunu düşündürmektedir.

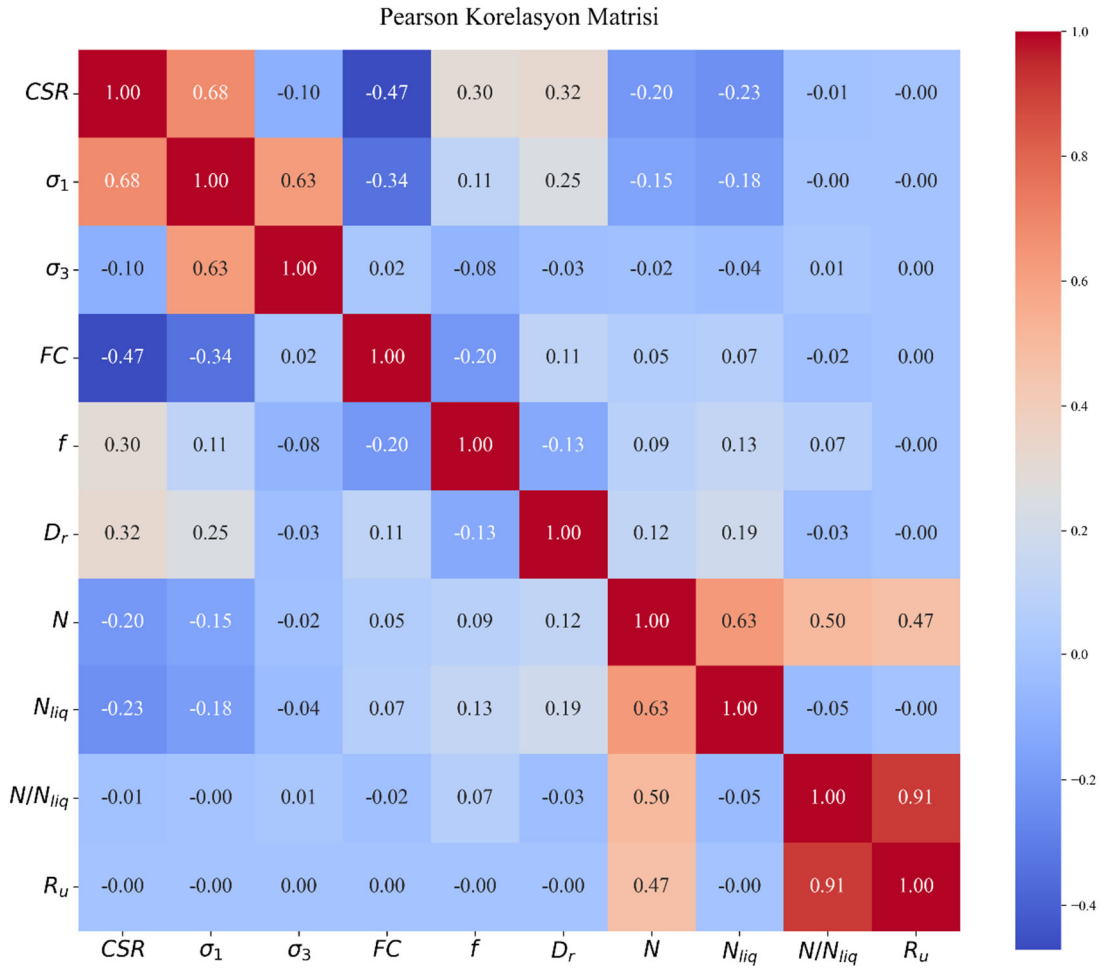
Ancak tüm modellerde açıklanan varyansın sınırlı olması ve bazı değişkenlerin tutarsız katkıları, bu çalışmada hedeflenen yüksek açıklama gücüne ulaşmak için daha esnek ve nonlineer modelleme yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Değişken korelasyonlarını denemek adına Bölüm 4.2.4'teki yöntemler denenmiştir.

4.2.4. Korelasyon ve değişken önem analizi

Bu başlık altında önem analizi yöntemlerinden bahsedilecektir.

4.2.4.1. <u>Pearson korelasyon katsayısı</u>

Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişken olan r_u ile olan ilişkisini değerlendirmek amacıyla korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçmek üzere Pearson korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Bu yöntem, değişkenler arasındaki doğrusal bağın gücünü ve yönünü belirlemek için klasik bir istatistiksel ölçüt olup katsayı değerinin -1 ile +1 arasında değiştiği bilinmektedir. Sıfıra yakın katsayılar, iki değişken arasında anlamlı bir doğrusal ilişki olmadığını ifade eder.



Şekil 4.18. Pearson korelasyon matrisi.

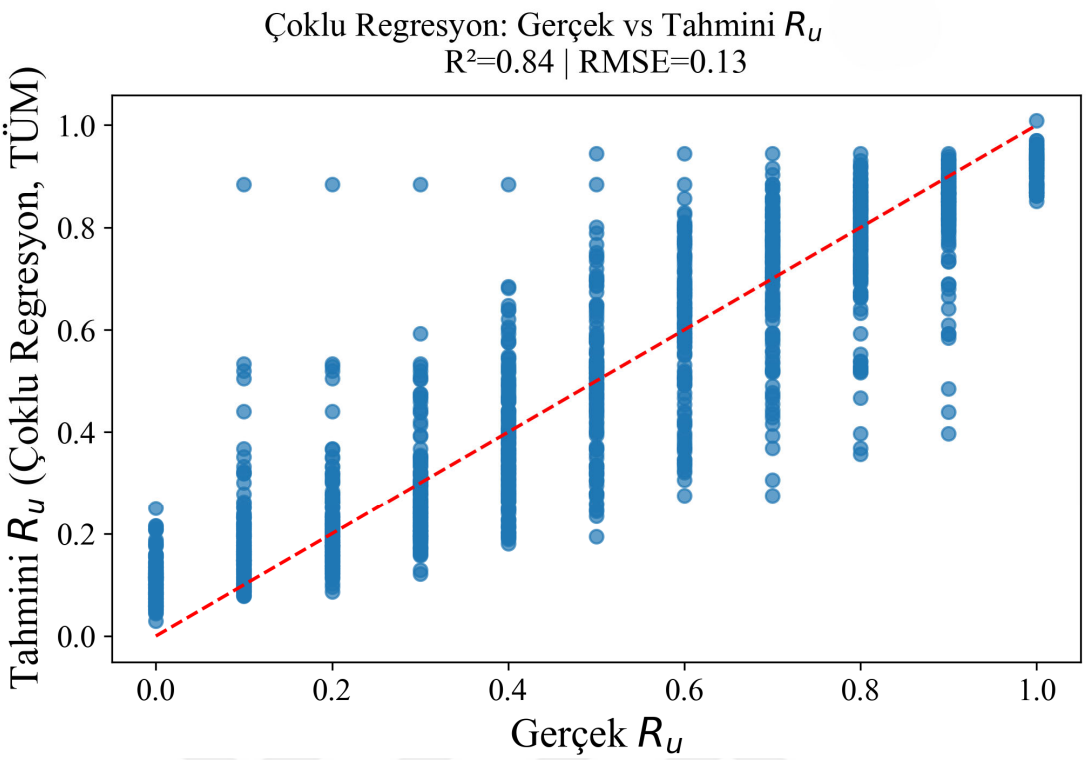
Yapılan analizde elde edilen Pearson korelasyon matrisi, Şekil 4.18'de sunulmaktadır. Görsel incelendiğinde, hedef değişken olan R_u ile diğer tüm bağımsız değişkenler arasında belirgin bir doğrusal ilişki bulunmadığı gözlenmektedir. Özellikle CSR, σ_1, σ_3, FC, f, D_r ve N_{liq} gibi deneysel parametrelerle r_u arasındaki korelasyon katsayıları neredeyse sıfırdır ($r \approx 0{,}00$). Sadece çevrim sayısı (N) ile r_u arasında $r=0{,}44$ düzeyinde orta şiddette pozitif bir ilişki tespit edilmiştir. Fakat çevrim sayısının, sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı ile normalize edilmiş haline baktığımızda (N/N_{liq}) değerine baktığımızda $r=0{,}91$ değeriyle yüksek pozitif bir ilişki bulunmuştur.



Şekil 4.19. Pearson korelasyonu p-değeri matrisi.

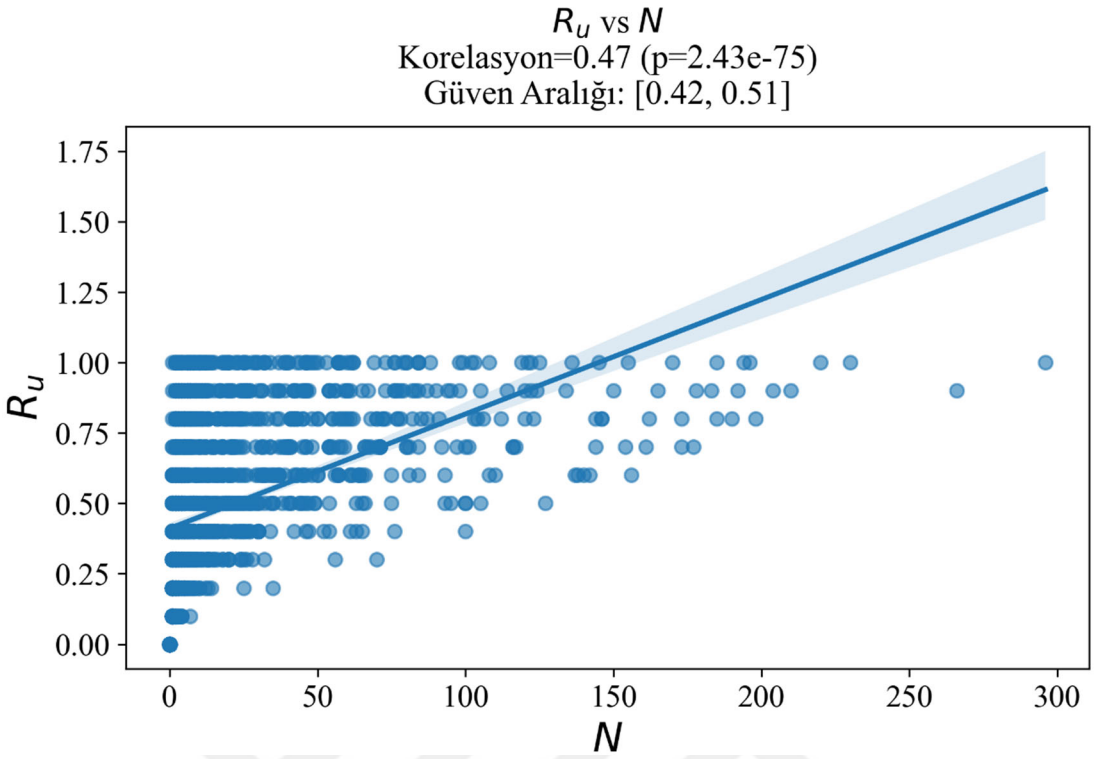
Şekil 4.19'da p-değeri matrisine yer verilmiştir. Önceki konularda da bahsedildiği üzere $p<0,05$ için anlamlılık durumu oluşmaktaydı. Matrisi incelediğimizde bağımsız değişken olarak düşündüğümüz verilerden sadece N/N_{liq} değeri bu rakamın altında kalmakta ve anlamlılık ifade etmektedir.

Tüm parametrelerin hesaba katılmasıyla oluşturulmuş regresyonun tahmin değerleri ve gerçek değerlerinin dağılımı Şekil 4.20'de sunulmuştur. Analizlerde uyumun yüksek hatanın az olmasını beklenmektedir. Tek bir ifadeyle verileri anlamlı kılmak yetersizdir. Burada R^2 değeri 0,84 önemi kadar Kök Ortalama Karesel Hata değeri 0,13'ün de önemi büyüktür. Uyum yüksek hata az çıkmıştır. Bu analizde çoğu parametre anlamsız olsa da N/N_{liq} değerinin yapıyı güçlendirdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.20. Tahmin-Gerçek Ru dağılımı.

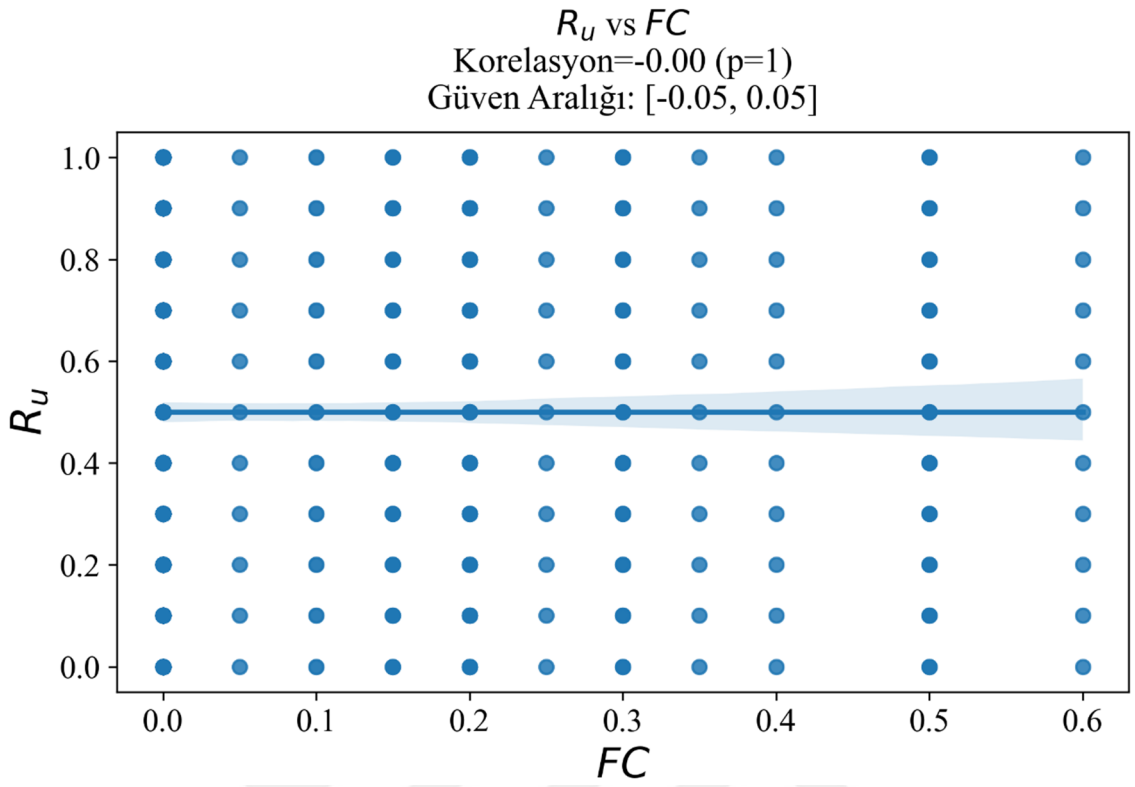
Şekil 4.21'de, çevrim sayısı (N) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki dağılımı ve doğrusal regresyon eğrisi gösterilmiştir. Analiz sonucunda, iki değişken arasında anlamlı düzeyde pozitif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir (korelasyon katsayısı = 0,47, $p<0,001$). Bu değer, çevrim sayısı arttıkça R_u değerinin de genel olarak yükseldiğini, ancak ilişkinin tam doğrusal olmadığını ve orta kuvvette olduğunu göstermektedir. Korelasyonun istatistiksel olarak yüksek anlamlılık düzeyine sahip olduğu, p-değerinin çok küçük (2,43e-75) çıkmasından anlaşılmaktadır. Ayrıca, korelasyon katsayısının güven aralığı [0,42, 0,51] olarak bulunmuş olup, bu aralık ilişki gücünün istikrarlı olduğunu desteklemektedir. Grafikte görüldüğü üzere, düşük çevrim sayılarında R_u değerlerinin geniş bir aralıkta dağıldığı, yüksek çevrim sayılarında ise R_u'nun belirgin şekilde arttığı izlenmektedir. Bu durum, zeminde tekrarlı yükleme uygulandıkça boşluk suyu basıncı birikiminin belirginleştiğini ve sıvılaşma eğiliminin güçlendiğini ortaya koymaktadır. Dağılımda gözlemlenen yatay yoğunluklar, belirli R_u seviyelerinde kümelenmeler olduğunu; bazı yüksek N değerlerinde ise uç değerlerin ortaya çıktığını göstermektedir. Çevrim sayısı ile R_u arasındaki ilişkinin doğrusal bir bileşeni bulunsa da verinin tamamı üzerinde doğrusal bir modelin sınırlı açıklama gücüne sahip olduğu ve bu tür zemin davranışlarında nonlineer etkilerin de dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.21. Ru-N dağılımı.

Şekil 4.22'de ince dane oranı ile boşluk suyu basıncı oranı (arasındaki ilişki gösterilmiştir. Korelasyon katsayısı sıfıra çok yakın olarak hesaplanmış (r≈0,00, p=1) ve güven aralığı da [-0,05, 0,05] olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, incelenen veri seti kapsamında FC değişkeninin R_u üzerinde lineer açıdan anlamlı veya istatistiksel olarak belirgin bir etkisinin bulunmadığını göstermektedir. Regresyon doğrusu neredeyse yatay olup, veri noktalarının büyük kısmı FC ekseni boyunca dağılmıştır.

Bu bulgular neticesinde, R_u gelişiminin sadece çevrim sayısıyla kısmen ilişkilendirilebildiğini, diğer değişkenlerle olan ilişkinin ise doğrudan lineer bir yapıdan çok nonlineer ve karmaşık bir karaktere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle sadece Pearson analizine dayalı bir önseziden yola çıkılarak modelleme yapılması uygun görülmemiştir. Lineer korelasyonun zayıf çıkması, sonraki adımlarda Spearman korelasyonu ve makine öğrenmesi tabanlı değişken önem analizlerine geçilmesini gerektirmiştir.



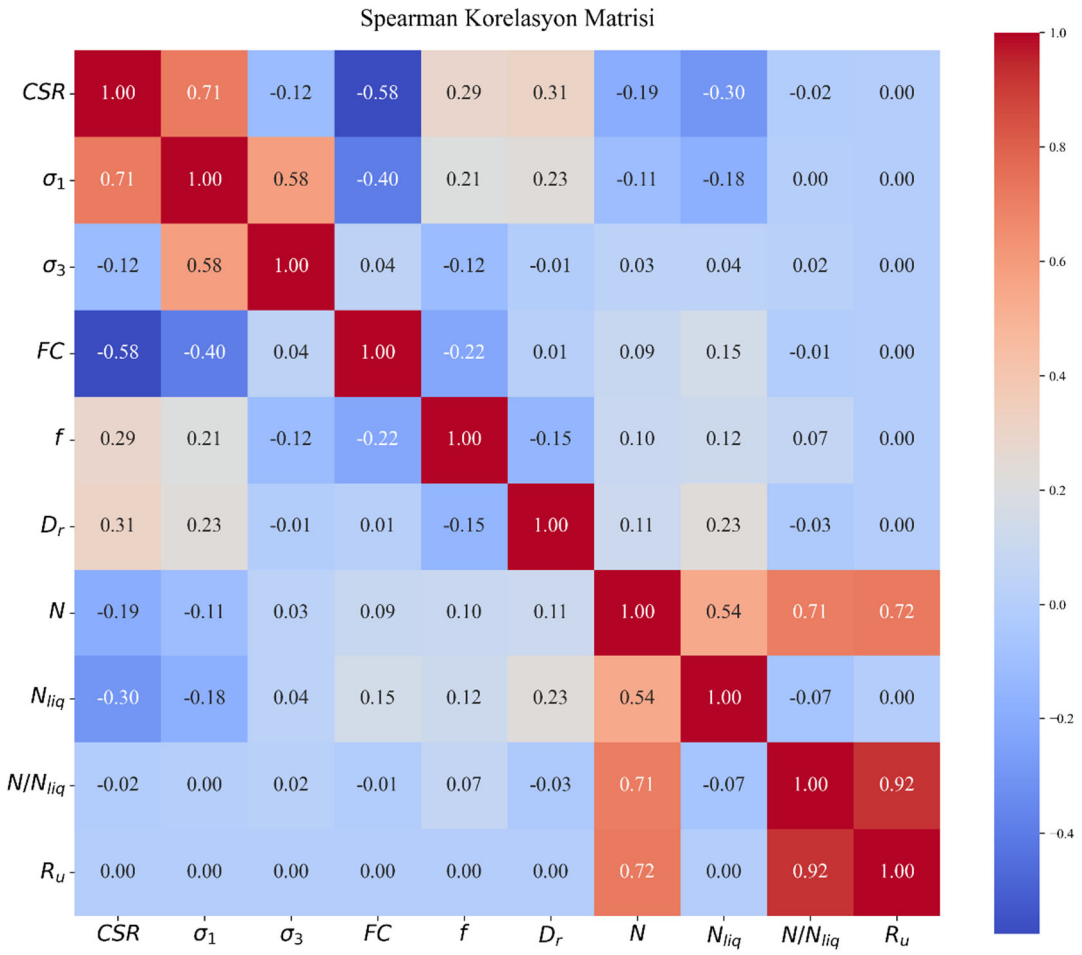
Şekil 4.22.R_u-FC dağılımı.

4.2.4.2. Spearman korelasyon katsayısı

Pearson korelasyon analizinde bağımsız değişkenlerle R_u arasında güçlü bir doğrusal ilişki tespit edilememesi üzerine, değişkenler arası olası monoton ama doğrusal olmayan ilişkilerin değerlendirilmesi amacıyla Spearman sıra korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Spearman korelasyonu, değişkenlerin sıralamaları üzerinden ilişkiyi ölçtüğü için, özellikle doğrusal olmayan ancak yönlü (monotonik) ilişkilerde daha güçlü bir gösterge sunmaktadır (Hauke & Kossowski, 2011).

Bu analizde kullanılan katsayı aralığı, Pearson ile aynıdır (−1 ila +1); ancak Spearman, veri noktalarının değerlerinden ziyade sıralamalarına odaklanır. Bu yönüyle, ampirik zemin davranışı gibi lineer olmayan fiziksel sistemlerde, Spearman korelasyonu daha açıklayıcı sonuçlar verebilmektedir.

Elde edilen Spearman korelasyon matrisi Şekil 4.23'te sunulmuştur.



Şekil 4.23. Spearman korelasyon matrisi

Şekil 4.23'te gösterilen analiz sonuçlarına göre, boşluk suyu basıncı oranı ile en yüksek korelasyona sahip parametreler sırasıyla çevrim sayısının sıvılaşma çevrim sayısına oranı (N/N_{liq}) ve çevrim sayısı (N)'dir. Özellikle N/N_{liq} ile R_u arasında elde edilen 0,92'lik çok güçlü korelasyon, sıvılaşma sürecinin en iyi şekilde bu parametreyle özetlenebileceğini göstermektedir. Ayrıca N ile R_u (r=0,72) ve N ve N_{liq} (rs=0,71) arasındaki pozitif ilişkiler de bu sonucu desteklemektedir.

Diğer taraftan, veri setinde öne çıkan bazı parametreler arasında da dikkat çekici ilişkiler saptanmıştır. Çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile deviator gerilme (σ_1) arasında 0,71 gibi yüksek pozitif bir korelasyon bulunmuştur. Bu, deneysel mekanik açıdan beklenen bir durumdur ve yükleme koşullarının sıklıkla birbirine bağlı olduğunu yansıtmaktadır. Benzer şekilde, deviator gerilme (σ_1) ile çevre basıncı (σ_3) arasındaki 0,58'lik pozitif ilişki de deney koşullarındaki birlikte değişimi yansıtır.

Bunun yanında, ince dane oranı (FC) ile CSR arasında -0,58'lik güçlü negatif bir korelasyon söz konusudur. Yani FC arttıkça CSR'ın düştüğü görülmektedir. Bu, ince daneli zeminlerde çevrimsel gerilme oranının azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Yine σ_1 ile FC arasında da -0,40 düzeyinde anlamlı bir negatif ilişki vardır.

Çevrim sayısı (N) ile sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı (N_{liq}) arasında 0,54 düzeyinde pozitif bir ilişki saptanmış, ayrıca N ile N/N_{liq} arasında 0,71 ve N_{liq} arasında N/N_{liq} da belirgin korelasyonlar elde edilmiştir. Bu bulgular, yükleme çevrimiyle ilgili parametrelerin birbirleriyle tutarlı ve beklenen şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, D_r (rölatif sıkılık), f (frekans), R_u – FC veya R_u – σ_1 bazı değişkenler arasında ise kayda değer bir korelasyon gözlenmemiştir ($|r|<0,30$). Spearman analizine göre bu parametrelerin sıvılaşma davranışının modellenmesinde tek başına belirleyici olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.24. Spearman p-değerleri.

Şekil 4.24'te gösterilen matriste, özellikle R_u ile N/N_{liq}, N ve N_{liq} arasındaki ilişkilerin p-değerleri sıfıra yakın bulunmuş, yani bu yüksek korelasyonların tamamı istatistiksel olarak son derece anlamlıdır. Bu durum, bir önceki korelasyon matrisinde tespit edilen güçlü monotonik ilişkilerin yalnızca tesadüften kaynaklanmadığını, istatistiksel olarak da doğrulandığını göstermektedir. Benzer şekilde, CSR–σ_1, σ_1–σ_3, FC–CSR, N–N_{liq} gibi daha önce vurgulanan yüksek korelasyonlu çiftlerin p-değerleri de çok düşük olup, anlamlılık düzeyleri yüksektir.

Öte yandan, p-değeri 0,05'in üzerinde olan (matriste 0,05'ten büyük veya ≈1 olarak gösterilen) bazı ilişkiler, örneğin R_u ile D_r, FC, σ_1, σ_3, f gibi parametreler arasında yer almakta ve bu durum, bu değişkenler arasında korelasyonun zayıf olduğunu (önceki matriste gözlendiği üzere), elde edilen korelasyonun istatistiksel olarak güvenilir olmadığını göstermektedir. Bahse konu parametrelerde sıfıra yakın veya düşük bir korelasyon elde edilmiş ve bu ilişki istatistiksel anlamlılık düzeyine ulaşmamıştır.

Spearman matrisi ve p-değerleri zemin sıvılaşmasının temel kontrol parametrelerini ve aralarındaki ilişkileri net biçimde ortaya koymuştur. Özellikle N/N_{liq}, N, N_{liq}, CSR ve σ_1 gibi değişkenler, modelleme ve mekanik yorumlamalar için veri setinin merkezinde yer almaktadır. Buna karşın, FC ve D_r gibi zemin özelliklerinin R_u üzerinde tek başına anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Analizler, sıvılaşmanın en güçlü belirleyicilerinin çevrimsel yükleme ile ilişkili değişkenler olduğunu doğrulamaktadır. Özetle, Spearman korelasyonu da bazı değişkenlerin ilişkisini açıklasa da bazı değişkenlerin ilişkisini tıpkı Pearson doğrudan açıklayamamıştır. Bu zaman kadar yapılan çalışmalarda bazı değişkenlerin R_u üzerindeki etkisi lineer ve nonlineer olarak gözlenememiştir. Bir sonraki bölümde lineer ver nonlineer davranışların beraber incelenmesi adına karşılıklı bilgi (mutual information) analizi yapılacaktır.

4.2.4.3. Karşılıklı bilgi analizi

Klasik korelasyon analizleri, değişkenler arasındaki yalnızca doğrusal veya monotonik ilişkileri tespit etme yeteneğine sahiptir. Ancak zemin mühendisliği ve benzeri disiplinlerde, parametreler arasındaki ilişkiler çoğu zaman doğrusal olmayan (nonlineer) ve

daha karmaşık yapılar sergileyebilmektedir. Bu tür karmaşık bağımlılıkları ortaya çıkarmak için kullanılan en güçlü yöntemlerden biri mutual information (karşılıklı bilgi) analizidir.

Mutual information, iki değişken arasında paylaşılan toplam bilgiyi ölçer. Bir değişkenin değerinin, diğer değişkenin değeri hakkında ne kadar bilgi verdiğini niceliksel olarak ortaya koyar. Sıfıra yakın değerler, iki değişken arasında hiçbir bağımlılık olmadığını gösterirken yüksek mutual information değerleri, doğrusal ya da doğrusal olmayan herhangi bir ilişki biçiminde değişkenler arasında anlamlı bir bilgi akışı olduğunu işaret eder. Bu yönüyle mutual information, klasik korelasyon katsayılarından çok daha geniş bir ilişki türünü kapsayabilmekte ve özellikle karmaşık, nonlineer veri setlerinde, hangi parametrelerin modelleme açısından en fazla bilgi içerdiğini belirlemede son derece etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 4.25'te sunulan mutual information matrisi, veri setindeki değişken çiftleri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkilerin toplam gücünü ölçmektedir. CSR–σ_1 (2,74), σ_1–CSR (2,76), N_{liq}–σ_1 (2,48), D_r–N_{liq} (2,40), CSR–N_{liq} (2,24), σ_1–D_r (1,75), gibi değişken çiftleri arasında yüksek düzeyde karşılıklı bilgi olduğu görülmektedir. Bu, iki değişkenin birbiriyle doğrudan ya da karmaşık biçimde bilgi paylaştığını, yani birbirlerinin değerlerini önemli ölçüde öngörebileceğini gösterir. R_u için bakıldığında, en yüksek mutual information değeri N/N_{liq} (1,11) ve N (0,59) ile görülmektedir. Bu bulgu, R_u üzerinde en fazla bilgi taşıyan değişkenlerin yine çevrim sayısı tabanlı parametreler olduğunu göstermekte, önceki korelasyon analizlerinin bulgularını desteklemektedir. CSR, σ_1 ve N_{liq} gibi parametreler arasında da karşılıklı bilgi yüksektir. Bu, özellikle deneysel koşullarda birlikte değişen veya karmaşık (nonlineer de dahil) bağımlılık gösteren parametrelerde beklenen bir sonuçtur. FC (ince dane oranı) ve f (frekans) gibi değişkenlerle R_u arasındaki mutual information değeri sıfıra yakındır, yani bu değişkenler R_u hakkında ek bilgi sağlamamaktadır.

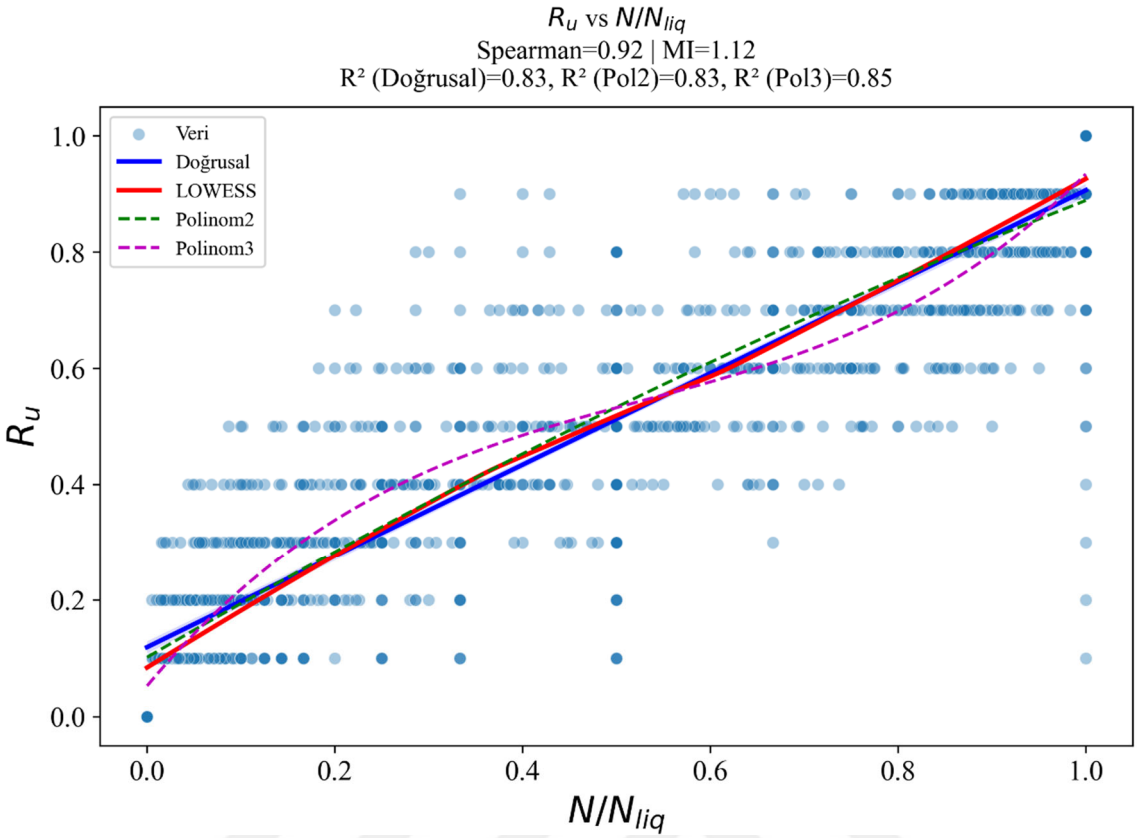
Mutual information analizi doğrusal ve karmaşık ilişkileri kapsaması nedeniyle, veri setinde klasik korelasyon analiziyle gözden kaçabilecek bağımlılıkları da ortaya koymaktadır. Ancak, bu analizde de en fazla bilgi paylaşan değişkenlerin, mekanik olarak anlamlı olan çiftler ve özellikle çevrim sayısı parametreleri olduğu görülmektedir. Buna karşın, zemin özelliklerinden FC ve D_r gibi parametreler R_u ile ilgili anlamlı bir bilgi taşımamaktadır.

Analiz öncesi mutual information matrisinin kullanılması, modelleme ve özellik seçimi aşamalarında hangi değişkenlerin hedef değişken üzerinde daha fazla etkili veya açıklayıcı olabileceğini hem doğrusal hem de nonlineer açıdan belirlemek için güçlü bir araç sunar.



Şekil 4.25. Karşılıklı bilgi analizi.

Şekil 4.26'da N/N_{liq} ile boşluk suyu basıncı oranı R_u arasındaki ilişki hem doğrusal hem de farklı dereceden eğrisel (polinomsal) modellerle birlikte sunulmuştur.



Şekil 4.26. Spearman R_u-N/N_{liq} dağılımı.

Analiz sonuçlarına göre, iki değişken arasında çok güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir monotonik ilişki bulunmuştur (Spearman korelasyon katsayısı = 0,92). Karşılıklı bilgi (mutual information, MI = 1,12) değeri de N/N_{liq} değişkeninin R_u üzerinde yüksek düzeyde bilgi taşıdığını, yani hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bağımlılıkların güçlü olduğunu göstermektedir.

Grafikteki doğrusal regresyon çizgisi (mavi), LOWESS (kırmızı, lokal doğrusal regresyon), ikinci dereceden polinom (yeşil, kesikli) ve üçüncü dereceden polinom (mor, kesikli) eğrileri ile birlikte sunulmuş ve tüm modellerde elde edilen R^2 değerleri yüksek çıkmıştır ($R^2 \approx 0{,}83–0{,}85$). Bu durum hem doğrusal hem de eğrisel modellerin veriyi başarıyla açıkladığını, ancak polinomsal modellerle açıklama gücünde hafif bir artış sağlandığını göstermektedir. LOWESS eğrisinin veriye uyumu da verideki lokal değişimlerin yakalanmasında başarılı olunduğunu işaret etmektedir.

Veri dağılımı incelendiğinde, N/N_{liq} oranı arttıkça R_u değerlerinin de belirgin şekilde arttığı ve bu artışın büyük oranda doğrusal, yer yer ise hafif eğrisel (nonlineer)

karakter gösterdiği görülmektedir. Bu, sıvılaşma davranışının tahmininde N/N_{liq} parametresinin kritik önemde olduğunu ve R_u üzerinde hem doğrusal hem de karmaşık etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Hem yüksek Spearman korelasyon katsayısı hem de mutual information değerinin güçlü çıkması, N/N_{liq} değişkeninin boşluk suyu basıncı gelişimini sıralı (monotonik) ve genel bağımlılık anlamında başarılı bir şekilde açıkladığını göstermektedir. Çeşitli regresyon modellerinin başarıyla uygulanması da bu bulguyu desteklemektedir.

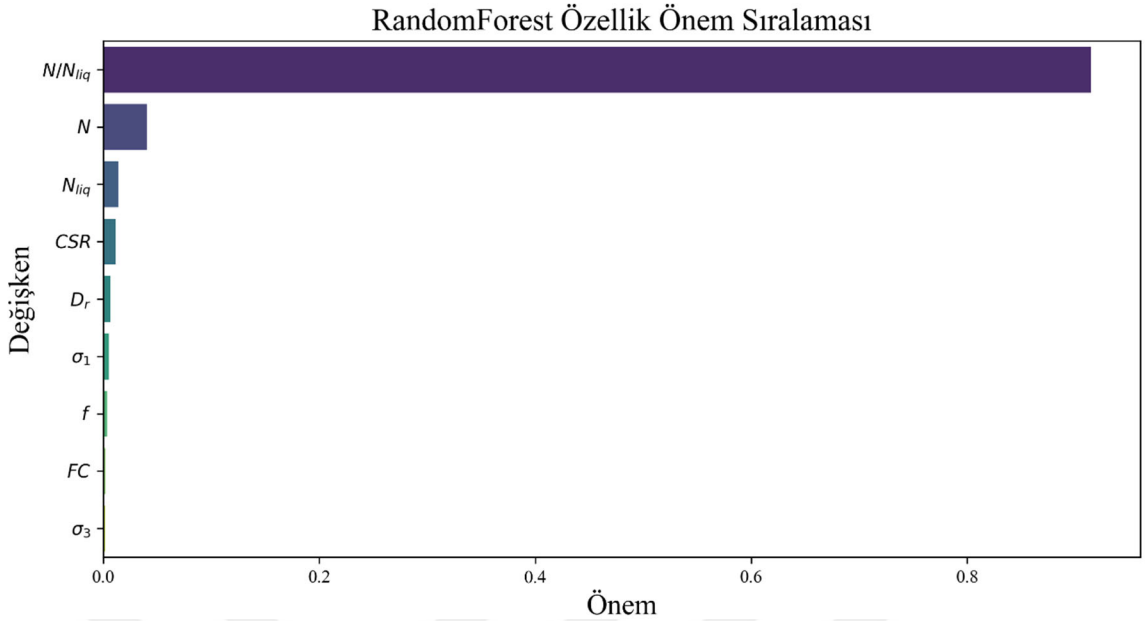
Bu analizler sonrası düşük anlamlılık seviyesinde kalmış değişkenlerde daha kompleks yapıların olabileceğinden ve göz ardı etmemek adına sonraki adımlarda makine öğrenmesi tabanlı yöntemlere (Random Forest, XGBoost) geçilecektir.

4.2.4.4. Random forest ve xgboost ile değişken önem analizi

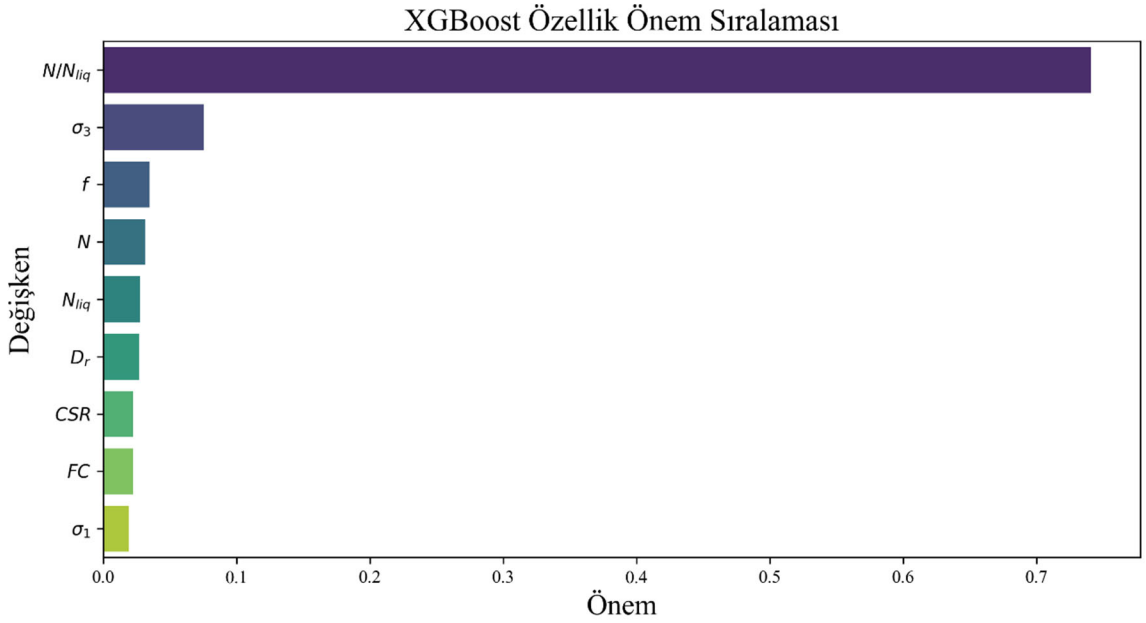
Korelasyon analizlerinin ardından, değişkenlerin R_u üzerindeki etkilerini daha kapsamlı şekilde değerlendirebilmek için makine öğrenmesi tabanlı önem analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda hem Random Forest Regressor hem de XGBoost Regressor algoritmaları uygulanmış ve her bir modelin değişkenlere atfettiği önem yüzdeleri çıkarılmıştır.

Bu algoritmalar, doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilen karar ağacı tabanlı modellere dayanmaktadır. Random Forest, çok sayıda karar ağacının ortalamasını alırken, XGBoost ise her bir ağaçta hatayı minimize ederek daha yüksek doğrulukla çalışacak şekilde ardışıl iyileştirmeler uygular (Chen ve Guestrin, 2016). Her iki yöntem de bağımsız değişkenlerin modele katkı düzeyini ölçme konusunda etkili ve yaygın olarak kabul görmüş yaklaşımlardır.

Modelleme sürecinde her iki algoritma da R_u'yu hedef değişken (output) olarak alacak şekilde eğitilmiştir. Giriş değişkenleri olarak CSR, D_r, σ_1, σ_3, f, FC, N ve N_{liq} kullanılmıştır. Elde edilen önem düzeyleri Random Forest için Şekil 4.27'de XGBoost için Şekil 4.28'de sunulmuştur. Ayrıca önem değerleri % cinsinden Çizelge 4.9'da yer verilmiştir. Random forest analizi sonucu R^2: 0,921, RMSE: 0,090, MAE: 0,064; XGBosst analizi sonucu R^2: 0,940, RMSE: 0,078, MAE: 0,056 istatistiksel değerleri elde edilmiştir. Veriler incelendiğinde iki modelin de hata parametrelerinin azlığı ve uyumun yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.27. Random forest ile değişken önem analizi.



Şekil 4.28. XGBoost ile değişken önem analizi.

Makine öğrenmesi tabanlı modelleme sonuçlarında Random Forest ve XGBoost algoritmaları, bağımlı değişken olan boşluk suyu basıncı oranı üzerinde en baskın parametrenin açık ara farkla N/N_{liq} olduğunu göstermiştir. Random Forest modelinde N/N_{liq} değişkeninin göreli önemi %91,45 gibi çok yüksek bir seviyededir. XGBoost modelinde de

bu oran %74,08 ile en yüksek seviyededir. Her iki modelde de bu parametrenin diğer tüm değişkenlere kıyasla çok daha belirleyici olduğu açıkça ortaya konmuştur.

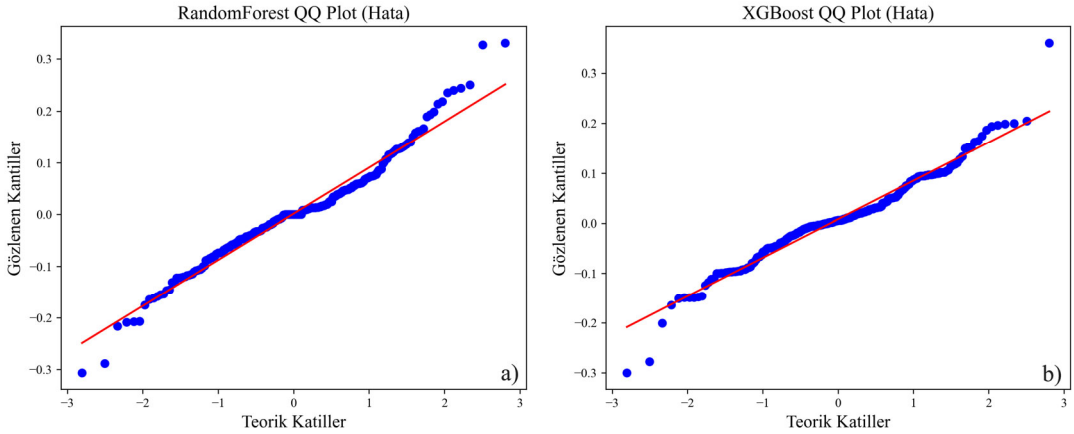
Random Forest için ikinci ve üçüncü sıradaki değişkenler N (%4,04) ve N_{liq} (%1,43) iken, XGBoost'ta sıralama biraz daha dağılmış olup sırasıyla N (%7,54), N_{liq} (%3,46), CSR (%3,12), D_r (%2,73) ve σ_1 (%2,68) şeklindedir. XGBoost'un, özellikle ikincil faktörlere biraz daha ağırlık verdiği görülmektedir.

Her iki modelde de çevrimsel gerilme oranı (CSR), rölatif sıkılık (D_r), deviator gerilme (σ_1), frekans (f), ince dane oranı (FC) ve çevre basıncı (σ_3) gibi zemin mekaniğinin önemli klasik parametreleri, görece düşük oranlarda kalmıştır (%1–3). Bu durum, klasik istatistiksel modelleme veya doğrudan korelasyon analizlerinin aksine, verinin yüksek boyutlu ve nonlineer karakteristiği göz önüne alındığında, makine öğrenmesi algoritmalarının daha baskın ve belirleyici bir kombinasyon (N/N_{liq}) bulabildiğini göstermektedir.

RF ve XGBoost sonuçları korelasyon ve karşılıklı bilgi analizleriyle uyumlu şekilde, N/N_{liq} oranının modelde anahtar rol oynadığını, diğer zemin parametrelerinin ise ikincil seviyede açıklama gücüne sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle XGBoost modelinin, önemli ama daha küçük etkiye sahip değişkenleri de hesaba kattığı görülmektedir. Bu sonuç modelleme ve saha/deney verisinin yorumu açısından tutarlı ve güvenilir bir öngörü sunmaktadır.

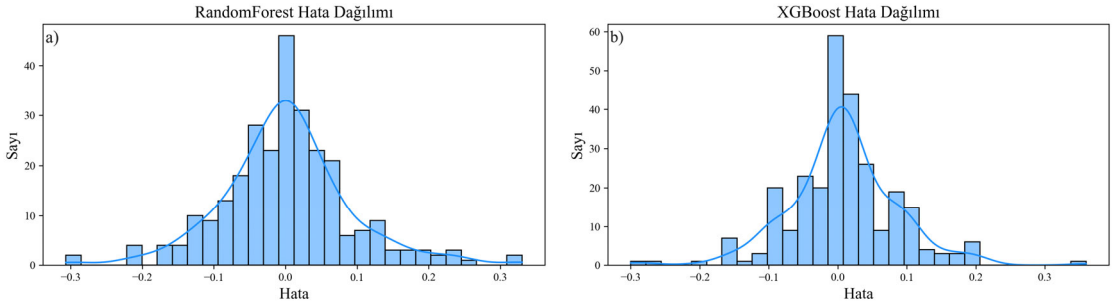
Çizelge 4.9. Önem dereceleri.

	RF	**XGBoost**
Değişken	Önem (%)	Önem (%)
N/N_{liq}	91,45	74,08
N	4,04	7,54
Nliq	1,43	3,46
CSR	1,15	3,12
D_r	0,64	2,73
σ_1	0,53	2,68
f	0,35	2,23
FC	0,22	2,22
σ_3	0,18	1,94



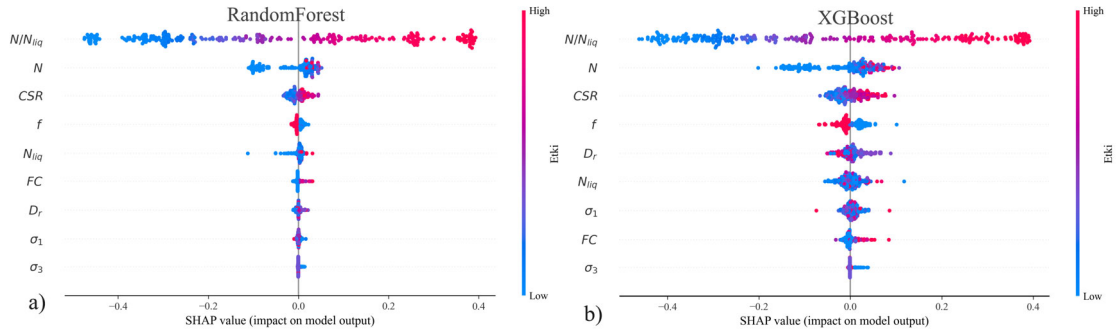
Şekil 4.29. QQ verileri a) RandomForest analizi sonucu, b) XGBoost analizi sonucu.

Şekil 4.29'da analizler sonucu elde edilen QQ grafikleri gösterilmiştir.X ekseni normal dağılımdan beklenen kantil değerlerini, y ekseni modelin gerçek hata dağıımının kantil değerleridir. Kırmızı çizgi hataların tam olarak normal dağılıma uyduğu ideal durumu temsil etmektedir. Mavi noktalar ise gerçek hata değerlernin kantil bazında teorik dağılımla karşılaştırılmasıdır. Noktalar genel olarak kırmızı çizgiye yakın bir seyir izlemektedir. Bu durum hataların büyük çoğunluğunun normal dağılım varsayımıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Ancak uç değerlerde sapmalar olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.30.Hata dağılımları a) RandomForest analizi sonucu, b) XGBoost analizi sonucu.

Şekil 4.30'da analizler sonucu elde edilen hata dağılım histogramları gösterilmiştir. Her iki modelde de hata dağılımı, yaklaşık olarak sıfır etrafında simetrik ve çan eğrisi (normal dağılıma yakın) şeklindedir. Bu, modellerin yanlılık (bias) üretmediğini, tahminlerde ortalama olarak sapmanın çok düşük olduğunu gösterir. Hataların çoğu sıfıra yakın olup, uç değerler oldukça azdır. B durum modelin genellikle doğru tahminler yaptığını, nadiren aykırı (outlier) tahminler ürettiğini gösterir.



Şekil 4.31.Shap değerleri a) Random Forest, b) XGBoost.

Her iki grafik de modelin çıktısı üzerindeki değişkenlerin etkisini ve bu etkinin şiddetini gösterir. Yatay eksende SHAP değeri (etkinin büyüklüğü ve yönü), düşey eksende ise değişkenler yer almaktadır. Bu değer hangi değişkenlerin modeli domine ettiğini anlamak için kullanılır. Bir değişkenin yüksek ya da düşük olmasının model üzerinde hangi yönde ve ne kadar etki yaptığını gösterir. Eğer beklenmeyen değişkenler üstte çıkarsa, modelin yanlış öğrenme yapıp yapmadığı kontrol edilir. Her bir nokta, bir veri örneğini temsil eder ve rengi, ilgili değişkenin değerinin düşük (mavi) veya yüksek (pembe) olduğunu gösterir. Böylece, bir değişkenin düşük ya da yüksek olmasının model çıktısını pozitif ya da negatif yönde nasıl etkilediği görselleştirilir. Her iki grafikte de N/N_{liq} değişkeni model çıktısında baskın belirleyici olarak öne çıkmakta, diğer değişkenlerin etkisi ise oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu durum, modelin öğrenmesinde N/N_{liq} oranının merkezi rolünü ortaya koyarken model geliştirme veya yorumlama aşamasında, modelin diğer bağımsız değişkenlerden yeterince faydalanıp faydalanmadığının ayrıca tartışılması gerektiğini gösterir.

İstatistiksel olarak veriler istenilen derecede olsa da bu modelleme yöntemleri kapalı kutu olduğundan fiziksel bir model elde edilemediğinden sembolik regresyon analizlerine geçilecektir.

4.2.4.5. Kullanılan algoritma yapıları

Phyton ortamında yapılandırılmış algoritmaların, pseudo kodları Şekil 4.32, 4.33, 4.34'te sunulmuştur.

Algoritma 1: Lineer Korelasyon ve Regresyon Analizi

1. Dosya ve klasör hazırlığı
    a. Çıktı klasörü oluşturulur
    b. Excel veri dosyası okunur
    c. Değişken isimleri, Ru sütunu ve sayısal kolonlar tespit edilir
2. Korelasyon analizi
    a. Pearson korelasyon matrisi ve heatmap'i oluşturulur
    b. p-değeri matrisi hesaplanır ve görselleştirilir
3. Ru ile bağımsız değişkenler arasında ayrıntılı analiz
    a. Her bağımsız değişken için Pearson korelasyon katsayısı, p-değeri, güven aralığı ve normality testi hesaplanır
    b. Sonuçlar özet tablo olarak kaydedilir
    c. Anlamlı mı etiketi eklenir ($p<0.05$ için)
4. Scatter ve regresyon grafikleri
    a. Ru ile tüm bağımsız değişkenler arasında regresyon grafikleri hazırlanır ve kaydedilir
5. Pairplot analizi
    a. Tüm sayısal değişkenlerin karşılıklı dağılımı (pairplot) oluşturulur
6. Çoklu regresyon analizi (en yüksek 3 korelasyonlu değişken ile)
    a. Ru ile en yüksek 3 korelasyonlu değişken seçilir
    b. Çoklu doğrusal regresyon modeli kurulur ve özet sonuçlar kaydedilir
    c. Gerçek ve tahmini Ru karşılaştırma grafiği çizilir
    d. Her bir bağımsız değişken için etki grafikleri oluşturulur
7. Çoklu regresyon analizi (tüm değişkenlerle)
    a. Tüm bağımsız değişkenler ile model kurulur ve özet kaydedilir
    b. Gerçek ve tahmini Ru karşılaştırma grafiği oluşturulur
8. Boxplot ile aykırı değer analizi
    a. Tüm sayısal değişkenler için yatay boxplot çizilir ve kaydedilir
9. Son kontroller ve çıktı kaydı
    a. Tüm özetler, grafikler ve analiz sonuçları klasöre kavdedilir

Şekil 4.32. Pearson pseudo kodu.

Algoritma 2: Nonlineer Korelasyon ve Regresyon Analizi

1. Dosya ve klasör hazırlığı
    a. Analiz tipi (spearman/kendall) için ayrı çıktı klasörü oluşturulur
    b. Excel veri dosyası okunur
    c. Ru sütunu, sayısal kolonlar ve değişken isimleri tespit edilir
2. Korelasyon ve p-değeri matrisi
    a. Korelasyon matrisi hesaplanır ve heatmap görselleştirilir
    b. p-değeri matrisi oluşturulur ve görselleştirilir
3. Mutual Information matrisi
    a. Tüm değişkenler arası mutual information (MI) matrisi hesaplanır
    b. MI heatmap'i oluşturulur ve kaydedilir
4. Ru ile bağımsız değişkenler için detaylı analiz ve özet tablo
    a. Her değişken için korelasyon katsayısı, p-değeri, mutual information değeri hesaplanır
    b. R2 (doğrusal, polinom2, polinom3) ve nonlineerlik artışı bulunur
    c. Sonuçlar özet tablo halinde kaydedilir, anlamlılık etiketi eklenir ($p<0.05$ için)
5. Scatter, lowess ve polinom grafikler
    a. Ru ile tüm bağımsız değişkenler için scatter, doğrusal, lowess ve polinom (2-3) eğrili grafikler hazırlanır ve kaydedilir
6. Pairplot ve boxplot analizi
    a. Sayısal değişkenlerin pairplot'u oluşturulur ve kaydedilir
    b. Sayısal değişkenler için yatay boxplot çizilir ve kaydedilir
7. Çoklu regresyon analizi
    a. MI'ya göre en yüksek 3 değişken ile çoklu regresyon modeli kurulup özet ve grafik kaydedilir
    b. Tüm bağımsız değişkenlerle çoklu regresyon analizi yapılır, özet ve grafik kaydedilir
8. (Opsiyonel) Bağlantı (tie) oranı analizi (yalnızca kendall)
    a. Bağımsız değişkenler için tie (bağlantı) oranı hesaplanır ve tablo kaydedilir
9. Son kontroller ve çıktı kaydı
    a. Tüm analiz özetleri, tablolar ve grafikler ilgili klasöre kaydedilir
    b. Kullanıcıya analiz tipi ve çıktı konumu bilgisi verilir

Şekil 4.33. Spearman pseudo kodu.

Algoritma 3: Random Forest ve XGBoost Analizi

```
1. Dosya ve klasör hazırlığı
    a. Ana çıktı klasörü ve model bazlı alt klasörler
       oluşturulur
    b. Excel veri dosyası okunur
    c. Ru (bağımlı değişken), sayısal kolonlar ve
       bağımsız değişkenler belirlenir
2. Eğitim ve test veri setlerinin hazırlanması
    a. Bağımsız ve bağımlı değişkenler belirlenir
    b. Veri %80 eğitim, %20 test olarak ayrılır
3. Model eğitimi ve değerlendirme (her iki model için
       tekrarlanır)
    a. Model eğitilir (Random Forest/XGBoost)
    b. Tahminler alınır, performans metrikleri (R2, RMSE,
       MAE) hesaplanır ve kaydedilir
    c. Model parametreleri kaydedilir
4. Özellik önem analizleri
    a. Özellik önem sıralaması % olarak hesaplanır ve
       tablo ile grafik olarak kaydedilir
5. Hata analizi
    a. Hata (residual) dağılımı histogramı hazırlanır, y
       ekseni "Sayı" olur
    b. QQ plot ile hata dağılımının normalitesi
       görselleştirilir
6. En önemli değişken için özel analiz
    a. En önemli değişken ile Ru arasındaki gerçek ve
       tahmin değerleri karşılaştırılır, scatter plot ile
       kaydedilir
7. Model yorumlanabilirliği (SHAP)
    a. SHAP ile özelliklerin modele katkısı analiz edilir
       ve özet grafik oluşturulur
8. Çapraz doğrulama (cross-validation)
    a. 5-fold cross-validation ile R2 ortalaması
       hesaplanır ve kaydedilir
9. Son kontroller ve çıktı kaydı
    a. Tüm tablo ve grafikler ilgili model klasörlerine
       kaydedilir
    b. Kullanıcıya çıktıların konumu bildirilir
```

Şekil 4.34. Random Forest ve XGBoost pseudo kodu.

4.2.5. Sembolik regresyon

Bu tez kapsamında, öncelikle deneysel verilerin istatistiksel açıdan kapsamlı bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. İlk aşamada, klasik parametrik ve parametrik olmayan korelasyon analizleriyle (Pearson, Spearman) bağımlı değişken olan R_u ile zemin

parametreleri (CSR, σ_1, σ_3, FC, f, D_r, N, N_{liq}, N/N_{liq}) arasındaki temel ilişkiler detaylı şekilde ortaya konmuştur. Takip eden aşamada, karşılıklı ilişkiler ve çoklu regresyon gibi daha ileri düzey tekniklerle hem lineer hem de nonlineer ilişki biçimleri incelenmiştir. Ayrıca, modern makine öğrenmesi yaklaşımları (Random Forest, XGBoost) kullanılarak veri setinin açıklama gücü artırılmış ve değişkenlerin önem katsayıları ortaya çıkarılmıştır.

Bütün bu analizler sonucunda açıklama gücü yüksek, pratik uygulamada kolaylık sağlayacak açık matematiksel modeller elde etmenin gerekliliği öne çıkmıştır. Klasik ve modern yöntemler çoğu zaman kapalı kutu model üretirken, bu tez kapsamında açıklanabilir yapay zekâ (explainable AI) ve ampirik model geliştirme ihtiyacını karşılayacak özgün bir yol olarak sembolik regresyon yöntemine yönelinmiştir.

Sembolik regresyon, verideki ilişkileri keşfetmek için kullanılan güçlü bir modelleme yaklaşımıdır. Temel farkı, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi önceden belirlenmiş bir fonksiyon biçimine zorlamaksızın, aralarındaki matematiksel ilişkiyi tamamen veri tarafından yönlendirilen açık formüller şeklinde otomatik olarak bulmasıdır (Cranmer, 2023). Klasik regresyonda araştırmacı, modelin doğrusal mı logaritmik mi yoksa polinomsal mı olacağına baştan karar vermektedir. Oysa sembolik regresyonda modelin hem matematiksel yapısı hem de katsayıları eş zamanlı olarak, otomatik biçimde optimize edilir. Elde edilen denklemler yüksek açıklama gücüne sahip, mühendislik ve bilimsel açıdan yoruma açık olur.

Sembolik regresyonun bir diğer önemli avantajı, klasik makine öğrenmesi modellerinin sunduğu "*doğruluk-açıklanabilirlik*" ikilemini aşmasıdır. Örneğin, Random Forest veya XGBoost gibi modeller yüksek doğruluk sağlayabilir fakat çoğunlukla kullanıcıya yalnızca sonuç sunmaktadır. Arka planda işleyen model karmaşık ve anlaşılması güçtür. Sembolik regresyonda ise sonuç insan tarafından anlaşılabilir ve denetlenebilir bir matematiksel formül olarak sunulur.

Sembolik regresyonun kökleri, Koza (1990) tarafından geliştirilen genetik programlama (Genetic Programming, GP) algoritmalarına dayanmaktadır. Koza'nın öncülüğünü yaptığı bu yaklaşımda, bir popülasyon içindeki rastgele oluşturulmuş matematiksel ifadeler, evrimsel algoritmalar ile sürekli olarak *"çaprazlama" ve "mutasyon*" işlemlerine tabi tutulur. Her nesilde, veriyle en uyumlu ve en basit modeller seçilerek, bir

sonraki nesil için yeni matematiksel ifadeler üretilir. Bu sayede, model fonksiyonel yapı ve parametre değerleri açısından evrimsel bir süreç sonunda en iyi formuna ulaşır.

Günümüzde, sembolik regresyon; fizik, biyoloji, ekonomi ve özellikle mühendislik bilimlerinde karmaşık fenomenlerin modellenmesi, yeni fiziksel yasaların keşfi ve açıklanabilir yapay zekâ modellerinin geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle son on yılda, hesaplama gücünün artması ve açık kaynaklı yazılımların gelişimiyle, sembolik regresyon modern veri bilimi içinde özgün bir yer edinmiştir.

PySR (Python Symbolic Regression), sembolik regresyonun modern, açık kaynaklı ve yüksek performanslı bir uygulamasıdır. PySR'ın ayırt edici özelliği, Python ortamında çalışırken arka planda Julia dilinin hızını ve matematiksel kütüphanelerini kullanmasıdır. Bu sayede büyük veri setlerinde ve çok değişkenli model aramalarında yüksek verimlilik ve doğruluk sunar. PySR algoritmasının temel işleyişi aşağıdaki adımlar üzerinden açıklanabilir:

- Fonksiyon Havuzu ve Operatör Seti: Kullanıcı, modelde yer alabilecek matematiksel işlemleri belirler (örneğin: toplama, çarpma, bölme, üstel, trigonometrik, logaritmik, kök alma, ters alma gibi). PySR, bu fonksiyon havuzunu "*operatör seti*" olarak kullanır ve model arama sırasında farklı kombinasyonları otomatik olarak dener.
- Model Popülasyonu ve Evrimsel Arama: PySR, genetik programlama yaklaşımı ile rastgele matematiksel ifadelerden oluşan bir "popülasyon" başlatır. Bu popülasyondaki her bir model, veri üzerinde test edilir ve "*başarımlılık*" (örneğin, hata oranı, R^2 değeri) ve "*karmaşıklık*" (örneğin, formülün terim sayısı, matematiksel derinliği) gibi kriterlere göre puanlanır.
- Çaprazlama ve Mutasyon: Yüksek başarımlı modeller seçilerek yeni nesiller üretmek için birbirleriyle birleştirilir veya rastgele değişikliklere (mutasyon) uğratılır. Bu evrimsel süreç, model popülasyonu üzerinde yeni ve potansiyel olarak daha iyi matematiksel formların ortaya çıkmasını sağlar.
- Kısıtlamalar ve Özel Tanımlar: Kullanıcı, fonksiyonlara özgü çeşitli kısıtlar tanımlayabilir. Örneğin, üstel fonksiyonlarda üs aralığı veya trigonometrik fonksiyonların iç içe geçirilmemesi gibi matematiksel anlamlılık kısıtları eklenebilir. Ayrıca, PySR'da model karmaşıklığı üzerinde doğrudan denetim için "*complexity_of_operators*" ve "*nested_constraints*" gibi parametreler de

ayarlanabilir. Bu hem fiziksel anlamlılığı ve mühendislikte pratik kullanılabilirliği artırır.

- ❖ Model Seçimi ve Sonuçların Sunumu: PySR'ın taradığı tüm modellerden en yüksek doğruluğa ve/veya en düşük karmaşıklığa sahip olanlar otomatik olarak kullanıcıya sunulur. Çıktılar arasında Python kodu, sembolik matematik (SymPy) ve LaTeX formatında matematiksel ifadeler yer alır. Böylece model hem görsel olarak hem de hesaplama ortamlarında kolayca kullanılabilir.

Pyhton ortamında oluşturulan algoritmanın pseudo kodu şekil 4.35'de sunulmuştur.

Algoritma 4: PySR Analizi

```
1. Veriyi yükle
   a. Excel dosyasından df değişkenine veri oku
2. X ve y oluştur
   a. X için: ["CSR", "Sigma1", "Sigma3", "FC", "f", "Dr",
      "N_Nliq"] sütunlarını seç
   b. y için: "Ru" sütununu seç
3. X ve y boyutunu ekrana yazdır
4. Custom loss fonksiyonu oluştur
   a. Tahmin ve gerçek değerler için MSE hesapla
   b. N_Nliq = 0 ve N_Nliq = 1 noktaları için özel hata
      cezası ekle
5. PySRRegressor modelini tanımla
   a. İterasyon, popülasyon, operatörler, karmaşıklık,
      constraint ve loss fonksiyonu ayarlarını yap
6. Modeli eğit
   a. fit fonksiyonuyla X, y ve değişken isimlerini modele
      ver
7. Eğitilen modeli kaydet
   a. Klasör oluştur, modeli joblib ile kaydet
8. (İsteğe bağlı) Veri kontrol çıktısı al
   a. N_Nliq ve Ru için min/max değerlerini ekrana yazdır
   b. Veri çerçevesinin sütun isimlerini ekrana yazdır
```

Şekil 4.35. PySR pseudo kodu.

Sembolik regresyon, genellikle genetik programlama veya yapay zekâ tabanlı fonksiyon arama algoritmaları kullanılarak çalışır. Bu yöntemler aşağıdaki bileşenleri içerir:

- Giriş değişkenleri (örneğin CSR, D_r, σ_3, f, FC),
- Temel aritmetik işlemler (+, −, ×, ÷),
- Fonksiyonel operatörler (sin, cos, log, exp, √ vb.),

- Koşullu ifadeler ve sabit katsayılar.

Model, bu yapı taşlarını kullanarak milyonlarca fonksiyon kombinasyonunu test eder ve hedef değişken olan R_u'yu en iyi açıklayan formu bulur. Amaç hem yüksek R^2 hem düşük MSE, MAE değerleri hem de fiziksel olarak anlamlı ve sade bir denklem elde etmektir.

Çizelge 4.10. Sembolik regresyon kütüphanelerinin karşılaştırılması.

Özellik	**PySR**	**Gplearn**	**AI-Feynman**
Çıkış Yılı / Güncellik	2021	2016	2019
Güncellik	Güncel	Sınırlı Güncelleme	Sınırlı Güncelleme
Algoritma	Evrimsel, Genetik, Julia	Genetik programlama	AI + Fiziğe özgü yöntemler
Fonksiyonel Esneklik	Çok yüksek-özelleştirilebilir	Sınırlı	Yüksek (fizik temelli)
Paralel Hesaplama	Çok çekirdekli	Hayır	Sınırlı
Python Uyumu	Python+Julia	Python	Python
Windows Uyumluluğu	Uyumlu	Uyumlu	Sınırlı
Model Açıklanabilirliği	Çok iyi	İyi	Çok iyi (fiziksel anlam)
Topluluk Desteği	Yüksek	Orta	Düşük
Veri Ölçeği/Performans	Büyük veri, yüksek hız	Küçük/orta veri	Orta/büyük veri, yavaş
API Kullanımı	Pythonic, gelişmiş	Sklearn-uyumlu	Komut satırı/tabanlı
Kullanım Zorluğu	Orta	Çok kolay	Zor
En Uygun Olduğu Alan	Veri bilimi, mühendislik, gen.	Hızlı prototip, eğitim	Fiziksel model keşfi

Sembolik regresyon için tek kaynak PySR değildir. AI-Feynman, gplearn gibi pyhton kütüphaneleri de bulunmaktadır. Ayrıca Eureqa, Turningbot gibi ticari yazılımlarda piyasada kullanılmaktadır. Bahsedilen üç açık kütüphanenin karşılaştırılması Çizelge 4.10'da sunulmuştur. AI-Feynman, gplearn kütüphanelerinde Windows işletim sistemi uyumsuzluğu oluşabilmekte ve güncelliğini yitirmişlerdir. Ayrıca PySR çok esnek bir kütüphane olup birçok ayar seçeneği sunmaktadır. İlave olarak Julia tabanlı kodlamayla kendi fonksiyonlarımızı da analiz içinde kullanabilmekteyiz.

4.2.6. PySR modelinin oluşturulması

Sembolik regresyon süreci şu stratejiyle yürütülmüştür:

i. Tüm bağımsız değişkenler (CSR, D_r, σ_1, σ_3, f, FC, N, N_{liq}, N/N_{liq}) başlangıçta modele dahil edilmiştir.
ii. Her iterasyonda modelin:
    - R^2 (determinasyon katsayısı),
    - MAE (ortalama mutlak hata),
    - MSE (ortalama kare hata)
    - Mükemmellik–sadelik dengesi,
    - Fiziksel anlamlılık düzeyi değerlendirilmiştir.
iii. Önceki analizlerde sınır değer hataları sebebiyle kapanışı gerçekleşmeyen eğri denklemleri için cezalandırma fonksiyonu işlenmiştir.
iv. Modeldeki sabit parametre sayısı, fonksiyon karmaşıklığı ve sembol uzunluğu sınırlanarak aşırı karmaşık ve içiçe yapılar filtrelenmiştir.
v. Literatürde önerilen çekirdek yapılara benzemeyen (örneğin Seed vd. (1975), Baziar ve Dobry (1995), Polito vd. (2008) modellerinden farklı) özgün yapılar oluşturulmasına özen gösterilmiştir (asin formu.)

Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafikleri incelendiğinde eğri formları genel itibariyle asin fonksiyonuna uyum sağlamaktadır. Çok değişkenli bir parametre olduğundan bazı değerlerde eğri formu değişse de genel trend asin yapısıdır.

Sembolik regresyon süreci boyunca bazı ön performans kriterleri belirlenmiştir. Analiz verilerinde R^2 değerinin 0.80'den büyük olmasına; MAE, MSE gibi hata değerlerinin düşük olmasına; anlamlı zemin parametrelerinin modelde yer almasına; modelin sade, açıklanabilir ve mühendislik yorumuna açık olmasına; $N/N_{liq}=1$ noktasında $R_u=1$ koşulunun sağlanmasına dikkat edilmiştir.

Bu doğrultuda birçok deneme analiz yapılmıştır. Analiz sürelerinde iterasyon ve popülasyon sayıları belirleyicidir. Yaklaşık 30000 iterasyon 40 popülasyon değerli çalışmalar yaklaşık 8 saat içinde sonuç vermektedir. Elde edilen modeller değerlendirilmiş, performans ve yapısal tutarlılık açısından en uygun formüller belirlenmiştir. Bu bölümde

sunulacak model yapıları, ilerleyen bölümde test verisi üzerinde doğrulanacaktır. Elde edilen nihai modellere, Bölüm 5'te belirtilecektir.

1375 veri noktasıyla yapılan analizler sonrası elde edilen denklemler Çizelge 4.11'de sunulmuştur. Ayrıca bu denklemlerin istatistik verileri Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

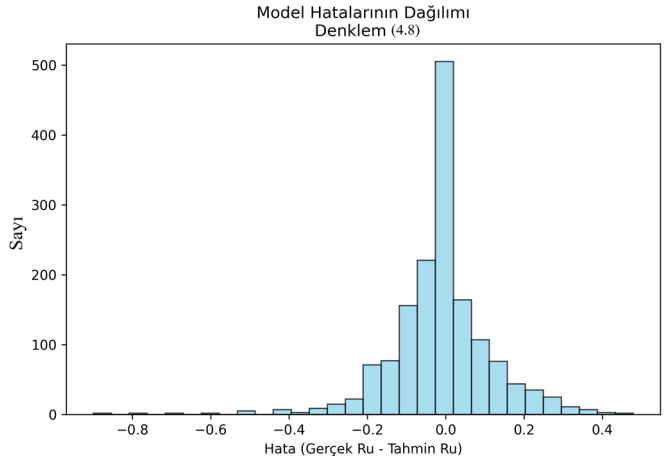
Çizelge 4.11. Oluşturulan model denklemleri.

Sunulan Modeller	No
$$R_u = \left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{0,84403497}$$	(4.4)
$$R_u = 0,6366197 \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{N}{N_{liq}}}\right)$$	(4.5)
$$R_u = \left(0,414041 - 0,15602876 \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{liq}}}^{D_r}\right) \cdot \left[\arcsin\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{0,10900054}\right]^3$$	(4.6)
$$R_u = 0,25801224 \cdot (-CSR + Dr) \cdot \left(-\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^3 + \left(\frac{N}{N_{liq}}\right)\right) + 0,25801224 \cdot \left[\arcsin\left(\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{0,0836063}\right)\right]^3$$	(4.7)
$$R_u = (-CSR + Dr) \cdot \left(\left(\frac{N}{N_{liq}}\right) - \left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{1,5322292}\right) + 0,25801224 \cdot \left[\arcsin\left(\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{0,0890528}\right)\right]^3$$	(4.8)

Çizelge 4.12. İstatistik verileri.

No	MAE	MSE	R^2
(4.4)	0,109	0,025	0,751
(4.5)	0,087	0,018	0,818
(4.6)	0,086	0,017	0,824
(4.7)	0,09	0,017	0,826
(4.8)	0,08	0,017	0,827

Analizler sonucu çıkan denklem yapıları incelendiğinde, genel anlamda asin fonksiyonu üzerine kurulduğu görülmektedir. Korelasyon araştırmalarında N/N_{liq} parametresinin güçlü bir bağımsız değişken olduğu tespit edilmişti. Sunulan modellere baktığımızda bu parametrenin ağırlıklı olarak kullanıldığı görülmektedir. Modellerin karmaşıklığı arttıkça R^2 değeri artmakta fakat çok büyük bir fark oluşturmamaktadır. Bu yüzden daha basit bir model yapısı hesaplama kolaylığı açısından tercih sebebi olabilir. Hata parametreleri incelendiğinde tüm denklemler için istenilen değer aralığında çıkmıştır. Denklemlerdeki bağımsız değişkenler önceki çalışmaları teyit etmiştir. R^2 en yüksek olan Denklem 4.8'in incelenmesine devam edilecektir ve Model 1 olarak isimlendirilecektir.

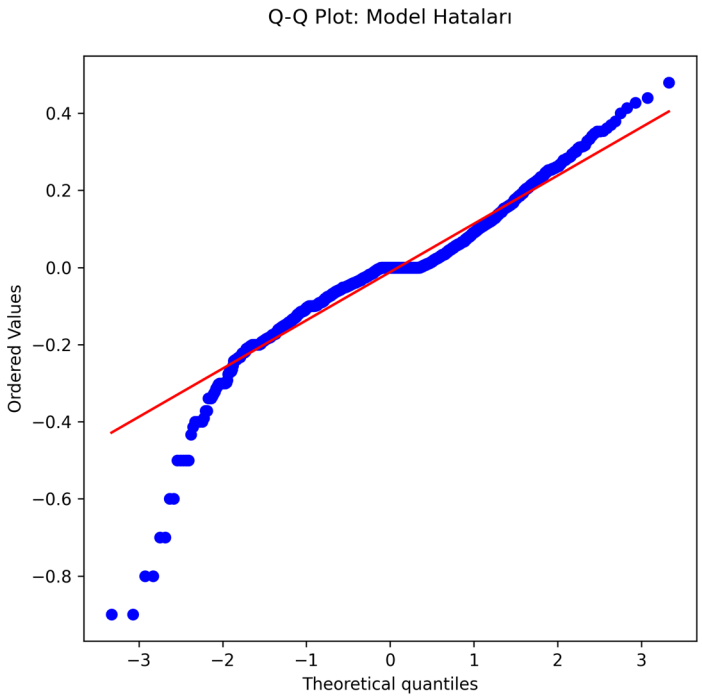


Şekil 4.36. Hata dağılım histogramı.

Şekil 4.36'da geliştirilen modelin tahmin ettiği R_u değerleri ile gerçek R_u değerleri arasındaki farkların dağılımı sunulmaktadır. Yatay eksende hata değerleri (Gerçek R_u-Tahmin R_u), düşey eksende ise bu hataların kaç kez tekrarlandığı gösterilmektedir. Histogramın orta kısmında yer alan ve en yüksek değere sahip olan sütun, modelin çoğunlukla R_u değerlerini oldukça doğru şekilde tahmin ettiğini ortaya koymaktadır. Zira hata değeri sıfıra çok yakın olan gözlemlerin sayısı oldukça fazladır.

Hata dağılımının simetrik olması, modelin tahminlerinde b sistematik olarak sürekli fazla veya sürekli az tahmin üretmediğini göstermektedir. Hataların büyük bir kısmı -0,2 ile +0,2 aralığında toplanmıştır ve bu da modelin, veri setinin tamamında tutarlı ve güvenilir tahminler sunduğunun bir göstergesidir. Öte yandan, grafikte uç noktalar olan -0,4 ve +0,4 civarındaki hata değerlerine sahip veri noktalarının oldukça az olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, modelin çok nadir olarak büyük sapmalar ürettiğini, genellikle orta ve düşük hata değerlerinde yoğunlaştığını kanıtlamaktadır.

Genel olarak, modelin hata dağılımının bu şekilde dar bir aralıkta ve simetrik olarak dağılması hem istatistiksel hem de uygulama açısından güvenilir bir model geliştirildiğine işaret etmektedir. Yani Denklem 4.8, R_u değerlerini başarılı bir şekilde hesaplamakta ve pratik uygulamalar için uygun bir araç olarak öne çıkmaktadır.

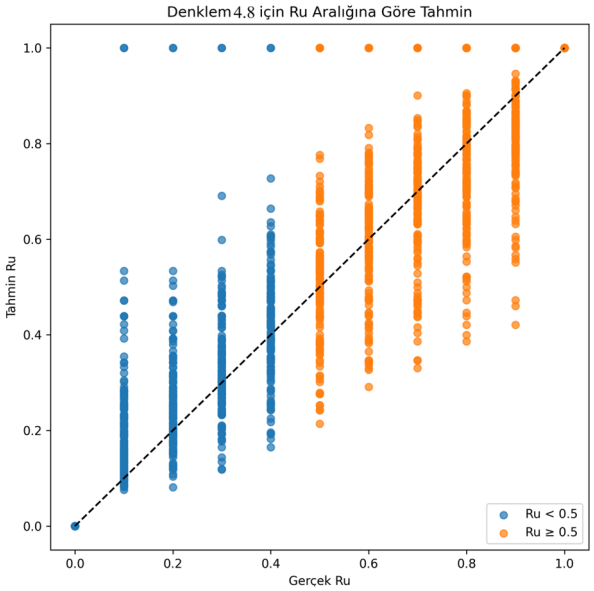


Şekil 4.37. Denklem 4.8 QQ verileri.

Şekil 4.37'de gösterilen Q-Q grafiği, modelden elde edilen hata terimlerinin dağılımının teorik normal dağılımla karşılaştırılmasını göstermektedir. Grafikte yatay eksende teorik kantiller, dikey eksende ise sıralı hata değerleri yer almaktadır. Kırmızı çizgi ise teorik olarak tam normal dağılıma sahip bir hata dağılımının izlemesi gereken referans doğrusal çizgiyi temsil eder.

Grafiğe bakıldığında, hata değerlerinin büyük kısmı orta bölgede referans çizgiye oldukça yakın bir seyir izlemektedir. Bu, modelin hatalarının normal dağılıma yakın bir yapıda olduğunu, özellikle merkezi (ortalama etrafındaki) değerlerde ciddi bir sapma bulunmadığını gösterir. Ancak negatif uçlarda, özellikle -2'nin altında kalan kantillere, noktaların kırmızı çizgiden aşağıya doğru önemli ölçüde saptığı görülmektedir. Benzer şekilde, pozitif uçta da küçük bir sapma mevcuttur, fakat bu daha hafiftir. Bu durum, modelde bazı uç (outlier) hata değerlerinin varlığına ve dağılımda hafif bir negatif çarpıklık olduğuna işaret etmektedir.

Model hatalarının dağılımı, normal dağılıma makul ölçüde yakın olup merkezdeki hata değerlerinin normal dağılım varsayımına uyduğu söylenebilir. Ancak uç noktalarda ortaya çıkan sapmalar, bazı tahminlerde beklenenden büyük hata değerlerinin oluştuğunu ve modelin uç değerleri tahmin etmede görece daha az başarılı olabileceğini göstermektedir. Yine de bu düzeydeki sapmalar çoğu uygulama için tolere edilebilir kabul edilmekte olup modelin genel olarak dengeli ve güvenilir bir tahmin performansı sunduğu söylenebilir.



Şekil 4.38. Gerçek ve tahmin edilen R_u dağılımı.

Şekil 4.38'de, Denklem 4.8'den ile elde edilen model tahminlerinin, gerçek R_u değerlerinin aralıklarına göre renklendirilmiş biçimde karşılaştırılması gösterilmektedir. Yatay eksende gerçek R_u değerleri, düşey eksende ise modelin tahmin ettiği R_u değerleri yer almaktadır. Noktalar, gerçek R_u değeri 0,5'in altında olanlar için mavi (R_u<0,5), 0,5 ve üzerinde olanlar için turuncu (R_u≥0,5) olarak renklendirilmiştir. Ayrıca, siyah kesikli çizgi mükemmel tahmin durumunu (y=x) göstermektedir.

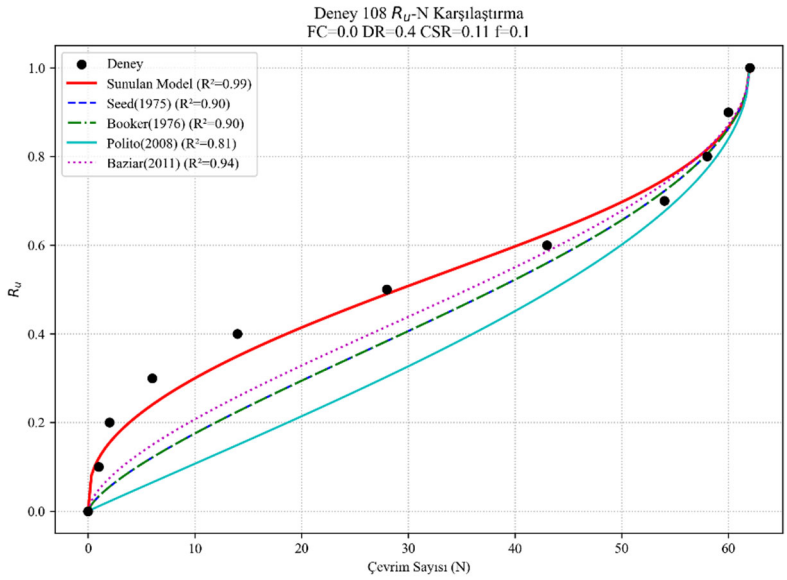
Grafiğin genel yapısı incelendiğinde, hem düşük (R_u<0,5) hem de yüksek (R_u≥0,5) R_u aralığında modelin çoğu tahmininin referans doğrusuna yakın şekilde dağıldığı görülmektedir. Özellikle $R_u \geq 0,5$ aralığında, modelin tahminlerinde biraz daha fazla saçılma olmakla birlikte, tahminlerin çoğunlukla doğrusal eğilimi takip ettiği ve aşırı sapmaların nadir olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, modelin R_u'nun yüksek olduğu, yani sıvılaşmanın ileri safhada olduğu durumlarda dahi tutarlı tahminler üretebildiğini göstermektedir.

R_u<0,5 aralığında ise tahminlerin referans çizgiye çok daha yakın kümelendiği gözlenmektedir. Yani model, görece düşük boşluk suyu basıncı oranlarında daha yüksek doğrulukla tahmin yapabilmektedir. Ayrıca, veri setindeki örneklerin büyük kısmının R_u<0.5 aralığında toplandığı ve uç değerlerde (R_u=0 veya R_u=1) de modelin ciddi bir sapma sergilemediği görülmektedir.

Her iki aralıkta da gözlenen bazı uç noktalar ve çizgiden uzaklaşan tahminler, verideki doğal yayılımın ve modelin deterministik olmayan karmaşık ilişkileri yakalama sınırlarının bir göstergesidir. Ancak genel eğilime bakıldığında, modelin farklı R_u aralıklarında genelleme kabiliyetinin yüksek olduğu ve sistematik bir yanlılık üretmediği söylenebilir.

Denklem 4.8 ile geliştirilen modelin, farklı sıvılaşma seviyelerinde (farklı R_u aralıklarında) stabil ve güvenilir tahminler yapabildiğini görsel olarak doğrulamaktadır. Modelin özellikle kritik eşik değeri olan R_u=0,5 civarında da başarılı performans göstermesi, mühendislik uygulamaları açısından önemli bir avantajdır.

Analize sokulan veri seti değerleriyle Denklem 4.8'in boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı grafikleri çizilmiştir. Buradaki amaç denklemin tam olarak çalıştığını kontrol etmektir. Ayrıca daha önceki bölümlerde sunulan literatür denklemleri (Bkz. Bölüm 3.6) ile de karşılaştırılmak istenmiştir.

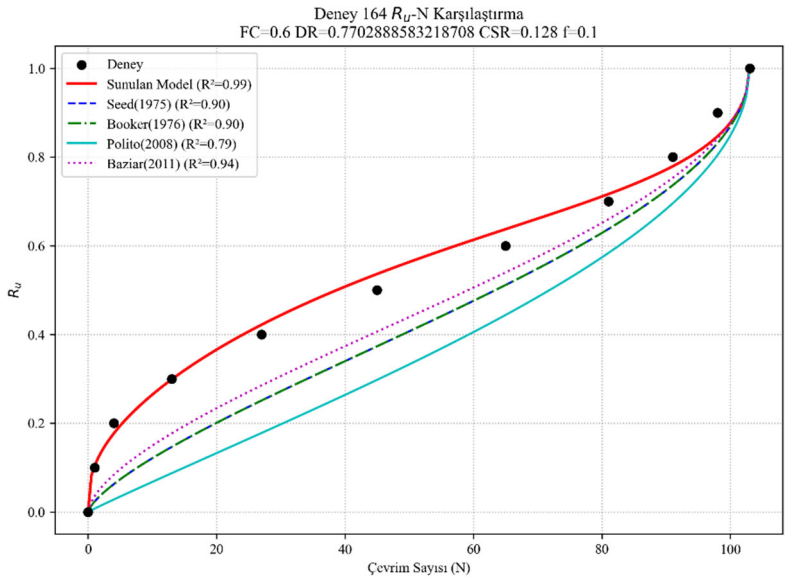


Şekil 4.39. Deney 108 R_u-N eğrileri karşılaştırması

Şekil 4.39'da FC %0, orta derecede rölatif sıkılık (D_r = 0,4) ve düşük CSR (0,11) altında yapılan testte Model 1, boşluk suyu basıncının gelişimini yüksek doğrulukla (R^2 = 0.99) yakalamıştır. Özellikle ilk çevrimlerde yavaş başlayan ve 60 çevrime doğru hızla doygunluğa ulaşan Ru artışı, deneyle oldukça iyi örtüşmektedir. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri bu eğilimi genel hatlarıyla yansıtsa CSR ve D_r etkilerini yeterince temsil edemedikleri için ilerleyen çevrimlerde deneysel verinin altında kalmaktadır. Polito modeli düşük CSR durumunda zayıf performans gösterirken, Baziar vd. (2011) modeli daha iyi uyum sunsa da erken çevrimlerdeki gelişimi tam karşılayamamaktadır. CSR ve D_r'nin çarpan biçiminde yer aldığı Model 1, bu parametrelerin birleşik etkisini diğer modellere kıyasla daha hassas ve gerçekçi biçimde yansıtmaktadır.

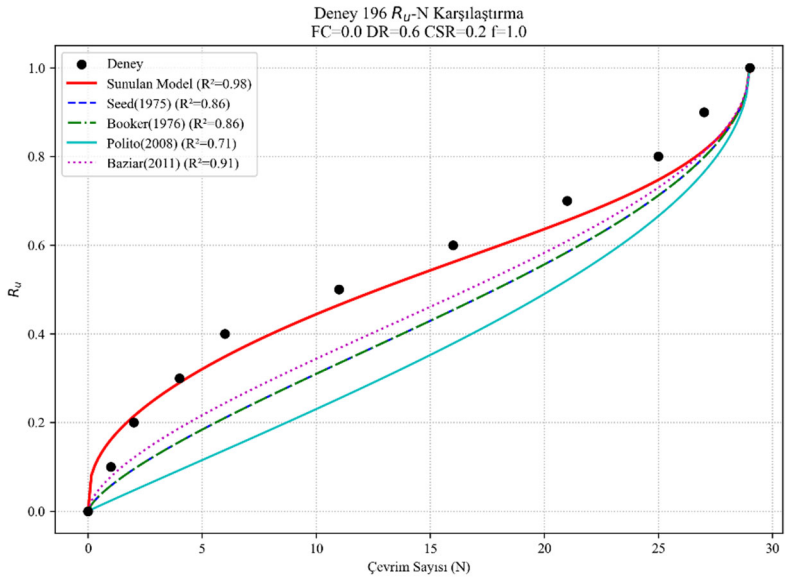
Şekil 4.40'da deney yüksek ince dane oranı (FC=0,6), yüksek rölatif sıkılık (D_r≈0,77) ve düşük CSR (0,128) gibi sıvılaşmaya karşı dirençli koşullarda gerçekleştirilmiştir; bu nedenle R_u gelişimi gecikmeli olup geç çevrimlerde hızlanmaktadır. Model 1, bu davranışı yüksek doğrulukla (R^2 = 0,99) temsil ederek tüm çevrim aralığında deneysel verilere yakın seyretmiştir. Özellikle geç çevrimlerdeki yumuşak ama kararlı artışı iyi yansıtan model, CSR ve D_r'yi doğrudan, çevrim oranını ise kademeli geçişle hesaba kattığı için fiziksel davranışı gerçekçi biçimde yansıtmaktadır. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri erken çevrimleri yakalasa da D_r ve FC etkilerini içermedikleri için sapmalar göstermektedir. Polito (2008) modeli teorik olarak bu değişkenleri α katsayısı yoluyla dikkate alsa da burada geç çevrimlerdeki artışı yeterince temsil edememiştir. Baziar vd. (2011) modeli ise daha

yumuşak bir geçiş sunsa da eğrinin tamamında Model 1 kadar tutarlı değildir. Bu deney, klasik modellerin karmaşık zemin koşullarında sınırlı kaldığını, Model 1'in ise yüksek FC–D_r etkilerini birlikte başarıyla yansıtabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.40. Deney 164 Ru-N eğrileri karşılaştırması

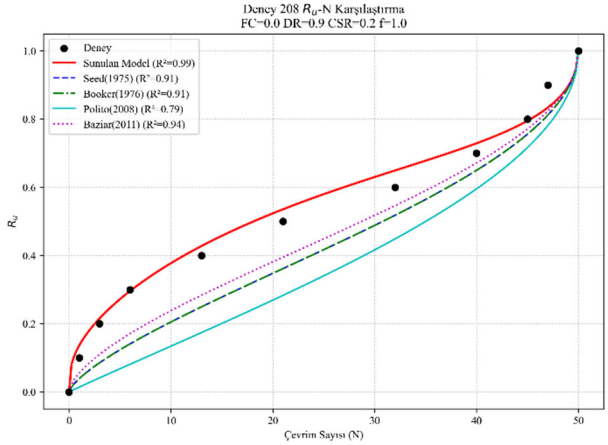
Şekil 4.41'de, deney %0 ince dane oranı (FC=0,0), orta-yüksek rölatif sıkılık (Dr=0,6) ve belirgin seviyede çevrimsel gerilme oranı (CSR=0,2) altında gerçekleştirilmiştir. Zemin direnci yüksek olmakla birlikte, CSR etkisi nedeniyle boşluk suyu basıncının çevrimlerle birlikte kararlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Model 1, R_u gelişimini erken çevrimlerden itibaren deneysel verilere oldukça yakın şekilde tahmin etmiş ve doygunluğa ulaşım sürecini başarılı biçimde yansıtmıştır (R^2 = 0,98). Bu deneyde Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri genel eğimi takip etse de çevrim sayısı arttıkça R_u'daki ivmeyi yeterince temsil edememektedir. Polito vd. (2008) modeli, CSR ve D_r'yi α katsayısı aracılığıyla içerse de düşük performans (R^2=0,71) göstermekte ve özellikle R_u'nun erken artışını eksik tahmin etmektedir. Baziar vd. (2011) modeli yumuşak geçişleriyle uyumlu sonuçlar verse de eğrinin tamamında Model 1 kadar tutarlı değildir. Bu grafikte sunulan modelin, CSR'nin baskın olduğu koşullarda bile R_u gelişimini hassasiyetle yakalayabildiğini ve geleneksel modellerin ötesinde bir uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.41. Deney 196 Ru-N eğrileri karşılaştırması.

Şekil 4.42'de, deney %0 ince dane içeriği (FC = 0,0), orta-yüksek rölatif sıkılık (D_r = 0,9) ve CSR = 0,2 koşullarında gerçekleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı artışı yaklaşık 50 çevrim boyunca düzenli bir hızla ilerleyerek R_u=1 noktasına ulaşmıştır. Bu deneyde Model 1, R_u gelişimini yüksek doğrulukla (R^2 = 0,99) tahmin etmiş ve tüm çevrim aralığında deneysel verilere oldukça yakın bir uyum göstermiştir. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri genel eğilimi izlese de çevrim ilerledikçe deneysel değerlerin gerisinde kalmaktadır. Polito vd. (2008) modeli α katsayısı üzerinden CSR ve D_r etkilerini içermekte olup bu örnekte R_u belirgin şekilde baskılamış ve düşük uyum göstermiştir (R^2=0,79). Baziar vd. (2011) modeli yumuşak geçişleriyle nispeten başarılı bir eğri sunsa da özellikle çevrimin sonuna doğru Model 1 kadar hassasiyet sağlayamamaktadır. Bu grafik, orta düzey sıkılık ve %0 FC koşullarında dahi Sunulan Model 1'in R_u davranışını diğer modellere göre daha kararlı ve doğru temsil ettiğini göstermektedir.

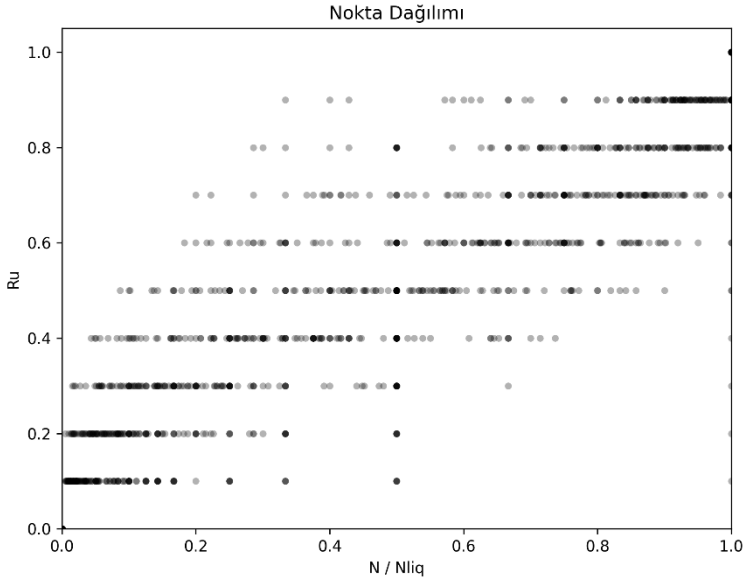
Buraya kadar sembolik regresyonun mantığı, modelin oluşturulması ve hata kontrolü açısından analize giren deneylerin model ile uyumu test edilmesi konuları işlenmiştir. Bu testlerde ayrıca literatür modellerinin de performansını görmek adına grafiklere eklenmiştir. Modelin asıl doğruluğunu belirlemek adına analize sokulmamış veri ile nihai testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu hususta Yüksek Lisans tez çalışmasında yapılmış olan dinamik üç eksenli deney sonuçları kullanılacaktır. Bir sonraki bölümde malzeme özellikleri, deney parametreleri üzerinde durulacaktır.



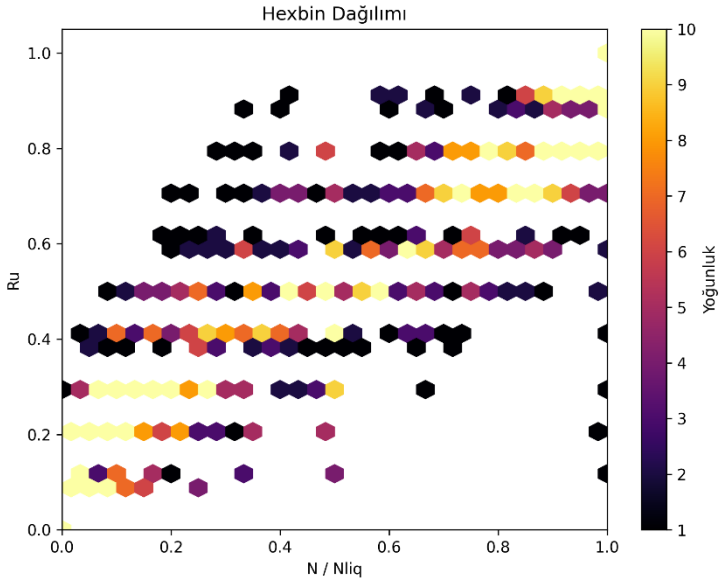
Şekil 4.42. Deney 208 Ru-N eğrileri karşılaştırması.

4.2.7. Hibrit modelin oluşturulması

Bu başlıkta geleneksel modelleme yöntemleri ile sembolik regresyon yöntemi birleştirilerek hibrit yapıda bir model önerilecektir. Önerilen hibrit modelleme yaklaşımı üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada veri noktalarının dağılımı incelenmiştir. Nokta veri dağılımı Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Burada x ekseni boşluk suyu basıncı oranı (R_u) değerlerini gösterirken y ekseni çevrim sayısının, sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı ile normalize edilmiş halinin (N/N_{liq}) değerlerini göstermektedir. Eksen yapısının bu şekilde gösterilme sebebi veri dağılımını net bir şekilde görerek dağılama uygun eğri fonksiyonlarının tespitini yapabilmektir.

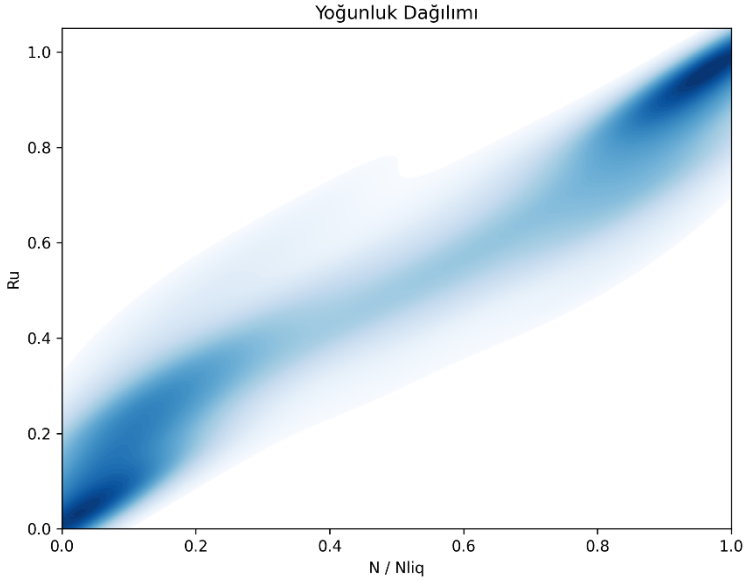


Şekil 4.43. R_u-N/N_{liq} veri nokta dağılımı.



Şekil 4.44. R_u-N/N_{liq} veri hexbin dağılımı.

Şekil 4.44'te 1375 veri noktasının petek dağılımı gösterilmiştir. Nokta verilerin yoğunlaştığı yerler sarı tonlarında, seyrek olduğu yerler siyah tonlarındadır. Dağılımların tam anlaşılabilmesi ve yoğunluk fonksiyonunu daha sürekli bir formda görebilmek adına çekirdek yoğunluk tahmini grafiği (KDE) Şekil 4.45'te sunulmuştur. KDE grafiğinde gözlenen dağılım, ikinci aşamada dağılıma uyum sağlayacak çekirdek ifadeler ve omurga denklemler hakkında önemli bir yol gösterici olmuştur.



Şekil 4.45. R_u-N/N_{liq} veri KDE grafiği.

İkinci aşamada dağılımlara uyum sağlayacağı düşünülen çekirdek fonksiyonlar belirlenmiştir (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13. Çekirdek denklem yapıları.

Çekirdek Denklemler		
Sin_core	$R_u = \sin\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{1/a}\right)$	(4.9)
Asin_core	$R_u = 0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left(2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{1/a} - 1\right) + b$	(4.10)
Exp_core	$R_u = 1 - \exp\left(-a\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{b}\right)$	(4.11)
Tanh_core	$R_u = \tanh\left(a\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{b}\right)$	(4.12)
Log_core	$R_u = a.\log\left(b.\frac{N}{N_{liq}} + 1\right)$	(4.13)

Bu yapıları daha kontrollü ve tutarlı hale getirmek adına kompleks omurga denklemler türetilmiştir (Çizelge 4.14). Denklem eğrileri veri dağılımına uydurulmaya çalışılmıştır. Omurga eğri türetilmesi aşamasında literatürde bulunan modellerden esinlenerek ters sinüs eğrisine çift yapı şeklinde çalışacak logaritmik, trigonometrik, polinomsal, sigmoidal ve kareköklü ifadeler eklenmiştir. Bu yapılar oluşturulurken $0 \leq R_u \leq 1$ sınır koşullarının sağlanması dikkate alınmıştır. Korelasyon analizlerinde, boşluk suyu basıncı ile en fazla ilişiğe sahip olan N/N_{liq} değişkenini içeren ifadeler a ile, denklemin ikinci yapısını oluşturan ifadeler ise b katsayılarıyla kontrol edilerek eğri uydurma aşamasına geçilmiştir.

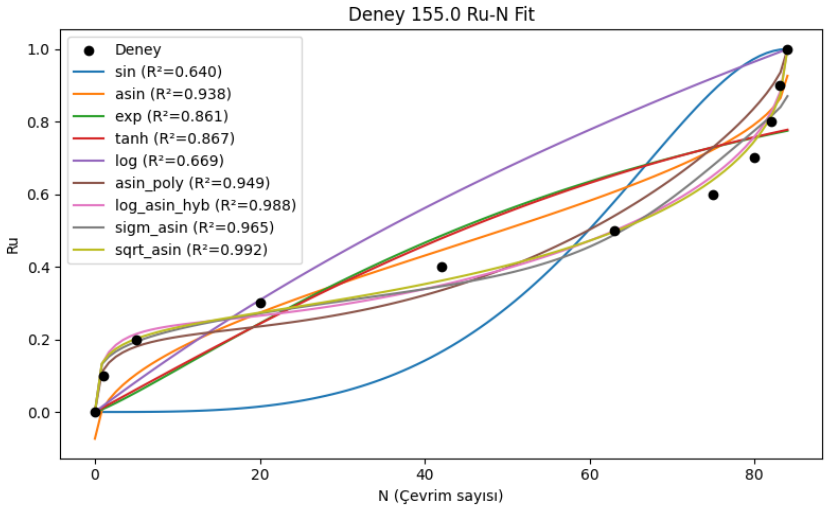
Çizelge 4.14. Omurga denklem yapıları.

	Oluşturulan Omurga Denklemler	
Poly_asin	$R_u = 0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^a - 1\right] + b\frac{N}{N_{liq}}\left(1 - \frac{N}{N_{liq}}\right)$	(4.14)
Log_asin	$R_u = b\left(0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^a - 1\right]\right) + (1-b)\frac{\ln\left(1+5\frac{N}{N_{liq}}\right)}{\ln(6)}$	(4.15)
Sigm_asin	$R_u = 0,5\left(0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^a - 1\right]\right) + 0,5\frac{1}{1+e^{-10\left(\frac{N}{N_{liq}}-b\right)}}$	(4.16)
Sqrt_asin	$R_u = b\left(0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^a - 1\right]\right) + (1-b)\sqrt{\frac{N}{N_{liq}}}$	(4.17)

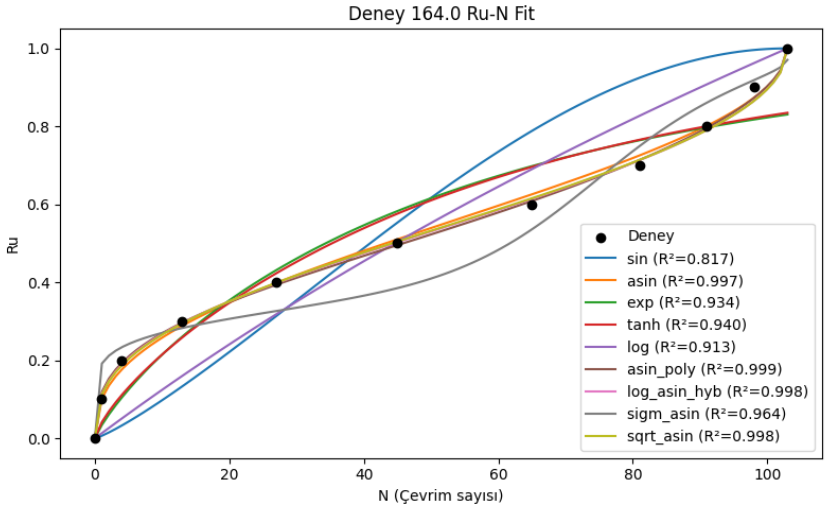
Çekirdek ve omurga eğri denklemleri 125 deney için ayrı ayrı eğri uydurma işleminin ardından her denklem yapısı için 125'er adet a ve b eğri uydurma katsayısı elde edilmiştir. Elde edilen en uygun yapılar tespit edilmek istenmiştir. Literatür modellerinde genellikle ters sinüs fonksiyonu kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çekirdek fonksiyonlarındaki değişimleri daha kontrollü hale getirmek adına çekirdek fonksiyonlar geliştirilerek daha kompleks omurga eğri yapıları oluşturulmuştur. Örnek olması adına literatürden alınmış dört deney verisi için eğri uydurma işlemi Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49'da gösterilmiştir. Grafikteki eğriler Çizelge 4.13 ve 4.14'te sunulmuş denklemlerdir. Görüldüğü üzere türetilmiş denklemler çekirdek denklemlere göre daha tutarlı sonuçlar vermiştir. R^2 bu aşamadan sonra türetilmiş yapılar ile analizlere devam edilecektir. Çizelge 4.15'da tüm denklem yapılarının 125 deney için istatistiksel sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 4.15. Omurga ve çekirdek denklem istatistikleri.

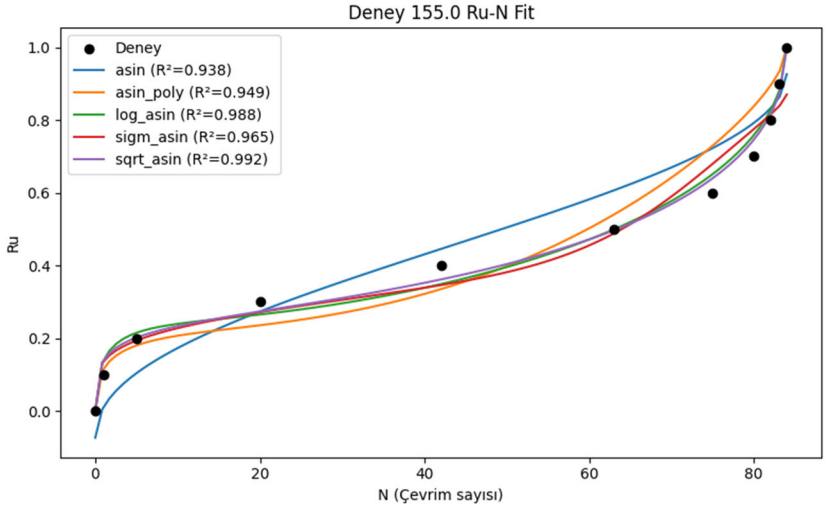
Yapı	Ortalama R^2	Standart Sapma	Deney Sayısı
Sgm_asin	0,936748372	0,101166628	125
Log_asin	0,912862833	0,314243908	125
Poly_asin	0,908966042	0,3135718	125
Sqrt_asin	0,908653491	0,314435755	125
asin	0,919420175	0,130028752	125
tanh	0,912980046	0,093653775	125
exp	0,90968361	0,093460642	125
log	0,805228802	0,329808689	125
sin	0,790307935	0,30374768	125



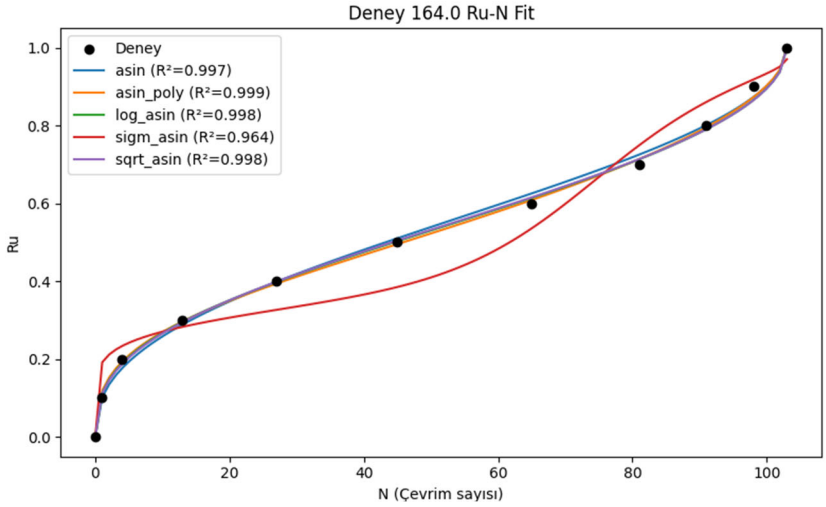
Şekil 4.46. Deney 155 verisi tüm denklem yapıları için eğri uydurma sonuçları.



Şekil 4.47. Deney 164 verisi tüm denklem yapıları için eğri uydurma sonuçları.



Şekil 4.48. Deney 155 verisi omurga eğriler.



Şekil 4.49. Deney 164 verisi omurga eğriler.

Üçüncü aşamada, denklem yapıları için α ve b eğri uydurma katsayılarının malzeme ve deney şartları ile bağıntıları araştırılmıştır. Her eğrinin 125 adet deney için ayrı ayrı katsayıları kayıt altına alınmıştır. Daha sonra önceki konu başlıklarında değinilmiş bağımsız değişkenlerle bağıntıyı saptamak adına sembolik regresyon yöntemi kullanarak katsayılar formülize edilmiştir (Çizelge 4.16).

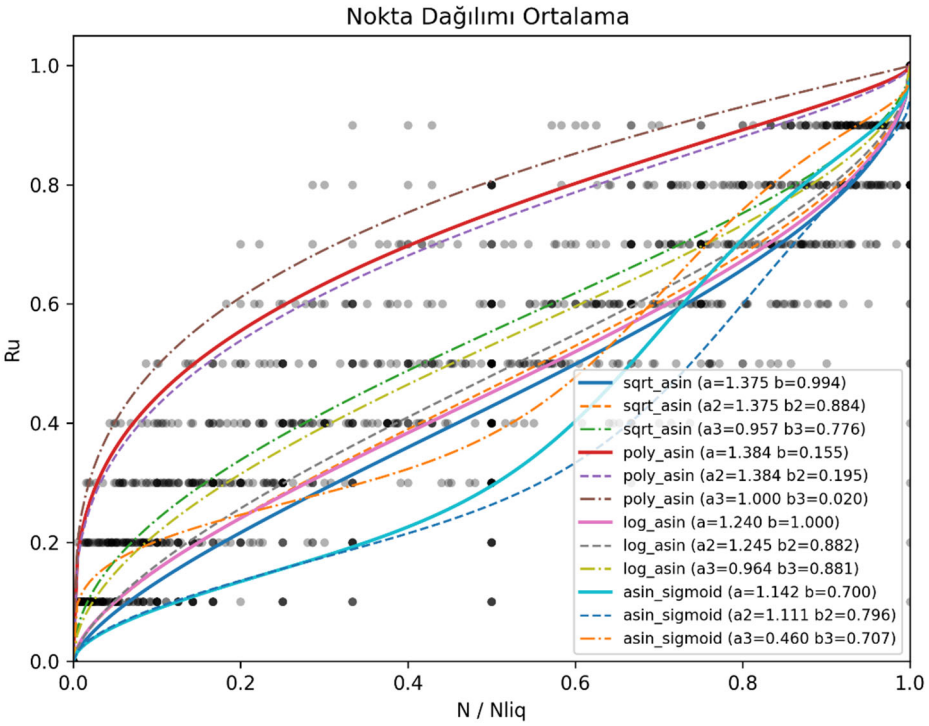
Çizelge 4.16. Eğri uydurma katsayıları hesap denklemleri.

Yapı	**Eğri Uydurma Katsayıları Hesap Denklemleri**	
Poly_asin	$a = 1,8317473 - \exp\left(-\frac{99,996185 \cdot CSR^{8,454926}}{\sigma_1 \cdot D_r^{8,454926}}\right)$	(4.18)
	$b = \frac{CSR - 0,14065091}{\sqrt{FC} + 277,61673 \cdot D_r - 138,77013}$	(4.19)
Log_asin	$a = \exp\left(\frac{(0,74317837 - D_r) \cdot 0,65297407}{f^{2,124752 \cdot FC}}\right)$	(4.20)
	$b = \exp\left(\frac{3,3979444 \cdot 10^{-9} \cdot CSR \cdot \exp(-FC)}{D_r - 0,50170684}\right)$	(4.21)
Sigm_asin	$a = 0,6841409 + \frac{0,033346243}{CSR - FC + \log(f) - 0,1392315}$	(4.22)
	$b = 0,7$	
Sqrt_asin	$a = 1,6530219 + \frac{-0,18070303 \cdot (D_r + \sqrt{f}) + 0,13017204}{CSR \cdot (D_r + \sqrt{f})}$	(4.23)
	$b = 1,1021285\left(\left(f^{\sigma_1}\right)^{e^{72,54562\sigma_3}}\right)^{0,0016267848}$	(4.24)

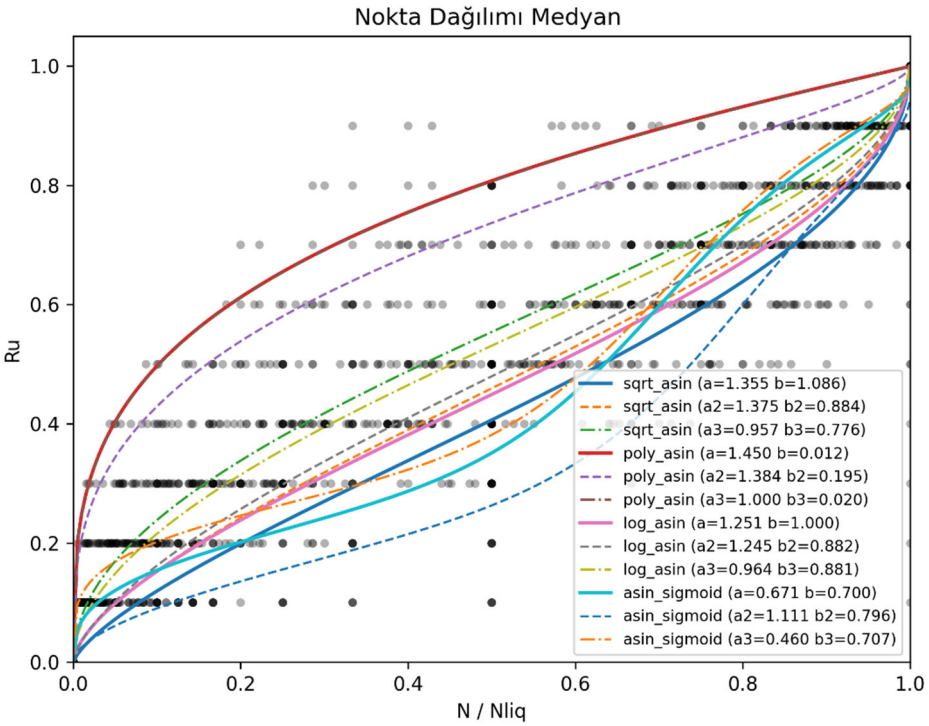
Oluşturulan denklemlerin veri setini ne kadar açıkladığını göstermek amacıyla petek, nokta, yoğunluk dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Grafikler ortalama ve medyan değerler olarak iki gruba ayrılmıştır. Bu değerler denklemlerin eğri uydurma aşamasında elde edilen sonuçlardır. Ayrıca grafiklerde omurga denklemlerin eğri uydurma katsayılarının sembolik regresyon ile hesaplanması sonucu elde edilen eğrilere de yer verilmiştir. Buradaki amaç katsayı hesabı ile oluşturulan eğrilerin veri setini ne kadar açıkladığını göstermektir. Ayrıca malzeme ve deney parametrelerinde eksiklik bulunması durumunda kullanılabilecek sabit katsayıları önermek ve karşılaştırmak amaçlanmıştır. a ve b katsayıları sembolik regresyon sonucu elde edilen denklemlerden hesaplanmış olup 125 deney için grafik türüne göre ortalama ve medyan değerleri göstermektedir. a2 ve b2 değerleri eğri uydurma işlemi sonucu elde edilmiş ortalama değerlerdir. a3 ve b3 değerleri ise eğri uydurma işlemi sonucu elde edilmiş medyan değerleridir. Her denklem için bu değerler ayrı ayrı Çizelge 4.17'de sunulmuştur. Parametre eksikliğinde bu değerler sabit katsayı olarak kullanılabilir. İleriki bölümlerde tavsiye edilen tüm denklem yapıları ve sabit katsayılar özetlenmiş bir şekilde sunulacaktır.

Çizelge 4.17. Eğri uydurma parametreleri.

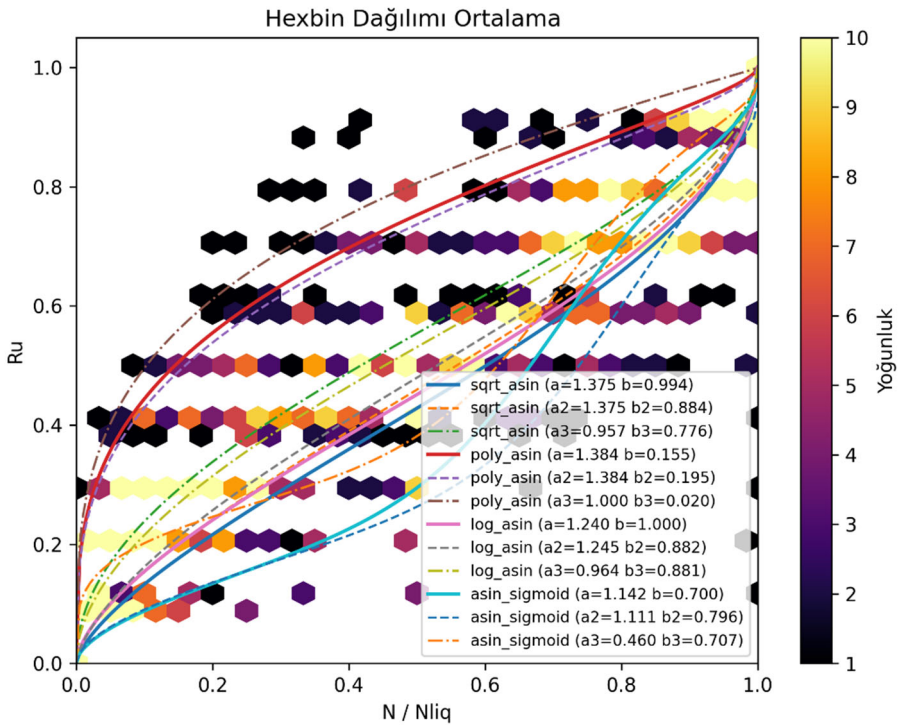
	EĞRİ UYDURMA ORTALAMA		**EĞRİ UYDURMA MEDYAN**	
Omurga Yapı	**a2**	**b2**	**a3**	**b3**
Poly_asin	1,38373	0,19519	0,99996	0,01957
log_asin	1,24498	0,8823	0,96431	0,88072
sigm_asin	1,11059	0,79586	0,45979	0,70665
sqrt_asin	1,37463	0,88372	0,9567	0,77643



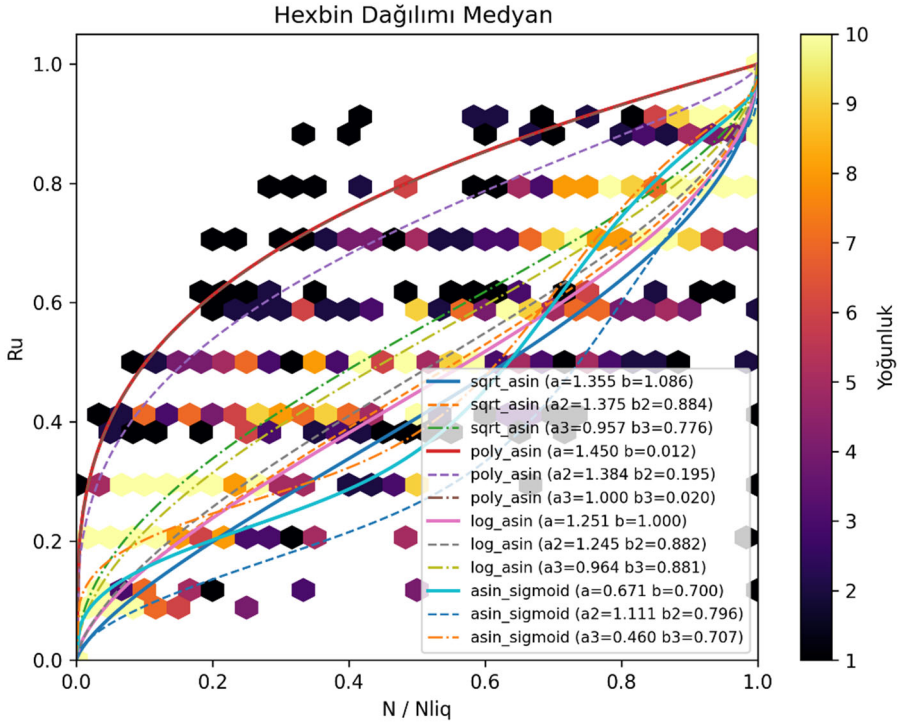
Şekil 4.50. Ortalama nokta dağılımı



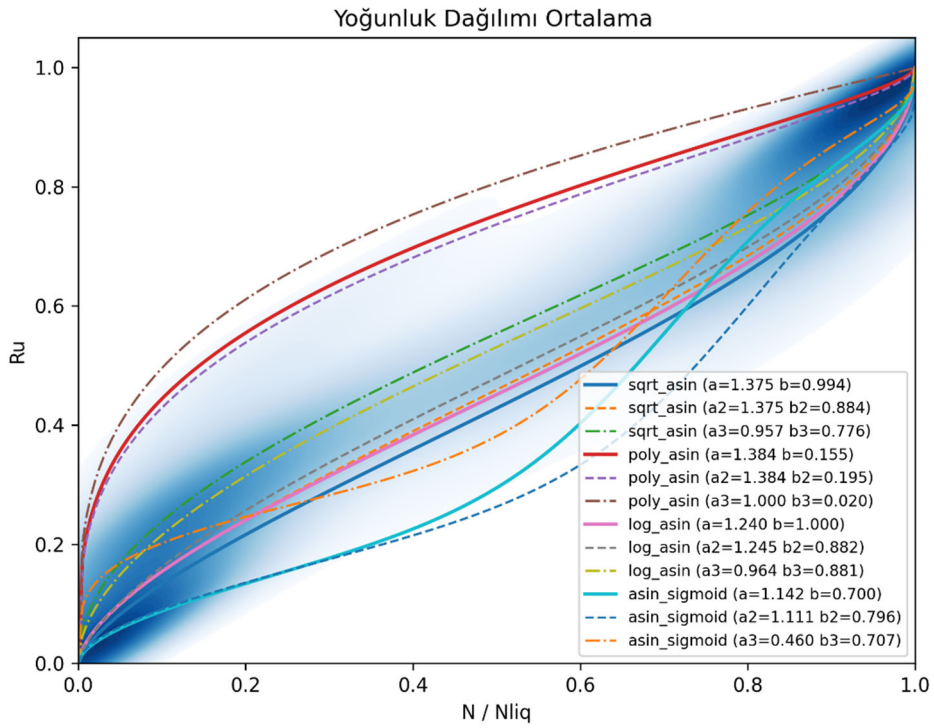
Şekil 4.51. Medyan nokta dağılımı.



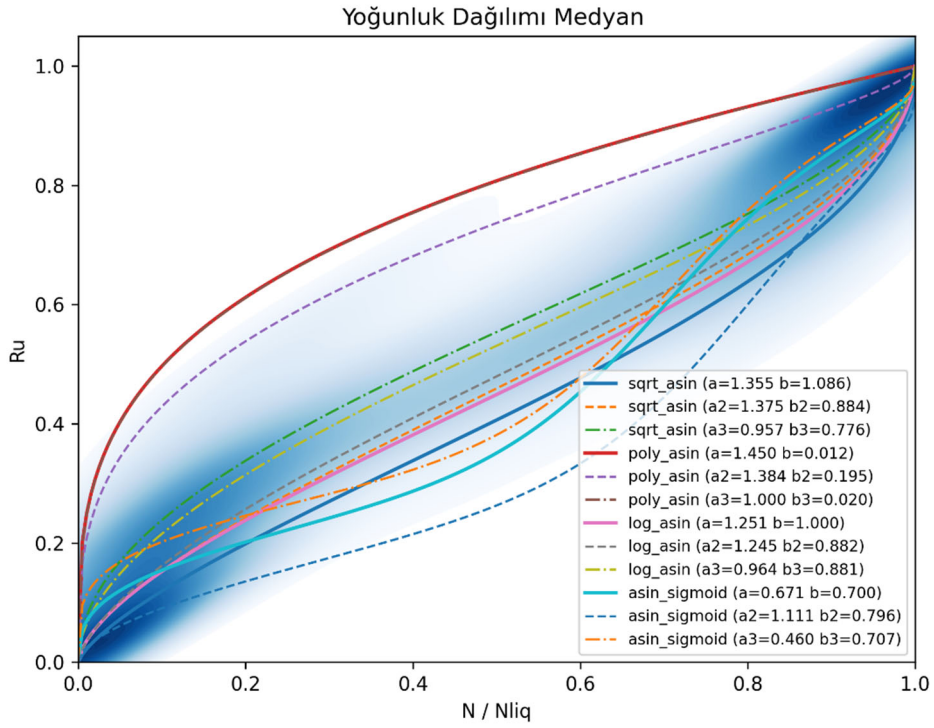
Şekil 4.52. Ortalama petek dağılımı



Şekil 4.53. Medyan petek dağılımı.

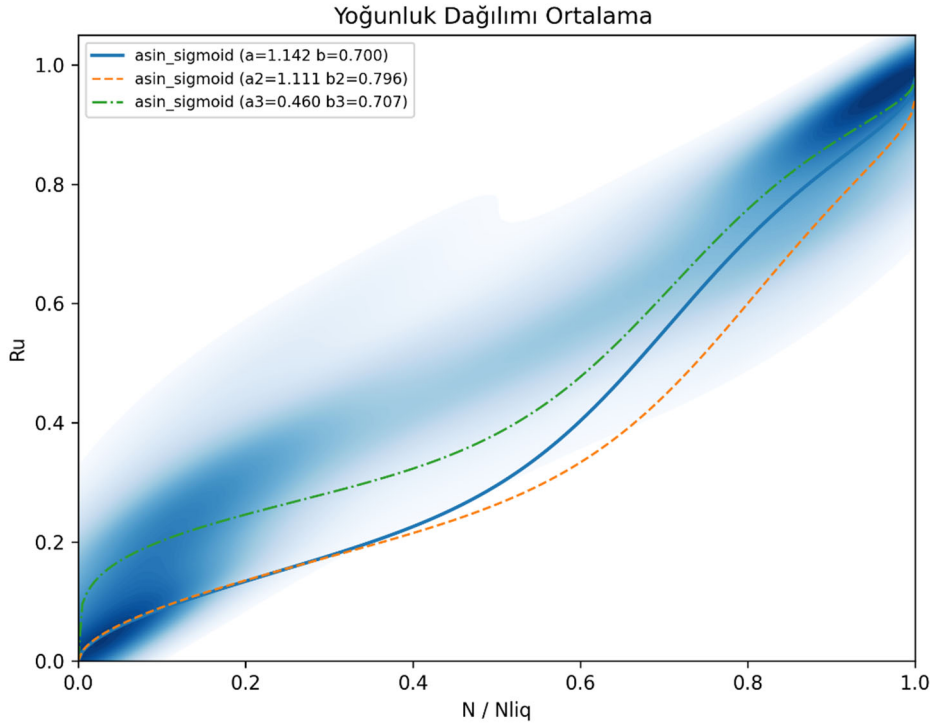


Şekil 4.54. Ortalama KDE dağılımı.



Şekil 4.55. Medyan KDE dağılımı.

Şekil 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55'de omurga denklem eğrilerinin veri setini ne kadar açıkladığı farklı grafik türlerinde gösterilmiştir. X ekseninde boşluk suyu basıncı oranı, Y ekseninde normalize edilmiş çevrim sayısı değerleri bulunmaktadır. Nokta dağılım grafiklerinde verilerin üst üste geldiği ve yoğunlaştığı kısımlar daha koyu bir şekilde gözükmektedir. Petek dağılımında ise yoğunlaşan noktalar sarı renk tonlarındadır. KDE grafiklerinde ise yoğunluk dağılım kontrastı daha açık bir şekilde görülmekte olup verinin toplandığı noktalar daha koyu bir şekilde görülmektedir. Bu grafiklerde ortalama ve medyan değerler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Her denklemin hesaplanmış, ortalama ve medyan değerleri kullanılmış şekilde toplamda 12 eğri sunulmuştur. Polinomsal ve sigmoidal denklemlerin verileri tam olarak açıklayamadığı görülmektedir. Polinomsal denklemde boşluk suyu basıncı oranı ilk çevrimlerden itibaren hızlı bir artmıştır. Sigmoidal denklem yapısında ise boşluk suyu basıncı oranı orta değerlerde daha düşük olarak tahmin edildiği ve veri yapısından uzaklaştığı görülmektedir. Kareköksel ve logaritmik yapılar ise tahmin konusunda veri setini daha iyi yansıttığı anlaşılmaktadır. Her denklem yapısı detaylı olarak konunun ilerleyen kısımlarında incelenecektir.



Şekil 4.56. Sigmoid yapı ortalama KDE dağılımı.

Şekil 4.56'da normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve farklı katsayı hesaplama yöntemleriyle elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Arka planda yer alan mavi renk tonlaması, 125 adet dinamik gerilme kontrollü üç eksenli deney sonucunda elde edilen R_u-N/N_{liq} verilerinin yoğunluğunu göstermektedir.

Grafik üzerinde üç farklı model eğrisi yer almaktadır. İlki, eğri uydurma ve PySR tabanlı sembolik regresyon yöntemiyle geliştirilen hibrit sigmoid omurga eğri denklemi kullanılarak elde edilen a=1,142 ve b=0,700 ortalama parametre değerleri ile çizilen eğridir. İkinci eğri, her bir deney için sigmoid yapısı kullanılarak eğri uydurma sonucunda ulaşılan a2=1,111 ve b2=0,796 ortalama parametreleriyle elde edilmiştir. Üçüncü eğri ise, aynı eğri uydurma işlemlerinde hesaplanan parametrelerin medyan değerleri olan a3=0,460 ve b3=0,707 kullanılarak oluşturulmuştur.

İstatistiksel olarak incelendiğinde, PySR hibrit modelinden elde edilen katsayıların ortalama değerleri, klasik eğri uydurma yönteminden elde edilen ortalama değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bu yakınlık, her iki yöntemin de veri setinin genel davranışını benzer doğrulukta temsil ettiğini göstermektedir. PySR eğrisi ile klasik ortalama eğrinin birbirine yakın çıkması, modelin genel eğilimleri dengeli şekilde yakaladığını ve veri setindeki uç değerlerin ortalamaya etkisini dengelediğini göstermektedir. Buna karşın, medyan eğri ortalama eğrilerden daha düşük a3 değeri ile farklılaşmış, uç değerlerin etkisinden bağımsız şekilde daha merkezdeki genel eğilimi yansıtmıştır. Çünkü medyan istatistiksel olarak uç değerlerden etkilenmeyen sağlam bir merkez ölçüsüdür. Medyan eğrinin daha düşük a3 katsayısı üretmesi, veri setindeki bazı erken Ru artışı gösteren testlerin ortalamayı yukarı çektiğini, ancak medyanın bu uç etkileri baskılayarak tipik davranışı daha temsil edici hale getirdiğini göstermektedir.

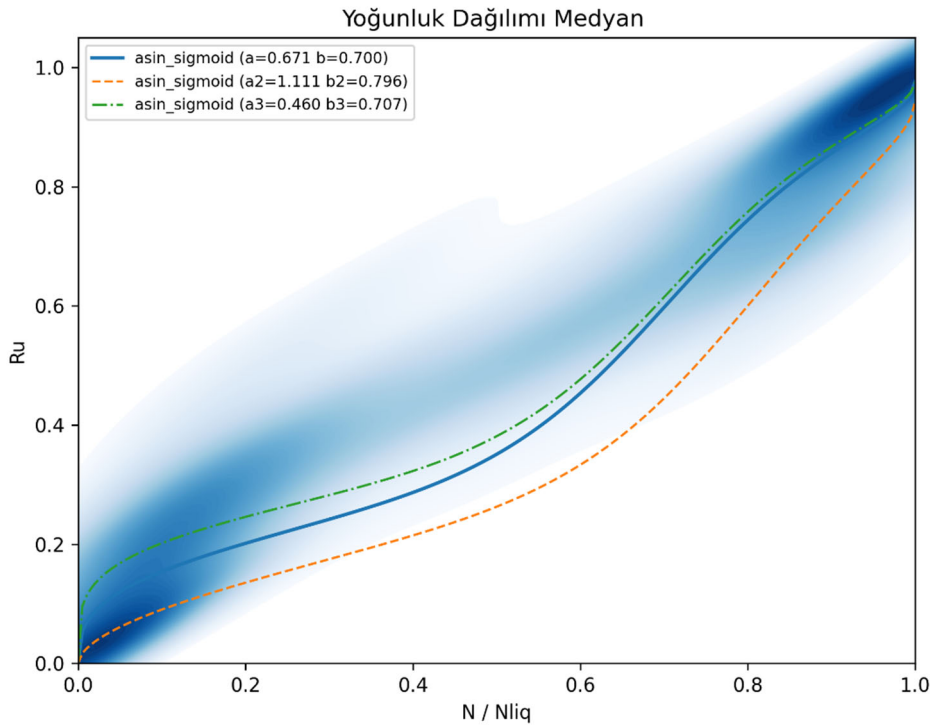
Model eğrilerinin deneysel yoğunluk dağılımı ile uyumu değerlendirildiğinde, düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) hem PySR hibrit model eğrisi hem de klasik ortalama eğri veri yoğunluğunun merkezine iyi oturmakta ve erken boşluk suyu basıncı artışını temsil etme açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Bu durum, modelin erken döngülerde boşluk suyu basıncı gelişim dinamiğini yeterli doğrulukla yakaladığını göstermektedir. Buna karşılık, orta seviyedeki R_u değerlerine karşılık gelen N/N_{liq} yaklaşık 0,4–0,7 aralığında özellikle PySR eğrisinde hafif bir sapma gözlemlenmektedir. Bu bölgede model, veri yoğunluğuna

göre nispeten daha düşük R_u tahminleri üretmiştir. Bu sapmanın temel nedeni, orta çevrim aralığında farklı deney koşullarının (örneğin yüksek FC, düşük D_r ve değişken CSR) birleşik etkisiyle boşluk suyu basıncı gelişim hızının değişmesidir. PySR modeli bağımsız değişkenleri model içerisine dahil etmesine rağmen, bu tür doğrusal olmayan kompleks etkileşimleri sınırlı seviyede temsil edebildiğinden dolayı orta çevrim bandında hafif bir sapma oluşturmaktadır. Medyan parametreler ile elde edilen eğri ise özellikle erken döngü aralığında ($N/N_{liq}<0,2$) PySR ve ortalama eğriye kıyasla daha yüksek R_u tahminleri yapmaktadır. Bu durum, veri setindeki bazı deneylerde erken sıvılaşma eğilimi gösteren davranışların ağırlığını ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek ince dane oranına sahip ve düşük sıkılıkta hazırlanmış numunelerde, boşluk suyu basıncı artışının ilk döngülerde hızla yükselmesi bu sonucu doğurmaktadır. Medyan eğri, uç değerlerin etkisinden arındırılmış haliyle, veri setinin baskın davranış eğilimini yansıtan daha sağlam bir temsil özelliği göstermektedir.

Model eğrilerinin son aşamasında, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında tüm eğrilerin deneysel yoğunluk merkezine yeniden oturduğu ve R_u yaklaşık 1 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu da hem PySR modelinin hem klasik eğri uydurma yaklaşımlarının sıvılaşma limitine yaklaşan çevrim sayılarında boşluk suyu basıncı doygunluğunu doğru temsil ettiğini göstermektedir.

Genel değerlendirmede PySR hibrit sigmoid modeli, erken ve geç çevrim aşamalarını oldukça başarılı şekilde modelleyebilmekte, ancak orta çevrim sayılarında bazı parametrik varyasyonları tam olarak yakalamakta sınırlı kalmaktadır. Parametrelerin ortalama ve medyan değerlerinin birlikte değerlendirilmesi, hem veri setinin parametrik yayılım karakterini hem de modelin açıklama kapasitesini ortaya koymaktadır. Gelecekte modelin doğruluk seviyesini artırmak amacıyla bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimlerin daha karmaşık yapıların içerisine dahil edilmesinin faydalı olabileceğini işaret etmektedir.

Şekil 4.57'de, normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve farklı katsayı hesaplama yöntemleriyle elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.57. Sigmoid yapı medyan KDE dağılımı.

Grafikte yer alan üç farklı model eğrisi, farklı katsayı hesaplama yaklaşımlarını temsil etmektedir. İlk eğri, PySR tabanlı hibrit sigmoid omurga denklemi kullanılarak elde edilen a=0,671 ve b=0,700 medyan parametre değerleri ile çizilmiştir. İkinci eğri, her bir deney için uygulanan klasik sigmoid eğri uydurma sonucunda elde edilen ortalama parametreler olan a2=1,111 ve b2=0,796 değerleriyle oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, klasik eğri uydurma sonuçlarından hesaplanan medyan parametre değerleri olan a3=0,460 ve b3=0,707 ile çizilmiştir.

İstatistiksel değerlendirmede dikkat çeken temel unsur, PySR hibrit modelin medyan parametreleri ile klasik eğri uydurmanın medyan parametrelerinin birbirine oldukça yakın olmasıdır. Özellikle b parametresi her iki yöntemde de 0,700 ve 0,707 gibi oldukça benzer değerlere ulaşmıştır. a parametresinde ise PySR hibrit modelin medyan değeri (a=0,671), klasik eğri uydurmanın medyan değerine (a3=0,460) göre bir miktar daha yüksek kalmıştır. Bu durum, PySR modelinin bağımsız değişkenleri sistematik şekilde kullanarak uç değerlerden kısmen etkilenmeyen ve aynı zamanda parametrik etkileri dengeleyen bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Medyan değerlerin genel olarak ortalama değerlere göre daha düşük çıkması ise istatistiksel olarak beklenen bir sonuçtur; çünkü medyan hesaplama uç

değerlerden etkilenmeyen daha sağlam merkez eğilim ölçüsüdür. Ortalama değerlerin daha yüksek çıkması, veri setinde bazı deneylerde erken R_u gelişiminin ortalamayı yukarı çektiğini göstermektedir.

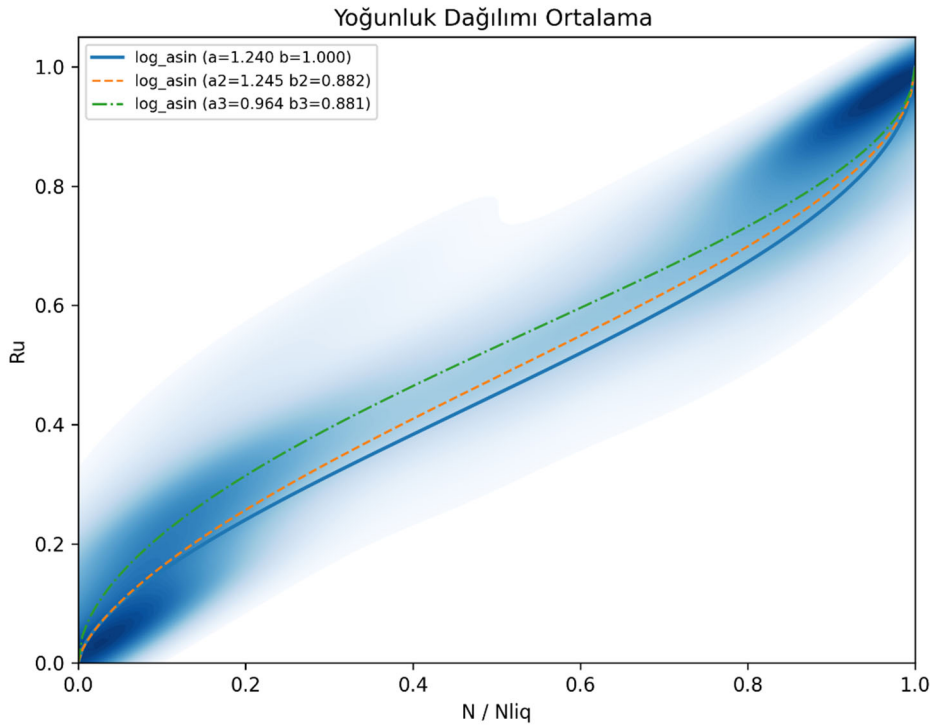
Model eğrilerinin deneysel yoğunluk dağılımı ile uyumu değerlendirildiğinde, düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) hem PySR hibrit model eğrisi hem de klasik medyan eğri veri yoğunluğunun merkezine oldukça iyi oturmakta, boşluk suyu basıncının erken artışını doğru şekilde yansıtmaktadır. Özellikle medyan eğrilerin bu bölgede PySR eğrisiyle oldukça yakın sonuçlar vermesi, erken döngülerdeki genel davranışın tutarlı şekilde yakalandığını göstermektedir. Buna karşın, klasik ortalama eğri aynı bölgedeki davranışta daha düşük R_u tahminleri yapmakta ve erken boşluk suyu basıncı artışını kısmen daha gecikmeli temsil etmektedir. Bu durum ortalamanın uç değerlerden etkilenerek a2 değerini yükseltmiş olmasıyla açıklanabilir.

Orta seviyedeki Ru değerlerine karşılık gelen N/N_{liq} yaklaşık 0,4–0,7 aralığında ise PySR hibrit model eğrisinde önceki ortalama analizde gözlemlenen hafif sapma, medyan değerler üzerinden yapılan bu hesaplamada kısmen azalmış ve deneysel yoğunluk merkezine daha iyi oturmuştur. Bu iyileşme, PySR hibrit modelde bağımsız değişkenlerin doğrudan ilişkilendirilmesi ve bu sayede uç etkilerin minimize edilerek merkez davranışa daha yakın sonuçların elde edilmesiyle ilişkilendirilebilir.

Model eğrilerinin son aşamasında, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında tüm eğrilerin deneysel yoğunluk merkezine yeniden oturduğu ve R_u yaklaşık 1 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum hem PySR hibrit modelin hem de klasik eğri uydurma yaklaşımlarının sıvılaşma limitine yaklaşan çevrim sayılarında boşluk suyu basıncı doygunluğunu başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

PySR hibrit sigmoid modeli medyan parametreleri kullanıldığında erken ve orta çevrim sayılarındaki davranışları ortalamaya göre daha yüksek doğrulukla modelleyebilmekte ve uç değer etkilerinden arınmış daha temsil edici bir eğri sunmaktadır. Parametrelerin medyan ve ortalama değerlerinin birlikte değerlendirilmesi hem veri setindeki yayılım yapısının anlaşılmasına hem de modelin genel güvenilirliğinin daha kapsamlı şekilde ortaya konulmasına katkı sağlamaktadır. Gelecekte model doğruluğunu

daha da artırmak amacıyla bağımsız değişkenler arası etkileşimlerin daha gelişmiş parametrik yapılarla temsil edilmesi faydalı olacaktır.



Şekil 4.58. Logaritmik yapı ortalama KDE dağılımı

Şekil 4.58'de, normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve logaritmik hibrit omurga denklemi kullanılarak elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Arka planda yer alan mavi renk tonlaması, 125 adet dinamik gerilme kontrollü üç eksenli deney sonucunda elde edilen R_u-N/N_{liq} verilerinin yoğunluğunu göstermektedir.

Grafikte yer alan üç farklı model eğrisi, logaritmik omurga denklemlerine dayalı farklı katsayı hesaplama yaklaşımlarını temsil etmektedir. İlk eğri, PySR tabanlı hibrit model ile oluşturulan sembolik regresyon denklemi kullanılarak elde edilen a=1,240 ve b=1,000 parametre değerleriyle çizilmiştir. İkinci eğri, her bir deney için uygulanan klasik eğri uydurma sonucunda hesaplanan ortalama parametreler olan a2=1,245 ve b2=0,882 değerleri ile elde edilmiştir. Üçüncü eğri ise, aynı eğri uydurma sonuçlarından hesaplanan medyan parametreler olan a3=0,964 ve b3=0,881 ile oluşturulmuştur.

İstatistiksel olarak değerlendirildiğinde, PySR hibrit modelin hesaplanan parametreleri ile klasik ortalama eğrinin parametreleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. a ve a2 değerlerinin neredeyse eşit olması, modelin bağımsız değişkenleri dikkate alarak genel davranış ortalamasını oldukça başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir. b parametresi açısından ise PySR modeli b=1,000 değeriyle tam skaler faktör formuna yaklaşmış, klasik ortalama modelde ise b2=0,882 değeri ile biraz daha küçük kalmıştır. Bu durum, PySR modelinin parametrik etkileşimleri sistematik şekilde değerlendirmesiyle açıklanabilir. Medyan değerler (a3=0,964 ve b3=0,881) ise klasik eğri uydurmanın uç değerlerden etkilenmeyen daha sağlam merkez eğilimini ortaya koymaktadır. Medyan a3 değerinin a ve a2'ye göre daha düşük çıkması, veri setindeki bazı testlerde erken R_u gelişiminin ortalamayı yukarı çektiğini ve medyanın uç değerleri dengeleyerek daha merkezi davranış sunduğunu göstermektedir.

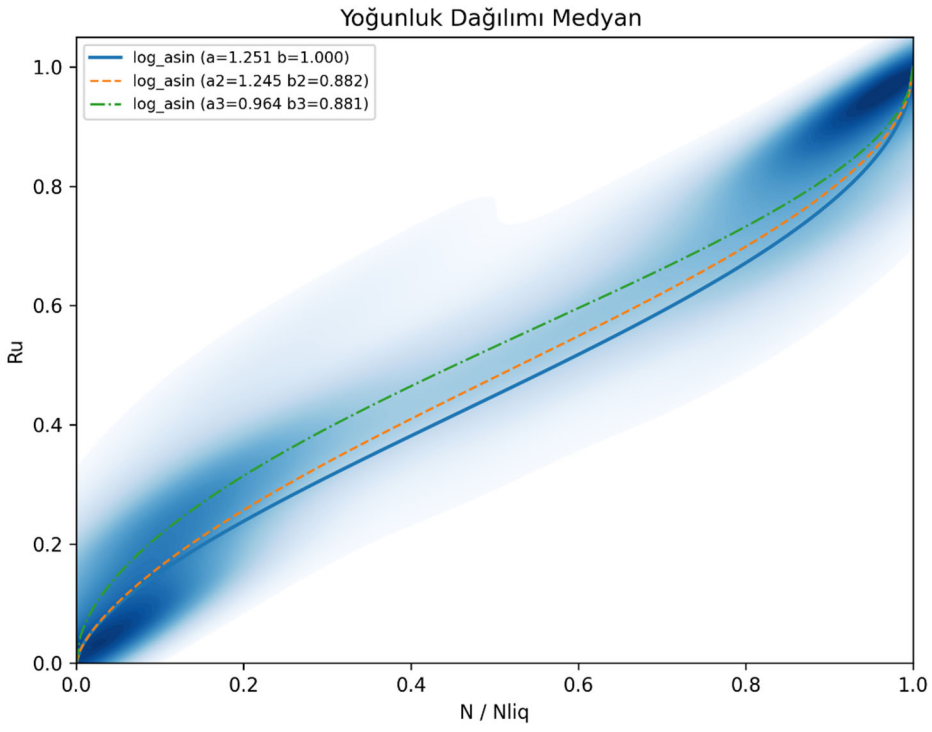
Model eğrilerinin deneysel yoğunluk dağılımı ile uyumu dikkate alındığında, düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) tüm eğriler veri yoğunluğunun merkezine oldukça iyi oturmakta ve boşluk suyu basıncı artışını başarılı şekilde yansıtmaktadır. Logaritmik yapının, sigmoid yapıya kıyasla özellikle düşük çevrim sayılarında R_u artışını daha yumuşak ve sürekli tanımlayabilen bir yapı sunduğu gözlemlenmektedir. PySR hibrit modelin eğrisi bu bölgede deneysel davranışla oldukça iyi örtüşmekte ve klasik ortalama eğriyle büyük oranda paralellik göstermektedir.

Orta seviyedeki Ru değerlerine karşılık gelen N/N_{liq} yaklaşık 0,4–0,7 aralığında da PySR hibrit model eğrisinin deneysel yoğunluk merkezine oldukça iyi uyum sağladığı görülmektedir. Özellikle logaritmik yapının nonlineer artış karakteristiği sayesinde orta çevrim aralığındaki boşluk suyu basıncı gelişimi sigmoid modele göre daha dengeli temsil edilmiştir. Klasik ortalama eğri ile PySR eğrisi bu bölgede neredeyse çakışmakta olup medyan eğri bu iki eğriden biraz daha yukarıda seyrederek erken sıvılaşmaya meyilli testlerin merkez davranışını temsil etmektedir.

Modelin son aşamasında, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında ise tüm eğrilerin deneysel yoğunlukla tam uyum sağladığı ve R_u yaklaşık 1 değerine başarıyla ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu da logaritmik yapının sıvılaşma doygunluğunu doğru şekilde temsil edebildiğini göstermektedir.

Logaritmik hibrit omurga modeli veri setinin erken, orta ve geç evre davranışlarını oldukça yüksek doğrulukla modelleyebilmekte ve parametrik çeşitliliği etkili şekilde dengelemektedir. Klasik ortalama ve medyan eğrilerin PySR eğrisiyle yakın sonuçlar üretmesi, modelin genel davranış eğilimini güvenilir şekilde yakaladığını ve uç değer etkilerinin sistematik parametrelerle dengelendiğini göstermektedir. Parametrelerin ortalama ve medyan değerlerinin birlikte değerlendirilmesi hem model performansının hem de veri setinin yayılım karakteristiğinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Logaritmik yapının, sigmoid yapıya kıyasla orta çevrim sayılarında daha iyi uyum sağlaması, bu tür fonksiyonların sıvılaşma davranışını modellemede önemli bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.59'da normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve logaritmik hibrit omurga yapısı kullanılarak elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.59. Logaritmik yapı medyan KDE dağılımı.

Grafikte üç farklı model eğrisi yer almaktadır. Birinci eğri, PySR tabanlı hibrit yapı ile oluşturulan logaritmik omurga denklemine, medyan değerleri esas alarak hesaplanan a=1,251 ve b=1,000 parametreleri ile çizilmiştir. İkinci eğri, klasik logaritmik omurga yapısına eğri uydurma yöntemiyle elde edilen ortalama parametreler olan a2=1,245 ve b2=0,882 değerleriyle oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, klasik eğri uydurma yönteminden elde edilen medyan parametreler olan a3=0,964 ve b3=0,881 kullanılarak çizilmiştir.

İstatistiksel açıdan değerlendirildiğinde, PySR logaritmik hibrit yapıdan elde edilen medyan parametreler ile klasik eğri uydurmanın ortalama parametreleri arasındaki yakınlık dikkat çekicidir. a ve a2 parametreleri neredeyse aynı seviyede olup hibrit modelin bağımsız değişkenleri içeren parametrik yapı sayesinde veri setinin genel eğilimini oldukça başarılı şekilde yakaladığını göstermektedir. b parametresi bakımından, PySR hibrit modelin b=1,000 değeriyle tam ölçek faktörü formuna ulaştığı, klasik ortalama modelin ise b2=0,882 değeri ile biraz daha düşük kaldığı görülmektedir. Klasik eğri uydurmanın medyan parametreleri (a3=0,964 ve b3=0,881) ise uç değerlerin etkisinden bağımsız daha temsil edici bir merkez davranışını yansıtmaktadır. Medyan a3 değerinin hem PySR hem de klasik ortalama eğrilere göre daha düşük kalması, bazı erken Ru artışlı testlerin ortalamayı yukarı çektiğini, medyanın ise bu etkileri baskılayarak daha sağlam merkezi eğilim verdiğini göstermektedir.

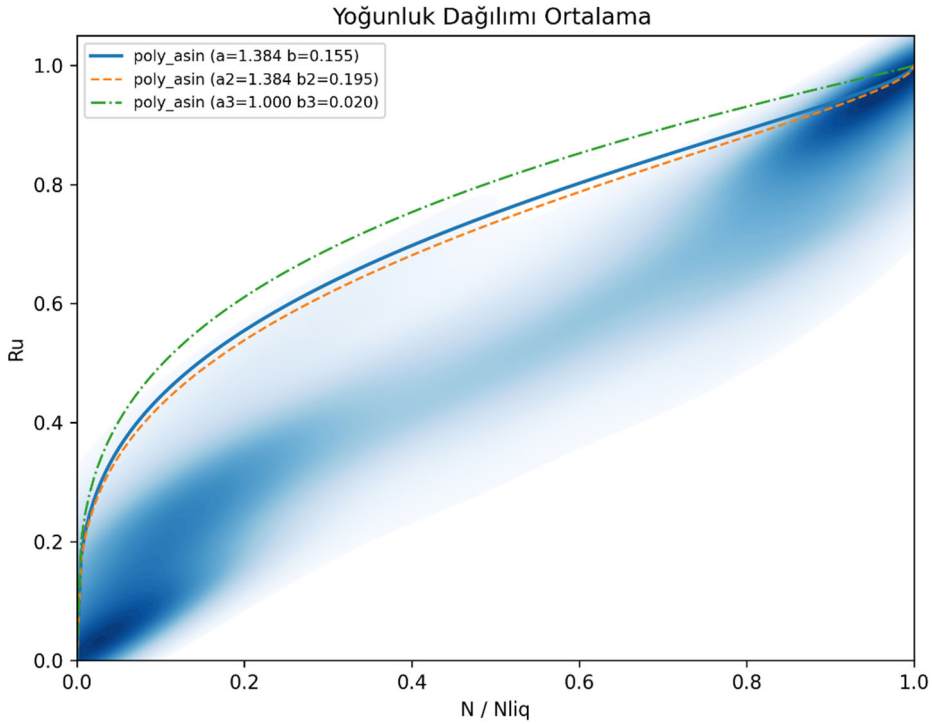
Model eğrilerinin deneysel yoğunluk dağılımı ile uyumuna bakıldığında, düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) tüm eğriler veri yoğunluğunun merkezine yüksek uyum göstermektedir. Logaritmik omurga yapısının karakteristik özelliği gereği, düşük çevrimlerdeki Ru gelişimini yumuşak ve dengeli bir artışla temsil etme kapasitesi sigmoid yapıdan daha başarılı sonuç vermektedir. PySR hibrit model eğrisi, özellikle erken çevrimlerde klasik ortalama ve medyan eğrilerle oldukça paralel davranış göstermiştir.

Orta çevrim aralığında ($N/N_{liq}\cong0,4 – 0,7$) PySR hibrit yapı eğrisi, deneysel yoğunluğa genel olarak iyi oturmakta, klasik ortalama eğri ile neredeyse örtüşmektedir. Bu durum, logaritmik yapının bu aralıkta parametrik çeşitliliği dengeleyerek R_u gelişimini istikrarlı şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Medyan eğri ise, bu bölgede yine biraz daha yüksek seyrederek erken sıvılaşma davranışına sahip örneklerin varlığını merkez eğilim içerisinde korumaktadır. Medyan eğrinin orta çevrimde PySR eğrisine göre daha yüksek R_u

tahminleri yapması, uç değerlerin medyan yapıyı yukarı yönlü etkilemeden genel davranış eğilimini ortaya koymasından kaynaklanmaktadır.

Modelin son bölümünde, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında tüm eğrilerin deneysel yoğunluk ile tam uyum sağladığı ve R_u yaklaşık 1 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu da logaritmik omurga yapısının sıvılaşma doygunluğu aşamasındaki davranışı dengeli ve başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Logaritmik hibrit omurga yapısı PySR modeli ile oluşturulduğunda, veri setinin erken, orta ve geç evre boşluk suyu basıncı gelişimini yüksek doğrulukla modelleyebilmektedir. Parametrelerin PySR, klasik ortalama ve klasik medyan değerlerinin birbirine yakın sonuçlar vermesi modelin genel davranış eğilimini güvenilir şekilde yakaladığını, aynı zamanda uç değerlerin dengeli biçimde absorbe edildiğini göstermektedir. Logaritmik yapı, özellikle orta çevrim sayılarında sıvılaşma eğrisinin nonlineer karakteristiğini daha stabil şekilde yansıtması nedeniyle sigmoid omurga yapılarına kıyasla alternatif ve güçlü bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır.



Şekil 4.60. Polinomsal yapı ortalama KDE dağılımı.

Şekil 4.60'da normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve polinomsal hibrit omurga yapısı kullanılarak elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Grafikte yer alan üç farklı model eğrisi, polinomsal hibrit omurga yapısına dayalı katsayı hesaplama yaklaşımlarını temsil etmektedir. İlk eğri, PySR tabanlı hibrit yapı ile oluşturulan polinomsal omurga denklemi kullanılarak elde edilen a=1,384 ve b=0,155 parametreleri ile çizilmiştir. İkinci eğri, her bir deney için uygulanan klasik polinomsal omurga yapısına eğri uydurma sonucunda hesaplanan ortalama parametreler olan a2=1,384 ve b2=0,195 değerleri ile oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, klasik eğri uydurma sonuçlarından hesaplanan medyan parametreler olan a3=1,000 ve b3=0,020 ile çizilmiştir.

İstatistiksel olarak değerlendirildiğinde, PySR hibrit yapıdan elde edilen a ve klasik ortalama eğri uydurmadan elde edilen a2 değerlerinin birebir aynı çıkması, modelin klasik eğri uydurma yöntemi ile hesaplanan ortalama eğrilerle yüksek tutarlılık gösterdiğini göstermektedir. b parametresi açısından ise PySR modelinde b=0,155, klasik ortalamada b2=0,195 elde edilmiştir. Her iki model de benzer parametrik seviyelerde çalışmış, ancak polinomsal yapının genel olarak düşük b değerleriyle boşluk suyu basıncı gelişimini hızlı ve erken temsil etme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Medyan parametreler (a3=1,000 ve b3=0,020) ise özellikle b parametresi bakımından oldukça düşük bir değerle daha konservatif bir merkez eğilimi ifade etmektedir. Medyan b3 değerinin düşük çıkması, veri setinde parametrik yayılımın yüksek olduğunu ve uç değerlerin klasik ortalamaya göre medyan üzerinde daha sınırlı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Model eğrilerinin deneysel yoğunluk dağılımı ile uyumu incelendiğinde, polinomsal hibrit yapı PySR eğrisinin ve klasik ortalama eğrinin düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) yoğunluk merkezinin üzerinde seyrettiği, yani deneysel verideki çoğu noktadan daha yüksek R_u tahminleri ürettiği gözlemlenmektedir. Özellikle erken çevrim sayılarında model eğrileri, boşluk suyu basıncı gelişimini olduğundan daha erken ve daha hızlı öngörmüştür. Bu durum, polinomsal yapının R_u gelişimini eğimsel olarak yukarı çekme etkisinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Medyan eğri ise bu bölgede PySR ve klasik ortalamaya göre daha da yukarıda seyretmekte, erken çevrimlerde en yüksek R_u tahminlerini yapmaktadır. Ancak

medyan eğrinin düşük b3 değeri nedeniyle genel eğimsel karakteri farklılık göstermekte ve hızlı R_u artışı üretmektedir.

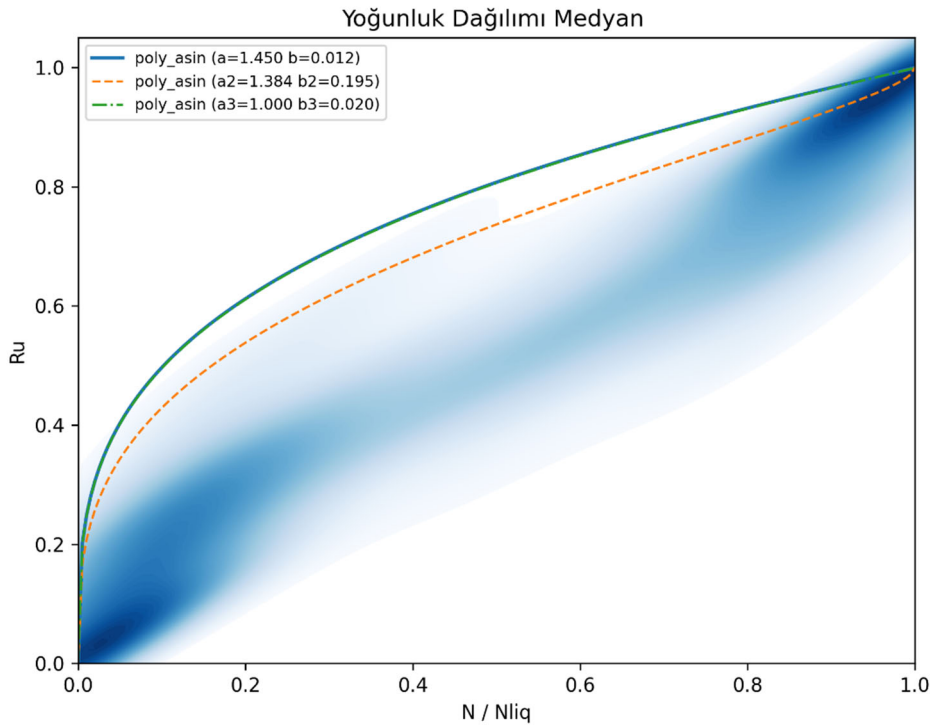
Orta çevrim aralığında ($N/N_{liq}\approx0,4 – 0,7$) PySR hibrit yapı ve klasik ortalama eğriler deneysel yoğunluk merkezinden yine yukarı saparak veri yoğunluğunu tam olarak karşılayamamışlardır. Bu sapma, polinomsal yapının parametrik formunun özellikle orta çevrimlerde boşluk suyu basıncı gelişimini deneysel gerçekliğe göre biraz daha yüksek tahmin ettiğini göstermektedir. Medyan eğri ise yine daha yüksek R_u değerleri üretmeye devam etmiş ve orta çevrim aralığında da veri merkezinden uzaklaşmıştır.

Modelin son aşamasında, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında tüm eğrilerin R_u yaklaşık 1 değerine ulaştığı ve sıvılaşma doygunluğunu genel anlamda yakalayabildiği görülmektedir. Ancak burada da PySR ve klasik ortalama eğriler deneysel yoğunluk sınırının üst tarafında seyretmiştir.

Polinomsal hibrit yapı PySR modeli; veri setinin genel davranışını temsil etme açısından diğer omurga yapılarına göre daha kısıtlı uyum sağlamış, boşluk suyu basıncı gelişimini özellikle erken ve orta çevrim sayılarında deneysel verilerden daha hızlı ve yüksek tahmin etmiştir. Parametrelerin PySR, klasik ortalama ve klasik medyan değerleri arasındaki b parametresi varyasyonları oldukça yüksektir. Bu sonuç, polinomsal yapıların R_u gelişimini kontrol eden parametreler üzerindeki duyarlılığının yüksek olduğunu ve bu model yapısının parametrik hassasiyet nedeniyle dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.61'da normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve polinomsal hibrit omurga yapısı kullanılarak elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Grafikte yer alan üç farklı model eğrisi, polinomsal hibrit omurga yapısına dayalı katsayı hesaplama yaklaşımlarını temsil etmektedir. İlk eğri, PySR tabanlı hibrit yapı ile oluşturulan polinomsal omurga denklemi kullanılarak elde edilen a=1,384 ve b=0,155 parametreleri ile çizilmiştir. İkinci eğri, her bir deney için uygulanan klasik polinomsal omurga yapısına eğri uydurma sonucunda hesaplanan ortalama parametreler olan a2=1,384 ve b2=0,195 değerleri ile oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, klasik eğri uydurma sonuçlarından hesaplanan medyan parametreler olan a3=1,000 ve b3=0,020 ile çizilmiştir.



Şekil 4.61. Polinomsal yapı medyan KDE dağılımı.

Grafikte yer alan üç farklı model eğrisi, polinomsal hibrit omurga yapısına dayalı katsayı hesaplama yaklaşımlarını temsil etmektedir. İlk eğri, PySR hibrit yapı ile oluşturulan polinomsal omurga denklemi kullanılarak, medyan parametre değerleri esas alınarak hesaplanan a=1,450 ve b=0,012 değerleriyle çizilmiştir. İkinci eğri, klasik polinomsal omurga yapısına eğri uydurma sonucunda elde edilen ortalama parametreler olan a2=1,384 ve b2=0,195 ile oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, klasik eğri uydurma yönteminden hesaplanan medyan parametreler olan a3=1,000 ve b3=0,020 ile çizilmiştir.

İstatistiksel değerlendirme yanında grafik üzerinden yapılan doğrudan gözlemler, model eğrileri arasındaki farklılıkları net biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle PySR hibrit yapı ile hesaplanan eğri, klasik medyan eğriyle neredeyse tamamen üst üste oturmuş ve her iki eğri özellikle $N/N_{liq}<0,6$ aralığında oldukça benzer davranış göstermiştir. Bu yakınlık, PySR modelinin bağımsız değişkenleri doğrudan modele dahil ederek uç değerlerden etkilenmeyen medyan davranışı başarılı şekilde yakaladığını göstermektedir. Buna karşın klasik ortalama eğri, bu iki medyan eğriden sistematik olarak daha aşağıda seyretmiş ve erken çevrim sayılarında R_u değerlerini daha düşük tahmin etmiştir. Bu durum, polinomsal

yapının ortalama hesaplamalarında uç değerlerin a2 ve b2 katsayılarını kısmen aşağı yönlü etkilemesinin sonucudur.

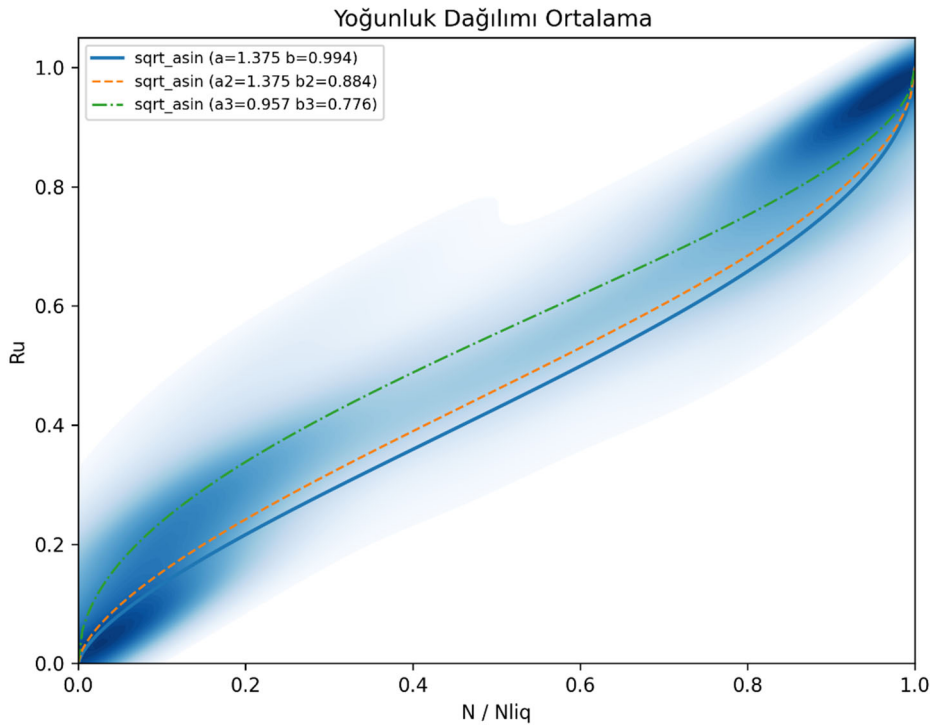
Düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$), medyan eğriler veri yoğunluğunun merkezinin bir miktar üzerinde seyretmektedir. Özellikle PySR ve klasik medyan eğrileri, erken çevrimlerde deneysel dağılımdaki çoğu noktaya göre daha yüksek R_u tahminleri yapmıştır. Bu durum, polinomsal yapıların düşük çevrimlerde boşluk suyu basıncı artışını hızlı başlatma eğilimini yansıtmaktadır. Ortalama eğri ise bu bölgede yoğunluk merkezine daha yakın konumlanmış ve veri setinin genel yayılımını bu bölgede daha iyi temsil etmiştir.

Orta çevrim aralığında ($N/N_{liq} \cong 0,4–0,7$), benzer bir eğilim devam etmiş ve PySR hibrit yapı ile klasik medyan eğrisi üst üste kalmayı sürdürmüştür. Bu iki eğri yine veri dağılımının hafif üst kısmında kalarak R_u değerlerini kısmen yüksek tahmin etmektedir. Ortalama eğri bu aralıkta da diğer iki eğriden ayrılarak veri yoğunluğuna daha yakın konumlanmıştır.

Modelin son bölümünde, $N/N_{liq}>0,8$ aralığında ise tüm eğriler sıvılaşma doygunluk seviyesine yaklaşmış ve R_u yaklaşık 1 seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada tüm modeller doygunluk sınırını başarılı şekilde temsil etmektedir.

Polinomsal hibrit yapı PySR modeli, medyan katsayılarla hesaplandığında klasik medyan eğriyi neredeyse tam olarak yakalamış ve uç değerlerin etkisinden arınmış merkezi davranışı temsil etmiştir. Ortalama eğri ise daha düşük R_u tahminleri yapsa da veri yoğunluğuna yine uzak değerler üretmiştir. Bu durum, polinomsal yapıların parametrik duyarlılığının özellikle b katsayısında yüksek olduğunu ve uç değerlerin bu duyarlılığı iki farklı merkez ölçüsü (ortalama ve medyan) üzerinde belirgin şekilde yansıttığını göstermektedir. Polinomsal hibrit yapı genel eğilimi düşük temsil etme kapasitesine sahip olmakla birlikte, parametrik stabilite açısından diğer hibrit yapılara göre daha hassas bir yapı sergilemektedir.

Şekil 4.62'de, normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve karekök tabanlı hibrit omurga yapısı kullanılarak elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.62. Kareköksel yapı ortalama KDE dağılımı.

Grafikte üç farklı model eğrisi yer almaktadır. Birinci eğri, PySR hibrit yapı ile oluşturulan karekök omurga denklemi kullanılarak elde edilen a=1,375 ve b=0,994 parametreleri ile çizilmiştir. İkinci eğri, karekök yapısına eğri uydurma sonucunda hesaplanan ortalama parametreler olan a2=1,375 ve b2=0,884 ile oluşturulmuştur. Üçüncü eğri ise, eğri uydurma yönteminden hesaplanan medyan parametreler olan a3=0,957 ve b3=0,776 ile çizilmiştir.

İstatistiksel parametreler açısından bakıldığında, PySR hibrit yapı ile ortalama katsayıların a parametresinde birebir eşleştiği, b parametresinde ise PySR b=0,994 ve klasik ortalama b2=0,884 değerleriyle oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Medyan parametrelerde ise a3=0,957 ve b3=0,776 değerleri, ortalamalara göre daha düşük çıkmıştır. Ancak, karekök tabanlı modelin matematiksel karakteristiği nedeniyle, parametrelerin düşük çıkması eğrinin R_u değerlerini daha hızlı ve yüksek tahmin etmesine yol açmıştır. Bu nedenle, medyan parametrelerle çizilen eğri (yeşil eğri), grafik üzerinde erken ve orta çevrimlerde PySR ve klasik ortalama eğrilere kıyasla yukarıda yer almakta ve daha hızlı R_u artışı öngörmektedir.

Grafik üzerinden yapılan doğrudan gözlem, model eğrileri arasındaki farklılıkları açıkça ortaya koymaktadır. Düşük çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,3$) PySR hibrit eğri ve ortalama eğri büyük oranda üst üste oturmuş ve veri yoğunluğunun merkezine çok yakın seyretmiştir. Bu iki eğri, deneysel verinin gerçekçi davranışını en iyi şekilde yakalamakta ve boşluk suyu basıncı artışını doğru biçimde modellemektedir. Medyan eğri ise aynı bölgede veri yoğunluğunun üstünde kalarak daha hızlı R_u gelişimi tahmin etmektedir.

Orta çevrim aralığında ($N/N_{liq}\cong0,4 – 0,7$) benzer bir eğilim devam etmektedir. PySR hibrit eğri ve ortalama eğri bu aralıkta yine neredeyse çakışmakta ve veri yoğunluğunun merkezine oturmaktadır. Medyan eğri bu bölgede de diğer iki eğriden daha yukarıda seyrederek R_u artışını hızlı göstermektedir.

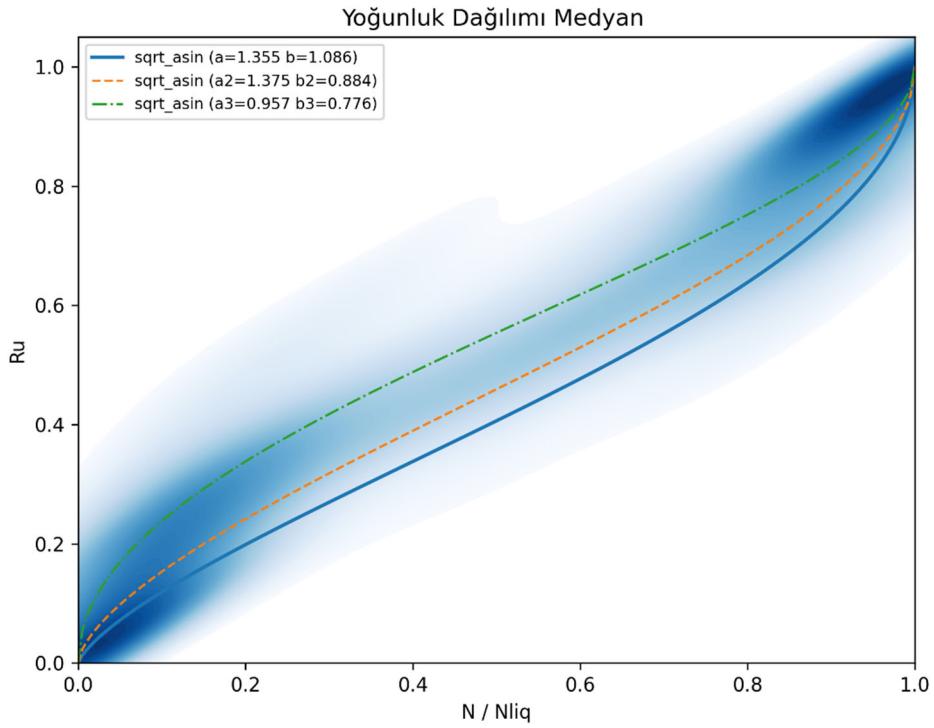
Modelin son aşamasında ($N/N_{liq}>0,8$) tüm eğriler R_u yaklaşık 1 seviyesine ulaşarak sıvılaşma doygunluğunu başarılı şekilde temsil etmiştir. Bu aşamada da tüm eğriler arasında benzer bir davranış gözlemlenmektedir.

Karekök hibrit yapı için PySR hibrit model ve ortalama eğriler hem düşük hem de orta çevrimlerde veri yoğunluğunun merkezine en iyi oturan ve deneysel R_u gelişim eğrisini en yüksek doğrulukla temsil eden modeller olmuştur. Medyan katsayılarla oluşturulan eğri ise, model matematiği nedeniyle gerçek veriye göre daha hızlı ve yüksek R_u değerleri tahmin etmiştir. Karekök hibrit yapı için veriyle en uyumlu eğrinin PySR hibrit yapı ve ortalama eğri olduğu, medyan eğrinin ise model karakteristiği gereği daha yüksek ve hızlı R_u gelişimini temsil ettiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.63'te, normalize çevrim sayısı (N/N_{liq}) ile boşluk suyu basıncı oranı (R_u) arasındaki ilişki, deneysel veri setinden elde edilen yoğunluk dağılımı (KDE) ve karekök tabanlı hibrit omurga yapısı ile elde edilen model eğrileri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Arka planda, 125 adet dinamik gerilme kontrollü üç eksenli deney sonucunda elde edilen R_u-N/N_{liq} verilerinin yoğunluk dağılımı mavi tonlamayla gösterilmektedir.

Grafikte üç farklı eğri yer almaktadır. Bunlardan ilki, PySR hibrit yapı ile oluşturulan karekök omurga denkleminde medyan katsayılar (a=1,355, b=1,086) kullanılarak çizilen mavi eğridir. İkinci eğri, klasik eğri uydurma yöntemiyle elde edilen ortalama parametreler (a2=1,375, b2=0,884) ile oluşturulan turuncu kesikli eğridir. Üçüncü eğri ise, klasik eğri

uydurma yöntemiyle elde edilen medyan parametreler (a3=0,957, b3=0,776) ile çizilmiş yeşil noktalı eğridir.



Şekil 4.63. Kareköksel yapı medyan KDE dağılımı.

Grafik dikkatli incelendiğinde PySR hibrit modelin medyan katsayılarla oluşturduğu mavi eğrinin, özellikle düşük ve orta çevrim sayılarında ($N/N_{liq}<0,7$), ortalama eğriden daha düşük R_u tahmini yaptığı görülmektedir. Bu durum, PySR hibrit yapının uç değerlerden etkilenmeyen ve merkez eğilime daha yakın, daha temkinli bir tahmin ürettiğini göstermektedir. Ortalama eğri ise hem düşük hem de orta çevrimlerde deneysel veri yoğunluğunun merkezine en iyi oturan eğri olup veri setinin baskın davranışını en gerçekçi şekilde temsil etmektedir. Medyan katsayılarla oluşturulan yeşil eğri ise, diğer iki eğrinin üzerinde kalarak özellikle erken ve orta çevrimlerde daha hızlı ve yüksek R_u artışı tahminiyle veri yoğunluğuna göre konservatif bir davranış sergilemiştir. Bu eğilimin temel nedeni, karekök yapıdaki b parametresinin modeldeki matematiksel etkisiyle medyan eğrinin R_u gelişimini daha hızlı öngörmesidir.

Tüm eğriler, sıvılaşma sonlanım bölgesi olan $N/N_{liq}>0,8$ aralığında $R_u\approx1,00$ seviyesine ulaşmakta ve doygunluk koşulunu başarılı şekilde temsil etmektedir. Ancak, genel uyum açısından değerlendirildiğinde ortalama katsayılarla elde edilen turuncu eğri

hem düşük hem de orta çevrimlerde veri yoğunluğunun merkezine en yakın oturan ve en uyumlu sonuçları sunan model olarak öne çıkmaktadır. PySR hibrit modelin medyan katsayılarla oluşturulan eğrisi ise bu bölgedeki tahminlerinde daha temkinli davranmakta ve klasik medyan eğriye göre daha düşük R_u artışı öngörmektedir. Medyan eğri ise model karakteristiği gereği daha hızlı bir sıvılaşma davranışı göstermekte ve veri setine göre daha yüksek R_u tahminleri üretmektedir.

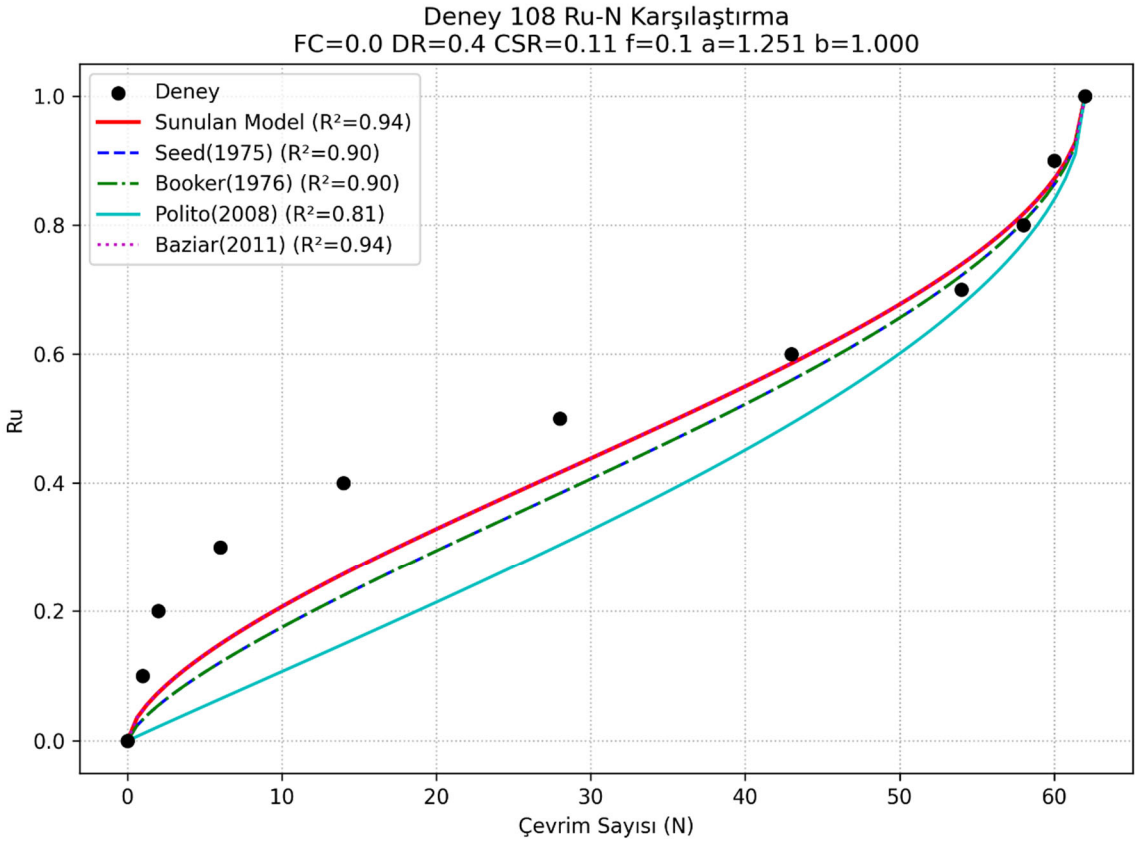
Karekök hibrit yapı için yapılan bu değerlendirmede, klasik ortalama katsayılarla oluşturulan eğrinin deneysel veriyle en iyi uyumu sağladığı, PySR hibrit medyan eğrinin ise daha temkinli ve merkezden sapmadan ilerleyen bir davranış sergilediği görülmüştür.

Bu çalışmada farklı hibrit omurga yapıların (sigmoid, logaritmik, polinomsal ve karekök) deneysel veriyle uyumu ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Grafikler ve yoğunluk dağılımı göz önüne alındığında, logaritmik hibrit yapı özellikle erken, orta ve geç çevrimlerde R_u gelişimini en iyi şekilde temsil ederek deneysel veri setinin merkezine en yakın ve tutarlı uyumu sağlamıştır. Karekök hibrit yapı da benzer şekilde yoğunluk merkezine yakın seyretmiş ve gerçekçi R_u tahminleriyle öne çıkmıştır. Buna karşın, sigmoid model düşük ve yüksek çevrimlerde başarılı olsa da özellikle orta çevrim sayılarında deneysel veriyle uyumu zayıflamış ve R_u değerlerini olduğundan düşük tahmin etmiştir. Polinomsal yapı ise model parametrelerine olan aşırı duyarlılığı nedeniyle erken ve orta çevrimlerde R_u gelişimini gereğinden fazla hızlı ve yüksek tahmin ederek, veri yoğunluğunun üstünde kalmıştır. Sonuç olarak, genel uyum açısından en güvenilir modeller logaritmik ve karekök hibrit yapılar olurken, sigmoid model orta çevrimlerde yetersiz kalmış, polinomsal model ise gerçek veriye göre daha yüksek ve hızlı R_u artışı öngören bir karakter sergilemiştir. Modellerin istatistiksel verileri Çizelge 4.18'de sunulmuştur. İlerleyen bölümlerde logaritmik model sunulacak olup Model 2 olarak isimlendirilecektir.

Çizelge 4.18. Omurga denklem istatistikleri.

MODEL	a	b	MAE	RMSE	MAPE (%)	R2	Adj_R2
sqrt_asin	1,3745	0,9944	0,1004	0,1456	26,7429	0,7879	0,7876
poly_asin	1,3836	0,1545	0,1633	0,2121	61,0291	0,5498	0,5492
log_asin	1,2400	0,9999	0,0928	0,1372	25,1506	0,8116	0,8113
asin_sigmoid	1,1423	0,7000	0,1321	0,1842	4174,2392	0,6605	0,6600

Analize sokulan veri seti değerleriyle Model 2'nin (Bkz. Denklem 4.15, Denklem 4.20, Denklem 4.21) boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı grafikleri çizilmiştir. Buradaki amaç denklemin tam olarak çalıştığını kontrol etmektir. Ayrıca daha önceki bölümlerde sunulan literatür denklemleri (Bkz. Bölüm 3.6) ile de karşılaştırılmak istenmiştir.



Şekil 4.64. Model 2 Deney 164 R_u-N eğrileri karşılaştırması.

Şekil 4.64'te, deney %0 ince dane içeriği (FC=0,0), orta derecede rölatif sıkılık (D_r=0,4) ve düşük çevrimsel gerilme oranı (CSR=0,11) koşullarında yürütülmüştür. Bu şartlarda zemin sıvılaşmaya görece dirençli olup R_u'nun gelişimi çevrimlerle birlikte dengeli bir şekilde artmaktadır. Grafik üzerinde, deneysel veri noktaları ile Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ve Baziar vd. (2011) modelinin tahmin eğrileri, çevrimlerin başından sonuna kadar neredeyse tamamen üst üste ilerleyerek deneysel davranışı yüksek doğrulukla yansıtmaktadır (R^2≈0,94). Özellikle R_u artışının belirginleştiği orta ve geç çevrim aralıklarında hem Model 2 hem de Baziar vd. (2011) modeli deneysel verilere son derece yakın sonuçlar üretmiştir. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, genel R_u gelişim eğilimini yakalamalarına karşın D_r ve CSR gibi parametreleri doğrudan içermedikleri için

orta ve yüksek çevrimlerde deneysel verilerin hafif altında kalarak R_u artışındaki ivmeyi tam olarak yansıtamamıştır. Özellikle R_u'nun hızlandığı bölgelerde bu klasik modellerin eğrileri deneysel değerlerin gerisinde seyretmiştir.

Polito vd. (2008) modeli ise, α katsayısında CSR ve D_r'yi içerse de düşük CSR koşullarında R_u gelişimini yeterince hızlı tahmin edememiş; özellikle erken ve orta çevrimlerde R_u değerlerini bariz şekilde düşük öngörmüştür (R^2=0,81).

Deney 164'te Model 2 ve Baziar vd. (2011) modeli, R_u'nun çevrimsel gelişimini bütün çevrim aralığında en iyi temsil eden modeller olmuştur. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, geleneksel sinüs çekirdekli yapılarının sınırlamaları nedeniyle orta-uzun çevrimlerde yetersiz kalırken Polito vd. (2008) modeli, α katsayısının zemin değişkenlerine bağlı olmasına rağmen, bu düşük CSR'li koşulda beklenen ivmeyi sağlayamamıştır.

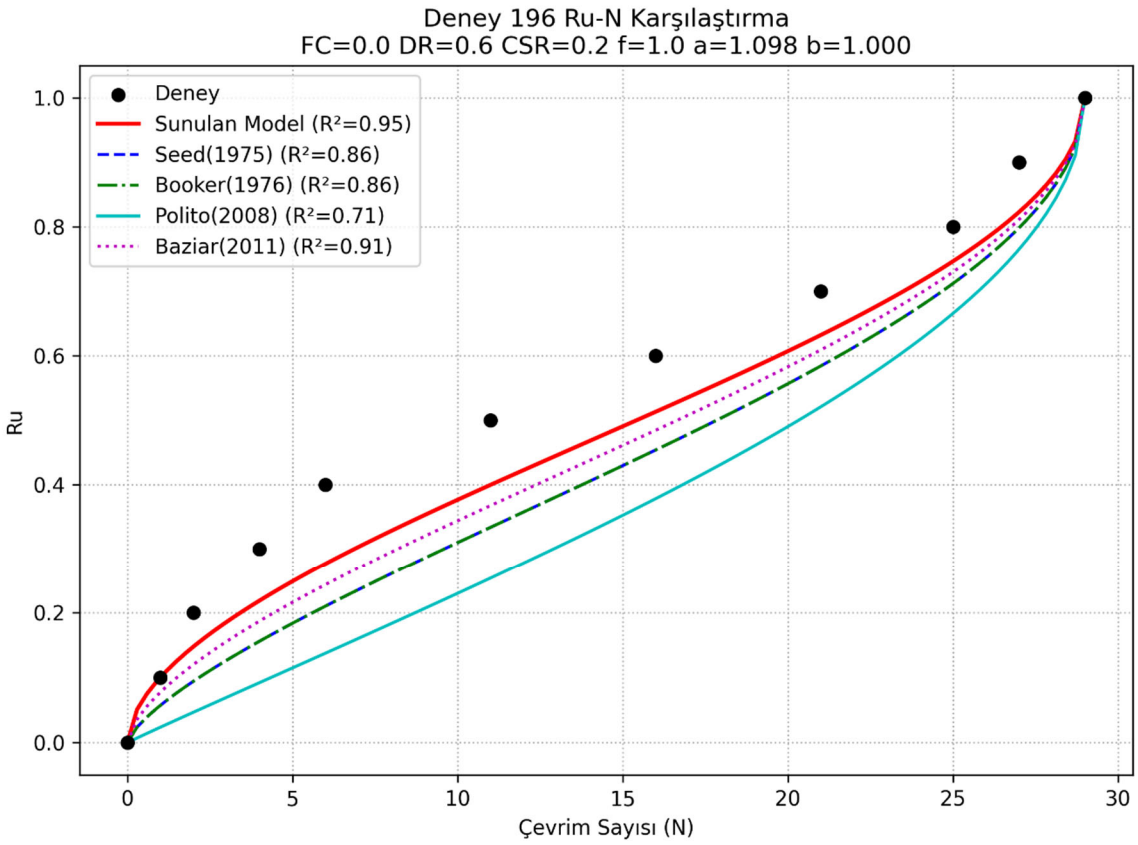
Logaritmik hibrit yapıya dayalı Model 2, deneysel veriye yüksek hassasiyetle uyum sağlamakta ve özellikle D_r ile CSR etkilerini doğrudan modele entegre etmesi sayesinde, geleneksel modellerin üzerinde bir temsil kabiliyeti sunmaktadır. Bu deneyde Baziar vd. (2011) modeliyle neredeyse tam örtüşme göstererek, literatürdeki en güncel modelle aynı doğruluk seviyesine ulaşmıştır.

Şekil 4.65'te, FC = 0,0, D_r = 0,6, CSR = 0,2 ve f = 1,0 koşullarında gerçekleştirilen Deney 196'ya ait R_u–N ilişkisi, deneysel veri noktalarıyla birlikte farklı model tahminleri üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriyle çevrimlerin başından sonuna kadar en yakın uyumu sağlamıştır. Özellikle R_u'nun hızlandığı orta ve geç çevrim aralığında, model eğrisi deneysel noktalarla neredeyse çakışarak hem ivmelenmeyi hem de doygunluğa ulaşımı başarılı biçimde temsil etmiştir (R^2=0,95). Bu yüksek doğruluk, modelin parametrelerinin doğrudan D_r, CSR ve f gibi deney koşullarını yansıtmasından ve zemin davranışını klasik modellere göre daha esnek biçimde modellemesinden kaynaklanmaktadır.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, genel R_u gelişim trendini takip etmekle birlikte, çevrim sayısı arttıkça R_u'nun ivmelenen artışını yeterince temsil edememiş ve özellikle orta ile geç çevrimlerde R_u'yu olduğundan düşük tahmin etmiştir (R^2=0,86). Bu

durumun başlıca nedeni, bu modellerin D_r ve CSR gibi deneysel değişkenleri doğrudan dikkate almamasıdır.



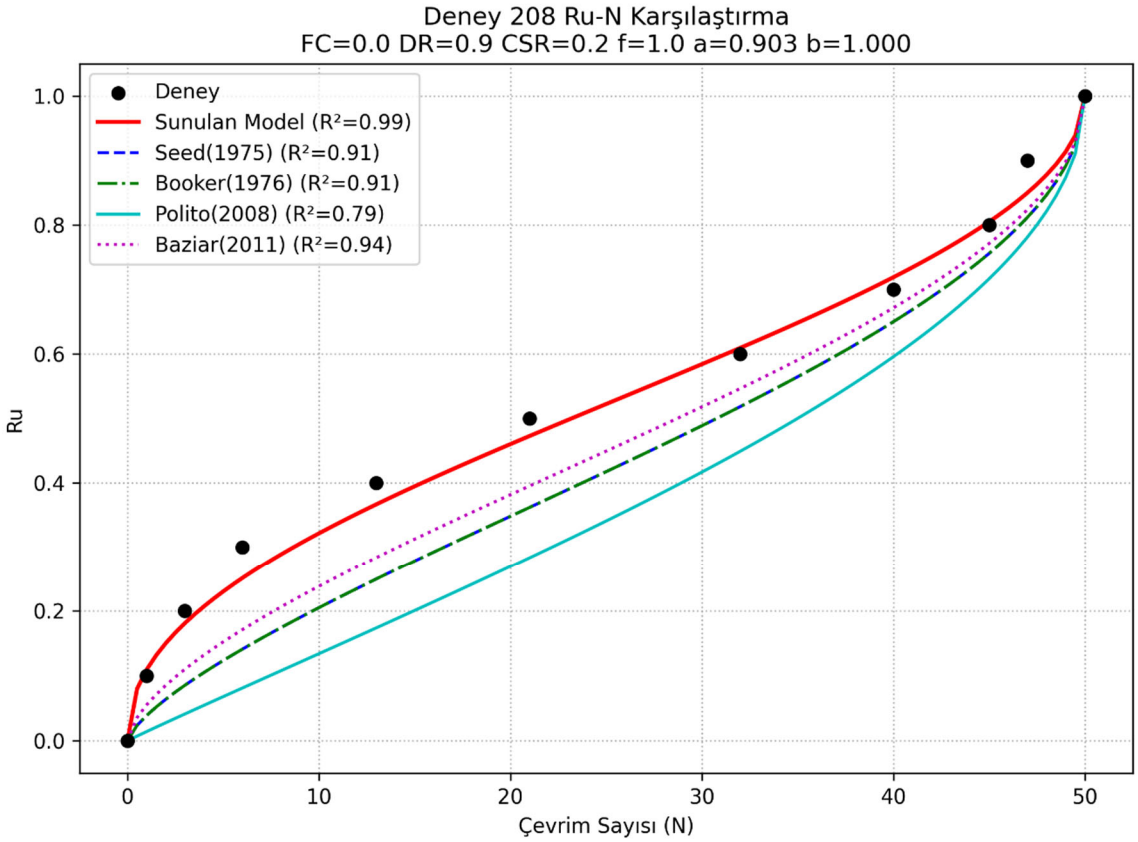
Şekil 4.65. Model 2 Deney 196 R_u-N eğrileri karşılaştırması.

Polito vd. (2008) modeli, α katsayısı yoluyla D_r ve CSR'yi hesaba kattığı halde, R_u'nun çevrimlerle artışını oldukça yavaş öngörmüştür. Özellikle erken ve orta çevrim aralığında deneysel verinin belirgin şekilde altında kalmış ve zemin parametrelerinin R_u gelişimi üzerindeki karmaşık etkisini yeterince yansıtamamıştır (R^2=0,71). Baziar vd. (2011) modeli ise, genel eğilimi makul düzeyde temsil etmiş (R^2=0,91), ancak R_u artışının hızlandığı çevrimlerde Model 2'nin gerisinde kalmış ve deneysel veri noktalarına Model 2 kadar yakın seyretmemiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Model 2 (logaritmik hibrit yapı), özellikle çevrimsel gerilme oranının yüksek, rölatif sıkılığın orta-yüksek seviyede olduğu bu deneyde R_u gelişimini en hassas ve gerçekçi biçimde temsil eden model olmuştur. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri çevrimlerin ilerlemesiyle deneysel veriden uzaklaşırken Polito

vd. (2008) modeli R_u artış hızını yeterince yakalayamamıştır. Baziar vd. (2011) modeli ise R_u eğrisinin tamamında Model 2 kadar tutarlı ve yüksek doğrulukta sonuç verememiştir.

Şekil 4.65, logaritmik hibrit modelin hem fiziksel zemin parametrelerini hem de çevrimsel yükleme etkisini doğrudan denklemlerine entegre ederek, klasik modellerin ötesinde bir uyum ve hassasiyet sunduğunu göstermektedir. Deneysel verinin karakterini hem erken hem de geç çevrimlerde başarıyla yakalayabilen model olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.66. Model 2 Deney 208 R_u-N eğrileri karşılaştırması.

Şekil 4.66'da FC = 0,0, D_r = 0,9, CSR = 0,2 ve f = 1,0 koşullarında yürütülen Deney 208'e ait R_u–N ilişkisi, deneysel veri noktalarıyla birlikte beş farklı modelin tahminleriyle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Model 2 (logaritmik hibrit yapı), çevrimlerin tamamında deneysel veriye en yakın tahminleri üreten model olmuştur. Özellikle erken, orta ve geç çevrimlerde R_u artışını son derece başarılı şekilde yansıtarak deneysel noktaların hemen üzerinden ilerlemiş ve deneyin karakteristiğine yüksek doğrulukla uyum sağlamıştır (R^2=0,99). Bu yüksek uyum, modelin a ve b parametrelerinin D_r, CSR ve f gibi deneysel

değişkenleri doğrudan ve fonksiyonel olarak içermesiyle ilgilidir. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, genel R_u gelişim trendini takip etmekle birlikte, çevrim sayısı arttıkça deneysel R_u'nun hızlanan artışını yeterince temsil edememiştir (her ikisi için R^2=0,91). Bu klasik modellerde D_r ve CSR gibi değişkenlerin doğrudan hesaba katılmaması, modelin çevrimler ilerledikçe deneysel veriden uzaklaşmasına sebep olmuştur.

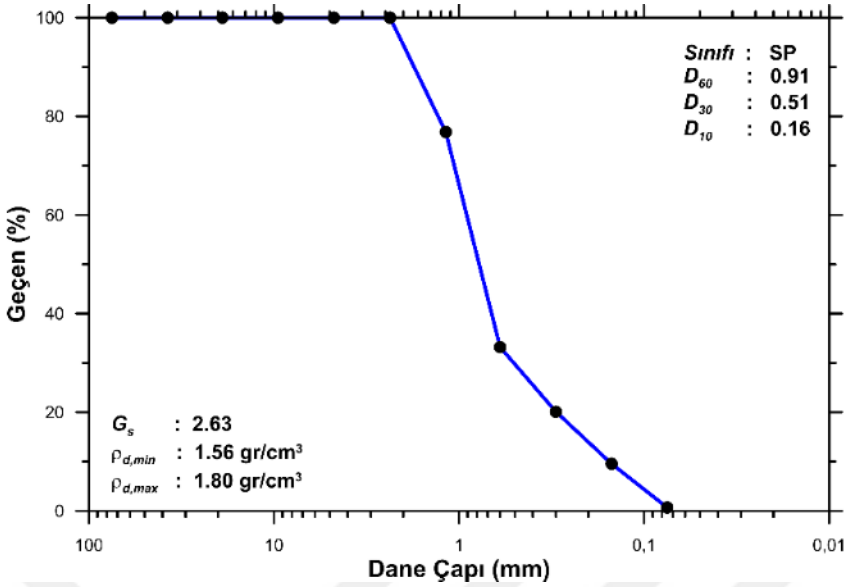
Polito vd. (2008) modeli, α katsayısında D_r ve CSR'yi dikkate almasına rağmen, R_u'nun çevrimlerle artışını özellikle erken ve orta çevrimlerde deneysel veriden daha yavaş tahmin etmiştir (R^2=0,79). Modelin parametre hassasiyeti, özellikle zemin sıkılığının çok yüksek olduğu bu testte beklenen ivmelenmeyi yansıtmakta yetersiz kalmıştır.

Baziar vd. (2011) modeli ise, R_u artışını genel hatlarıyla gerçekçi biçimde yansıtsa da çevrimlerin erken ve orta aralığında Model 2'nin gerisinde kalmış ve deneysel veriyle olan uyumu daha azdır (R^2=0,94). Özellikle deneysel noktaların üst sınırına yaklaşmakta Model 2 kadar hassas değildir. Model 2 (logaritmik hibrit yapı), yüksek rölatif sıkılık ve belirgin çevrimsel gerilme oranı gibi zemin ve yükleme koşullarında, R_u gelişimini deneysel veriye en yakın şekilde modellemiştir. Klasik modeller, özellikle çevrim sayısı arttıkça R_u artışındaki ivmeyi ve deneysel karakteristiği tam olarak yakalayamamış, Model 2 ise deneyin başından sonuna kadar yüksek doğruluk ve esneklikle uyum sağlamıştır.

4.2.8. Model doğrulama ve test süreci

Modelin sadece eğitim verileri üzerinde yüksek performans göstermesi yeterli değildir. Aynı zamanda farklı kaynaklardan gelen bağımsız veri setleri üzerinde de tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretmesi beklenir. Bu bağlamda, bu çalışmada geliştirilen sembolik regresyon modelinin doğruluğunu test etmek amacıyla, yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirdiğimiz üç eksenli dinamik deney verileri test sürecinde kullanılmıştır.

Verileri elde etmek için kullanılan deney düzeneği, gerilme kontrollü, drenajsız üç eksenli dinamik basınç deneyi olup, silindirik numuneler üzerinde çevrimsel yükleme uygulanarak boşluk suyu basıncı gelişimi izlenmiştir. Modelde kullanılan tüm giriş değişkenleri mevcut olduğu için doğrudan kullanılabilir formata dönüştürülmüştür. Bu çalışmada standart Podima kumu kullanılmış olup numuneye ait özellikleri Çizelge 4.19'da gösterilmiştir. Ayrıca granülometri eğrisi şekil 4.67'de sunulmuştur.



Şekil 4.67. Podima kumu granülometri eğrisi (Ertekin, 2019'dan).

Çizelge 4.19. Zemin özellikleri.

Zemin Sınıfı	SP
Gs	2,63
ρ_{dmin}	1,56 gr/cm^3
ρ_{dmin}	1,80 gr/cm^3
D_{60}	0,91
D_{30}	0,51
D_{10}	0,16
C_u	5,68
C_c	1,79

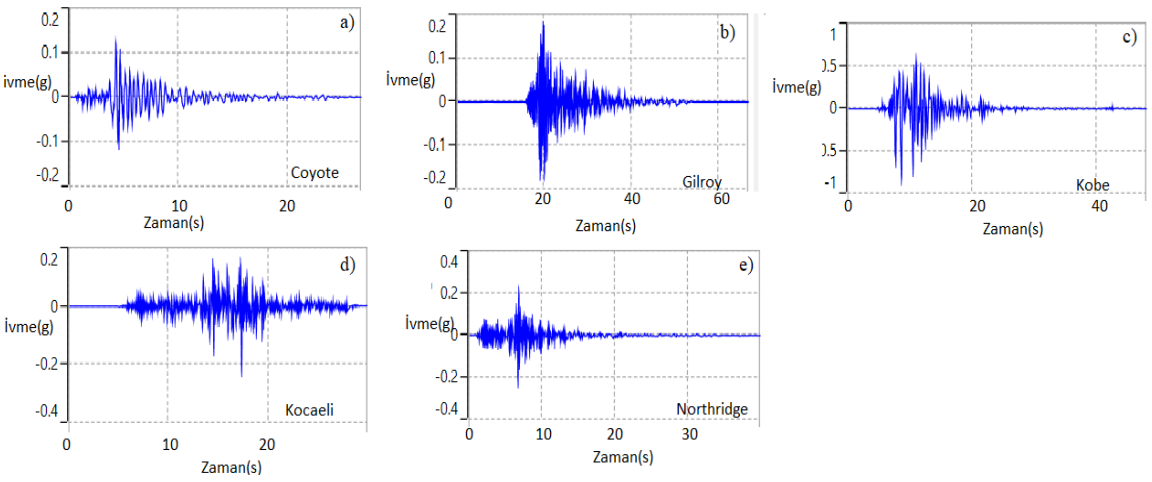
Yapılan deney bu paragrafta özetlenecektir. Dinamik üç eksenli deneyde kullanılmak üzere hazırlanan numune, 70 mm çapında ve 140 mm yüksekliğinde, iki yana ayrılabilir kalıp içerisine yerleştirilen bir membran yardımıyla hazırlanmıştır. Önceden etüvde kurutulmuş olan Podima kumu, numuneye bir huni aracılığıyla yerleştirilmiş; %40 rölatif sıkılık hedeflenerek hafif titreşimler uygulanmak suretiyle numune hazırlanmıştır. Numunenin kalıpsız olarak kendi formunu koruyabilmesi ve deney sırasında gerekli basınçlar uygulanana dek stabil kalabilmesi amacıyla üst başlıktan vakum uygulanmıştır. Deneye başlanmadan önce, gerekli üst başlıklar monte edilerek hücre içerisi su ile doldurulmuştur. Ardından drenaj hatları açılarak numunenin doygunluğa ulaşması sağlanmıştır. Bu süreçte çevre basıncı ve ters basınç kademeli olarak artırılmıştır. Numunenin tamamen doygun hale gelmesinin ardından, 65 kPa çevre basıncı uygulanmış

ve numune konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyon süreci tamamlandıktan sonra, numune çevrimsel yüklemelere tabi tutulmuştur. Deney koşulları ve malzeme özellikleri Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Deney koşulları ve malzeme özellikleri.

Değişken	**Deviator Gerilme**		
	35 kPa	**50 kPa**	**80 kPa**
D_r %	40	40	40
FC %	0	0	0
CSR	0,269	0,385	0,615
σ_1 (kPa)	35	50	80
σ_3 (kPa)	65	65	65
f (Hz)	0,1	0,1	0,1

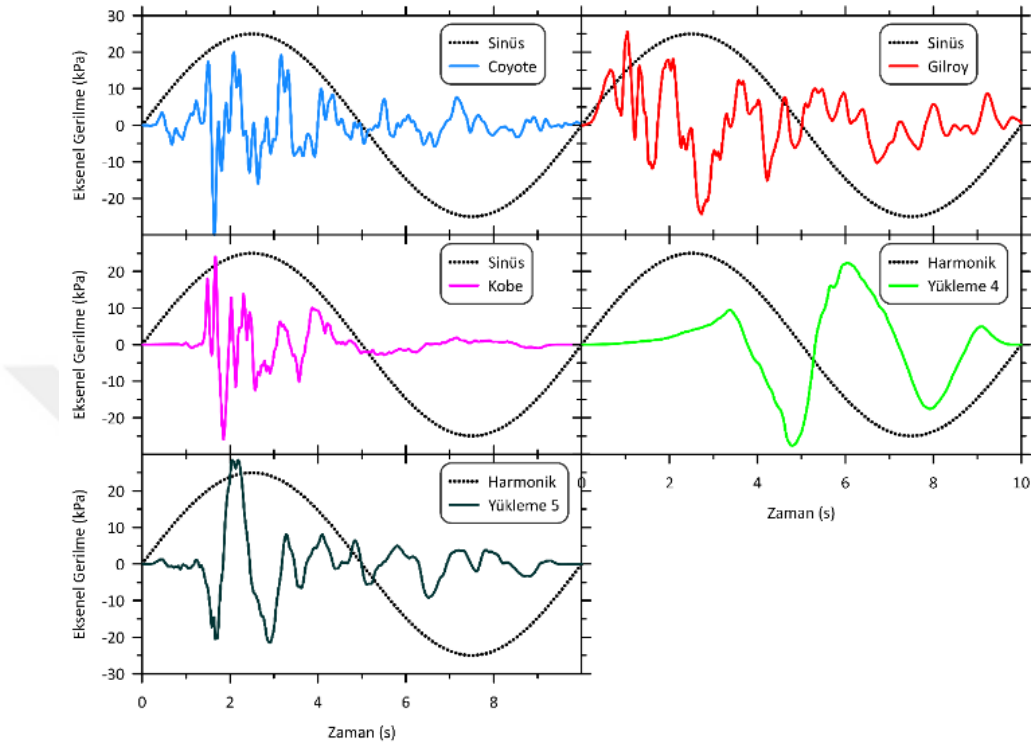
Önceki çalışma kapsamında, kum zeminlerde tekrarlı yükleme altında boşluk suyu basıncının gelişimini araştırmak amacıyla üç farklı yükleme düzeyi ve altı farklı düzensiz sismik yer hareketi kullanılarak toplamda on sekiz adet dinamik deney gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda yükleme girdisi olarak kullanılan yer hareketleri; Coyote, Gilroy, Kobe, Kocaeli ve Northridge depremlerine ait ivme kayıtları ile idealize edilmiş sinüs dalga formu şeklinde belirlenmiştir (Şekil 4.68).



Şekil 4.68. Deprem ivme-zaman grafikleri: a) Coyote depremi, b) Gilroy depremi, c) Kobe depremi, d) Kocaeli depremi, e) Northridge depremi (Ertekin'den, 2019).

Deney düzeneğinin hassasiyet sınırları göz önünde bulundurulduğunda, bu frekans değerine sahip bir yüklemenin doğrudan uygulanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle,

ivme–zaman verileri kullanılarak yüklemenin deformasyon–zaman davranışı elde edilmiştir. Örnek olarak, 50 kPa'lık yükleme düzeyinde kullanılan sismik kayıtlar ile idealize sinüs dalgası arasındaki karşılaştırma Şekil 4.69'da sunulmuştur.



Şekil 4.69. Yükleme şekilleri (Ertekin'den, 2019).

Çalışmada, beşi düzensiz deprem kaydı ve biri düzenli sinüs formu olmak üzere toplam altı farklı yükleme tipi, üç ayrı çift genlik seviyesinde (35 kPa, 50 kPa ve 80 kPa) uygulanmış ve bu kapsamda toplam 18 adet dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda çok sayıda veri elde edilmiş olmakla birlikte, çalışmanın odak noktası boşluk suyu basıncının zamana bağlı gelişimi olduğundan analizler yalnızca bu konu çerçevesinde sınırlandırılmıştır.

Deney verileri çok fazla satır aralığından oluştuğundan dolayı gürültü azaltma işlemleri uygulanmıştır. Her test numunesi için, R_u = 0,0–1,0 aralığında gözlenen çevrim sayıları (N) ile, sembolik regresyon modeli tarafından tahmin edilen çevrim sayıları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare hata (MSE), Belirleme katsayısı (R^2), görsel karşılaştırmalar (gerçek vs. tahmin R_u–N eğrisi) kullanılmıştır.

Model, eğitim verisi dışında bu test verileri üzerinde de yüksek doğrulukla çalışmıştır. R_u gelişimini çevrim sayısına bağlı olarak başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Özellikle R_u=0,6 ve 0,8 gibi kritik eşik seviyelerinde modelin sapma düzeyi oldukça düşüktür. Bu durum, modelin sadece literatür verisine değil farklı kaynaklardan gelen deneysel verilere de genellenebilir olduğunu göstermektedir.

Geliştirilen sembolik modelin yüksek lisans deney verisiyle doğrulanmış olması, modelin hem akademik özgünlük hem de mühendislik uygulamaları için güvenilirlik taşıdığını kanıtlamaktadır. Bu aşama, modelin saha verileri ile test edilmesi yönünde yapılacak sonraki çalışmalara da temel teşkil etmektedir.

Elde edilen sonuçlar Bölüm 5'te detaylı olarak paylaşılacaktır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Geliştirien Sembolik Regresyon Modelinin Sunumu

Bu çalışmanın ilk aşamasında 125 adet üç eksenli dinamik basınç deneyinin 1375 veri noktası üzerinden gerçekleştirilen kapsamlı modelleme süreci sonucunda, çok sayıda sembolik regresyon denemesi arasından en yüksek performansa ve fiziksel anlamlılığa sahip ampirik model belirlenmiştir (Model 1). Daha sonra ikinci aşamada 125 adet dinamik üç eksenli basınç deneyi verilerine uyum sağlayacak şekilde oluşturulan omurga denklemlerin eğri uydurma parametrelerini PySR ile modelleyerek logaritmik hibrit parametre (Model 2) oluşturulmuştur. PySR ile Geliştirilen Model 1, Denklem 4.8'de gösterilmişti. Ayrıca hibrit olarak geliştirilmiş Model 2, Denklem 4.15'te, a ve b parametre hesapları Denklem 4.20 ve Denklem 4.21'de gösterilmişti. Hatırlatma amaçlı iki modelin denklem yapıları Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Sunulan modeller.

SUNULAN MODELLER	NO
$R_u = (-CSR + Dr)\cdot\left(\left(\frac{N}{N_{liq}}\right) - \left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{1,5322292}\right) + 0,25801224\cdot\left[\arcsin\left(\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{0,0890528}\right)\right]$	(1)
$R_u = b\left(0,5 + \frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_{liq}}\right)^{a} - 1\right]\right) + (1-b)\frac{\ln\left(1+5\frac{N}{N_{liq}}\right)}{\ln(6)}$ $a = \exp\left(\frac{(0,74317837 - D_r)\cdot 0,65297407}{f^{2,124752\cdot FC}}\right)$ $b = \exp\left(\frac{3,3979444\cdot 10^{-9}\cdot CSR\cdot\exp(-FC)}{D_r - 0,50170684}\right)$	(2)

Ayrıca Model 2 için gerekli değişkenlerin elde edilememesi durumunda medyan parametreler olan a=0,964, b=0,881 sabit katsayılarının kullanılması tavsiye edilmektedir.

Burada;

- N : Çevrim sayısı,
- N_{liq} : Sıvılaşmaya için gerekli çevrim sayısı,
- CSR : Çevrimsel gerilme oranı,
- F : Frekans,
- FC : İnce Tane Oranı,
- D_r : Rölatif sıkılıktır (%).

Model 1'in fonksiyonel yapısı incelendiğinde, boşluk suyu basıncının çevrimsel yükleme altındaki gelişimini ifade etmek için literatürde sıklıkla başvurulan arcsin çekirdeği temel alınmıştır. Bu trigonometrik çekirdek, R_u–N eğrisinin deneysel gözlemlerle uyumlu, karakteristik S-eğrisi formunu doğru biçimde üretmekte ve sıvılaşmaya yaklaşan davranışı gerçekçi biçimde yansıtmaktadır. Modelde ayrıca N/N_{liq} oranı hem ana bağımsız değişken olarak hem de güç fonksiyonu ve ters sinüs fonksiyonu içinde çoklu şekilde değerlendirilmiştir. Böylece döngüsel yüklemenin etkisinin çevrim sayısına göre değişen dinamiği hassas biçimde modellenmiştir.

Model 1'in literatürdeki Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) gibi klasik denklemlerden önemli farklarından biri, parametrelerinde sabit değerler yerine çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve rölatif sıkılık (D_r) gibi zemin–deney koşullarının bir çarpan olarak doğrudan yer almasıdır. Bilindiği üzere, sıvılaşmaya karşı zemin direnci CSR ile ters, D_r ile doğru orantılıdır. Bu mühendislik yaklaşımı modelin hem fiziksel anlamlılığını hem de farklı zemin tipleri ve deneysel koşullar altında genellenebilirliğini artırmıştır.

Geliştirilen Model 1'in matematiksel sağlamlığı ve uygulama başarısı, yüksek determinasyon katsayılarıyla birlikte temel sınır şartlarını ($N=0$ için $R_u=0$, $N=N_{liq}$ için $R_u=1$) eksiksiz biçimde sağlamasıyla da desteklenmiştir. Geliştirme sürecinde alternatif fonksiyonel formlar denenmiş, sınır koşullarına uymayan veya deneysel verilerle örtüşmeyen modeller PySR/JULIA ortamında otomatik olarak elenmiştir. Sonuçta elde

edilen final model hem analitik hem de sayısal olarak güvenilirlik sağlamıştır. Modelin bu yönü, uygulamada doğru tahmin yapabilmesi ve deney ve malzeme parametrelerini açıklaması açısından literatürdeki birçok yaklaşımdan ayrılmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında sunulan Model 2 (logaritmik hibrit yapı), oluşturulmuş omurga denkleminin eğri uydurma parametrelerinin çok değişkenli sembolik regresyon ile bağımsız zemin ve deney parametrelerine bağlandığı, çok daha esnek ve özgün bir yapı sunmaktadır. Model 2'de a ve b parametreleri doğrudan CSR, D_r, FC ve f gibi değişkenlerin birleşik ve doğrusal olmayan fonksiyonları olarak tanımlanmıştır. Özellikle PySR tabanlı sembolik regresyon, parametrik ilişkinin otomatik olarak türetilmesini sağlayarak klasik regresyonla ulaşılamayacak karmaşık ilişkilerin modelde temsil edilmesine imkân tanımıştır.

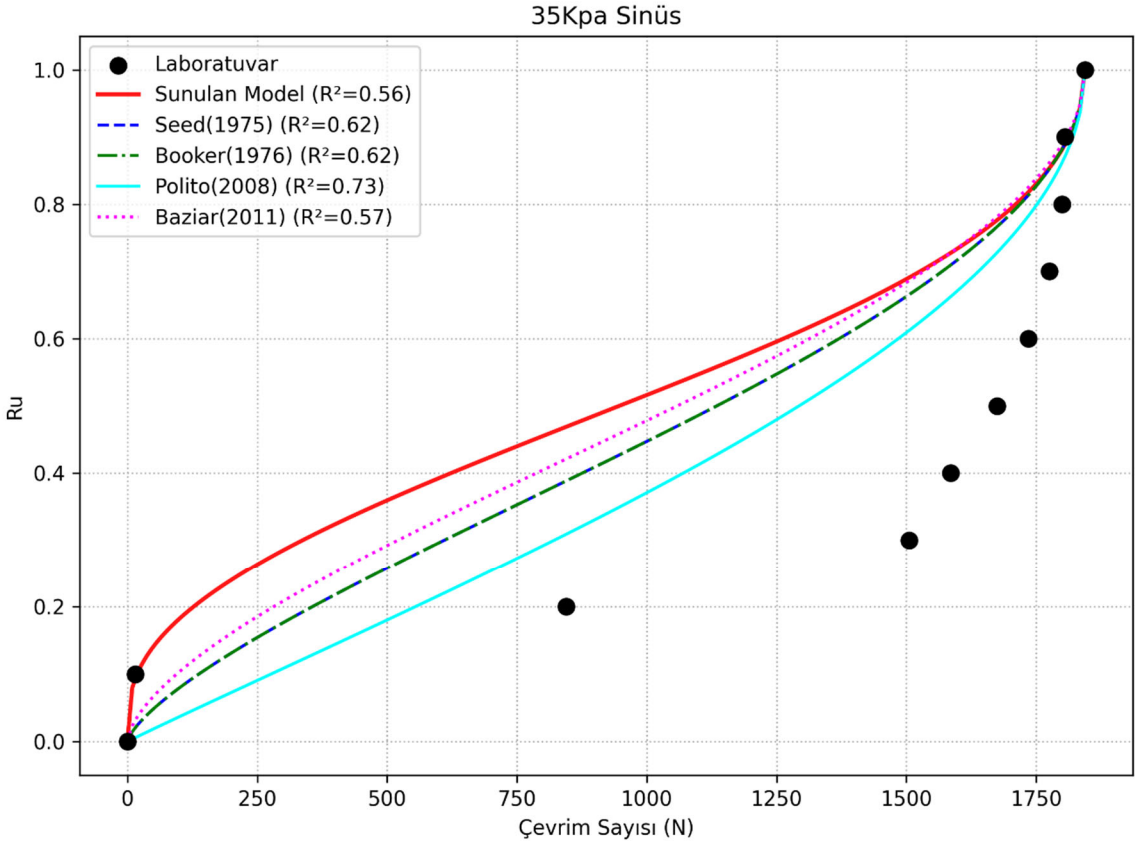
Logaritmik hibrit modelin en önemli üstünlüğü, her bir zemin tipi ve deney koşulu için eğri şeklinin, yani R_u gelişiminin, değişkenlere duyarlı şekilde optimize edilmesini mümkün kılmasıdır. Bu yapı sayesinde hem gevşek hem sıkı zeminlerde hem düşük hem yüksek CSR'lı ortamlarda ve hem az hem çok ince dane içeren örneklerde R_u–N ilişkisi gerçeğe en yakın şekilde yansıtılabilmektedir. Model 2'nin fonksiyonel formu ayrıca, parametrik optimizasyon ve mühendislik açısından teorik hesaplamalar için de kullanışlı bir araç sunmaktadır.

Her iki modelin geliştirme sürecinde, PySR ve sembolik regresyonun sağladığı esnek arayüz sayesinde sınır değerlerin eksiksiz sağlanması, yüksek determinasyon katsayıları, parametrik anlamlılık ve fiziksel tutarlılık gibi birçok kritere eşzamanlı olarak ulaşılmıştır. Model 2, özellikle bağımsız değişkenlerin etkilerini doğrudan kapsayan parametrik yapısı sayesinde, klasik literatür modellerinin ötesinde yüksek uyum ve açıklama gücü sunmaktadır. Model 1 ise, temel mühendislik parametrelerini kompakt bir fonksiyonda birleştirerek, hızlı ve güvenilir tahminler için güçlü bir referans oluşturmaktadır.

Tezde sunulan Model 1 ve Model 2, boşluk suyu basıncı gelişiminin dinamik deney verisiyle yüksek uyumlu, sınır şartlarına tam uygun, fiziksel anlamlı ve parametrik olarak esnek iki özgün ampirik model olarak literatüre katkı sağlamaktadır. Her iki modelin performansı, izleyen bölümlerde farklı deney koşulları ve literatürdeki referans modellerle

detaylı biçimde karşılaştırılarak analiz edilecektir. Diğer bölüm başlıklarında gerilme genliği cinsinden test sonuçları sunulacaktır.

5.2. 35 kPa Deviator Gerilme için Test Sonuçları



Şekil 5.1. 35 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.1'de, 35 kPa çift genlikli sinüs şeklinde uygulanan deviator gerilme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi hem önerilen modeller hem de literatürde yaygın olarak kullanılan formüller üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu deneyde sıvılaşma 1844. çevrimde gerçekleşmiştir. Bu denli yüksek çevrim sayısına genellikle deniz yapıları, iskeleler veya köprü temellerinde, uzun süreli dalga veya trafik yükleri altında rastlanmaktadır.

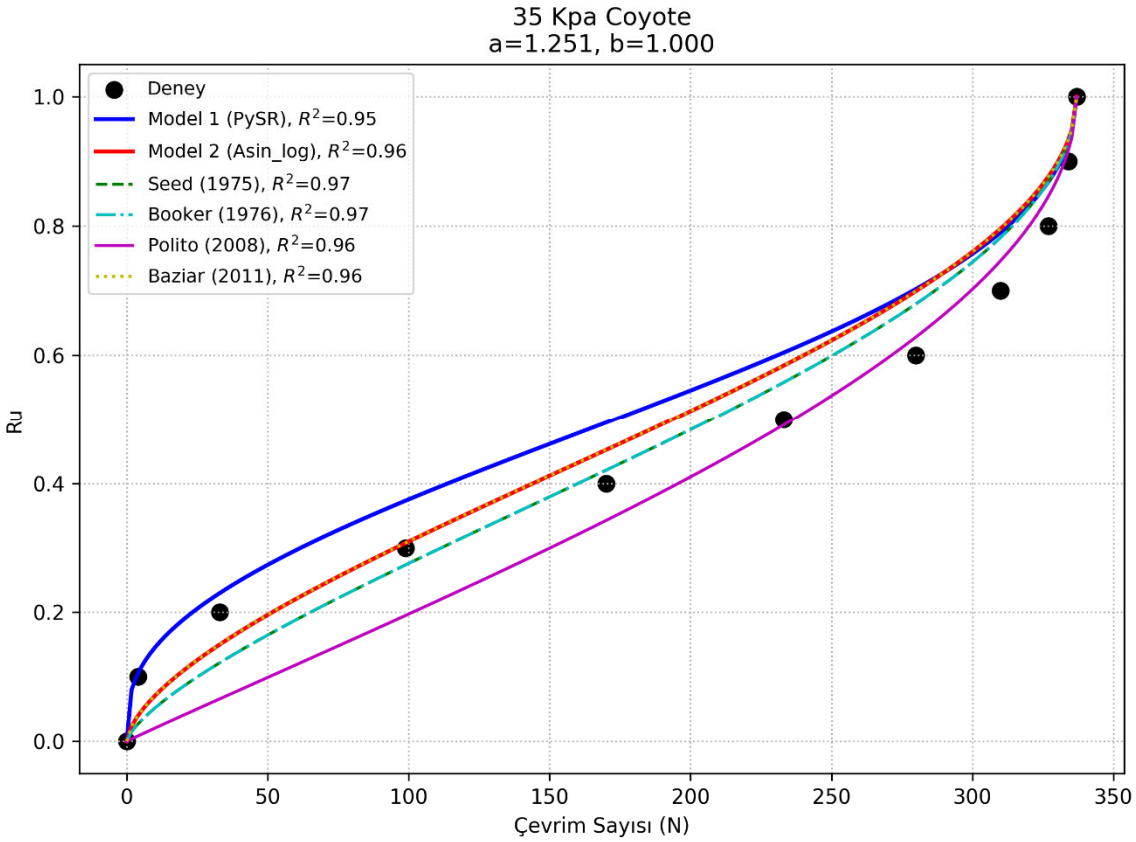
Grafik incelendiğinde hem Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) hem de Model 2 (logaritmik hibrit yapı) başta olmak üzere, tüm modellerin yüksek çevrimli bu özel yükleme formunda deneysel verilere tam uyum sağlayamadığı görülmektedir. Model 1 ve Model 2, özellikle ilk ve orta çevrimlerde R_u'nun düşük seviyelerdeki artışını deneyle makul

düzeyde temsil etse de çevrim sayısı 1000'in üzerine çıktıkça deneysel R_u'nun ani yükselişini ve doygunluğa ulaşmasını öngörmekte zorlanmıştır. Bu durum, model parametrelerinin büyük ölçüde 1–300 aralığındaki çevrim sayıları üzerinden optimize edilmesi ve klasik sıvılaşma testlerinde gözlenen tipik R_u–N_{liq} davranışına göre ayarlanmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim, model eğitiminde kullanılan veri setinde N_{liq} ortalaması yalnızca 28,47'dir ve bu tür yüksek çevrimli yüklemelere ait veri bulunmamaktadır.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de benzer şekilde, ilk çevrimlerden sonra deneysel verinin gerisinde kalmakta, özellikle R_u'nun ani sıçramasını ve sıvılaşma eşiğine yaklaşan davranışını düşük tahmin etmektedir. Polito vd. (2008) modeli, diğer modellere göre daha yüksek bir R^2 değerine sahip olsa da çevrim sayısı arttıkça deneysel yükselmeyi tam olarak yakalayamamaktadır. Baziar vd. (2011) modeli ise genel trendi izlese de deneysel verinin hızlanan kısmına uyumda eksik kalmaktadır. Grafiklerde görülen R^2 değerleri Model 1 için 0,56, Model 2 için 0,57, Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) için 0,62, Polito vd. (2008) için 0,73 ve Baziar vd. (2011) için 0,57'dir.

Bu deney hem önerilen hem de literatürdeki tüm modellerin tipik deprem ölçekli çevrim sayılarının ötesine geçen, çok uzun süreli ve düşük genlikli dinamik yüklemelerde önemli sapmalar gösterebileceğini, mevcut formüllerin veri dışı tahminlerde sınırlı kalabileceğini göstermektedir. Bu tür istisnai koşullar için model parametrelerinin yeniden kalibre edilmesi ya da ilave fiziksel etkenlerin (örneğin kümülatif enerji, gevşeme vb.) denklemlere dahil edilmesi gerekebilir.

Şekil 5.1'deki yükleme tipi ve deney koşulu, modellerin geçerli olduğu parametre aralığının dışında kalmaktadır. Bu da modellenen R_u–N ilişkilerinin yalnızca model eğitimi yapılan ve literatürde karşılaşılan tipik çevrim aralıklarında yüksek uyum sunduğunu, çok uzun çevrimli veya sıra dışı yüklemelerde ise dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 5.2. 35 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.2'de, 35 kPa Coyote depremi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi hem önerilen modeller hem de literatürde yaygın olarak kullanılan modellerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Grafik incelendiğinde, sıvılaşmanın 336. çevrimde gerçekleştiği ve deneysel R_u–N eğrisinin tipik S-formunu koruduğu görülmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı) başta olmak üzere, tüm modeller deneysel veriyle yüksek oranda uyum göstermiştir. Özellikle Model 2, literatür modellerinden Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) ile birlikte, R_u artışını hem erken hem de geç çevrimlerde doğru şekilde modelleyebilmiştir.

R^2 değerleri karşılaştırıldığında, Model 1 için 0.95, Model 2 için 0,96, Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) için 0,97, Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) için 0,96'dır. Bu değerler, tüm modellerin deneysel R_u gelişim eğrisini başarılı şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

Model 1 ve Model 2, özellikle R_u'nun yavaşça arttığı erken çevrimlerde ve doygunluğa ulaşılan son çevrimlerde deneysel noktaları başarıyla temsil etmiştir. Model 2'nin eğri formu, deneysel verilere ve Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Baziar vd. (2011) gibi literatür modellerine çok yakın seyretmiştir. Polito vd. (2008) modeli de bu testte başarılı bir uyum sergilemiştir. Model 1'in ise diğer modellere kıyasla orta çevrimlerde R_u değerini biraz daha yüksek tahmin ettiği ancak genel olarak başarılı bir performans ortaya koyduğu gözlenmiştir.

Literatürdeki modellerin fonksiyonel formu özellikle Coyote tipi yükleme gibi tipik deprem ölçekli ve orta-yüksek çevrimli testlerde, R_u artışının ana karakteristiğini yakalamada güçlüdür. Sunulan Model 2 ise, parametrik yapısının ve bağımsız değişkenlerle olan doğrudan ilişkisinin avantajıyla, tüm çevrim aralığında güvenilir ve mühendislik açısından anlamlı tahminler sağlamaktadır.

Testte tüm modeller, özellikle Model 2 ve literatürden Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011), deneysel veriye yüksek uyum göstermiştir. Bu da hem önerilen hem de klasik modellerin orta-uzun çevrimli ve klasik deprem benzeri yüklemelerde geçerli ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini, Model 2'nin ise parametrik esnekliğiyle pratikte öne çıktığını göstermektedir.

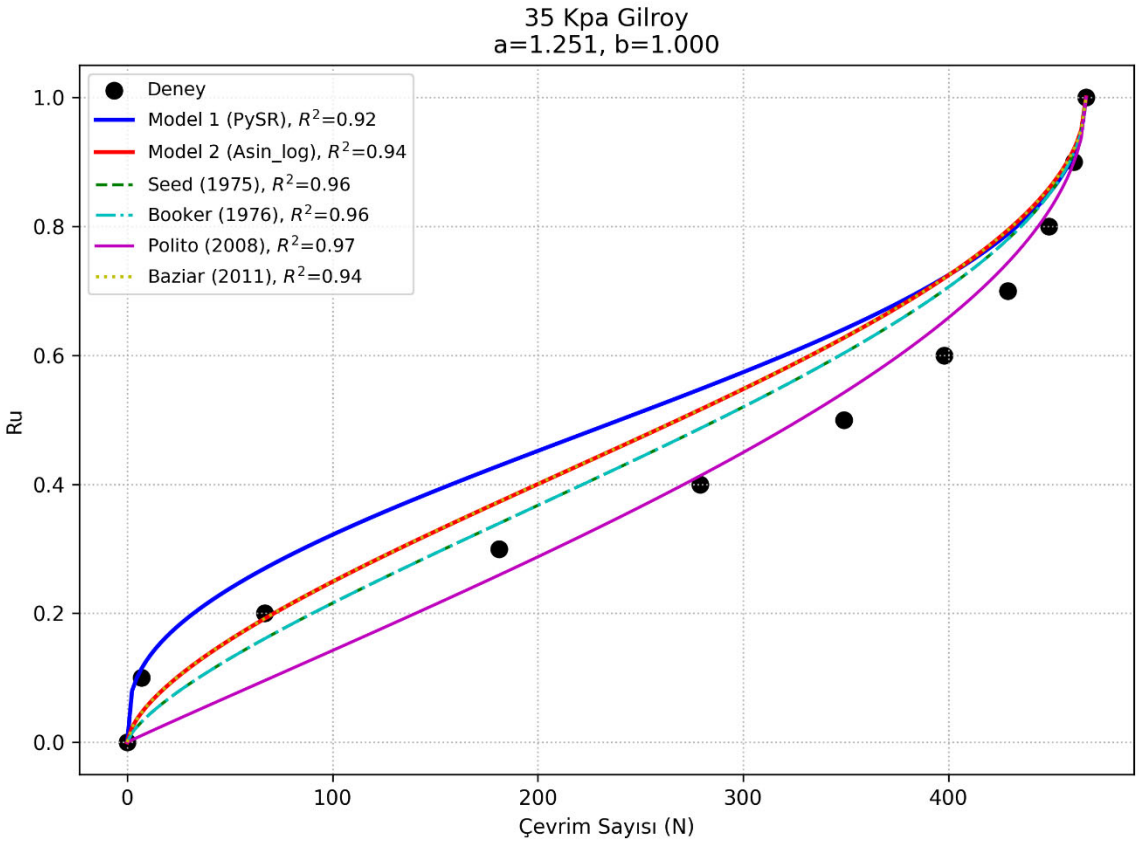
Şekil 5.3'te, 35 kPa Gilroy depremi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu testte, sıvılaşmanın 482. çevrimde meydana geldiği ve deneysel R_u–N eğrisinin karakteristik S-formunu koruduğu görülmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriyle genel olarak başarılı bir uyum yakalamıştır. Özellikle Model 2, hem erken hem de geç çevrimlerde deneysel noktaları en yakın şekilde takip etmiş ve R_u'nun ivmelenen artışını doğru biçimde yansıtmıştır (R^2=0,94).

Literatür modelleri incelendiğinde; Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modellerinin R^2 değeri 0,96 olup deneysel veriyle yüksek uyum göstermişlerdir. Polito vd. (2008) modeli ise, bu testte en yüksek uyumu (R^2=0,97) sunmuş hem orta hem geç çevrimlerde R_u artışını isabetli şekilde tahmin etmiştir. Baziar vd. (2011) modeli de (R^2=0.94), Model 2 ile benzer doğrulukta sonuçlar vermiştir.

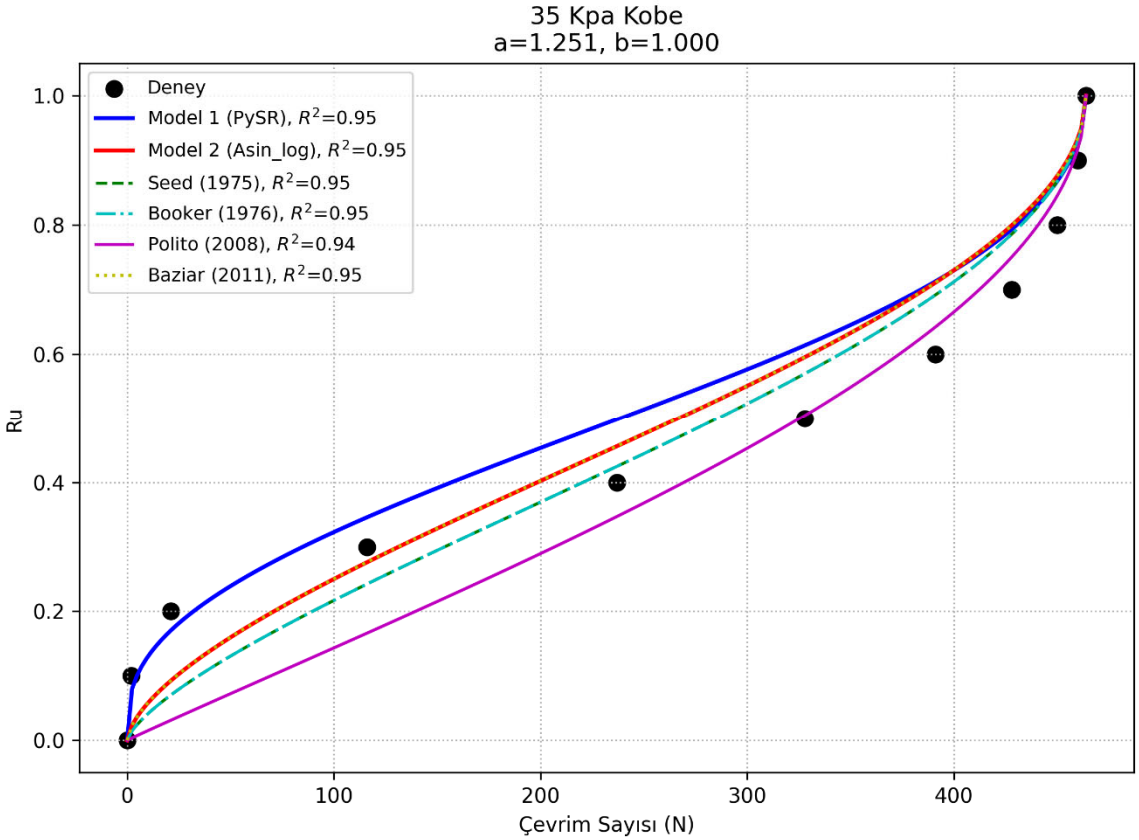
Model 1'in, orta çevrimlerde R_u değerini bir miktar yüksek tahmin ettiği, buna karşın genel trendi başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir (R^2=0,92). Model 2 ve Baziar vd. (2011) modeli özellikle çevrim sayısının arttığı ve R_u'nun hızlandığı bölgelerde deneysel veriye en yakın eğriler olarak öne çıkmaktadır. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri ise klasik sinüs tabanlı çekirdek yapılarıyla bu yükleme tipinde de yüksek bir uyum göstermiştir.

Testte Model 2 (logaritmik hibrit yapı), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) modelleri ile birlikte deneysel R_u–N gelişimini en iyi temsil eden modeller olmuştur. Seed (1975) ve Booker (1976) ise literatürdeki klasik formlarıyla, Gilroy tipi yükleme altında da genel trendi yakalamakta başarılı olmuşlardır. Bu modellerin sadece temiz kumlar için oluşturulması bu başarının sebeplerinden birisidir. Tüm modellerde R^2 değerlerinin 0,92 ile 0,97 aralığında olması, R_u–N ilişkilerinin bu yükleme tipi ve çevrim aralığında güvenilir şekilde modellenebildiğini göstermektedir.



Şekil 5.3. 35 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.4'te, 35 kPa Kobe tipi çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modellerle birlikte sunulmuştur.



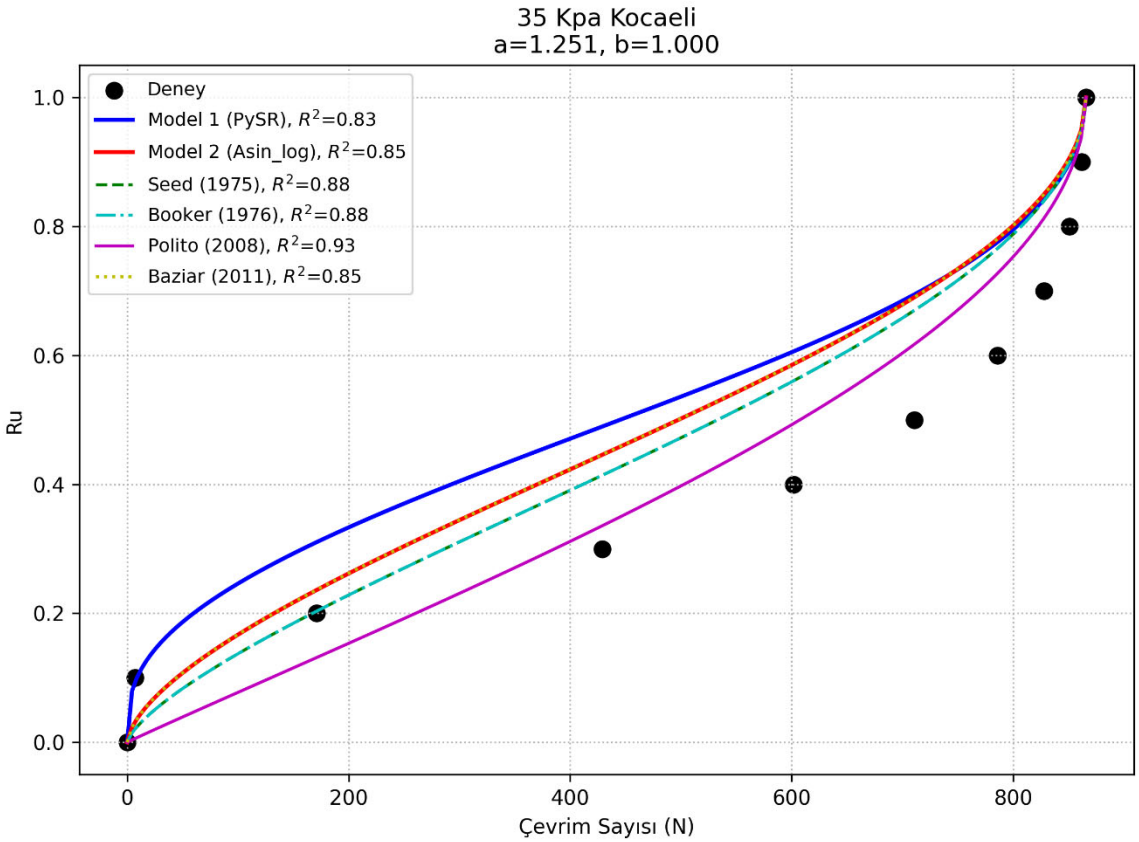
Şekil 5.4. 35 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları.

Bu testte, sıvılaşma yaklaşık 480. çevrimde meydana gelmiş ve deneysel R_u–N eğrisinin tipik S-eğrisi formu korunmuştur. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriye tüm çevrim aralığında yüksek düzeyde uyum göstermiştir. Her iki modelin de R^2 değeri 0,95 olup, özellikle erken ve orta çevrimlerde R_u artışını gerçekçi bir şekilde tahmin ettikleri görülmektedir.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de bu yükleme koşulunda R^2=0,95 ile deneysel veriye oldukça iyi uyum sağlamış hem eğrinin genel trendini hem de R_u'nun hızlandığı bölgeleri başarıyla modellemiştir. Polito (2008) modeli, R^2=0,94 ile yine başarılı sonuçlar vermiş, ancak R_u'nun orta çevrimlerdeki artışını diğer modellere göre bir miktar düşük tahmin etmiştir. Baziar vd. (2011) modeli de (R^2=0,95), Model 1 ve Model 2 ile neredeyse üst üste seyrederek deneysel veriyle en yakın uyumu yakalamıştır.

Bu grafik, tüm modellerin Kobe tipi yüklemede deneysel R_u–N ilişkisini güvenilir şekilde modelleyebildiğini ve hem önerilen hem de klasik modellerin birbirine çok yakın performans sergilediğini göstermektedir. Model 2, fonksiyonel esnekliğiyle hem erken hem de geç çevrimlerde veriyle iyi bir uyum yakalarken, Model 1 ve literatürdeki modeller de mühendislik uygulamaları için yeterli doğruluk sağlamıştır.

Kobe tipi çevrimsel yüklemede Model 1, Model 2, Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) modellerinin tamamı deneysel veriye yüksek doğrulukta uyum sağlamış, R_u–N gelişimini güvenilir biçimde temsil etmiştir. Bu sonuç, klasik ve yeni ampirik modellerin bu tipik dinamik yükleme koşullarında benzer başarı düzeyinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5. 35 kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.5'te, 35 kPa Kocaeli tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modellerle birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşma yaklaşık 900. çevrimde gerçekleşmiş ve deneysel R_u–N eğrisi yine karakteristik S-formunu sergilemiştir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), erken çevrimlerde R_u artışını genel olarak temsil etse de çevrim sayısı arttıkça deneysel R_u'nun hızlanan artışını tam olarak yakalayamamışlardır. Özellikle Model 1'in R_u değerlerini daha yüksek tahmin ettiği, Model 2'nin ise deneysel eğriye biraz daha yakın seyrettiği görülmektedir (Model 1 için R^2=0,83 Model 2 için R^2=0,85).

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de bu yükleme koşulunda, R^2=0,88 ile deneysel R_u–N gelişimine genel olarak iyi uyum sağlamışlardır. Bununla birlikte, bu modeller de orta ve geç çevrimlerde R_u'nun deneysel artış hızını tam olarak karşılayamamış, verinin bir miktar altında kalmışlardır.

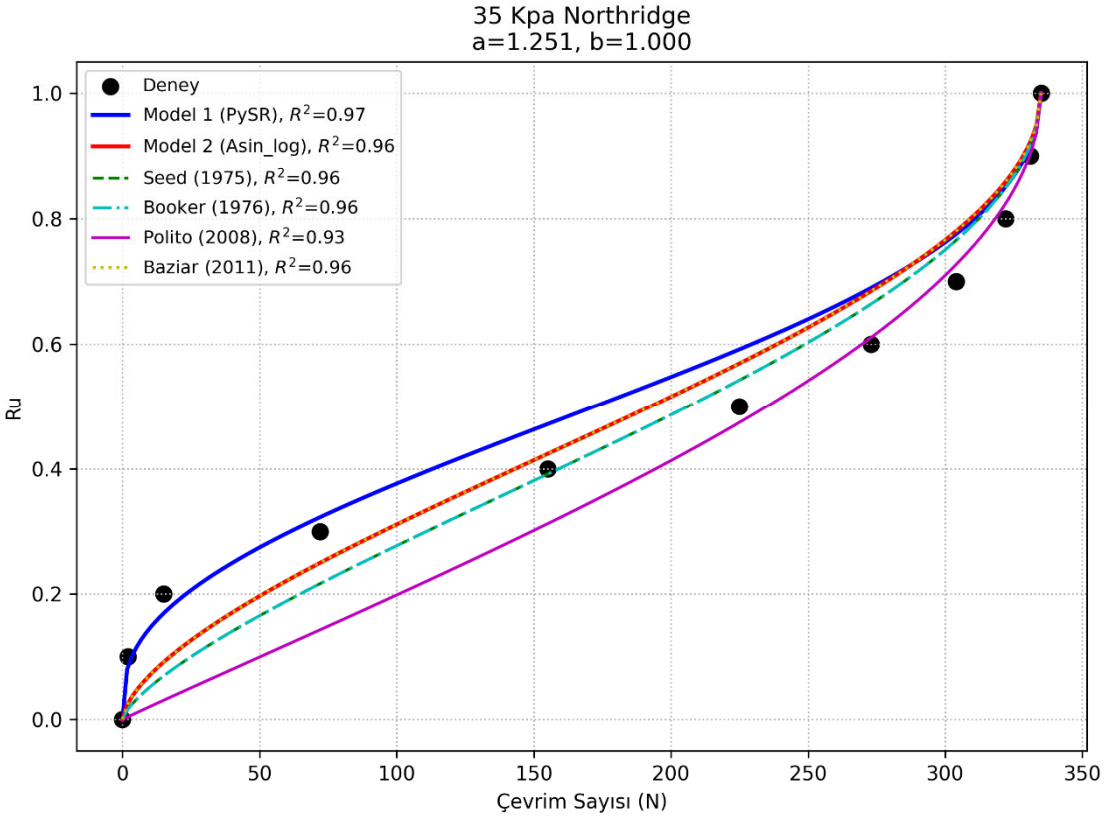
Polito vd. (2008) modeli, R^2=0,93 ile en yüksek uyumu sunmuş ve özellikle geç çevrimlerde R_u'nun deneysel eğrisini en iyi şekilde yakalamıştır. Polito modelinin α katsayısı ile zemin ve yükleme koşullarını doğrudan modele entegre etmesi, bu başarının temel nedenidir. Baziar vd. (2011) modeli ise (R^2=0,85), Model 2 ile benzer doğrulukta sonuçlar üretmiştir.

Genel olarak, bu testte Model 2 (logaritmik hibrit yapı), Baziar vd. (2011) ve Seed vd. (1975), Booker vd. (1976) gibi klasik modellerle benzer başarı düzeyine ulaşırken, en yüksek uyumu Polito vd. (2008) modeli sağlamıştır. Bu durum, Polito modelinin parametrik duyarlılığı sayesinde, uzun çevrimli ve geç doygunluğa ulaşan testlerde daha yüksek performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Model 1 ve Model 2 ise, veri setlerinin çoğunluğunu temsil eden kısa ve orta çevrimli deneylere optimize edildiğinden, bu tip yüksek çevrimli testlerde bazı sapmalar gösterebilmektedir.

Şekil 5.6'da 35 kPa Northridge düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modellerle birlikte sunulmuştur.

Testte sıvılaşmanın yaklaşık 350. çevrimde gerçekleştiği ve deneysel R_u–N eğrisinin S-eğrisi şeklini koruduğu gözlenmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) bu testte en yüksek uyumu sağlamış (R^2=0,97), hem erken hem de geç çevrimlerde deneysel noktaların üzerine en yakın seyretmiştir. Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ise benzer şekilde

yüksek doğruluk sunmuş (R^2=0,96), eğri boyunca deneysel verilere çok yakın tahminler üretmiştir.



Şekil 5.6. 35 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de her ikisi için R^2=0,96 olmak üzere, deneysel R_u–N gelişimini genel olarak başarılı biçimde modellemiştir. Bu klasik modellerin fonksiyonel çekirdeği, bu tipik deprem ölçekli yükleme koşullarında deneysel eğriye yüksek düzeyde uyum sağlamıştır.

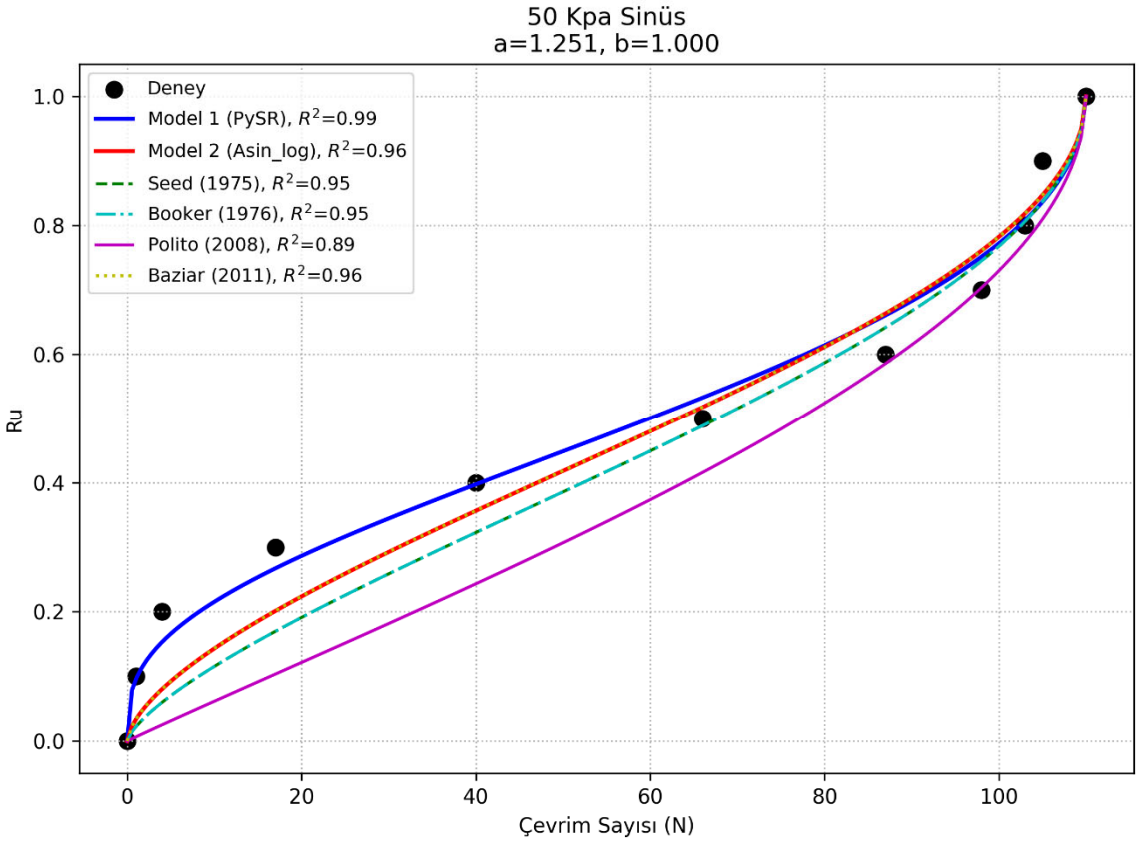
Polito vd. (2008) modeli, bu yükleme koşulunda R^2=0,93 ile görece daha düşük doğruluk sağlamış, özellikle R_u'nun hızlandığı geç çevrimlerde deneysel verinin hafif altında kalmıştır. Baziar vd. (2011) modeli ise (R^2=0,96), Model 2 ve klasik modeller ile neredeyse üst üste ilerlemiş, eğri boyunca deneysel trende çok yakın tahminler üretmiştir.

Northridge tipi yüklemede, tüm modeller deneysel R_u–N ilişkisini güvenilir şekilde temsil etmiştir. Model 1'in çok hafif bir üstünlüğü göze çarpmakla birlikte, Model 2, Seed vd. (1975), Booker vd. (1976) ve Baziar vd. (2011) modelleri de benzer derecede başarılı

sonuçlar vermiştir. Bu yükleme tipinde hem önerilen hem de klasik modellerin kullanımı mühendislik uygulamaları için güvenli ve geçerli olarak değerlendirilmiştir.

Bu deneyde Model 1 (sembolik regresyon tabanlı) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı) klasik literatür modelleriyle birlikte deneysel veriyle yüksek uyum sağlamış; R_u–N gelişimini baştan sona güvenilir biçimde modelleyebilmiştir.

5.3. 50 kPa Deviator Gerilme İçin Test Sonuçları



Şekil 5.7. 50 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.7'de, 50 kPa Sinüs tipi çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modellerle birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşmanın yaklaşık 115. çevrimde meydana geldiği ve deneysel R_u–N eğrisinin karakteristik S-formunu koruduğu gözlenmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR), deneysel veriye baştan sona en yüksek uyumu sağlamıştır (R^2 = 0,99). Model

1'in eğrisi hem erken çevrimlerde hem de R_u'nun ivmelenerek hızla doygunluğa ulaştığı geç çevrimlerde deneysel noktaları neredeyse tam olarak takip etmiştir.

Model 2 (logaritmik hibrit yapı), genel trendi ve R_u artışını başarılı biçimde modellemiş, R^2=0,96 ile Model 1'in hemen ardından gelmiştir. Model 2'nin performansı, özellikle orta ve geç çevrimlerdeki veri noktalarına olan yakınlığıyla dikkat çekmektedir.

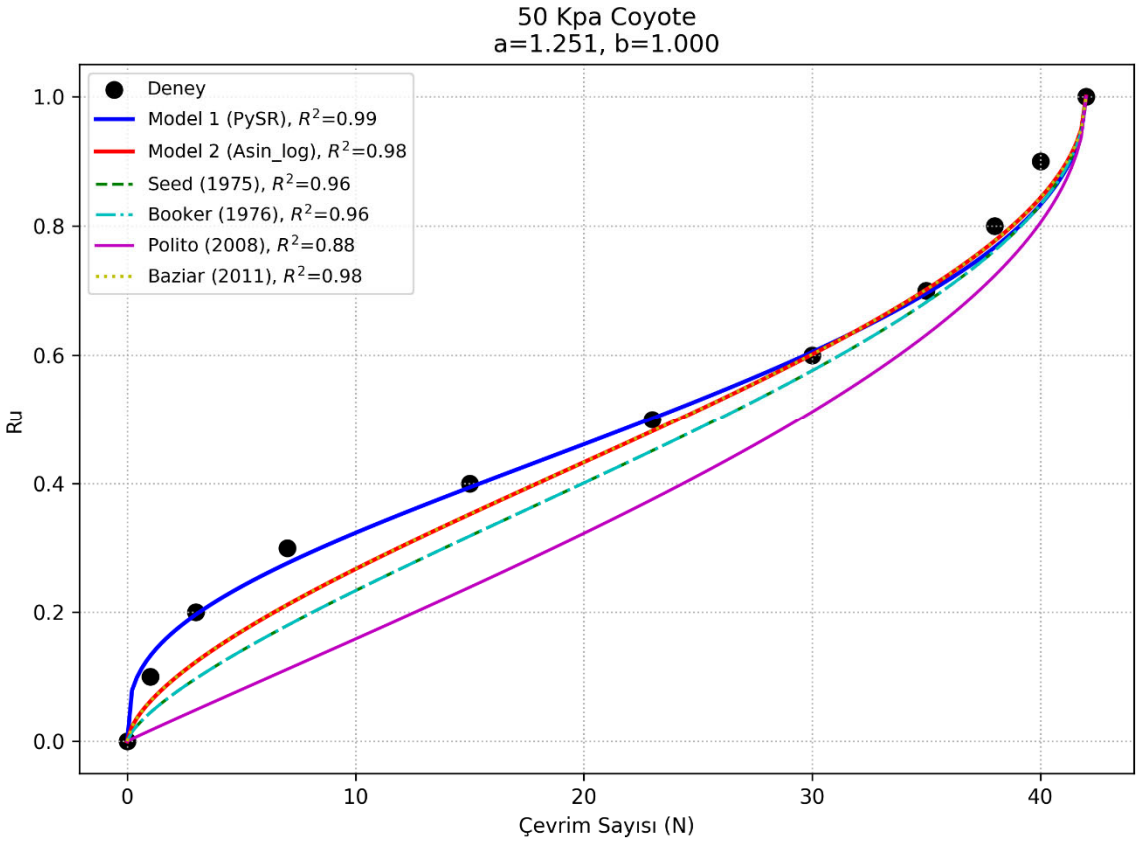
Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, her ikisi de R^2=0,95 ile, deneysel R_u–N gelişimini güvenilir şekilde temsil etmiştir. Bu modellerin klasik fonksiyonel yapısı, R_u'nun çevrimlere bağlı olarak artışını doğru şekilde yansıtmakta ve genel trendi başarılı biçimde izlemektedir.

Polito vd. (2008) modeli, bu yükleme koşulunda R^2=0,89 ile daha düşük uyum göstermiş, özellikle R_u'nun hızlı artış gösterdiği çevrimlerde deneysel verinin gerisinde kalmıştır. Baziar vd. (2011) modeli ise (R^2=0,96), Model 2 ile benzer doğrulukta sonuçlar vererek eğri boyunca deneysel veriye yakın tahminler üretmiştir.

50 kPa Sinüs tipi yükleme altında, Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) en yüksek uyumu gösterirken Model 2 (logaritmik hibrit yapı), Baziar vd. (2011), Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de deneysel veriyle çok yakın ve güvenilir sonuçlar üretmiştir. Polito vd. (2008) modeli ise, diğer modellere göre bu yükleme koşulunda daha zayıf bir performans sergilemiştir. Bu tablo hem önerilen yeni modellerin hem de klasik literatür modellerinin bu çevrim aralığında pratikte geçerli ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.8'de, 50 kPa Coyote tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modellerle birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşma yaklaşık 42. çevrimde gerçekleşmiş ve deneysel R_u–N eğrisinin tipik S-formu korunmuştur. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR), deneysel veriye baştan sona en yüksek uyumu göstermiştir (R^2=0,99). Model 1'in eğrisi hem erken hem de geç çevrimlerde R_u'nun artışını tam olarak yansıtmış ve deneysel noktaları başarıyla takip etmiştir.



Şekil 5.8. 50 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları.

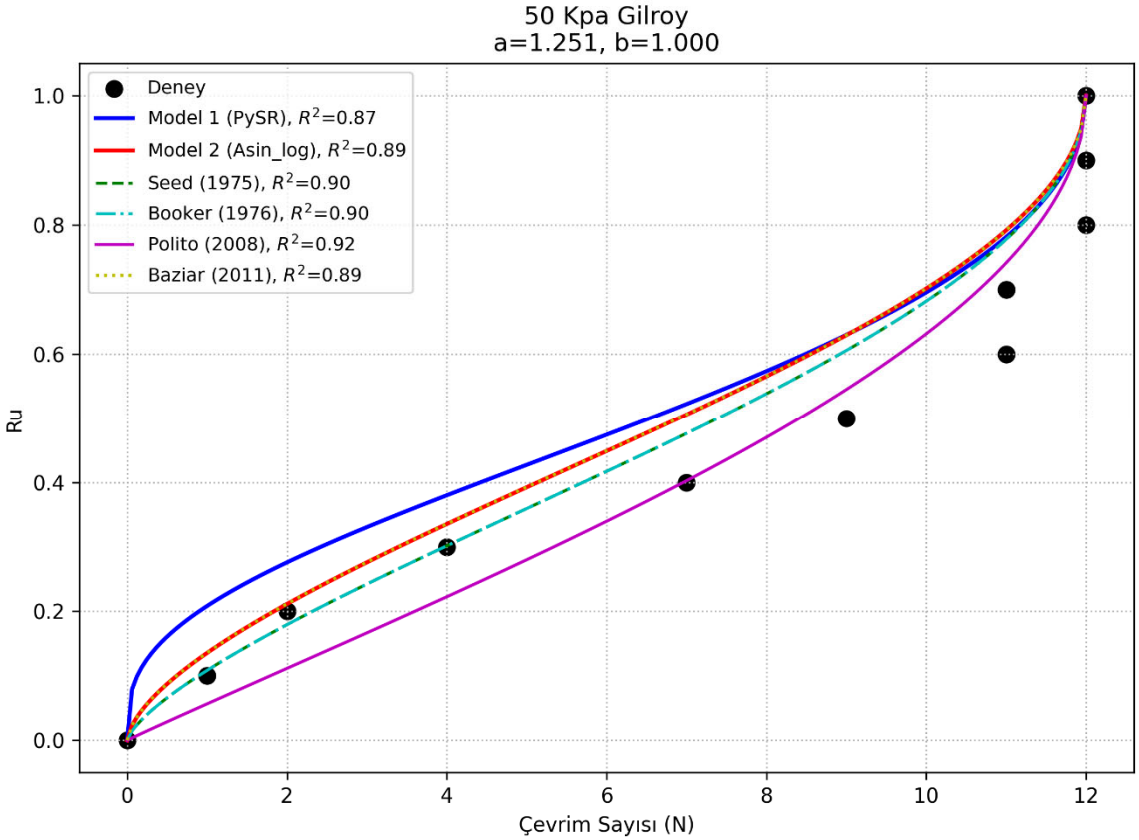
Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ve Baziar vd. (2011) modeli de (R^2=0,98) deneysel veriye çok yakın sonuçlar üretmiştir. Her iki model de özellikle orta ve geç çevrimlerde R_u artışını gerçekçi biçimde tahmin edebilmiştir.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, her ikisi de R^2=0,96 ile deneysel R_u–N gelişimini başarılı şekilde temsil etmiştir. Bu modellerin klasik yapısı, özellikle Coyote tipi kısa çevrimli yüklemelerde deneysel eğriyle uyumlu tahminler üretmiştir.

Polito vd. (2008) modeli, R^2=0,88 ile diğer modellere göre daha düşük uyum sağlamış, özellikle R_u'nun hızlı yükseldiği geç çevrimlerde deneysel verinin bir miktar altında kalmıştır.

50 kPa Coyote tipi yükleme altında Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) en yüksek uyumu göstermiş, Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ve Baziar vd. (2011) modeli ise neredeyse aynı düzeyde yüksek doğruluk sunmuştur. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri de güvenilir ve pratik sonuçlar üretmiştir. Polito vd. (2008) modeli ise bu yükleme

tipi ve kısa çevrim sayısında diğer modellere göre daha düşük bir performans göstermiştir. Bu sonuçlar hem önerilen hem de klasik literatür modellerinin kısa çevrimli yüklemelerde pratikte geçerli ve yüksek uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.9. 50 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları.

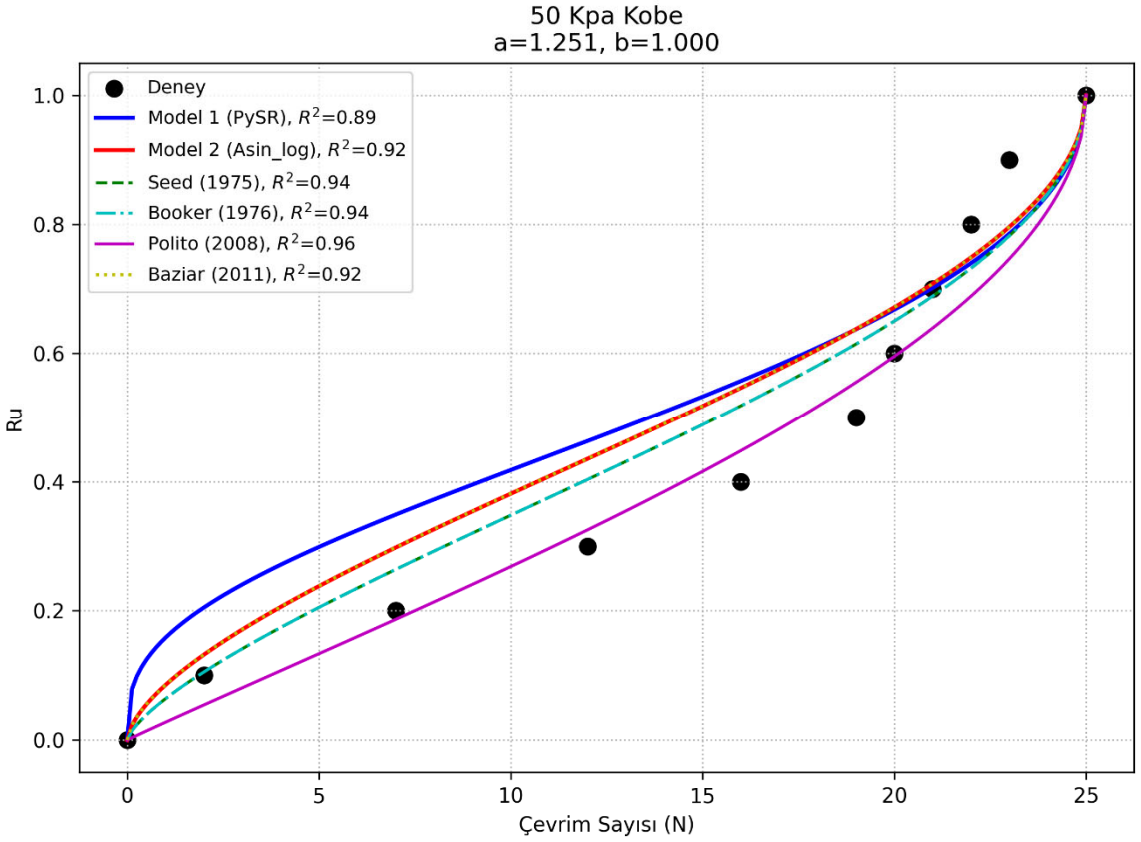
Şekil 5.9'da 50 kPa Gilroy tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşmanın yaklaşık 12. çevrimde meydana geldiği ve R_u–N eğrisinin oldukça kısa çevrimli, hızlı yükselen bir S-formu izlediği gözlenmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriye genel olarak tatmin edici bir uyum sağlamıştır. Model 1'in eğrisi erken çevrimlerde R_u artışını bir miktar fazla tahmin etmiş, Model 2 ise hem orta hem geç çevrimlerde deneysel noktalarla daha yakın bir uyum yakalamıştır (Model 1 için R^2=0,87, Model 2 için R^2=0,89).

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, R^2=0,90 ile, kısa çevrimli bu testte deneysel R_u–N gelişimini güvenilir şekilde modellemiştir. Her iki model de erken ve geç çevrimlerde R_u artışını başarılı şekilde yansıtmıştır. Baziar vd. (2011) modeli ise (R^2 = 0,89), Model 2 ile neredeyse aynı doğrulukta sonuç vermiştir.

Polito vd. (2008) modeli, bu yükleme tipinde en yüksek uyumu göstermiş (R^2=0,92), R_u'nun hızlı yükseldiği bu kısa çevrimli testte deneysel veriyi en iyi yakalayan model olmuştur.

50 kPa Gilroy tipi yükleme altında Polito vd. (2008) modeli en yüksek uyumu göstermiş, Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Model 2 ve Baziar vd. (2011) modelleri ise birbirine çok yakın, yüksek doğruluklu sonuçlar üretmiştir. Model 1 (PySR) ise genel trendi izlemekle birlikte erken çevrimlerde deneysel R_u'yu biraz fazla tahmin etmiştir.



Şekil 5.10. 50 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.10'da 50 kPa Kobe tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşma yaklaşık 25. çevrimde meydana gelmiş ve deneysel R_u–N eğrisinin kısa çevrimli, hızlı yükselen bir form izlediği görülmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) eğrisi, özellikle erken çevrimlerde R_u artışını deneysel veriye göre bir miktar fazla tahmin etmiş, genel olarak tatmin edici bir uyum sağlamıştır (R^2=0,89). Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ise, deneysel veriyle daha yakın bir uyum göstermiş (R^2=0,92), hem orta hem de geç çevrimlerde R_u artışını başarılı şekilde tahmin etmiştir.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, bu yükleme tipinde yüksek uyum göstererek (her ikisi için R^2 = 0,94), R_u–N eğrisinin genel trendini başarıyla temsil etmiştir. Her iki model de kısa çevrimli bu testte deneysel eğriyle oldukça yakın sonuçlar üretmiştir.

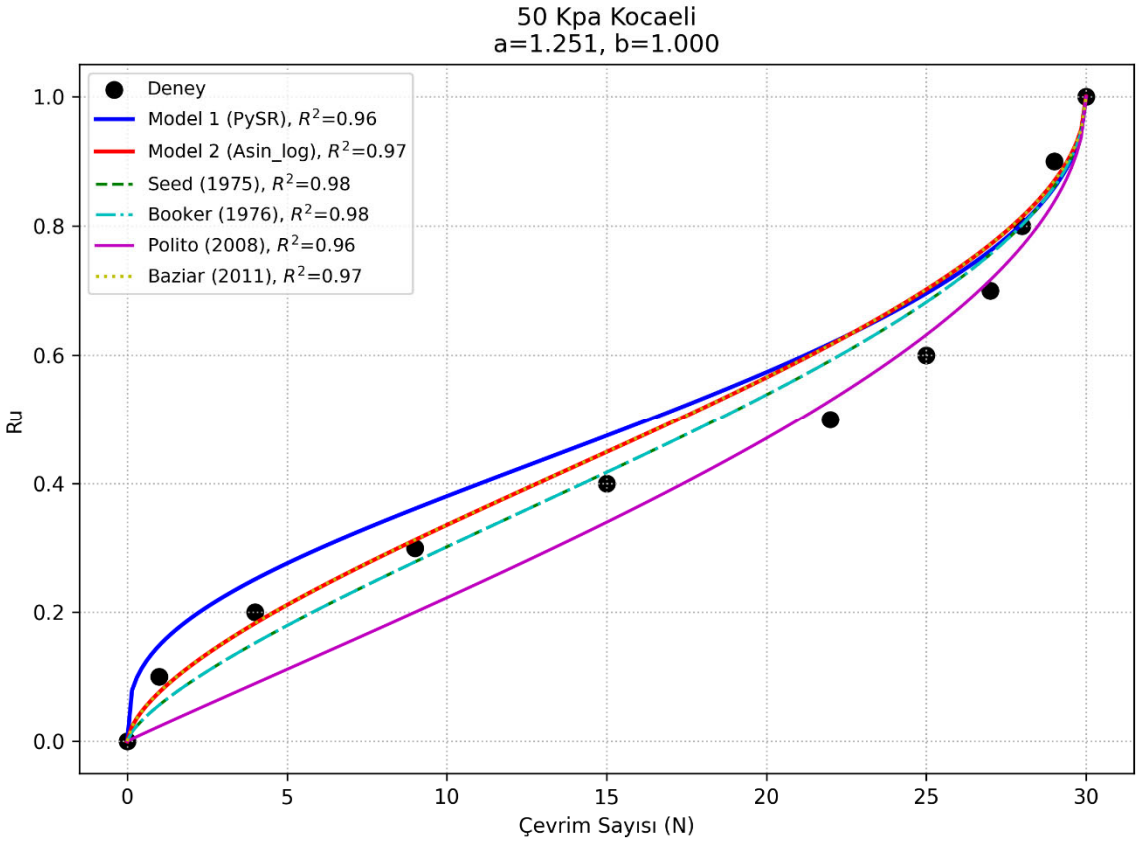
Polito vd. (2008) modeli, (R^2=0,96) ile en yüksek uyumu sağlamış ve özellikle R_u'nun hızlı yükseldiği çevrimlerde deneysel veriye en yakın eğriyi çizmiştir. Baziar vd. (2011) modeli ise (R^2 =0,92), Model 2 ile neredeyse üst üste ilerlemiş ve genel olarak deneysel veriyle iyi bir uyum göstermiştir.

50 kPa Kobe tipi yükleme altında Polito vd. (2008) modeli en yüksek doğruluğa ulaşmış, Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Model 2 ve Baziar vd. (2011) modelleri ise birbirine oldukça yakın, yüksek uyumlu sonuçlar üretmiştir. Model 1 ise, genel eğilimi temsil etmekle birlikte erken çevrimlerde R_u'yu daha yüksek öngörmüş, fakat genel olarak güvenilir bir sonuç vermiştir. Kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın görüldüğü yüklemelerde özellikle Polito vd. (2008) modelinin ve Model 2'nin öne çıktığını göstermektedir.

Şekil 5.11'de, 50 kPa Kocaeli tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşma yaklaşık 30. çevrimde meydana gelmiş ve deneysel R_u–N eğrisinin tipik S-formu izlendiği görülmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriye genel olarak yüksek uyum göstermiştir. Model 2 hem orta hem de geç çevrimlerde deneysel noktalarla daha yakın bir uyum sunmuş

(R^2=0,97), Model 1 ise biraz daha üstte seyrederek (R^2=0,96) yine güvenilir bir sonuç vermiştir.



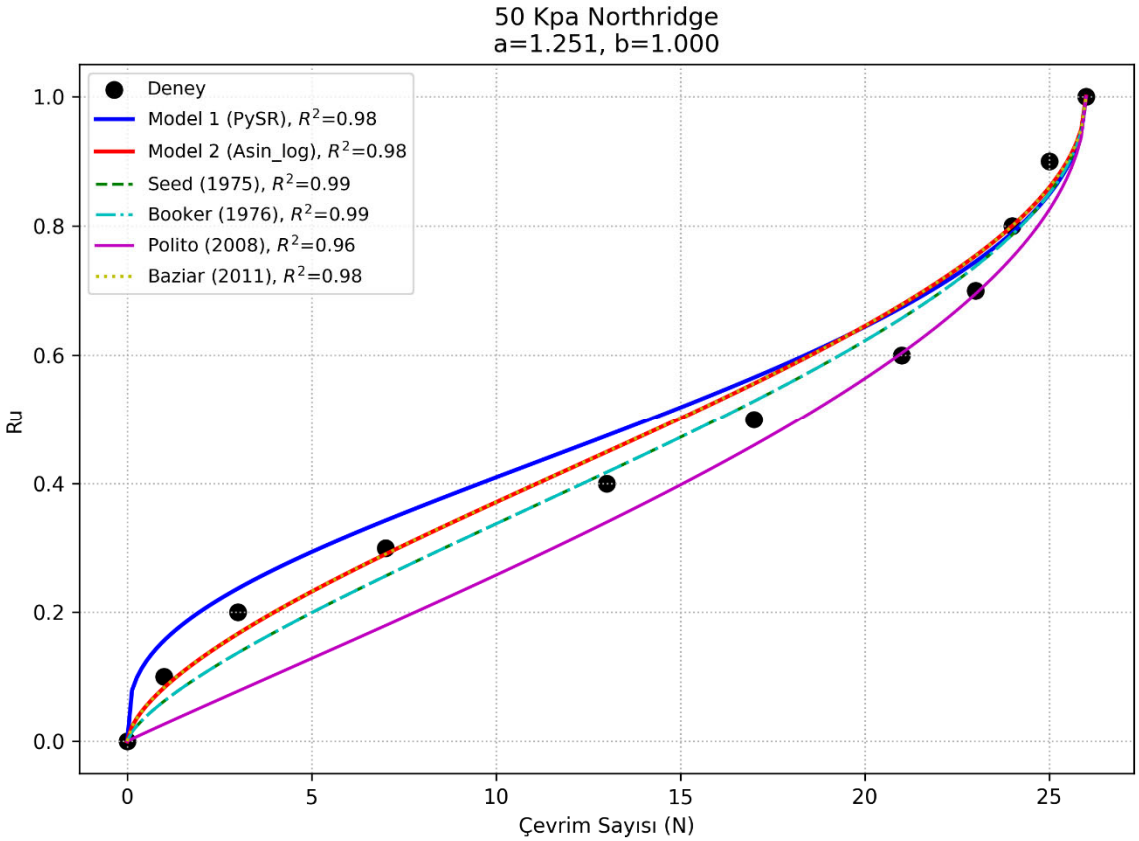
Şekil 5.11. 50kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, bu yükleme tipinde en yüksek uyumu göstererek (her ikisi için R^2=0,98), R_u–N gelişimini baştan sona başarıyla temsil etmiştir. Her iki model de klasik çekirdek yapısıyla deneysel veriyle neredeyse birebir uyumlu eğriler çizmiştir.

Baziar vd. (2011) modeli (R^2=0,97) ve Model 2, eğri boyunca üst üste ilerleyerek özellikle geç çevrimlerde deneysel veriyi en iyi şekilde temsil etmiştir. Polito vd. (2008) modeli ise (R^2=0,96), genel olarak uyumlu olsa da R_u'nun hızlı artış gösterdiği çevrimlerde deneysel verinin hafif altında kalmıştır.

50 kPa Kocaeli tipi yükleme altında Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Model 2 ve Baziar vd. (2011) modelleri, deneysel veriye en yüksek uyumu sağlamış; Model 1 (PySR) ve Polito vd. (2008) modelleri ise güvenilir ve yakın sonuçlar üretmiştir. Tüm modellerde

elde edilen yüksek R^2 değerleri, kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın gözlendiği bu yükleme koşulunda modellerin genel olarak yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.12. 50 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.12'de, 50 kPa Northridge tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu deneyde, sıvılaşma yaklaşık 26. çevrimde meydana gelmiş ve R_u–N eğrisinin kısa çevrimli, hızlı yükselen bir form izlediği görülmektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), eğri boyunca birbirine çok yakın ilerlemiş ve deneysel veriye yüksek derecede uyum sağlamıştır (her ikisi için R^2=0,98). Özellikle Model 2, orta ve geç çevrimlerde deneysel noktaları neredeyse tam olarak takip etmiştir.

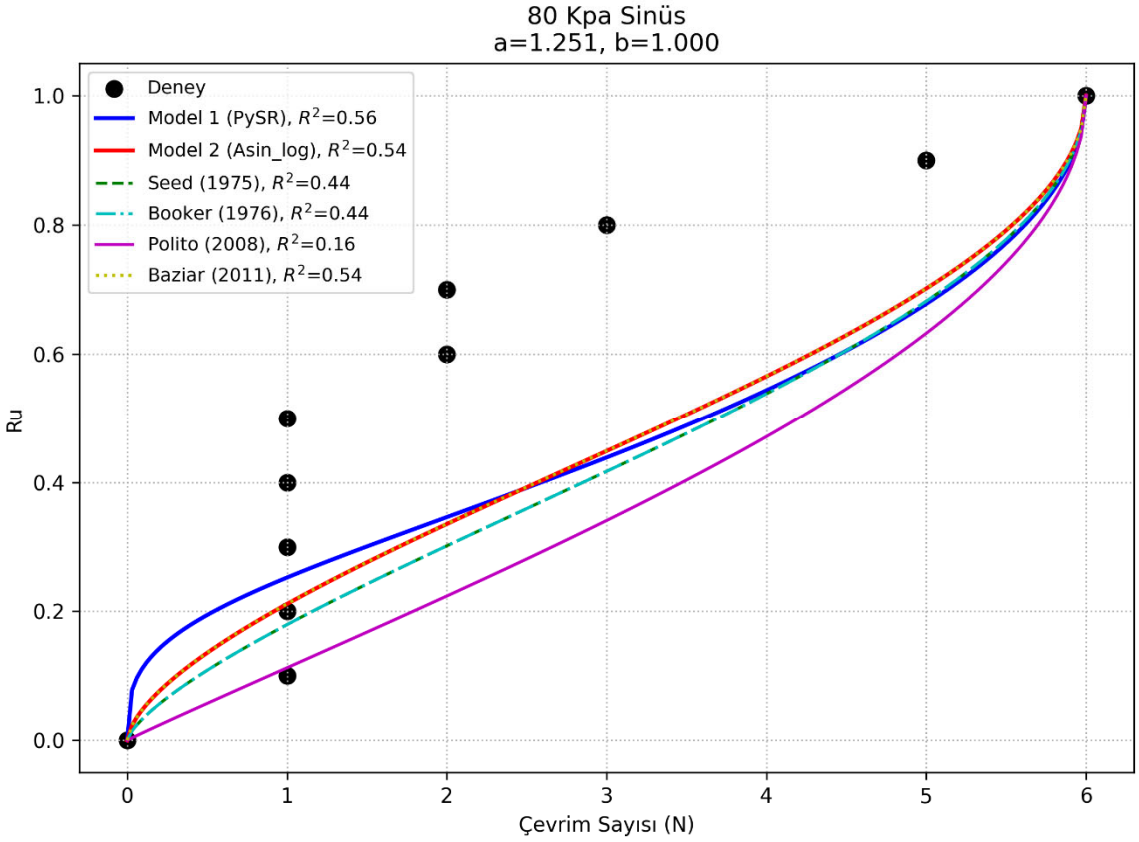
Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri, bu yükleme tipinde en yüksek uyumu göstermiş (her ikisi için R^2=0,99), R_u–N gelişimini baştan sona neredeyse birebir şekilde

temsil etmiştir. Bu modellerin klasik çekirdek yapısı, kısa çevrimli yüklemelerde deneysel veriye çok yakın sonuçlar üretmiştir.

Baziar vd. (2011) modeli (R^2=0,98) de Model 1 ve Model 2 ile neredeyse üst üste ilerlemiş hem orta hem de geç çevrimlerde deneysel veriye yakın sonuçlar vermiştir. Polito vd. (2008) modeli ise (R^2=0,96), genel trendi iyi yakalasa da R_u'nun hızlı artış gösterdiği geç çevrimlerde deneysel verinin biraz altında kalmıştır.

50 kPa Northridge tipi yükleme altında Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Model 2 ve Baziar vd. (2011) modelleri, deneysel veriye en yüksek uyumu sağlamıştır. Model 1 (PySR) de bu modellerle çok yakın sonuçlar üretmiştir. Tüm modellerin yüksek R^2 değerleri, bu yükleme tipinde kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın modellenmesinde önerilen ve klasik modellerin birlikte oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

5.4. 80 kPa Deviator Gerilme için Test Sonuçları



Şekil 5.13. 80 kPa Sinüs yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.13'te, 80 kPa Sinüs tipi yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte gösterilmiştir.

Bu yükleme tipinde, deneysel R_u–N eğrisi çok kısa çevrim aralığında oldukça hızlı ve doğrusal bir artış göstermektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı) bu ani yükselişi yalnızca kısmen yakalayabilmiş, R^2 değerleri sırasıyla 0,56 ve 0,54 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, modellerin klasik S-eğrisi davranışının dışında kalan hızlı sıvılaşma koşullarında sınırlı bir uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modellerinin yanı sıra, Baziar vd. (2011) ve Polito vd. (2008) modelleri de bu ekstrem koşulda benzer şekilde düşük açıklama gücüne sahip olmuştur. Klasik modellerin parametrik formları, çok kısa sürede doygunluğa ulaşan deneylerde veri noktalarını tam olarak temsil edememiştir. Özellikle Polito vd. (2008) modelinin performansı belirgin şekilde düşüktür.

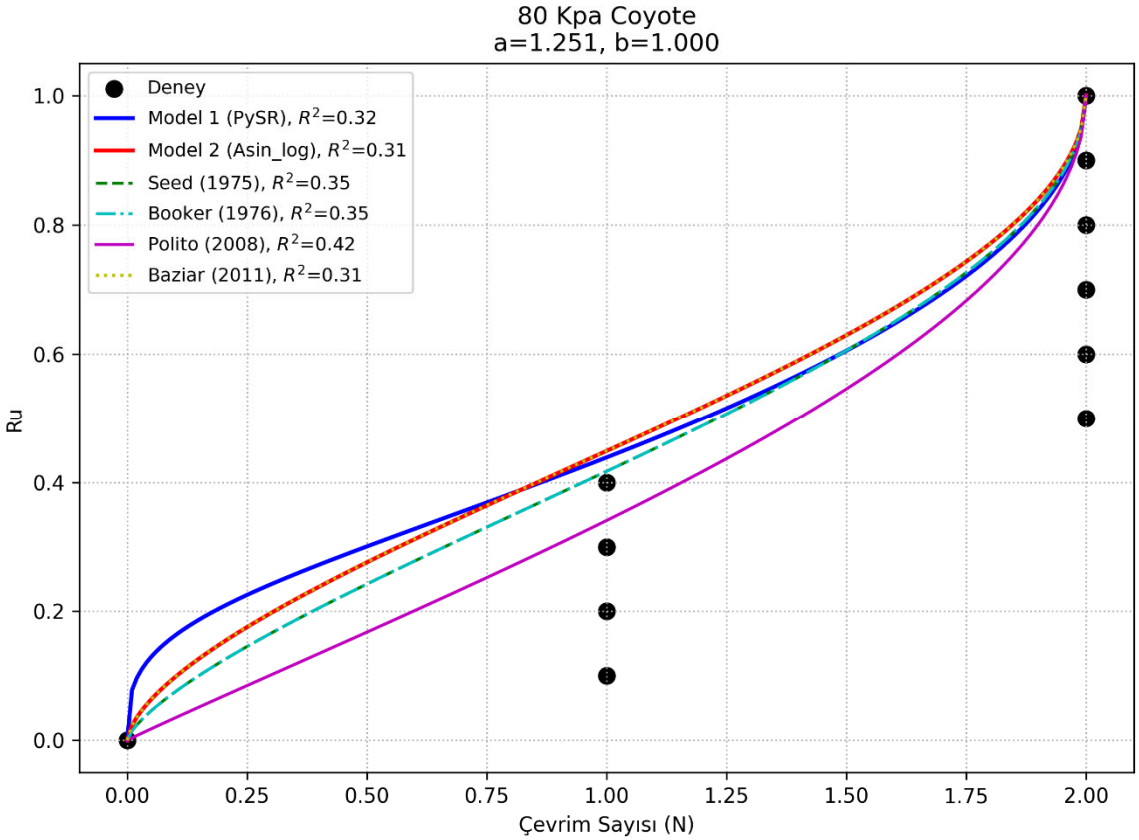
Bu deney türü için hem önerilen modeller hem de literatürde yaygın olarak kullanılan ampirik denklemler, boşluk suyu basıncının çevrimlere bağlı gelişimini hızlı yükselişin görüldüğü bu gibi yükleme türlerinde yeterli doğrulukla modelleyememiştir. Modelleme sonuçlarının zayıf kalmasının temel nedeni, formüllerin büyük oranda daha tipik çevrim aralıklarına ve klasik sıvılaşma davranışına göre geliştirilmiş olmasıdır.

80 kPa Sinüs tipi yükleme altında yapılan deneyde, tüm modellerin açıklama gücü azalmış ve deneysel eğrinin karakteristik hızlı yükselişini yakalamakta yetersiz kalmıştır. Bu bulgu, yüksek yük seviyelerinde ve kısa çevrim aralığında çalışan modellerin iyileştirilmesine ve/veya bu tür testler için farklı ampirik yaklaşımlar geliştirilmesine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.14'te, 80 kPa Coyote tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu yükleme tipinde, deneysel R_u–N eğrisi yalnızca birkaç çevrimde son derece hızlı bir artış göstermekte ve tipik S-eğrisi formundan belirgin şekilde sapmaktadır. Model 1

(sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), veriye uyumda sınırlı başarı sergilemiş; her iki model için de R^2 değerleri sırasıyla 0,32 ve 0,31 ile düşük kalmıştır. Eğriler, veri noktalarının ani ve dik yükselişini yeterince temsil edememiştir.

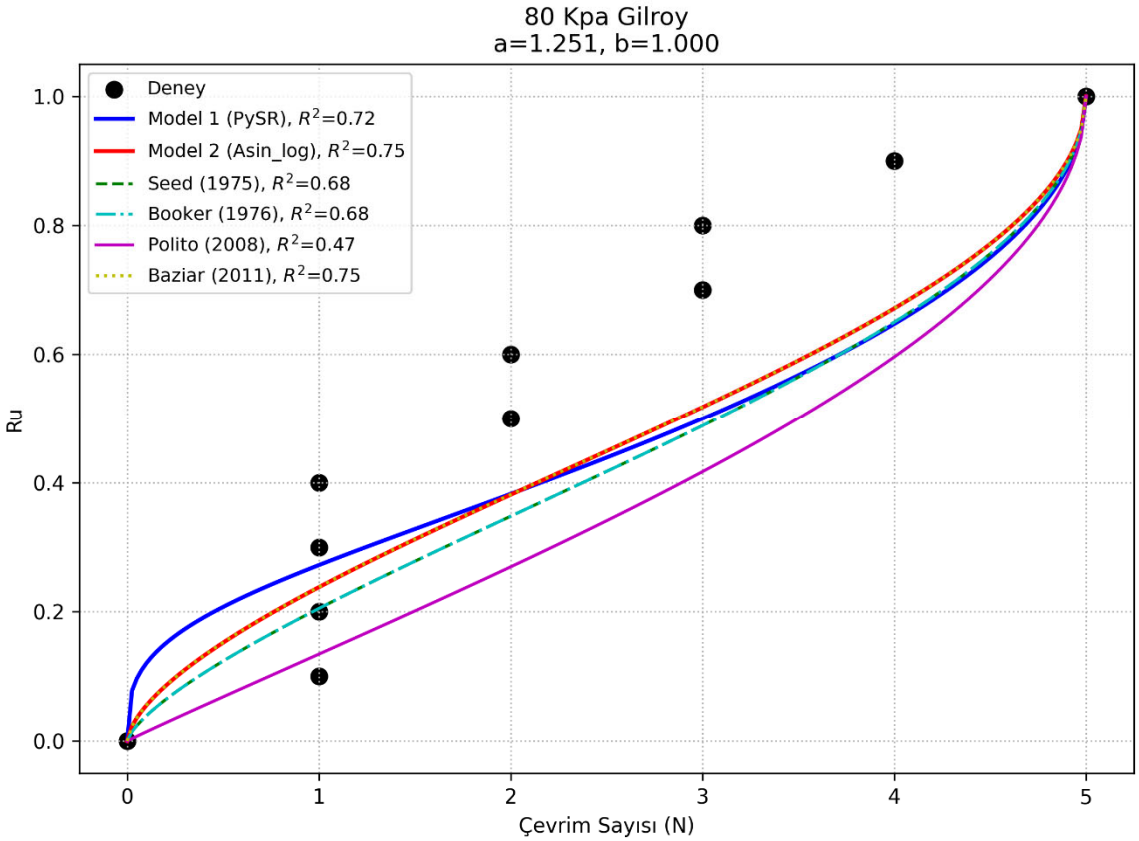


Şekil 5.14. 80 kPa Coyote yüklemesi test sonuçları.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri (her ikisi için R^2=0,35), bu ekstrem koşulda benzer şekilde düşük uyum göstermiş, klasik formüllerin parametrik yapısı, verideki hızlı Ru artışını tam olarak modelleyememiştir. Baziar vd. (2011) modeli (R^2=0,31) de Model 2 ile neredeyse aynı düzeyde, veriyle zayıf bir uyum sunmuştur.

Bu deneyde en yüksek R^2 değerine sahip olan model Polito vd. (2008) olmuştur (R^2=0,42), ancak bu değer dahi deneysel verinin yüksek değişkenliğini ve ani sıçramasını modellemek için yetersizdir. Modellerin hepsi, çevrim sayısının çok az olduğu ve sıvılaşmanın hemen gerçekleştiği bu özel yükleme tipinde, deneysel eğriyle istenen yakınlığı sağlayamamıştır.

Hem önerilen yeni modeller hem de literatürdeki klasik ampirik denklemler, çevrim sayısının çok düşük ve R_u artışının son derece hızlı olduğu bu gibi yükleme türlerinde sınırlı açıklama gücüne sahiptir. Bu bulgu, mevcut ampirik yapıların tipik çevrimli yüklemelere göre geliştirilmiş olduğunu ve yüksek deviator yük içeren, ani sıvılaşmanın gözlendiği deneyler için yeni modellemelere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.



Şekil 5.15. 80 kPa Gilroy yüklemesi test sonuçları.

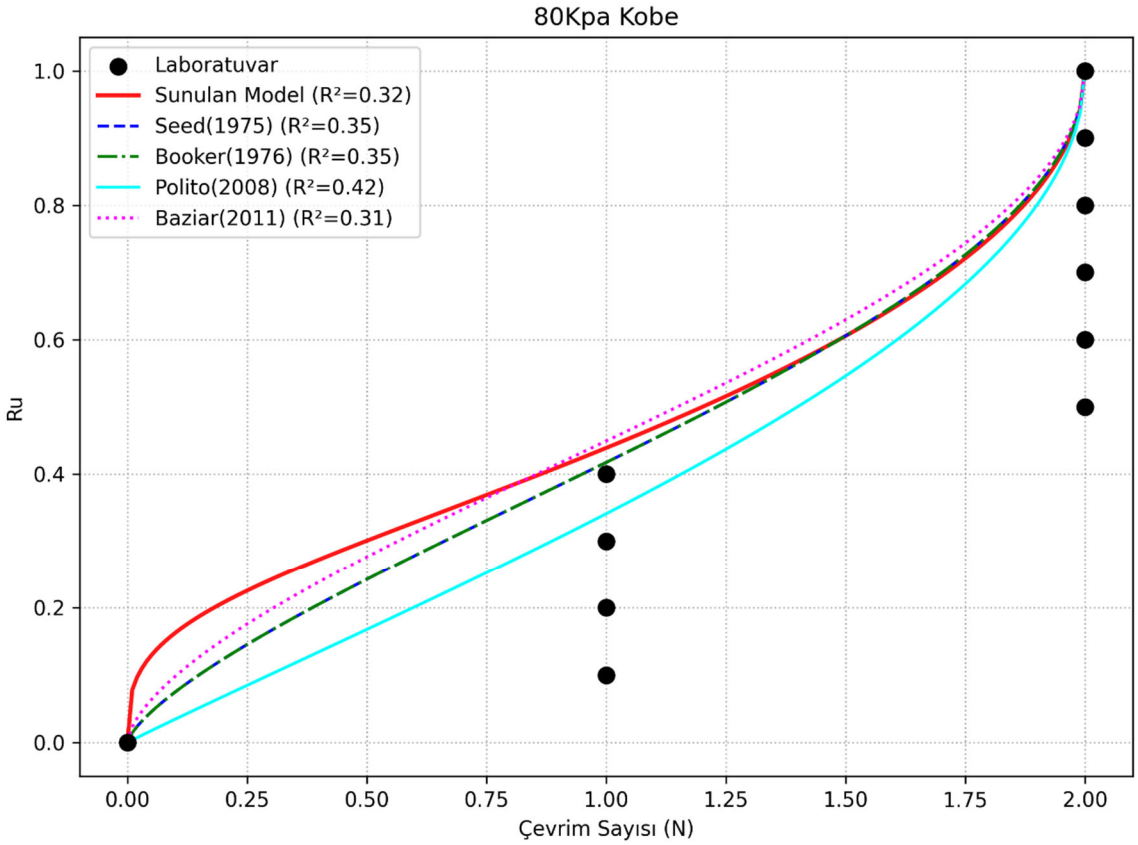
Şekil 5.15'te, 80 kPa Gilroy tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu yükleme tipinde deneysel R_u–N eğrisi çok kısa çevrim aralığında hızlı ve doğrusal bir artış sergilemekte, tipik S-eğrisi formundan sapmaktadır. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), deneysel veriye kısmen uyum sağlamış ve R^2 değerleri sırasıyla 0,72 ve 0,75 olarak bulunmuştur. Model 2, veri noktalarını Model 1'e göre daha iyi temsil etmiş, özellikle orta ve geç çevrimlerde eğriyi daha yakından takip etmiştir.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri (her ikisi için R^2=0,68), bu deneyde düşük–orta düzeyde uyum göstermiştir. Klasik fonksiyonel yapılar, kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın olduğu bu yükleme tipinde veri noktalarını tam olarak temsil edememiştir.

Baziar vd. (2011) modeli (R^2=0,75) Model 2 ile neredeyse aynı eğri üzerinde ilerlemiş ve genel olarak veriye daha iyi uyum sağlamıştır. Polito vd. (2008) modeli ise (R^2=0,47) bu yükleme tipinde en düşük uyumu göstermiş, R_u'nun ani artış gösterdiği kısa çevrimli deneyde deneysel verinin gerisinde kalmıştır.

Genel olarak hem önerilen yeni modeller hem de literatürdeki klasik ampirik denklemler, çevrim sayısının az olduğu ve R_u artışının çok hızlı gerçekleştiği bu yükleme tipinde sınırlı açıklama gücüne sahiptir. Model 2 ve Baziar vd. (2011) modeli, bu grup içinde en iyi uyumu sağlarken, Polito vd. (2008) modeli belirgin şekilde düşük kalmıştır. Bu durum, mevcut modellerin çoğunlukla daha tipik çevrim aralıkları ve klasik sıvılaşma davranışına göre geliştirildiğini göstermekte; hızlı yükleme ve kısa çevrimli sıvılaşmanın hâkim olduğu deneylerde açıklama gücünün azaldığına işaret etmektedir.



Şekil 5.16. 80 kPa Kobe yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.16'da 80 kPa Kobe tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu yükleme tipinde deneysel R_u–N eğrisi son derece kısa çevrim aralığında ve çok hızlı bir artışla sıvılaşmaya ulaşmakta, tipik S-eğrisi davranışından önemli ölçüde sapmaktadır. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), veriye uyumda düşük performans göstermiştir (R^2=0,32 ve 0,31). Her iki model de veri noktalarındaki ani ve yüksek artışı temsil etmekte yetersiz kalmıştır.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri (her ikisi için R^2=0,35), benzer şekilde, kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın olduğu bu yükleme tipinde deneysel eğrinin hızlı yükselişini yakalayamamış, veriyle düşük uyum göstermiştir. Baziar vd. (2011) modeli de (R^2=0,31) Model 2 ile neredeyse aynı, düşük düzeyde açıklama gücüne sahip olmuştur.

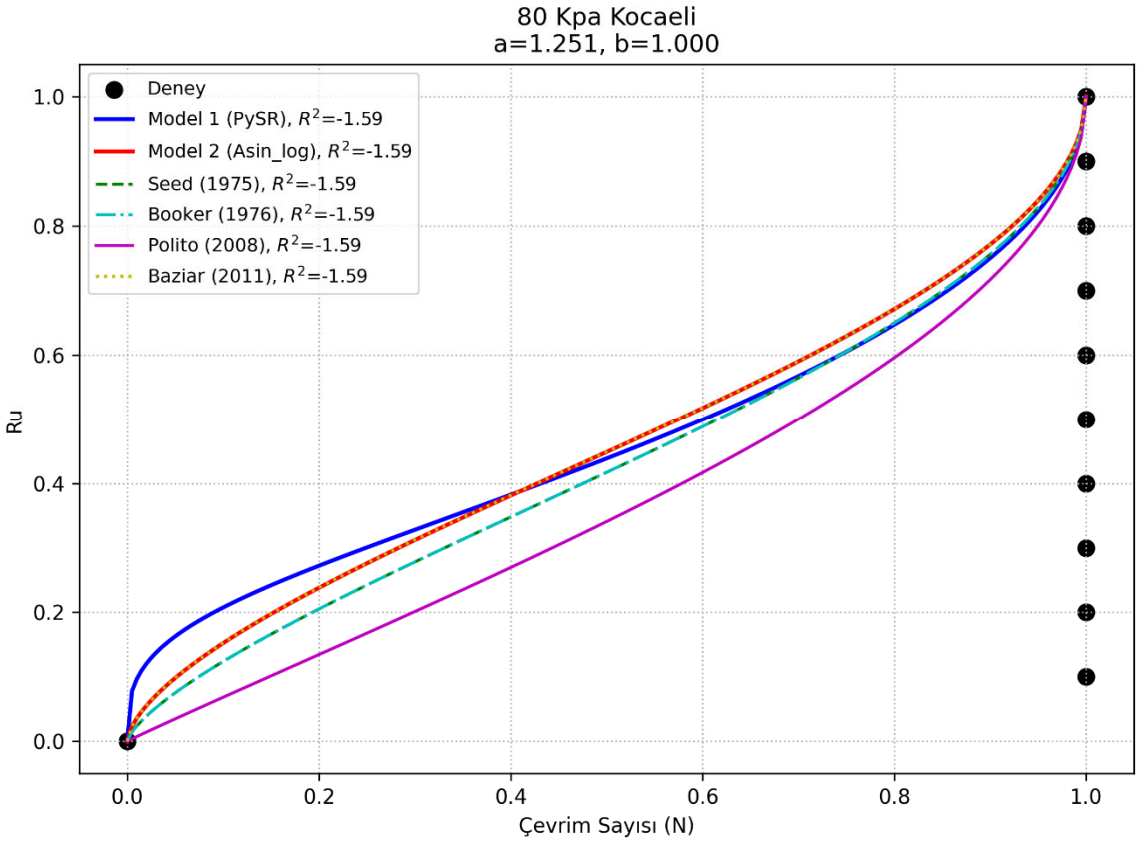
Bu deneyde en yüksek R^2 değerine sahip model Polito vd. (2008) olmuştur (R^2=0,42), ancak bu değer bile veri setinin ani sıçrama ve yayılımını modellemek için yetersizdir. Hiçbir model, çevrim sayısının çok az ve R_u artışının son derece hızlı olduğu bu gibi deneylerde istenen doğruluğu sağlayamamıştır.

Genel kapsamda hem önerilen yeni modeller hem de literatürdeki klasik ampirik denklemler, çevrim sayısının çok düşük olduğu ve R_u artışının çok hızlı gerçekleştiği yükleme tiplerinde sınırlı açıklama gücüne sahiptir. Bu sonuç, mevcut ampirik yapıların tipik çevrimli yüklemelere göre geliştirilmiş olduğunu ve yüksek yük seviyelerinde, ani sıvılaşmanın gözlendiği testlerde yeni modellemelere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Şekil 5.17'de, 80 kPa Kocaeli tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte sunulmuştur.

Bu yükleme tipinde, deneysel R_u–N eğrisi sadece 1 çevrimlik bir alanda ani ve çok hızlı bir artış göstermektedir. Tipik S-eğrisi davranışından tamamen sapmaktadır. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR), Model 2 (logaritmik hibrit yapı) ve tüm literatür modellerinin R^2 değerlerinin -1,59 çıkması, modellerin veri ile neredeyse hiçbir şekilde

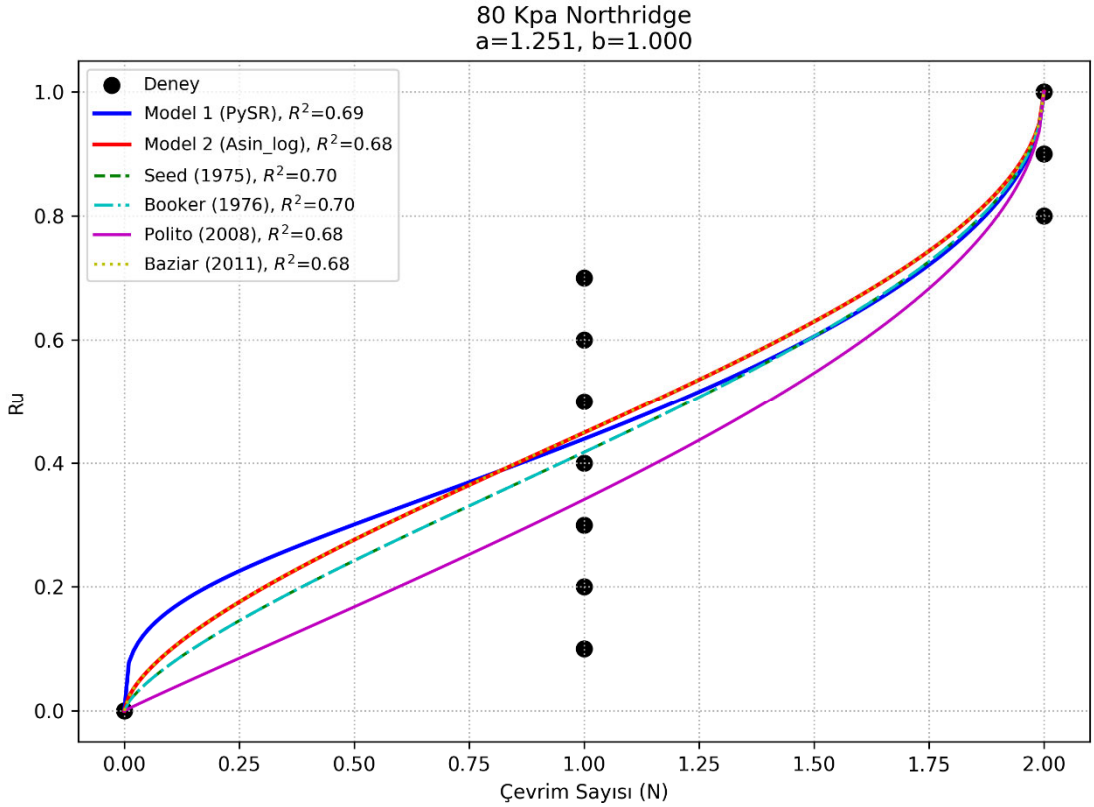
örtüşmediğini ve açıklama gücünün negatif yönde olduğunu göstermektedir. Grafik üzerinde tüm modellerin eğrileri, ani ve dikey veri dağılımını temsil edememiştir.



Şekil 5.17. 80 kPa Kocaeli yüklemesi test sonuçları.

Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) gibi klasik literatür modelleri de bu tip yükleme altında deneysel veriyle anlamlı bir uyum sağlayamamıştır. Deneysel veride, çevrim sayısı çok düşükken (örneğin 1 çevrim) R_u değeri bir anda 1'e ulaşmakta; buna karşılık tüm ampirik modeller, çevrim bazında daha yayılı ve S formunda bir geçiş öngördüğünden, bu ani yükselişi yakalayamamıştır.

Genel kapsamda hem önerilen yeni modeller hem de literatürdeki klasik ampirik denklemler, çevrim sayısının en düşük olduğu ve R_u artışının neredeyse anında gerçekleştiği bu tür deneylerde sıfıra yakın ya da negatif açıklama gücüne sahip olmaktadır. Bu durum, mevcut ampirik yapıların geleneksel sıvılaşma davranışı ve tipik çevrimli yüklemeler için geçerli olduğunu, aşırı yüksek yük seviyeleriyle oluşan ani sıvılaşma vakaları için ise uygun olmadığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.18. 80 kPa Northridge yüklemesi test sonuçları.

Şekil 5.18'de, 80 kPa Northridge tipi düzensiz çevrimsel yükleme altında elde edilen boşluk suyu basıncı oranı–çevrim sayısı ilişkisi, önerilen modeller ve literatürdeki klasik modeller ile birlikte gösterilmiştir.

Bu yükleme tipinde deneysel R_u–N eğrisi, yalnızca birkaç çevrimde oldukça hızlı bir yükseliş göstermektedir. Model 1 (sembolik regresyon tabanlı, PySR) ve Model 2 (logaritmik hibrit yapı), veriye kısmen uyum sağlayarak R^2 değerleriyle sırasıyla 0,69 ve 0,68'lik bir açıklama gücü sunmuştur. Her iki model de hızlı ve ani artış içeren veri noktalarının genel trendini kısmen takip etmiş, fakat R_u'nun çok kısa sürede doygunluğa ulaştığı bu tip deneyde eğrinin tüm detaylarını temsil edememiştir.

Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri (her ikisi için R^2=0,70), kısa çevrimli ve hızlı sıvılaşmanın görüldüğü bu koşulda, klasik çekirdek yapılarının bir avantajıyla veriyle nispeten daha iyi bir uyum sağlamış; deneysel eğrinin trendini yakalamada Model 1 ve Model 2'den biraz daha yüksek doğruluk göstermiştir.

Baziar vd. (2011) modeli ve Polito vd. (2008) modeli ise (her ikisi için R^2=0,68), bu yükleme tipi için Model 2 ile aynı doğruluk seviyesine ulaşmış ancak deneysel eğrideki hızlı ve yaygın R_u artışını tam olarak modelleyememiştir.

Genel kapsamda hem önerilen yeni modeller hem de klasik ampirik literatür denklemleri, çevrim sayısının az olduğu ve R_u artışının çok hızlı gerçekleştiği bu yükleme tipinde sınırlı açıklama gücüne sahiptir. Seed vd. (1975) ve Booker vd. (1976) modelleri veriyle en uyumlu eğrileri üretirken, Model 1, Model 2, Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) modelleri ise benzer ve kısmi uyum göstermiştir. Sonuçlar, mevcut ampirik yapıların genellikle daha tipik sıvılaşma çevrim aralıklarına göre geliştirildiğini, hızlı yükleme ve kısa çevrimli sıvılaşmanın olduğu deneylerde ise açıklama gücünün belirgin şekilde düştüğünü göstermektedir.

Bu bölümde boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına göre gelişimini modelleyen hem klasik literatür formülasyonları hem de bu çalışma kapsamında sembolik regresyon ve hibrit yapı yaklaşımıyla elde edilen yeni modeller karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tüm analizler; üç farklı deviator gerilme düzeyinde ve sinüzoidal ile deprem kökenli çift genlikli yükleme formlarında, zeminin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkiler dikkate alınarak yürütülmüştür.

35 kPa gibi görece düşük gerilme düzeylerinde gerek önerilen yeni modeller gerekse Seed vd. (1975), Booker vd. (1976), Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) gibi literatür kaynaklı formüller, deneysel veriyle genellikle yüksek uyum sergilemiştir. Bu koşullarda Model 1 ve Model 2'nin yanı sıra Polito vd. (2008) ve Baziar vd. (2011) modelleri de yüksek korelasyon katsayılarıyla öne çıkmıştır. Özellikle çevrim sayısının orta ve yüksek olduğu, klasik sıvılaşma gelişiminin gözlendiği deneylerde tüm modellerin S-eğrisi tipi R_u–N ilişkisini başarılı şekilde yansıttığı görülmüştür.

50 kPa düzeyine çıkıldığında, yükleme formunun (sinüs ya da deprem tipi) davranış üzerindeki belirleyici etkisi ön plana çıkmıştır. Burada, bazı modellerin belirli yükleme formlarında (örneğin, düzenli veya ani yüklemeler) deneysel veriye uyumu artarken, diğer formlarda açıklama gücü azalmıştır. Model 1 ve Model 2, özellikle düzenli ve orta çevrimli testlerde güçlü bir performans sergilemiş; Seed vd. (1975), Booker vd. (1976) ve Baziar vd. (2011) modelleri de birçok testte güvenilir sonuçlar vermiştir. Polito (2008) modeli, bazı

kısa çevrimli yüklemelerde öne çıkarken, ani yükseliş içeren deneylerde ise daha sınırlı performans göstermiştir.

80 kPa düzeyinde ise modelleme açısından en karmaşık ve sınırlandırıcı koşullar ortaya çıkmıştır. Bu yükleme düzeyinde deviator gerilmenin çevre basıncını aşması sonucu, zemin numunelerinde kırılma veya ani sıvılaşma davranışı gözlenmiştir. Deneysel verilerde Ru değerlerinde ani yükselmeler ve geniş dağılımlar oluşmuş; tipik R_u–N eğrisinin dışına çıkan davranışlar ortaya çıkmıştır. Bu tip yüklemelerde gerek önerilen yeni modeller gerekse literatürde yaygın kullanılan ampirik modeller açıklama gücü açısından yetersiz kalmıştır. Özellikle çevrim sayısının 2 ve altına düştüğü örneklerde, modeller veri noktalarının ani ve dik yükselişini yakalamakta başarısız olmuştur. Model 1 ve Model 2'nin yanı sıra tüm literatür modellerinin bu ekstrem deneylerde düşük veya negatif korelasyon değerleri verdiği, klasik S-eğrisi tipi yaklaşımların bu koşullarda yetersiz olduğu net biçimde ortaya konmuştur.

Yapılan karşılaştırmalı analizler hem önerilen yeni modellerin hem de literatürdeki klasik ampirik yapıların, tipik sıvılaşma koşullarında ve orta-yüksek çevrimli deneylerde başarılı sonuçlar verebildiğini ancak uç yükleme ve yenilme davranışlarının görüldüğü kısa çevrimli ve ani sıvılaşma koşullarında modellerin yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu bulgular, ileriye dönük olarak zemin davranışındaki bu karmaşık ve hızlı değişimleri açıklayabilmek için yeni parametrik veya fizik-temelli model yapılarına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.2'de sunulan istatistiksel karşılaştırma, modellerin deneysel verilere uyumunu değerlendirmek amacıyla çeşitli performans ölçütleriyle yapılmıştır. R^2 (determinasyon katsayısı), modelin toplam değişkenliğin ne kadarını açıkladığını gösterirken düzeltilmiş R^2, modeldeki değişken sayısının etkisini dengeleyerek daha nesnel bir uyum ölçütü sunar. MAE (ortalama mutlak hata), MSE (ortalama kare hata) ve RMSE (karekök ortalama kare hata) ise, modelin tahminlerinde ne kadar sapma olduğunu farklı bakış açılarıyla ortaya koyar. MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) ise, hata oranlarını göreli olarak değerlendirmede önemli bir metriktir.

Tablodaki verilere bakıldığında, R^2 değerlerinin tüm modellerde 0,90'ın üzerinde olduğu, yani hem yeni geliştirilen hem de literatürdeki klasik modellerin, özellikle Seed vd.

(1975) ve Booker vd. (1976), düşük ve orta deviator gerilme düzeylerinde deneysel verinin büyük kısmını başarıyla açıkladığı görülmektedir. Bu modellerin yüksek R^2 ve düşük hata metrikleriyle öne çıkması, test edilen veri setinin temiz kum içermesiyle de doğrudan ilişkilidir. Zira, literatürdeki klasik ampirik modellerin önemli bir bölümü, özellikle temiz kum numuneleri üzerinde geliştirilmiş ve kalibre edilmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada kullanılan test veri seti de temiz kum deneylerine dayandığından, klasik modellerin veriyle yüksek uyum göstermesi beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 5.2. 35-50 kPa yüklemeler için istatistik verileri.

Model	**R2**	**AdjR2**	**MAE**	**MSE**	**RMSE**	**MAPE**
Model 1	0,904383	0,903648	0,067233	0,009562	0,097784	20,20486
Model 2	0,910739	0,910053	0,066036	0,008926	0,094478	20,83229
Seed (1975)	0,921301	0,920695	0,062533	0,00787	0,088713	20,9691
Booker (1976)	0,921301	0,920695	0,062533	0,00787	0,088713	20,9691
Polito (2008)	0,919938	0,919322	0,064701	0,008006	0,089477	24,91513
Baziar (2011)	0,91064	0,909953	0,066075	0,008936	0,09453	20,83468

Öte yandan, sunulan yeni modeller (Model 1 ve Model 2), sadece tek bir zemin türüne değil, geniş bir zemin spektrumuna (örneğin; farklı ince dane oranı, rölatif sıkılık, frekans, CSR gibi zemin ve yükleme parametreleri) uyum sağlayacak şekilde kurgulanmıştır. Bu nedenle, 35 ve 50 kPa gibi ideal, temiz kum koşullarında, klasik modeller kadar yüksek R^2 veya düşük hata metrikleri vermese de model yapısındaki parametrik çeşitlilik sayesinde çok bileşenli ve karmaşık zemin koşullarında öngörü yeteneğinin daha yüksek olması beklenmektedir. Yani, geliştirdiğimiz modellerin esas avantajı sadece standart test ortamlarında değil, farklı ince dane oranı, değişen rölatif sıkılık, farklı frekans

ve CSR ile yapılacak üç eksenli dinamik basınç deneylerinde de güvenilir ve esnek tahminler sunabilmesidir.

Bu istatistiksel analizler hem klasik modellerin temiz kum ortamında ne kadar güçlü olduğunu hem de yeni geliştirilen modellerin çok değişkenli zemin davranışını açıklama potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekte, heterojen zemin tiplerinde ve laboratuvar koşullarının ötesinde yapılacak üç eksenli dinamik deneylerde, sunulan hibrit ve parametrik modellerin daha yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sağlayacağı öngörülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu çalışmada analiz verilerinde temiz kum yanı sıra silt içeriği olan, ince daneli zeminlerden oluşmaktadır. Buna karşılık test verilerinde temiz Podima kumu kullanılmıştır. Bu durum, modellenen davranışla doğrulama testlerindeki uyumsuzlukların başlıca nedenlerinden biridir. Test verilerinin daha karmaşık yapıda bulunan zemin türlerinden oluşması durumunda geliştirilen modellerin literatür modellerinden daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.
- Sembolik regresyon yöntemi, düşük deviator gerilmesi uygulanan deneylerde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. 35 kPa genlikte, ortalama çevrim sayıları ile uyumlu R_u gelişim eğrileri sunabilmiştir. Ancak yüksek genlikli yüklemelerde (örneğin 80 kPa) model performansında belirgin düşüşler gözlenmiştir. Bu durum, zemin yenilmesi ve yapı dışı davranışların modele entegre edilememesinden kaynaklanmaktadır.
- Literatürde çoğunlukla sinüzoidal veya sabit genlikli yüklemeler üzerine yoğunlaşılmıştır. Bu çalışmada test verisi olarak kullanılan Coyote, Kobe, Kocaeli, Northridge yer değiştirme-zaman kayıtlarından türetilmiş çift genlikli yüklemeler literatüre kıymetli bir katkı sağlamaktadır. Düzensiz ve gerçekçi yüklemeler ile yapılmış literatür verilerinin artmasıyla sembolik regresyonun analiziyle oluşturulan denklemlerin açıklama gücü daha da artacaktır.
- Eğitim verilerinde R_u 1 için gerekli çevrim sayısı (N_{liq}) genellikle 300 çevrimin altındayken, test verilerinde bu sayı 1800 çevrimi aşabilmektedir. Bu durum, modelin aşırı yüksek çevrim sayılı yüklemelerde yetersiz kalmasına neden olmuştur. İlerideki çalışmalarda model eğitiminde kullanılan veri setlerinin daha geniş çevrim sayısı aralığını kapsayacak biçimde çeşitlendirilmesi önerilmektedir.
- CSR, D_r ve FC gibi parametreler modele doğrudan etki ederken, yükleme frekansı gibi zamana bağlı parametrelerin etkisi daha dolaylıdır. Ancak yapılan analizlerde frekansın özellikle orta şiddetli yüklemelerde R_u gelişim hızını doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenle gelecekte frekans parametresine bağlı daha detaylı alt modellerin tanımlanması önerilmektedir.
- 65 kPa çevre basıncına karşılık 80 kPa deviator gerilme uygulanan deneylerde numunelerde yenilme eğilimi gözlenmiştir. Bu, boşluk suyu basıncının aniden doyuma ulaşamamasına ve modellemenin başarısız olmasına yol açmıştır. Bu nedenle modelin,

belirli bir kritik deviator gerilme oranını aşan yüklemeler için geçerliliğinin sınırlandırılması gerekmektedir.

- Elde edilen sembolik denklem yapılarını hem doğruluk hem de açıklanabilirlik açısından değerlendirmek gerekmektedir. Bu çalışma, model sadeleştirmeleri ve formül türevleriyle ilerlemiş olup, açıklanabilir yapay zekâ uygulamalarına açık bir zemin oluşturmuştur. Daha ileri analizlerde sembolik model karmaşıklığının sınırlanması önerilmektedir.
- Çalışmada kullanılan deneysel veriler incelendiğinde, özellikle rölatif sıkılık (D_r) ve ince dane oranı (FC) gibi zemin özelliklerinin, R_u gelişimi üzerinde beklenenden daha karmaşık bir etki gösterdiği görülmüştür. Örneğin bazı yüksek FC içerikli numunelerde R_u artışı gecikmeli başlamış, buna karşın düşük FC içerikli zeminlerde daha erken yükseliş göstermiştir. Bu durum, modelde bu değişkenlere karşı sabit katsayılar yerine fonksiyonel ilişki tanımlanmasının gerekebileceğini ortaya koymaktadır.
- CSR değerinin artışı, beklenen şekilde R_u gelişiminde hızlanmaya neden olmuş, ancak bu etki belirli bir sınırdan sonra doyuma ulaşmıştır. Bu davranış, sembolik model içerisinde CSR'nin doğrusallıktan uzak bir biçimde temsil edilmesi gerektiğini göstermektedir. Gelecekte, CSR ile R_u arasındaki ilişki için parabolik veya sigmoidal dönüşüm fonksiyonlarının denenmesi önerilebilir.
- Sunulan sembolik modellerin değerlendirilmesinde ağırlıklı olarak determinasyon katsayısı (R^2) kullanılmıştır. Ancak özellikle uç noktalardaki tahmin başarısı, ortalama mutlak hata (MAE) ve kök ortalama kare hata (RMSE) gibi metriklerle detaylı analiz edilmelidir. Bu sayede modelin hem genel eğilimi hem de lokal sapmaları daha dengeli biçimde anlaşılabilir.
- Literatürde sıkça karşılaşılan veri eksikliği sorunu, özellikle R_u=1 sınırına yakın davranışların modellenmesini güçleştirmektedir. Bu bağlamda, kontrollü yapay veri üretimi (örneğin, sayısal analizlerden veya iyi kalibre edilmiş model eğrilerinden üretilen sanal deneyler) ile veri çeşitliliği artırılarak modelin genelleme yetisi geliştirilebilir.
- Geniş veri dağılımı göz önüne alındığında, FC, D_r ya da CSR gibi değişkenlerin belirli aralıklarında farklı model eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle fonksiyonlarla tanımlanmış modellerin oluşturulması, yüksek doğruluk sağlayabilir. Örneğin, FC<%10 ve FC>%20 durumları için ayrı alt modeller tanımlanabilir.
- 80 kPa gibi çevre basıncından yüksek deviator gerilmelerinde gözlenen yapısal bozulmalar, mevcut modellerin ötesinde plastisite teorisi ya da kırılma mekaniği temelli

yaklaşımları gerektirmektedir. Bu nedenle sıvılaşma analizlerinden bağımsız olarak, yükleme düzeyi-zemin stabilitesi ilişkisinin deneysel olarak sorgulanması önerilmektedir.

- Tez kapsamında kullanılan Coyote, Kobe ve Kocaeli gibi gerçek depremlerden türetilmiş yükleme formları, modelin doğrusal olmayan ve ani yükseliş gösteren R_u davranışlarını test etmesi açısından önemlidir. Literatürde çoğunlukla sinüzoidal yüklemeler tercih edildiğinden, bu çalışma düzensiz yüklemelere karşı model dayanımını sorgulayan nadir örneklerdendir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akosah, S., Zhou, L., Chen, J.-F., & Lawer, A. K. (2024). *Experimental investigation on cyclic behavior of geogrid-reinforced coral sand from the South China Sea*. Marine Georesources & Geotechnology, 42(6), 707–720. https://doi.org/10.1080/1064119X.2023.2214933

Amuthan, S.M., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2020). *Undrained cyclic responses of granulated rubber-sand mixtures*. Soils and Foundations, 60(4), 871–885. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.007

Andrus, R. D., & Stokoe II, K. H. (2000). *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(11), 1015–1025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015)

Andrus, R. D., Stokoe, K. H., & Juang, C. H. (2004). *Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation*. Earthquake Spectra, 20(2), 285–308.

Bartlett, S. F., & Youd, T. L. (1995). *Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread*. Journal of Geotechnical Engineering, 121(4), 316–329. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(316)

Baziar, M. H., & Dobry, R. (1995). *Residual strength and large-deformation potential of loose silty sands*. Journal of Geotechnical Engineering, 121(12), 896–906. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(896)

Baziar, M. H., Shahnazari, H., & Sharafi, H. (2011). *A laboratory study on the pore pressure generation model for Firouzkooh silty sands using hollow torsional test*. International Journal of Civil Engineering, 9(2), 126–134.

Booker, J. R., Rahman, M. S., & Seed, H. B. (1976). *GADFLEA: A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading*. Technical report, University of California, Berkeley.

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2006). *Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(11), 1413–1426. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1413)

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures* (Report No. UCD/CGM-14/01). University of California, Davis, Center for Geotechnical Modeling.

Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). *Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(9), 1165–1177. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1165)

KAYNAKLAR DİZİNİ

Brennan, A. J., & Madabhushi, S. P. (2005). *Liquefaction and drainage in stratified soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(7), 876–885. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(876)

Byrne, P. M. (1991). *A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand*. Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (Paper No. 1.24, pp. 1–13), 11–15 March 1991, St. Louis, Missouri. https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/02icrageesd/session01/1

Carlton, B. (2014). *An improved description of the seismic response of sites with high plasticity soils, organic clays, and deep soft soil deposits*. Doctoral thesis, University of California, Berkeley. 846 p.

Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr, L. F., Kayen, R. E., & Moss, R. E. (2004). *Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(12), 1314–1340. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1314)

Chauhan, R., Mittal, S., & Sharma, V. (2022). *Mitigation of liquefaction-induced hazard using geosynthetics: An experimental study using cyclic triaxial and large-scale shake table tests*. Innovative Infrastructure Solutions, 7, 352. https://doi.org/10.1007/s41062-022-00941-6

Chavan, D., Sitharam, T. G., & Anbazhagan, P. (2022). *Liquefaction resistance and cyclic response of air injected-desaturated sandy soil*. Geotechnical and Geological Engineering, 40, 1851–1872. https://doi.org/10.1007/s10706-021-01996-5

Chen, G., Wu, Q., Zhao, K., Shen, Z., & Yang, J. (2020). *A binary packing material–based procedure for evaluating soil liquefaction triggering during earthquakes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 146(6), 04020040. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002260

Chen, J., Che, A., Wang, L., & Zhou, H. (2024). *Dynamic response prediction for slope during earthquake using modal analysis and deep learning methods*. Computers and Geotechnics, 174, 106618. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106618

Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). *Xgboost: A scalable tree boosting system*. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785–794). https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

KAYNAKLAR DİZİNİ

Choi, Y., & Kumar, K. (2023, March). *A machine learning approach to predicting pore pressure response in liquefiable sands under cyclic loading*. In Geo-Congress 2023 (pp. 202–210). https://doi.org/10.1061/9780784484692.021

Cranmer, M. (2023). *Interpretable machine learning for science with PySR and SymbolicRegression*. arXiv preprint arXiv:2305.01582. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01582

Dash, H., Sitharam, T., Baliarsingh, F., & Mishra, A. (2010). *Effect of initial gross void ratio on undrained cyclic pore pressure response of sand-silt mixtures*. International Journal of Geotechnical Engineering, 4(2), 205–216. https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.02.205-216

Dobry, R. (1985). *Liquefaction of soils during earthquakes*. Committee on Earthquake Engineering, National Research Council, Report No. CETS-EE-001. National Academy Press, Washington, DC, USA.

Dobry, R., & Ladd, R. S. (1980). *Discussion of "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes and liquefaction potential: Science versus practice"*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(6), 720–724.

Dobry, R., Elgamal, A. W., Baziar, M., & Vucetic, M. (1989, December). *Pore pressure and acceleration response of Wildlife site during the 1987 earthquake*. In Proceedings of the 2nd US–Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines (pp. 145–160). Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research.

Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., & Powell, D. (1982). *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method* (Building Science Series No. 138). National Bureau of Standards, US Department of Commerce, US Government Printing Office, Washington, DC.

Elzamel, A., Altahrany, A., & Elmeligy, M. (2023). *Utilization of different additives in improving sandy soil against liquefaction*. Jordan Journal of Civil Engineering, 17(1), 107–116. https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i1.10

Ertekin, B. (2019). *Kumlarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı gelişiminin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 140s.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Faris, A. T., Seed, R. B., Kayen, R. E., & Wu, J. (2006). *A semi-empirical model for the estimation of maximum horizontal displacement due to liquefaction-induced lateral spreading*. In Proceedings of the 8th US Conference on Earthquake Engineering (Vol. 3, pp. 1584–1593).

Festugato, L., Flórez Gálvez, J. H., Miguel, G. D., & Consoli, N. C. (2022). *Cyclic response of fibre reinforced dense sand*. Transportation Geotechnics, 37, 100811. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100811

Finn, W. L., Martin, G. R., & Byrne, P. M. (1976). *Seismic response and liquefaction of sands*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(8), 841–856. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000310

Finn, W.D.L., Lee, K.W., Martin, G.R., (1977). An effective stress model for liquefaction. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, p. 517-533.

Ghorbani, B., Arulrajah, A., Narsilio, G., & Horpibulsuk, S. (2020). *Experimental investigation and modelling the deformation properties of demolition wastes subjected to freeze–thaw cycles using ANN and SVR*. Construction and Building Materials, 258, 119688. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119688

Gobbi, S., d'Avila, M. P. S., Lenti, L., Semblat, J. F., & Reiffsteck, P. (2022). *Liquefaction assessment of silty sands: Experimental characterization and numerical calibration*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 159, 107349. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107349

Green, R. A., Mitchell, J. K., & Polito, C. P. (2000, November). *An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils.* In Proceedings of the John Booker Memorial Symposium (Vol. 3, pp. 25–31). AA Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands.

Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. Quaestiones geographicae, 30(2), 87-93.

Holzer, T. L., & Bennett, M. J. (2007). *Geologic and hydrogeologic controls of boundaries of lateral spreads: Lessons from USGS liquefaction case histories*. In Proceedings of the 1st North American Landslide Conference (Vol. 23, pp. 502–522). Association of Engineering Geologists Special Publication, Denver, CO.

Idriss, I. M. (1999). *An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential*. In Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction (Publication No. FHWA-RD-99-165). Federal Highway Administration.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2004). *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (ICSDEE) & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE), Berkeley, California, 32–56. https://www.marchetti-dmt.it/wp-content/uploads/bibliografia/idriss_2004_semi_empirical_procedures_for_liquef.pdf

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes* (Monograph MNO-12). Earthquake Engineering Research Institute.

Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780198562245.001.0001

Jain, A., Mittal, S., & Shukla, S. K. (2023a). *Use of polyethylene terephthalate fibres for mitigating the liquefaction-induced failures*. Geotextiles and Geomembranes, 51, 245–258. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.11.002

Jain, A., Mittal, S., & Shukla, S. K. (2023b). *Cyclic behaviour of stratified soil under liquefied states*. Marine Georesources & Geotechnology, 41(7), 721–742. https://doi.org/10.1080/1064119X.2022.2095946

Juang, C. H., Chen, C. J., Jiang, T., & Andrus, R. D. (2000). *Risk-based liquefaction potential evaluation using standard penetration tests*. Canadian Geotechnical Journal, 37(6), 1195–1208. https://doi.org/10.1139/t00-064

Juang, C. H., Jiang, T., & Andrus, R. D. (2002). *Assessing probability-based methods for liquefaction potential evaluation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(7), 580–589. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:7(580)

Karabulut, Z. E., Zeybek, A., İkizler, S. B. (2023, 22-24 Kasım). *Dinamik üç eksenli deneyler ile temiz kumun sıvılaşma karakteristiğine dane boyutunun etkisi*, 9. Geoteknik Sempozyumu Bildiri Kitapçığı, s. SS-19, İstanbul, Türkiye. https://doi.org/10.5505/2023geoteknik.SS-19

Khashila, M. (2019). *Assessment of liquefaction potential using the combined triaxial simple shear apparatus (TxSS)*, Doctoral thesis, Université de Sherbrooke, 267 p.

Koza, J. R. (1990). *Genetic programming: A paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems* (Vol. 34). Stanford, CA: Stanford University, Department of Computer Science.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kumar, S. S., Krishna, A. M., & Dey, A. (2020). *Assessment of dynamic response of cohesionless soil using strain-controlled and stress-controlled cyclic triaxial tests*. Geotechnical and Geological Engineering, 38, 1431–1450. https://doi.org/10.1007/s10706-019-01100-y

Kutter, B. L. (1992). *Dynamic centrifuge modeling of geotechnical structures*. Transportation Research Record, 1336, 24–30.

Kutter, B. L., Chen, Y. R., & Shen, C. K. (1994). *Triaxial and torsional shear test results for sand*. Final report, University of California.

Lee, K. L., & Albaisa, A. (1974). *Earthquake induced settlements in saturated sands*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 100(4), 387–406. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000034

Madabhushi, S. P. G., & Zeng, X. (2007). *Simulating seismic response of cantilever retaining walls*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(5), 539–549. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(539)

Maharjan, M., & Takahashi, A. (2013). *Centrifuge model tests on liquefaction-induced settlement and pore water migration in non-homogeneous soil deposits*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 55, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.002

Martin, G. R., Seed, H. B., & Finn, W. L. (1975). *Fundamentals of liquefaction under cyclic loading*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101(5), 423–438. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000164

Marzuni, S. S., Fadaee, M., Bahmanpour, A., & Derakhshandi, M. (2022). *Effect of cyclic stress ratio and non-plastic fines content on the liquefaction potential of sandy and silty soil in cyclic triaxial testing*. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 58(6), 467–473. https://doi.org/10.1007/s11204-022-09768-w

Matasović, N., & Vucetic, M. (1993). *Cyclic characterization of liquefiable sands*. Journal of Geotechnical Engineering, 119(11), 1805–1822. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:11(1805)

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons

Moss, R. E. S., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & Cetin, K. O. (2006). *CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(8), 1032–1051.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Olson, S. M., & Stark, T. D. (2002). *Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories*. Canadian Geotechnical Journal, 39(3), 629–647. https://doi.org/10.1139/t02-001

Olson, S. M., Stark, T. D., Walton, W. H., & Castro, G. (2000). *1907 static liquefaction flow failure of the North Dike of Wachusett Dam*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(12), 1184–1193. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:12(1184)

Papadopoulou, A. I., & Tika, T. M. (2021). *Laboratory-based correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity of sand with fines*. Geotechnics, 1(2), 219–242. https://doi.org/10.3390/geotechnics1020012

Park, D., & Ahn, J. K. (2013). *Accumulated stress based model for prediction of residual pore pressure*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 1567–1570.

Park, L. W., Lee, S., & Chang, H. (2018). *A sustainable home energy prosumer-chain methodology with energy tags over the blockchain*. Sustainability, 10(3), 658. https://doi.org/10.3390/su10030658

Pokhrel, A., Chiaro, G., Kiyota, T., & Cubrinovski, M. (2024). *Liquefaction characteristics of sand-gravel mixtures: Experimental observations and its assessment based on intergranular state concept*. Soils and Foundations, 64, 101444. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101444

Polito, C. (2001). *Plasticity based liquefaction criteria*. Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn, San Diego, California, March 26–31, 2001 (Paper No. 1.33). Missouri University of Science and Technology, Scholars' Mine.

Polito, C. P., Green, R. A., & Lee, J. (2008). *Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(10), 1490–1500. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1490)

Rangaswamy, K., Boominathan, A., & Rajagopal, K. (2010). *Influence of initial conditions on liquefaction resistance of silty sands*. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 5(3), 199–211. https://doi.org/10.1080/17486021003706572

Rauch, A. F. (1997). *EPOLLS: An empirical method for predicting surface displacements due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes*, Doctoral thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 499 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Rauch, A. F., & Martin III, J. R. (2000). *EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4), 360–371. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(360)

Rauch, A. F., & Martin III, J. R. (2000). *EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4), 360–371. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(360)

Ray, P., & Sahu, R. B. (2021). *Liquefaction potential along with pore water pressure generation of coastal sand of Digha in West Bengal, India*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 18(2), 165–184. https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0012

Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1997). *Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT*. In Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils (pp. 41–88). National Center for Earthquake Engineering Research. Utah

Rouholamin, M., Bhattacharya, S., & Orense, R. P. (2017). *Effect of initial relative density on the post-liquefaction behaviour of sand*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 97, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.007

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1967). *Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 93(3), 83–108.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1249–1273.

Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). *Liquefaction of saturated sands during cyclic loading*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 92(6), 105–134. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000913

Seed, H. B., Mori, K., & Chan, C. K. (1975). *Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands* (Report No. EERC 75-25). University of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). *Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations*. Journal of Geotechnical Engineering, 111(12), 1425–1445.

Seed, R. B., & Harder, L. F. Jr. (1990). *SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength*. In Proceedings of the H. Bolton Seed Memorial Symposium (Vol. 2, pp. 351–376). Bi-Tech Publishing Ltd.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., & Faris, A. (2003). *Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework*. In Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar (pp. 71–138). Long Beach, CA.

Shibata, T., & Teparaksa, W. (1988). *Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests*. Soils and Foundations, 28(2), 49–60. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.2_49

Silver, M. L., & Seed, H. B. (1971). *Volume changes in sands during cyclic loading*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1171–1182. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001658

Stark, T. D., & Mesri, G. (1992). *Undrained shear strength of liquefied sands for stability analysis*. Journal of Geotechnical Engineering, 118(11), 1727–1747. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:11(1727)

Suzuki, Y., Koyamada, K., & Tokimatsu, K. (1997). *Prediction of liquefaction resistance based on CPT tip resistance and sleeve friction*. In Proceedings of the XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 603–606). Hamburg, Germany.

Tanrınian, N., Karakan, E., & Sezer, A. (2018). *Plastik olmayan bir silt zemin üzerinde yapılan çevrimsel üç eksenli deneyler sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı davranışının değerlendirilmesi*. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 513–524.

Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T., & Fukushima, S. (1986). *Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures*. Soils and Foundations, 26(1), 65–84. https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.65

Tokimatsu, K., & Asaka, Y. (1998). *Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake*. Soils and Foundations, 38, 163–177. https://doi.org/10.3208/sandf.38.Special_163

Toprak, S., Holzer, T. L., Bennett, M. J., & Tinsley, J. C. (1999). *CPT- and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential*. In Proceedings of the 7th U.S.–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction. MCEER, Seattle.

Towhata, I., & Ishihara, K. (1985). *Shear work and pore water pressure in undrained shear*. Soils and Foundations, 25(3), 73–84. https://doi.org/10.3208/sandf1972.25.3_73

KAYNAKLAR DİZİNİ

Towhata, I., Sasaki, Y., Tokida, K. I., Matsumoto, H., Tamar, Y., & Yamada, K. (1992). *Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle*. Soils and Foundations, 32(3), 97–116. https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.3_97

Tsukamoto, Y., & Ishihara, K. (2022). *Advances in soil liquefaction engineering (1st Ed.)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5479-7

Wang, G., Zhao, B., & Wu, B. (2023). *Intelligent prediction of slope stability based on visual exploratory data analysis of 77 in situ cases*. International Journal of Mining Science and Technology, 33, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.07.002

Wu, T.-W., Suzuki, Y., Carlton, B., Harbitz, C., & Kopf, A. (2021). *Effect of prior small to moderate seismic events on monotonic undrained shear strength of sand*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 141, 106465. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106465

Yang, X. T., Zhou, Y. G., Cao, Y., Ishikawa, A., & Chen, Y. M. (2023). *On the determination of cyclic shear stress for soil liquefaction triggering in centrifuge model test*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 173, 108137.

Yoshimi, Y., & Tokimatsu, K. (1977). *Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes*. Soils and Foundations, 17(1), 23–38. https://doi.org/10.3208/sandf1972.17.23

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). *Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4), 297–313.

Youd, T. L., Hansen, C. M., & Bartlett, S. F. (2002). *Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(12), 1007–1017. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1007)

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder Jr, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., ... Stokoe II, K. H. (2001). *Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), 817–833. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817)

KAYNAKLAR DİZİNİ

Zachariah, J. P., & Jakka, R. S. (2025). *Cyclic behavior and liquefaction resistance of sand with partial bagasse replacement*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 191, 109237. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109237

Zeng, X., & Schofield, A. N. (1996). *Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modelling*. Geotechnique, 46(1), 83–102. https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.1.83

Zeybek, A. (2022). *Stress-controlled dynamic triaxial experiments to examine the liquefaction response of clean sand*. Bitlis Eren University Journal of Science, 11(2), 666–677. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1080973

Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I. (2004). *Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(8), 861–871. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(861)

Zhang, X., Wang, S., Su, L., Zhu, H., Liu, H., Liu, C., & Cui, J. (2024). *Mitigation of earthquake-induced liquefaction and lateral spread deformation by applying ground granulated blast furnace slag*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 178, 108493. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108493

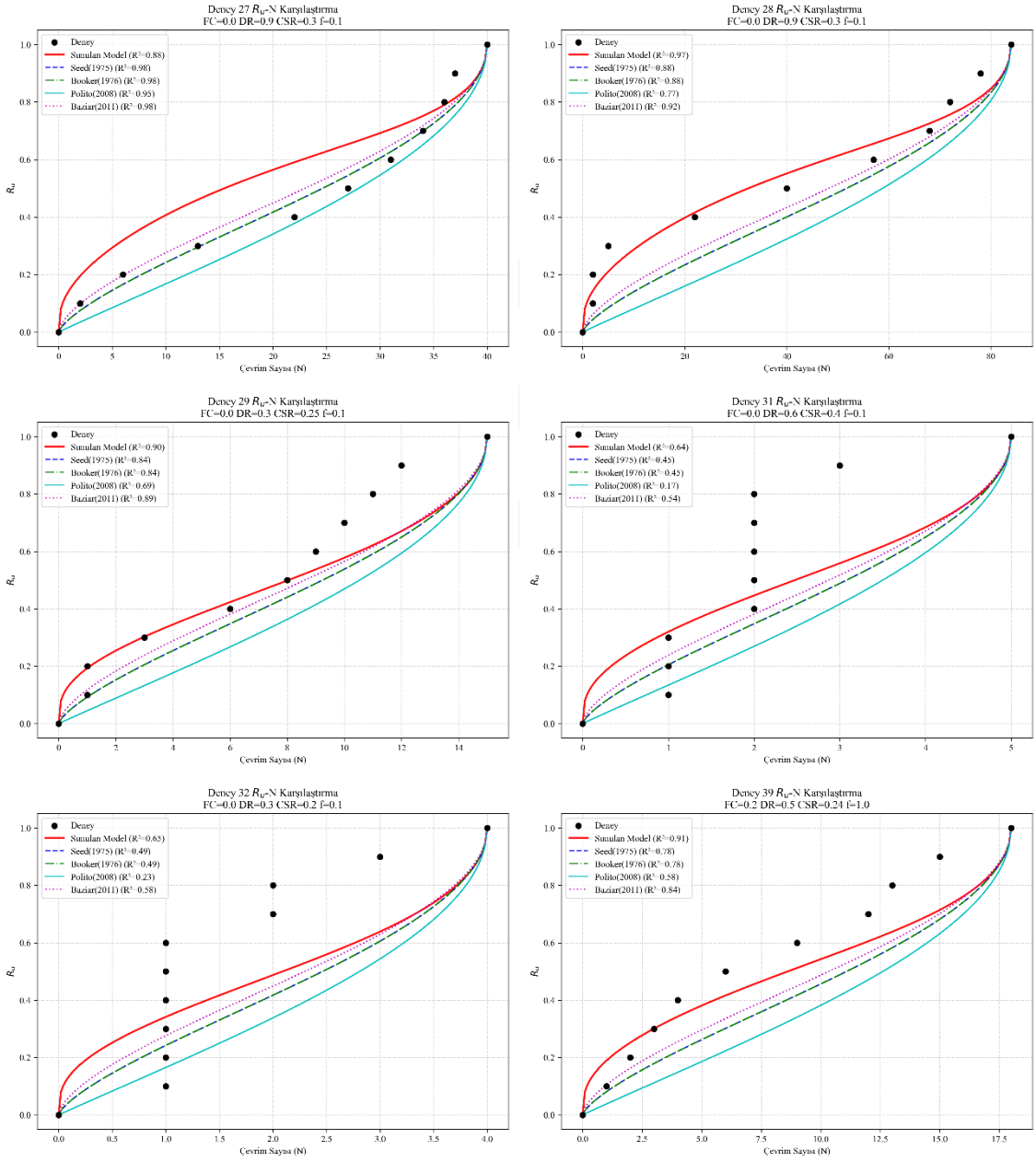
Zhu, L., Yang, Q., Luo, L., & Cui, S. (2022). *Pore-water pressure model for carbonate fault materials based on cyclic triaxial tests*. Frontiers in Earth Science, 10, 842765. https://doi.org/10.3389/feart.2022.842765

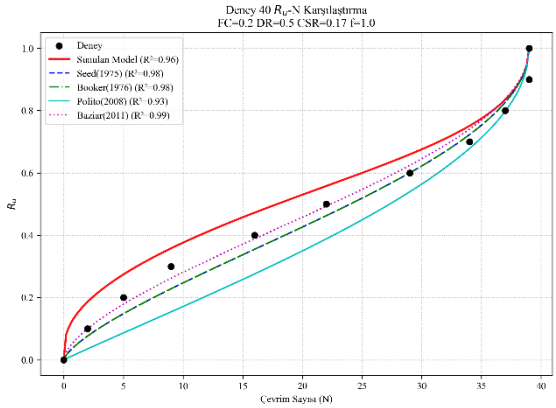
Zhu, Z. (2023). *Influence of fine particles on the liquefaction properties of a reference sand: Application to the seismic response of a sand column on a vibrating table*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24299-1

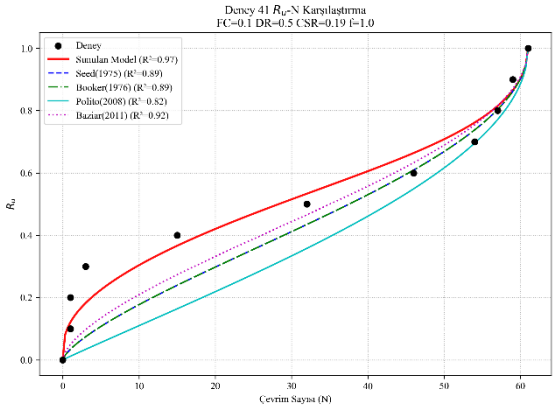
Zhu, Z., Zhang, F., Peng, Q., Dupla, J.-C., Canou, J., Cumunel, G., & Foerster, E. (2021). *Effect of the loading frequency on the sand liquefaction behaviour in cyclic triaxial tests*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106779. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106779

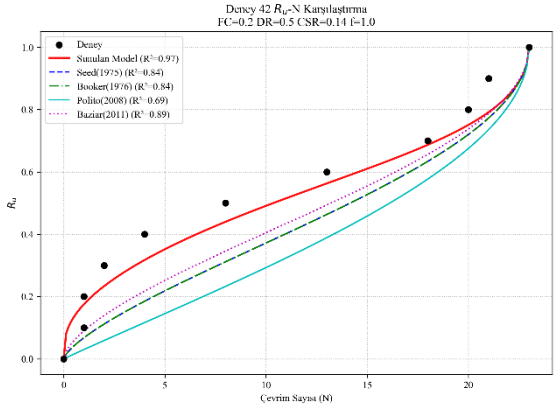
EK AÇIKLAMALAR

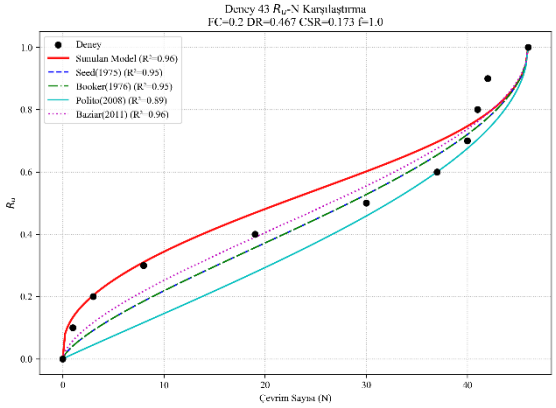
Ek Açıklamalar-A: Model 1 (PySR) Veri Seti Grafikleri

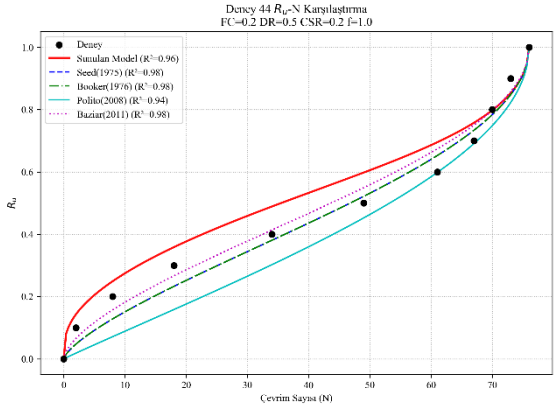


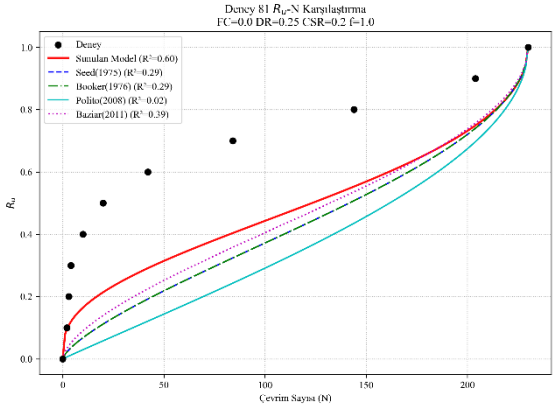

Deney 40 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.17 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.98)
Booker(1976) (R^2=0.98)
Polito(2008) (R^2=0.93)
Baziar(2011) (R^2=0.99)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

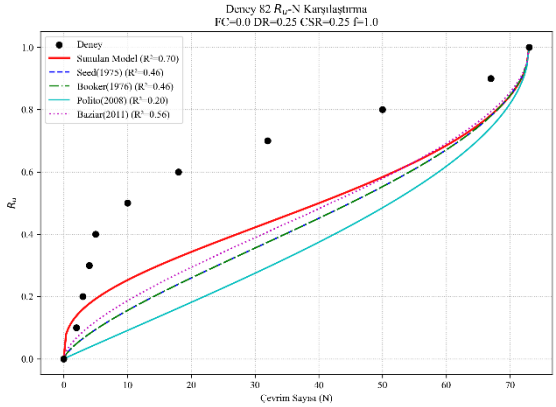

Deney 41 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.5 CSR=0.19 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.89)
Booker(1976) (R^2=0.89)
Polito(2008) (R^2=0.82)
Baziar(2011) (R^2=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

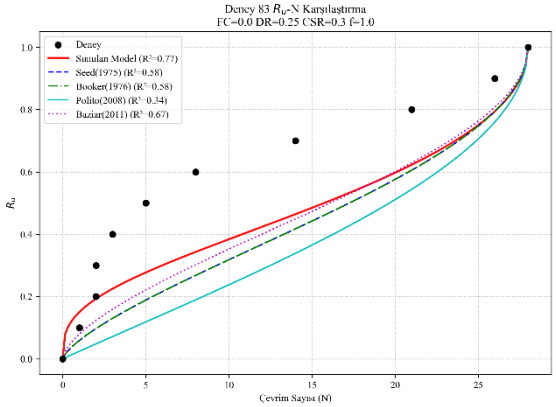

Deney 42 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.14 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.84)
Booker(1976) (R^2=0.84)
Polito(2008) (R^2=0.69)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

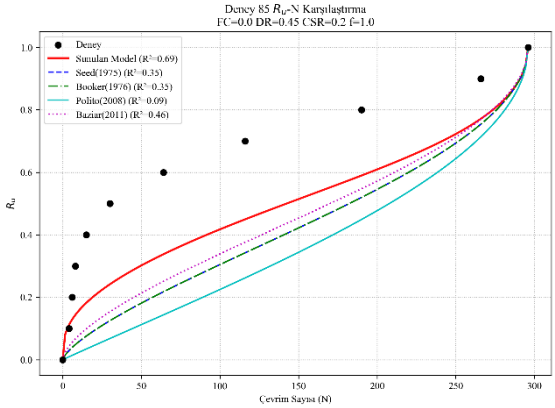

Deney 43 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.467 CSR=0.173 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.95)
Booker(1976) (R^2=0.95)
Polito(2008) (R^2=0.89)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

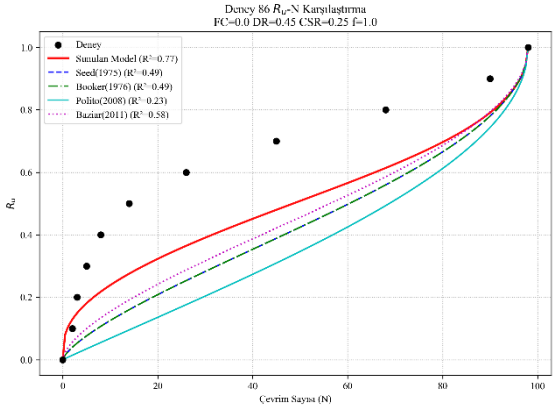

Deney 44 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.98)
Booker(1976) (R^2=0.98)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

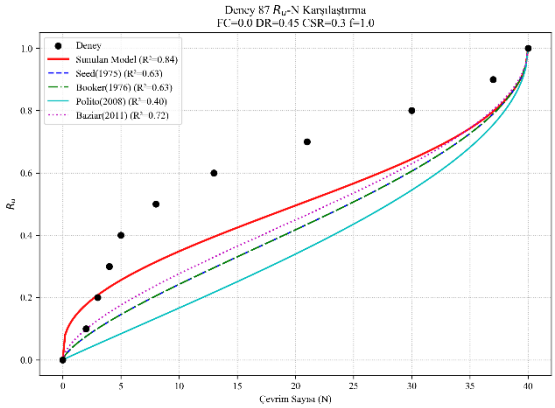

Deney 81 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.60)
Seed(1975) (R^2=0.29)
Booker(1976) (R^2=0.29)
Polito(2008) (R^2=0.02)
Baziar(2011) (R^2=0.39)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

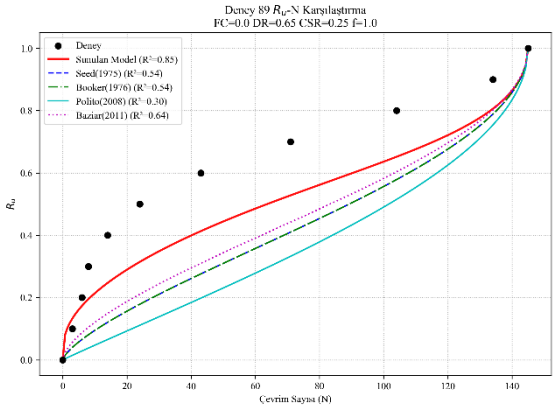

Deney 82 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.70)
Seed(1975) (R^2=0.46)
Booker(1976) (R^2=0.46)
Polito(2008) (R^2=0.20)
Baziar(2011) (R^2=0.56)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

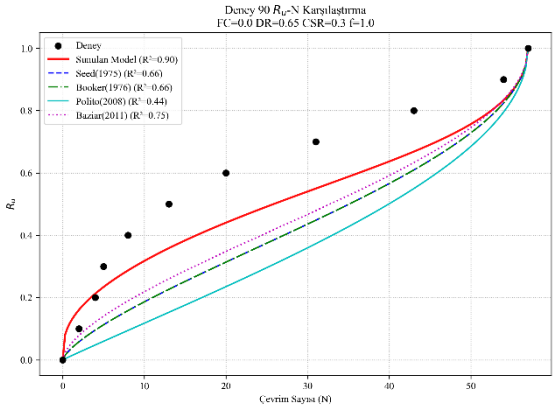

Deney 83 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.77)
Seed(1975) (R^2=0.58)
Booker(1976) (R^2=0.58)
Polito(2008) (R^2=0.34)
Baziar(2011) (R^2=0.67)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

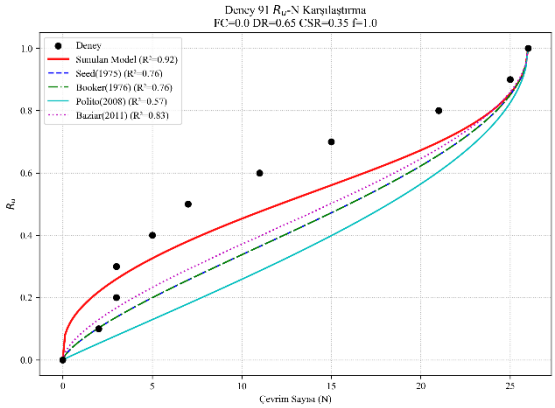

Deney 85 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.69)
Seed(1975) (R^2=0.35)
Booker(1976) (R^2=0.35)
Polito(2008) (R^2=0.09)
Baziar(2011) (R^2=0.46)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

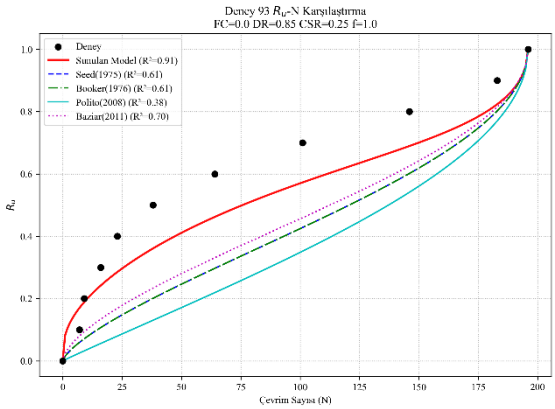

Deney 86 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.77)
Seed(1975) (R^2=0.49)
Booker(1976) (R^2=0.49)
Polito(2008) (R^2=0.23)
Baziar(2011) (R^2=0.58)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

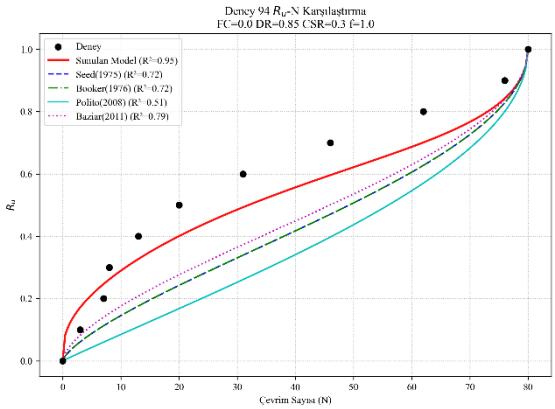

Deney 87 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.84)
Seed(1975) (R^2=0.63)
Booker(1976) (R^2=0.63)
Polito(2008) (R^2=0.40)
Baziar(2011) (R^2=0.72)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

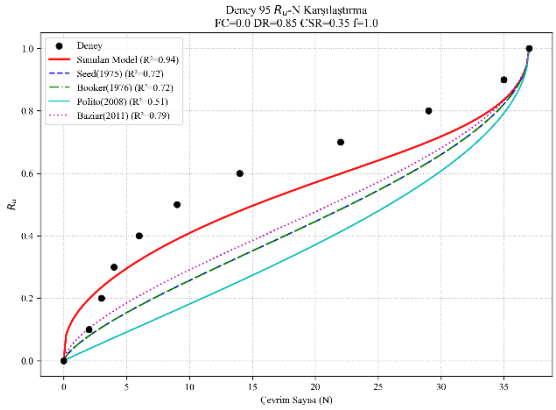

Deney 89 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.85)
Seed(1975) (R^2=0.54)
Booker(1976) (R^2=0.54)
Polito(2008) (R^2=0.30)
Baziar(2011) (R^2=0.64)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

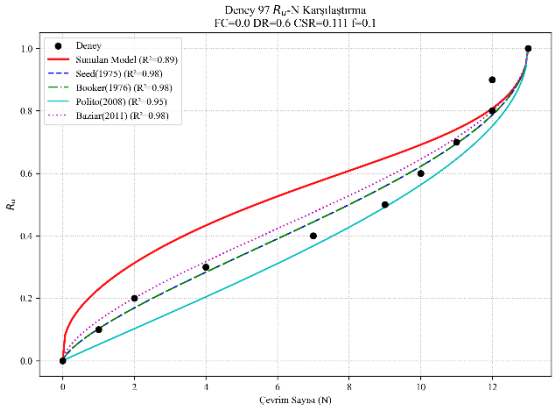

Deney 90 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.90)
Seed(1975) (R^2=0.66)
Booker(1976) (R^2=0.66)
Polito(2008) (R^2=0.44)
Baziar(2011) (R^2=0.75)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

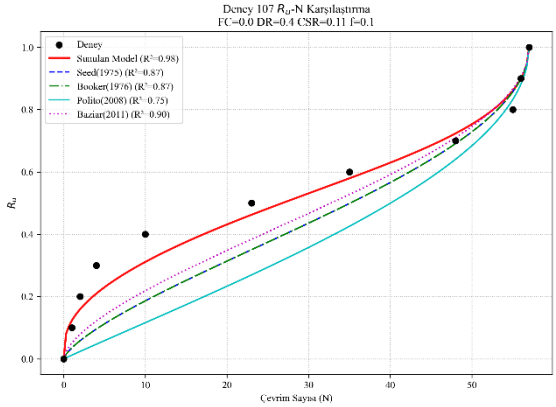

Deney 91 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.35 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.76)
Booker(1976) (R^2=0.76)
Polito(2008) (R^2=0.57)
Baziar(2011) (R^2=0.83)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

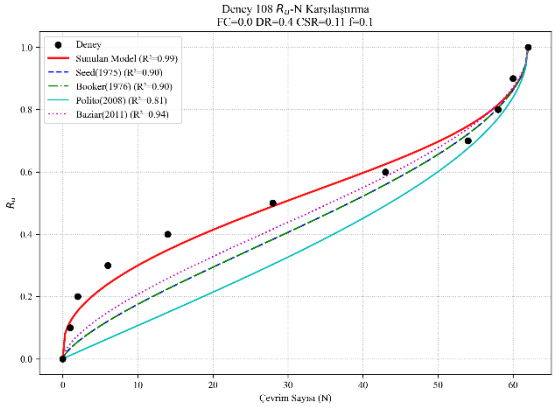

Deney 93 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.91)
Seed(1975) (R^2=0.61)
Booker(1976) (R^2=0.61)
Polito(2008) (R^2=0.38)
Baziar(2011) (R^2=0.70)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

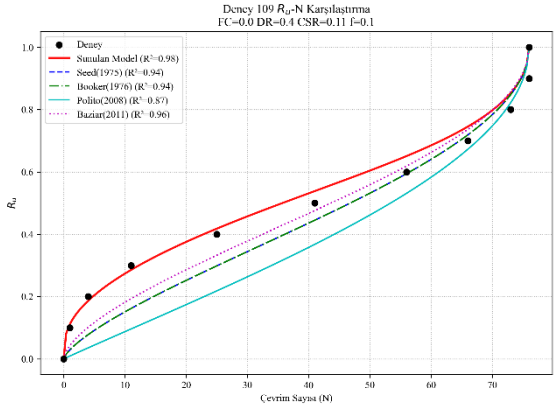

Deney 94 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.95)
Seed(1975) (R^2=0.72)
Booker(1976) (R^2=0.72)
Polito(2008) (R^2=0.51)
Baziar(2011) (R^2=0.79)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

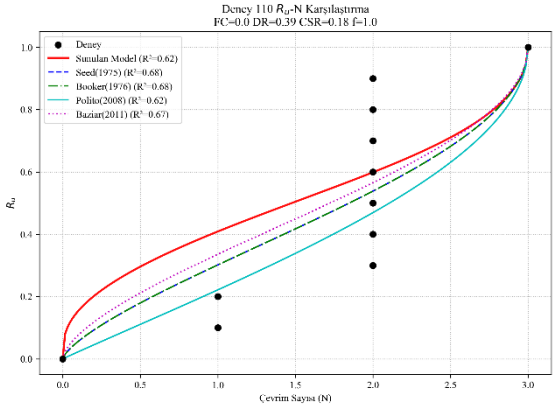

Deney 95 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.35 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.94)
Seed(1975) (R^2=0.72)
Booker(1976) (R^2=0.72)
Polito(2008) (R^2=0.51)
Baziar(2011) (R^2=0.79)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

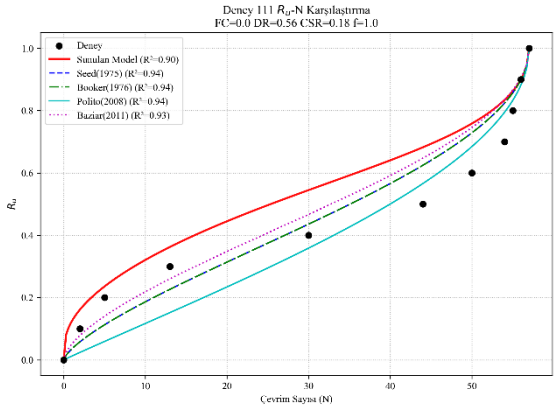

Deney 97 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.111 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.89)
Seed(1975) (R^2=0.98)
Booker(1976) (R^2=0.98)
Polito(2008) (R^2=0.95)
Baziar(2011) (R^2=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

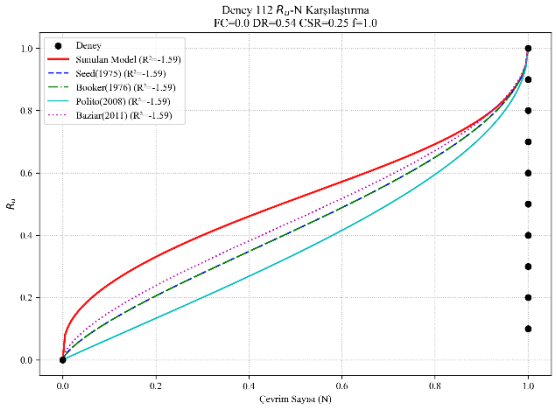

Deney 107 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.75)
Baziar(2011) (R^2=0.90)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

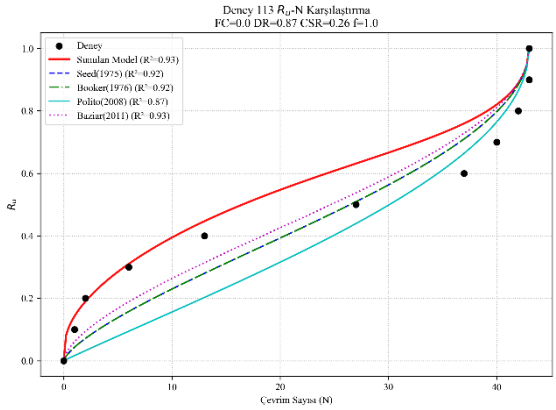

Deney 108 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.81)
Baziar(2011) (R^2=0.94)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

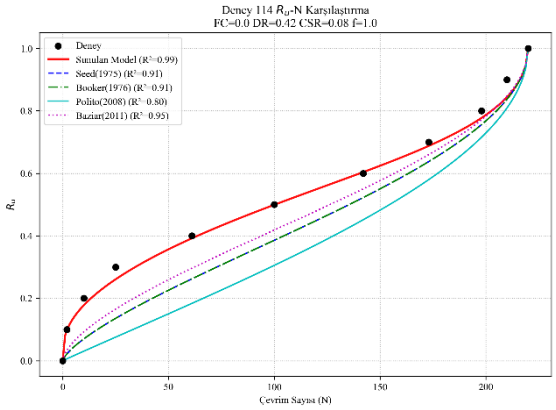

Deney 109 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.87)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

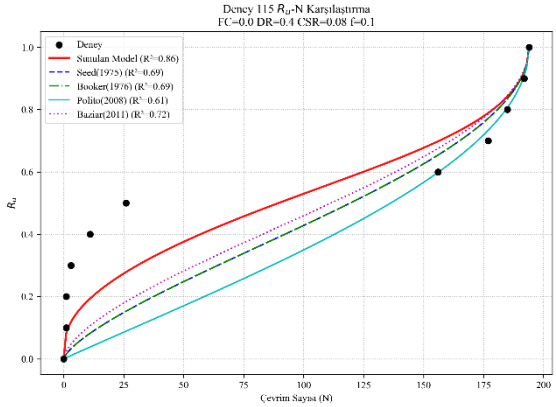

Deney 110 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.39 CSR=0.18 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.62)
Seed(1975) (R^2=0.68)
Booker(1976) (R^2=0.68)
Polito(2008) (R^2=0.62)
Baziar(2011) (R^2=0.67)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

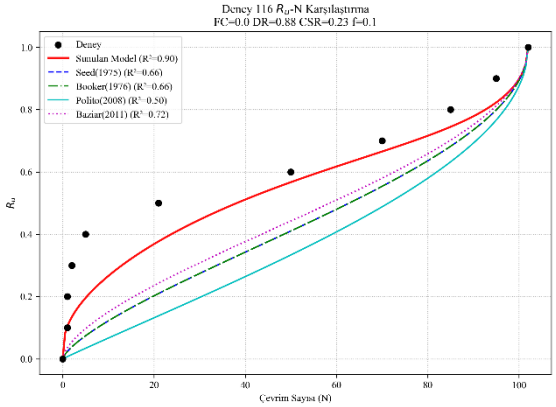

Deney 111 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.56 CSR=0.18 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.90)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.93)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

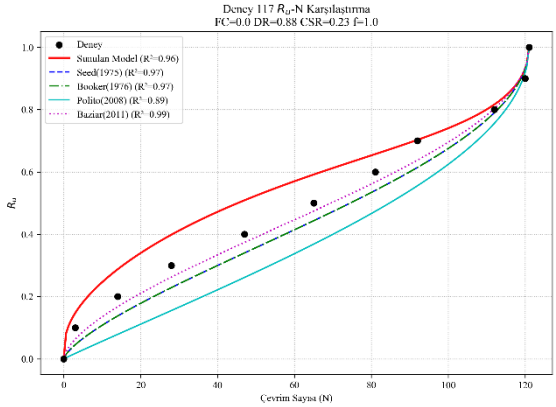

Deney 112 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.54 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=-1.59)
Seed(1975) (R^2=-1.59)
Booker(1976) (R^2=-1.59)
Polito(2008) (R^2=-1.59)
Baziar(2011) (R^2=-1.59)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

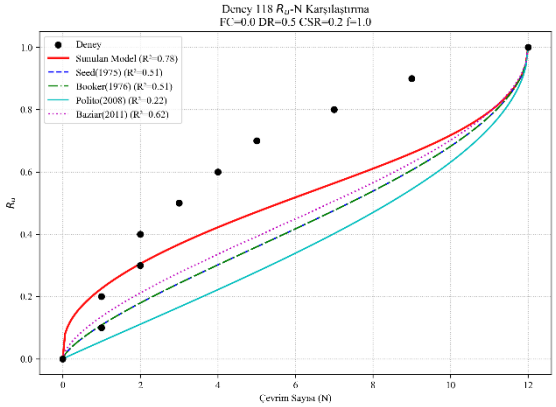

Deney 113 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.87 CSR=0.26 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.93)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.87)
Baziar(2011) (R^2=0.93)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

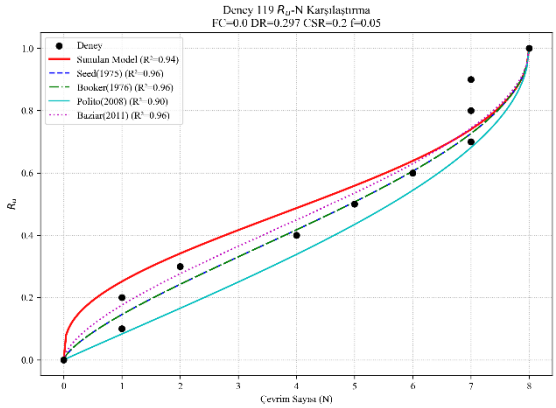

Deney 114 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.42 CSR=0.08 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.91)
Booker(1976) (R^2=0.91)
Polito(2008) (R^2=0.80)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

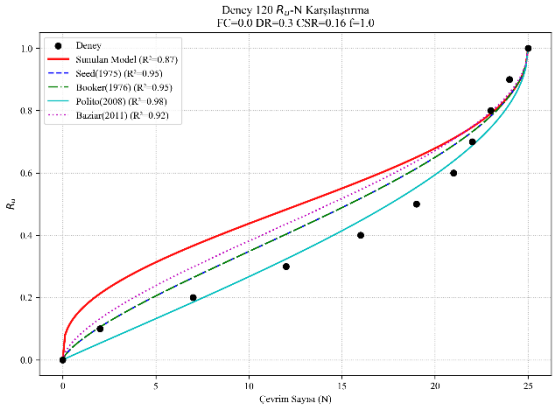

Deney 115 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.08 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.86)
Seed(1975) (R^2=0.69)
Booker(1976) (R^2=0.69)
Polito(2008) (R^2=0.61)
Baziar(2011) (R^2=0.72)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

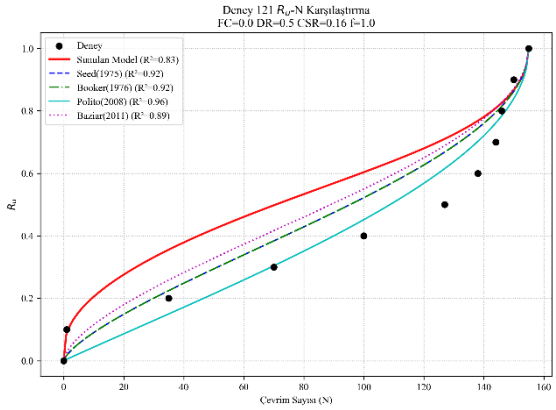

Deney 116 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.88 CSR=0.23 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.90)
Seed(1975) (R^2=0.66)
Booker(1976) (R^2=0.66)
Polito(2008) (R^2=0.50)
Baziar(2011) (R^2=0.72)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

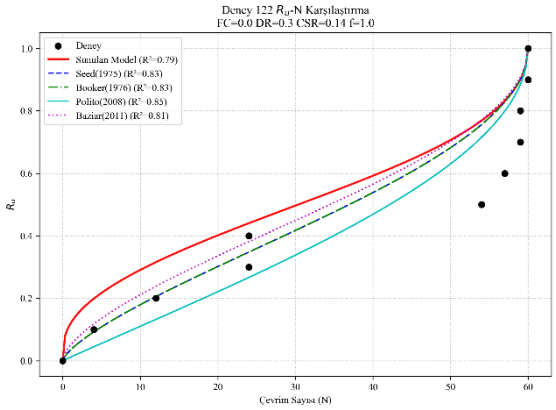

Deney 117 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.88 CSR=0.23 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.97)
Booker(1976) (R^2=0.97)
Polito(2008) (R^2=0.89)
Baziar(2011) (R^2=0.99)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

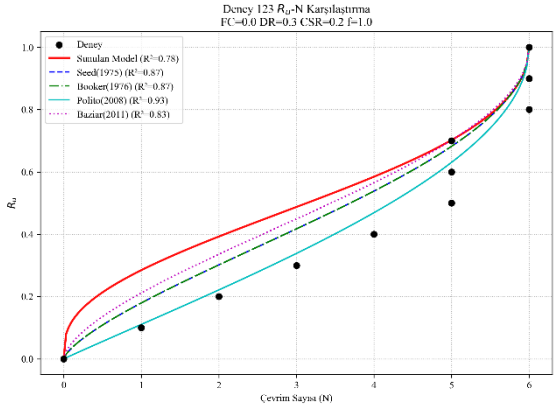

Deney 118 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.78)
Seed(1975) (R^2=0.51)
Booker(1976) (R^2=0.51)
Polito(2008) (R^2=0.22)
Baziar(2011) (R^2=0.62)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

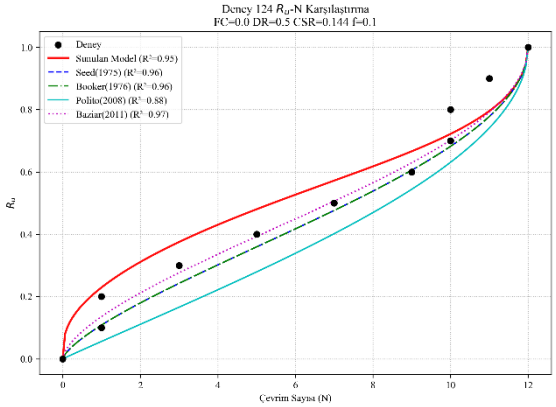

Deney 119 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.297 CSR=0.2 f=0.05
Deney
Sunulan Model (R^2=0.94)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.90)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

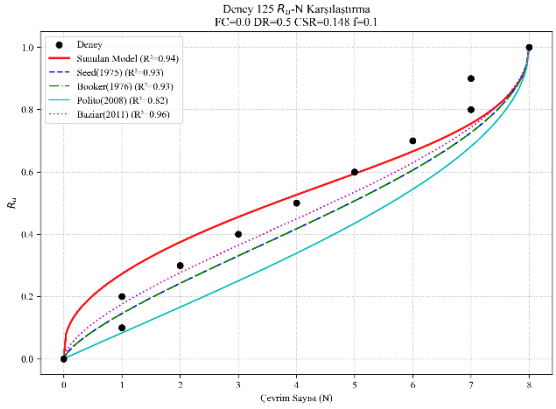

Deney 120 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.16 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.87)
Seed(1975) (R^2=0.95)
Booker(1976) (R^2=0.95)
Polito(2008) (R^2=0.98)
Baziar(2011) (R^2=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

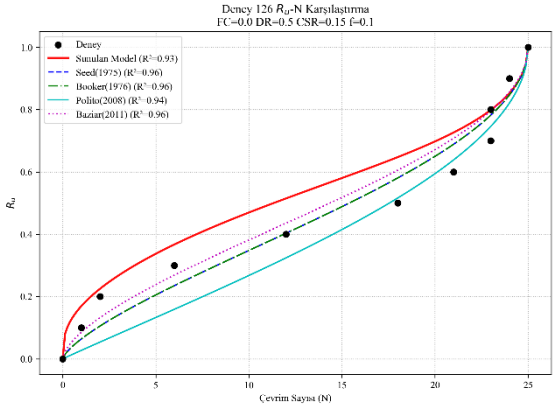

Deney 121 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.16 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.83)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.96)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

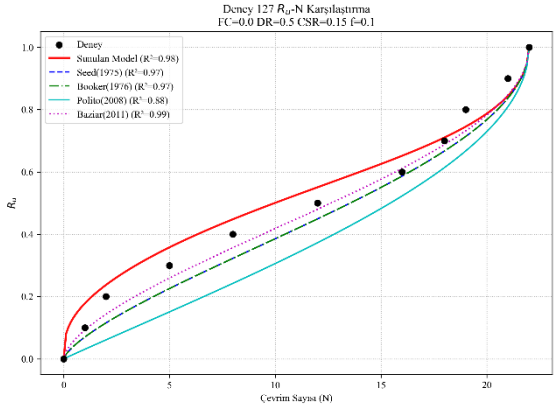

Deney 122 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.14 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.79)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.85)
Baziar(2011) (R^2=0.81)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

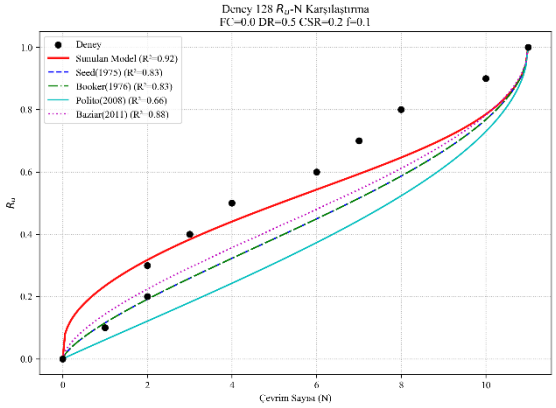

Deney 123 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.78)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.93)
Baziar(2011) (R^2=0.83)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

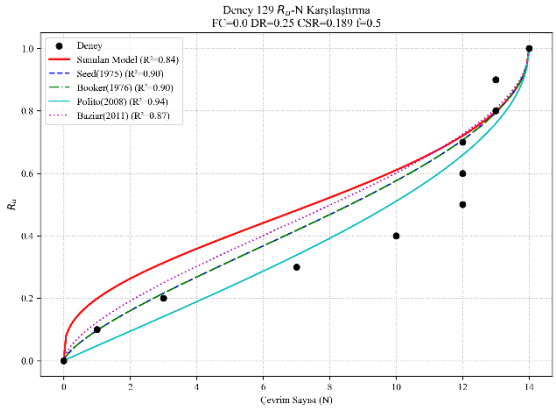

Deney 124 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.144 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.95)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.88)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

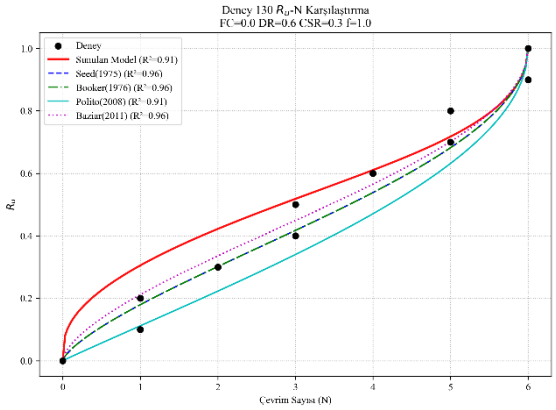

Deney 125 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.148 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.94)
Seed(1975) (R^2=0.93)
Booker(1976) (R^2=0.93)
Polito(2008) (R^2=0.82)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

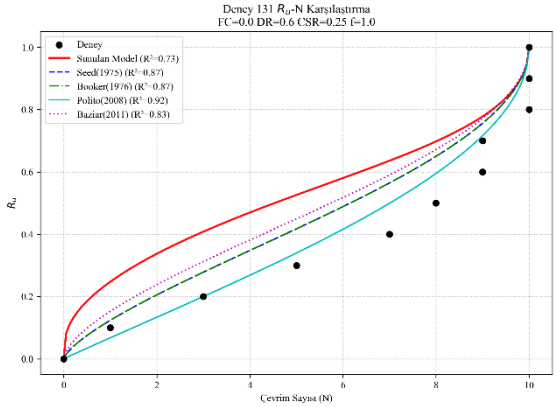

Deney 126 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.15 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.93)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

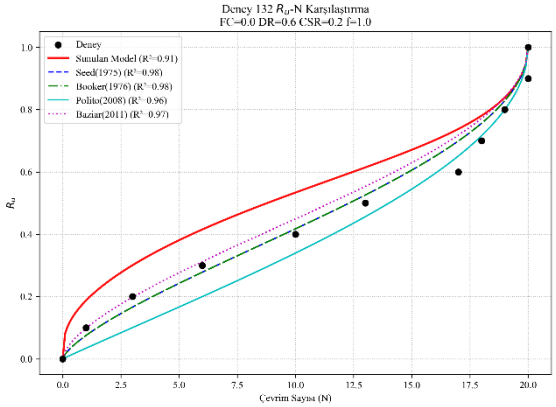

Deney 127 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.15 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.97)
Booker(1976) (R^2=0.97)
Polito(2008) (R^2=0.88)
Baziar(2011) (R^2=0.99)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

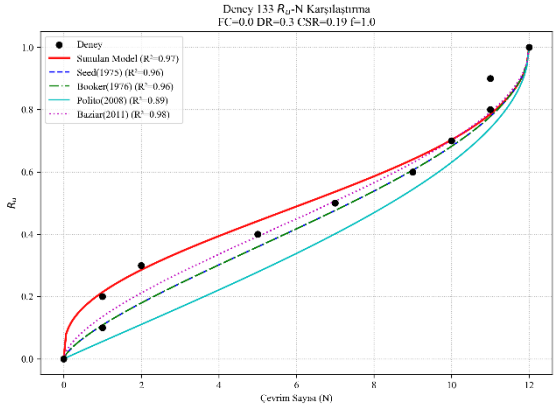

Deney 128 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.2 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.66)
Baziar(2011) (R^2=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

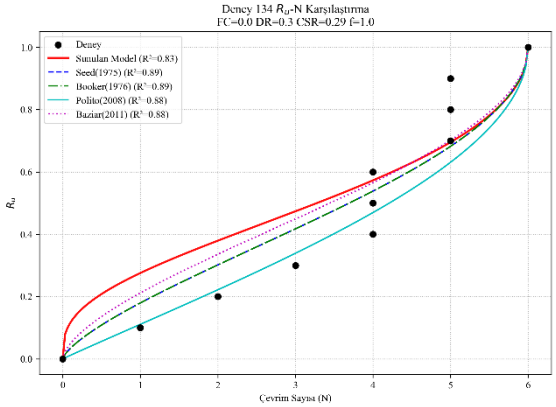

Deney 129 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.189 f=0.5
Deney
Sunulan Model (R^2=0.84)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.87)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

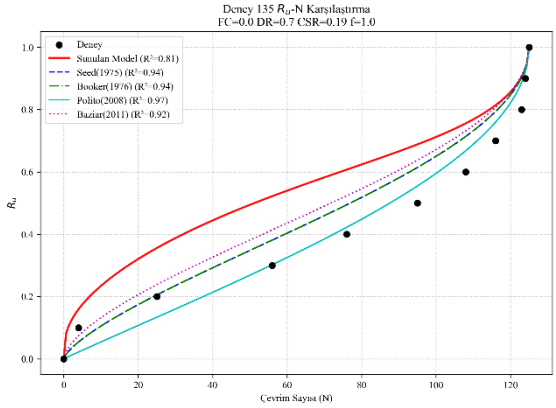

Deney 130 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.91)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.91)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

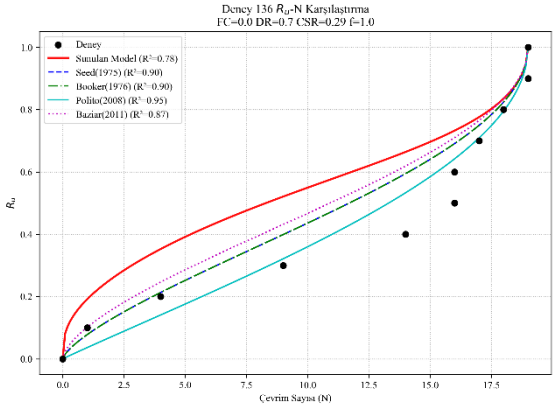

Deney 131 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.25 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.73)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.92)
Baziar(2011) (R^2=0.83)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

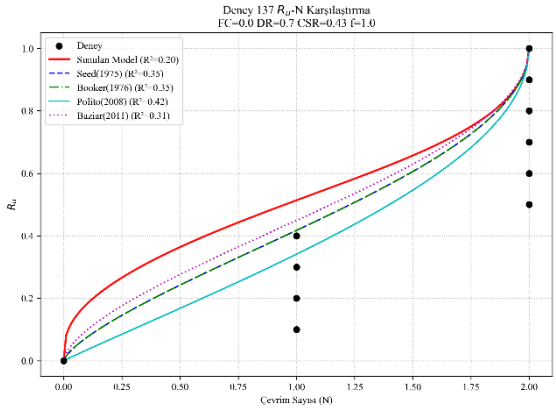

Deney 132 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.91)
Seed(1975) (R^2=0.98)
Booker(1976) (R^2=0.98)
Polito(2008) (R^2=0.96)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

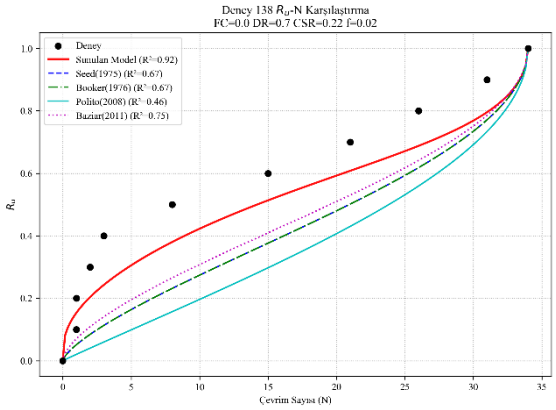

Deney 133 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.19 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.89)
Baziar(2011) (R^2=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

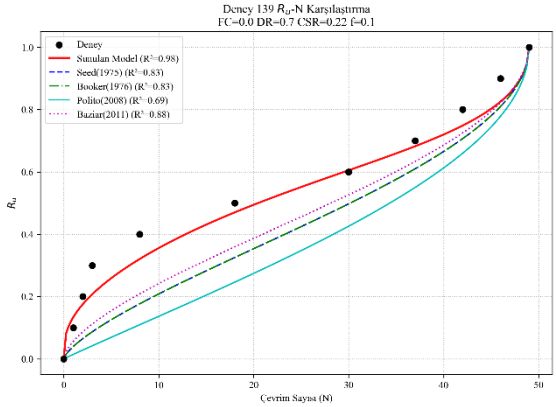

Deney 134 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.29 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.83)
Seed(1975) (R^2=0.89)
Booker(1976) (R^2=0.89)
Polito(2008) (R^2=0.88)
Baziar(2011) (R^2=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

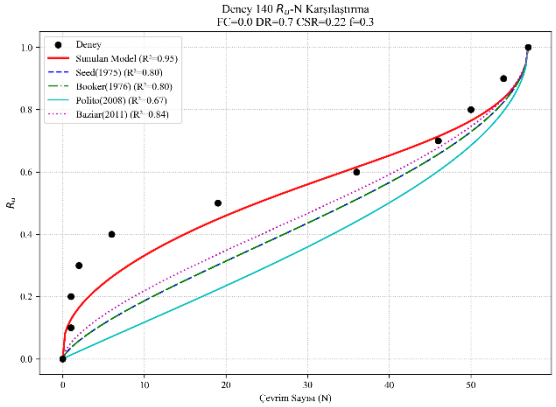

Deney 135 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.19 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.81)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.97)
Baziar(2011) (R^2=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

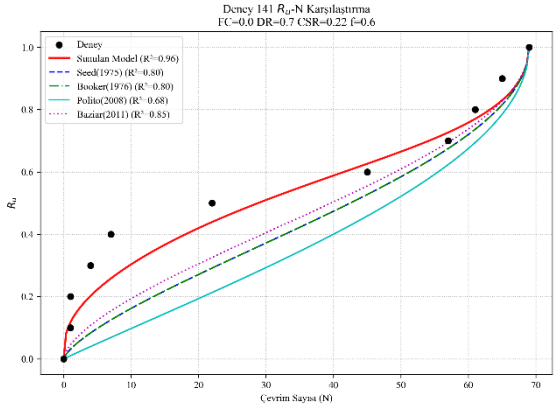

Deney 136 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.29 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.78)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.95)
Baziar(2011) (R^2=0.87)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

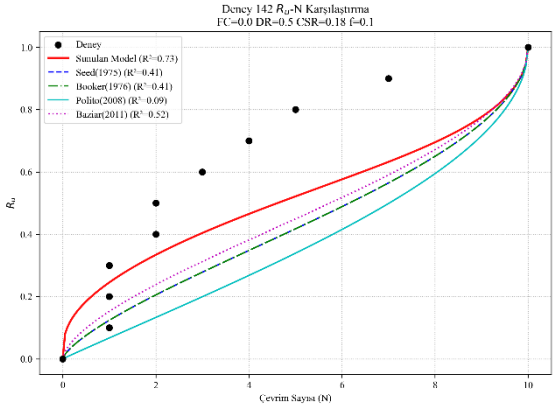

Deney 137 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.43 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.20)
Seed(1975) (R^2=0.35)
Booker(1976) (R^2=0.35)
Polito(2008) (R^2=0.42)
Baziar(2011) (R^2=0.31)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

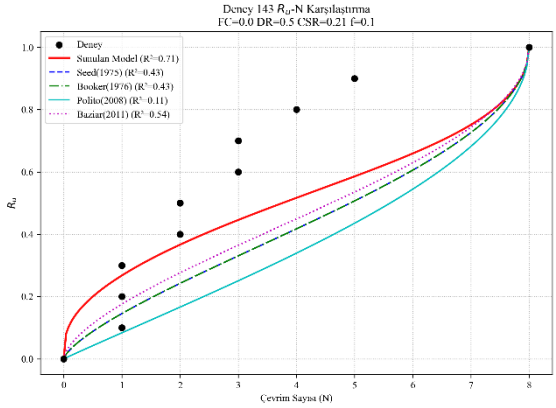

Deney 138 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.02
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.67)
Booker(1976) (R^2=0.67)
Polito(2008) (R^2=0.46)
Baziar(2011) (R^2=0.75)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

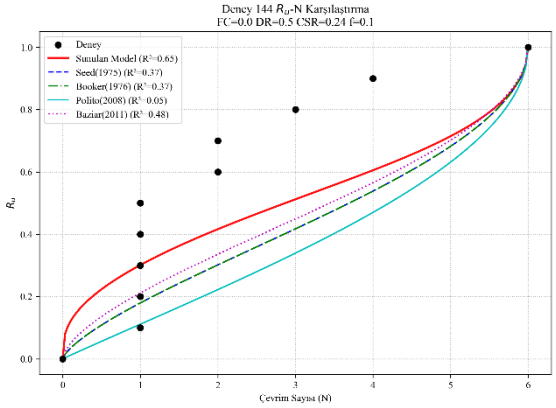

Deney 139 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.69)
Baziar(2011) (R^2=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

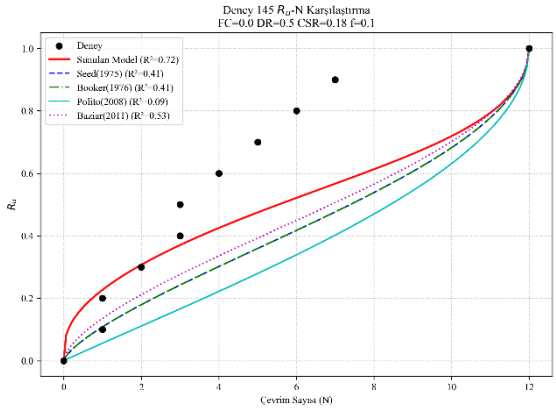

Deney 140 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.3
Deney
Sunulan Model (R^2=0.95)
Seed(1975) (R^2=0.80)
Booker(1976) (R^2=0.80)
Polito(2008) (R^2=0.67)
Baziar(2011) (R^2=0.84)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

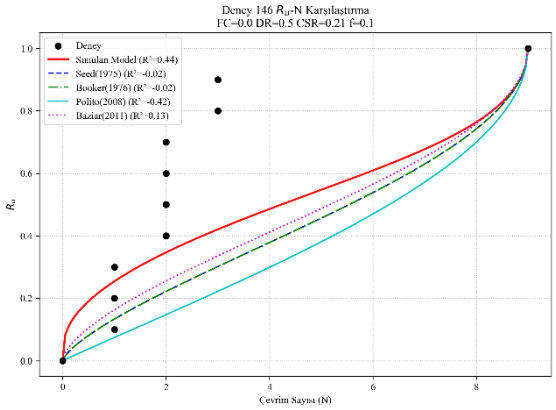

Deney 141 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.6
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.80)
Booker(1976) (R^2=0.80)
Polito(2008) (R^2=0.68)
Baziar(2011) (R^2=0.85)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

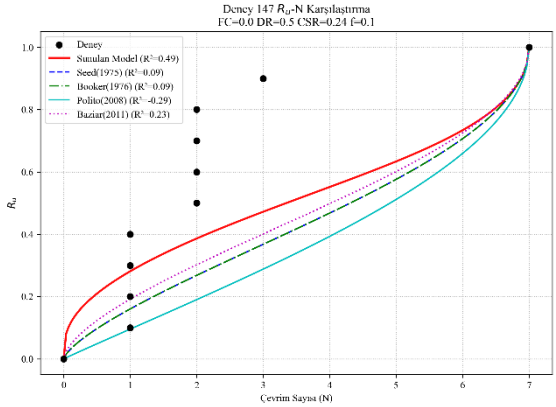

Deney 142 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.73)
Seed(1975) (R^2=0.41)
Booker(1976) (R^2=0.41)
Polito(2008) (R^2=0.09)
Baziar(2011) (R^2=0.52)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

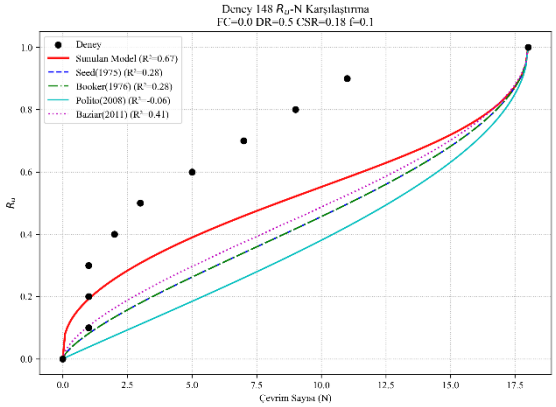

Deney 143 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.71)
Seed(1975) (R^2=0.43)
Booker(1976) (R^2=0.43)
Polito(2008) (R^2=0.11)
Baziar(2011) (R^2=0.54)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

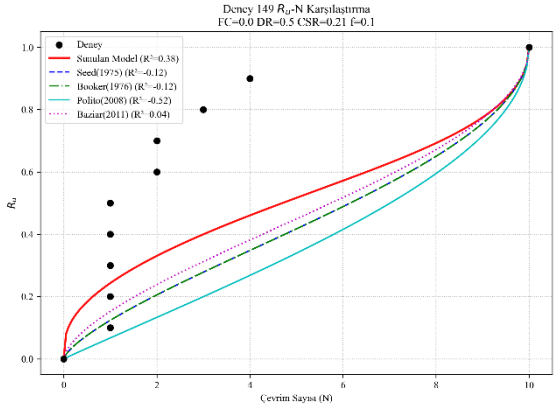

Deney 144 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.65)
Seed(1975) (R^2=0.37)
Booker(1976) (R^2=0.37)
Polito(2008) (R^2=0.05)
Baziar(2011) (R^2=0.48)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

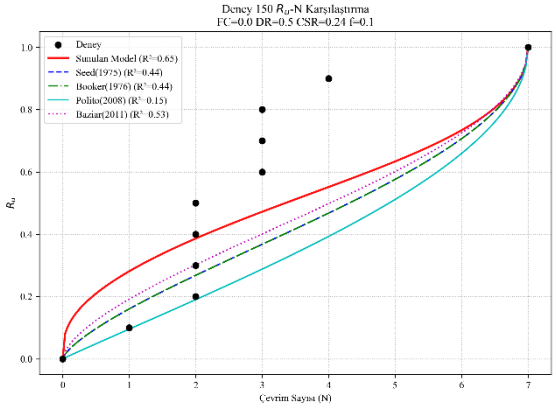

Deney 145 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.72)
Seed(1975) (R^2=0.41)
Booker(1976) (R^2=0.41)
Polito(2008) (R^2=0.09)
Baziar(2011) (R^2=0.53)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

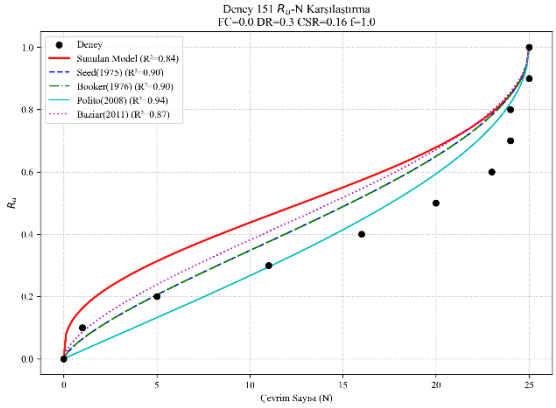

Deney 146 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.44)
Seed(1975) (R^2=-0.02)
Booker(1976) (R^2=-0.02)
Polito(2008) (R^2=-0.42)
Baziar(2011) (R^2=0.13)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

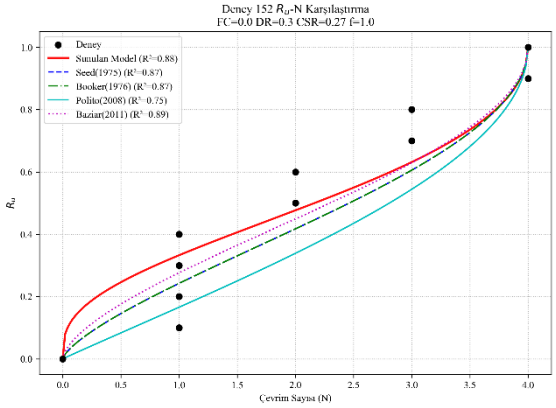

Deney 147 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.49)
Seed(1975) (R^2=-0.09)
Booker(1976) (R^2=-0.09)
Polito(2008) (R^2=-0.29)
Baziar(2011) (R^2=0.23)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

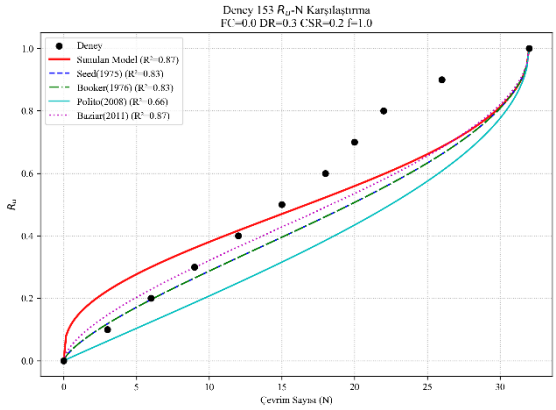

Deney 148 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.67)
Seed(1975) (R^2=-0.28)
Booker(1976) (R^2=-0.28)
Polito(2008) (R^2=-0.06)
Baziar(2011) (R^2=0.41)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

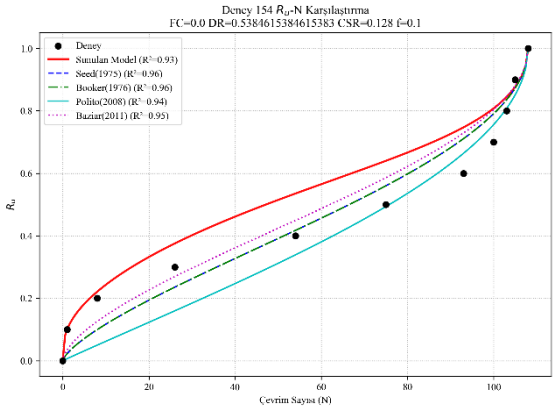

Deney 149 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.38)
Seed(1975) (R^2=-0.12)
Booker(1976) (R^2=-0.12)
Polito(2008) (R^2=-0.52)
Baziar(2011) (R^2=0.04)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

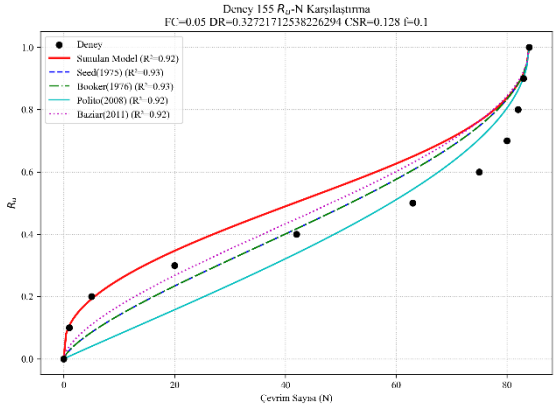

Deney 150 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.65)
Seed(1975) (R^2=0.44)
Booker(1976) (R^2=0.44)
Polito(2008) (R^2=0.15)
Baziar(2011) (R^2=0.53)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

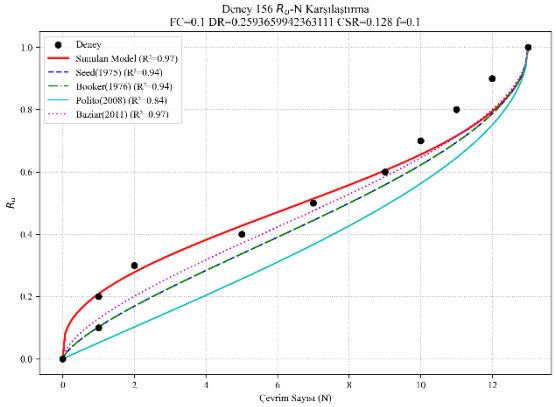

Deney 151 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.16 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.84)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.87)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

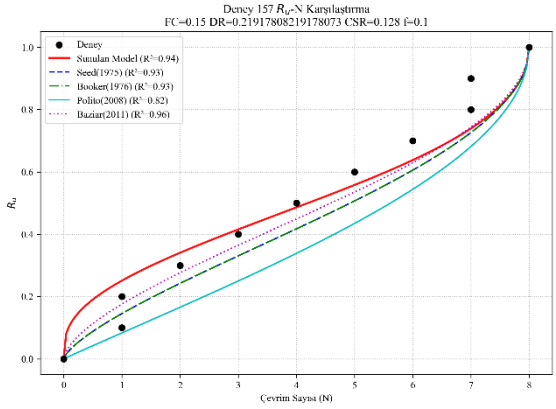

Deney 152 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.27 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.88)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.75)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

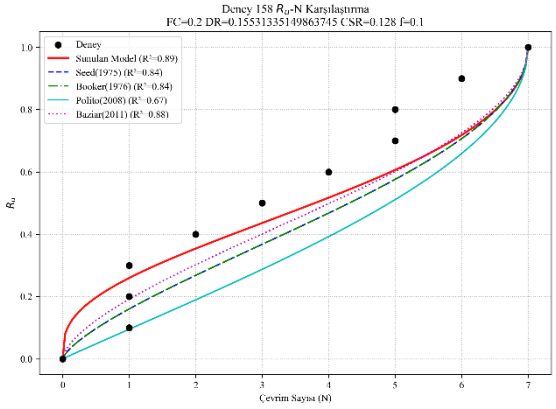

Deney 153 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.87)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.66)
Baziar(2011) (R^2=0.87)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

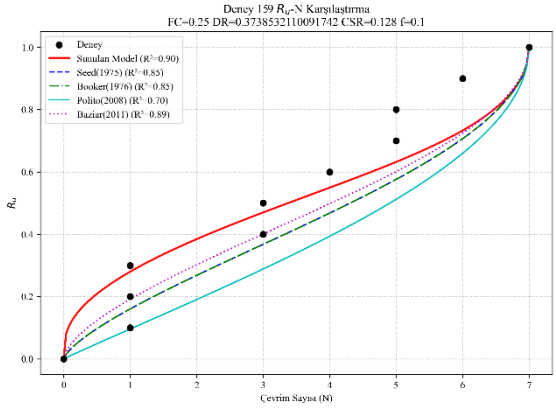

Deney 154 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5384615384615383 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.93)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.94)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

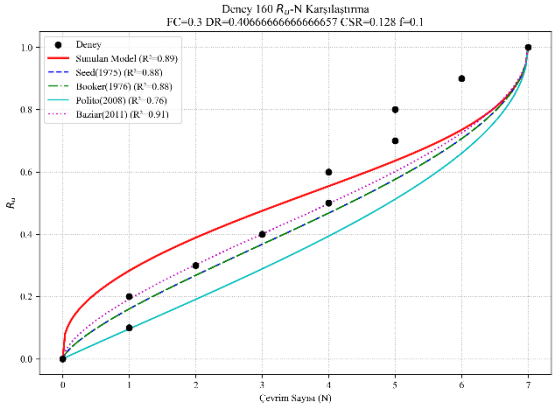

Deney 155 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.05 DR=0.32721712538226294 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.93)
Booker(1976) (R^2=0.93)
Polito(2008) (R^2=0.92)
Baziar(2011) (R^2=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

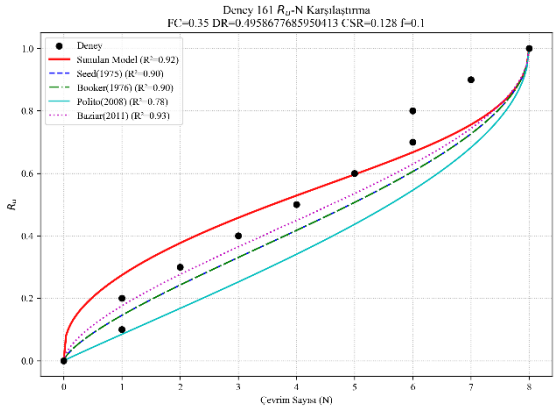

Deney 156 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.25936599423631111 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.84)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

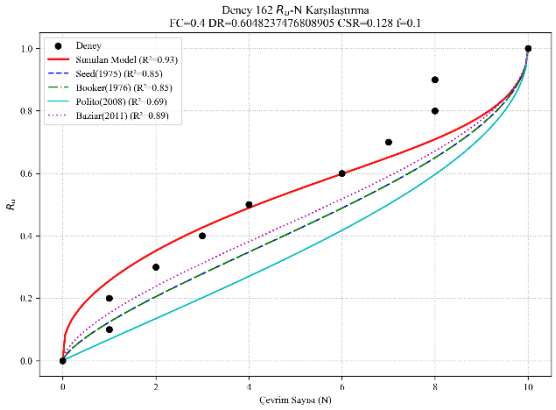

Deney 157 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.21917808219178073 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.94)
Seed(1975) (R^2=0.93)
Booker(1976) (R^2=0.93)
Polito(2008) (R^2=0.82)
Baziar(2011) (R^2=0.96)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

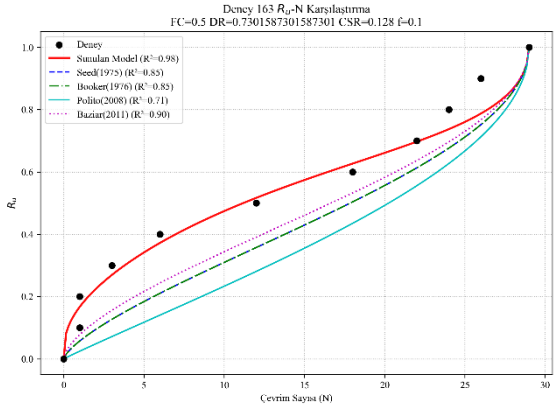

Deney 158 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.15531335149863745 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.89)
Seed(1975) (R^2=0.84)
Booker(1976) (R^2=0.84)
Polito(2008) (R^2=0.67)
Baziar(2011) (R^2=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

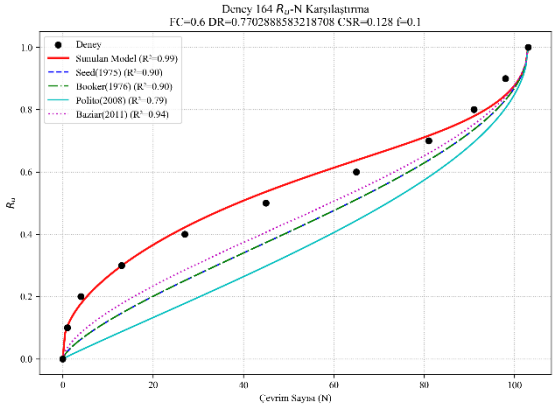

Deney 159 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.25 DR=0.3738532110091742 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.90)
Seed(1975) (R^2=0.85)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.70)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

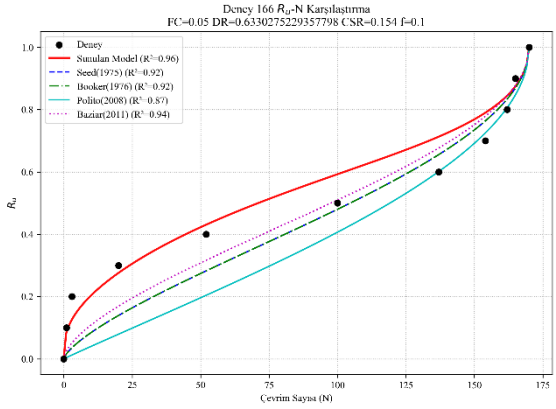

Deney 160 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.40666666666666657 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.89)
Seed(1975) (R^2=0.88)
Booker(1976) (R^2=0.88)
Polito(2008) (R^2=0.76)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

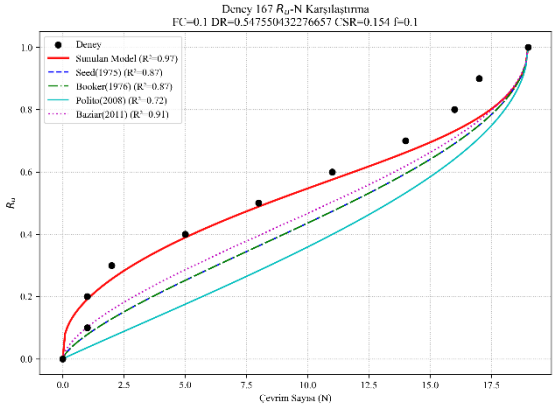

Deney 161 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.35 DR=0.4958677685950413 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.78)
Baziar(2011) (R^2=0.93)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

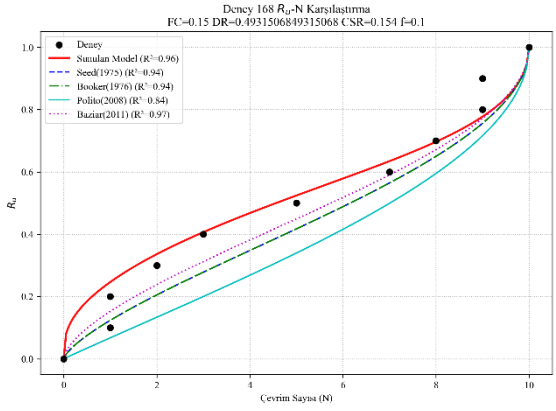

Deney 162 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.4 DR=0.6048237476808905 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.93)
Seed(1975) (R^2=0.85)
Booker(1976) (R^2=0.85)
Polito(2008) (R^2=0.69)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

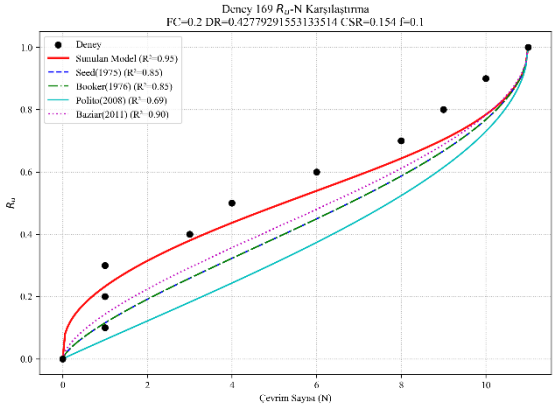

Deney 163 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.7301587301587301 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.85)
Booker(1976) (R^2=0.85)
Polito(2008) (R^2=0.71)
Baziar(2011) (R^2=0.90)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

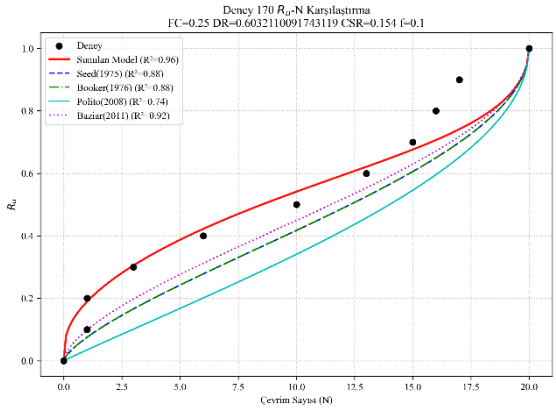

Deney 164 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.6 DR=0.7702888583218708 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.90)
Booker(1976) (R^2=0.90)
Polito(2008) (R^2=0.79)
Baziar(2011) (R^2=0.94)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

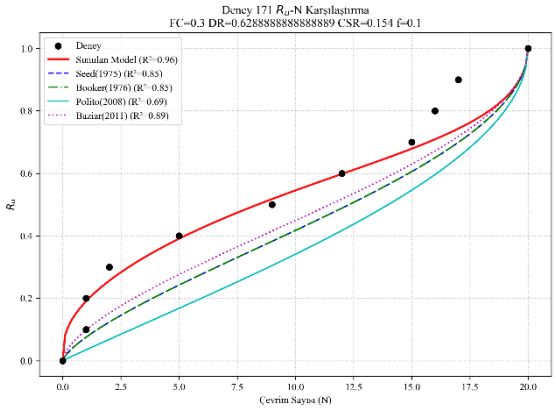

Deney 166 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.05 DR=0.6330275229357798 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.87)
Baziar(2011) (R^2=0.94)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

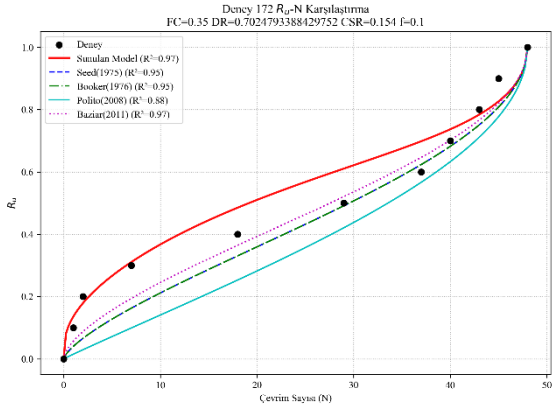

Deney 167 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.5475504132276657 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.72)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

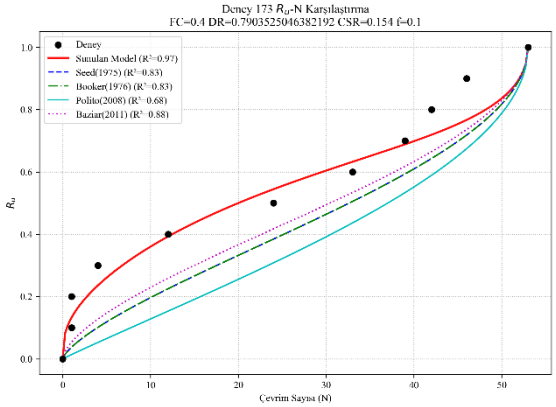

Deney 168 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4931506849315068 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.84)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

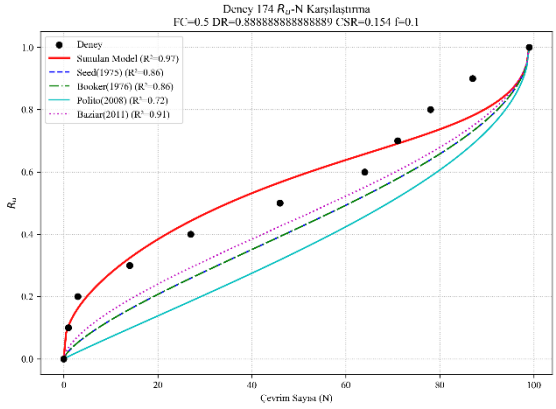

Deney 169 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.4277929155313351 4 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.95)
Seed(1975) (R^2=0.85)
Booker(1976) (R^2=0.85)
Polito(2008) (R^2=0.69)
Baziar(2011) (R^2=0.90)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

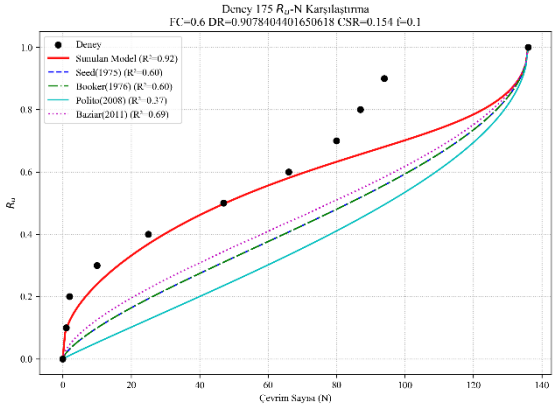

Deney 170 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.25 DR=0.6032110091743119 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.88)
Booker(1976) (R^2=0.88)
Polito(2008) (R^2=0.74)
Baziar(2011) (R^2=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

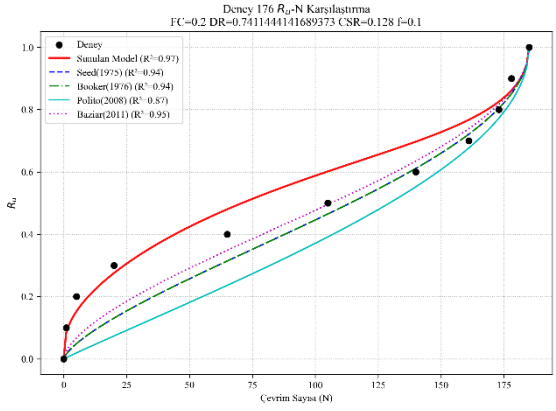

Deney 171 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.6288888888888889 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.85)
Booker(1976) (R^2=0.85)
Polito(2008) (R^2=0.69)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

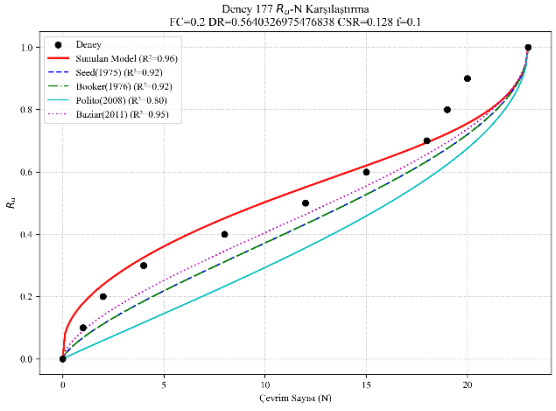

Deney 172 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.35 DR=0.7024793388429752 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.95)
Booker(1976) (R^2=0.95)
Polito(2008) (R^2=0.88)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

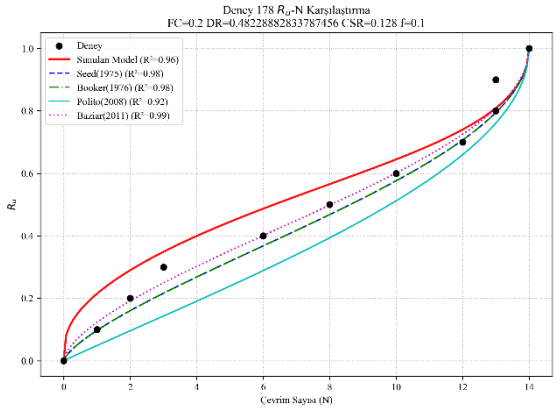

Deney 173 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.4 DR=0.7903525046382192 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.68)
Baziar(2011) (R^2=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

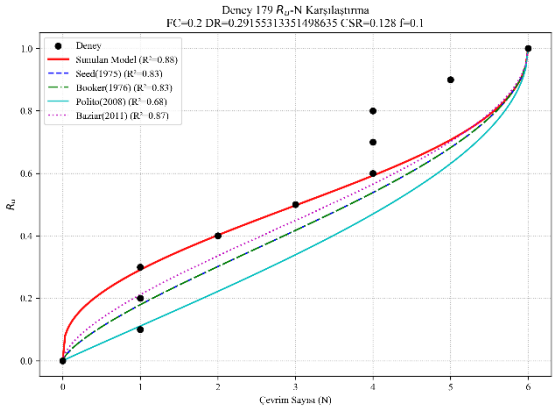

Deney 174 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.8888888888888889 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.86)
Booker(1976) (R^2=0.86)
Polito(2008) (R^2=0.72)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

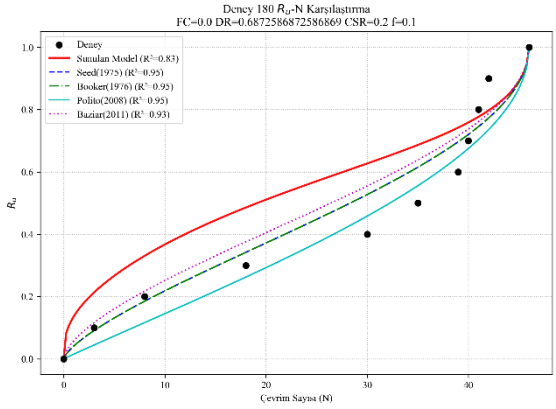

Deney 175 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.6 DR=0.9078404401650618 CSR=0.154 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.92)
Seed(1975) (R^2=0.60)
Booker(1976) (R^2=0.60)
Polito(2008) (R^2=0.37)
Baziar(2011) (R^2=0.69)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

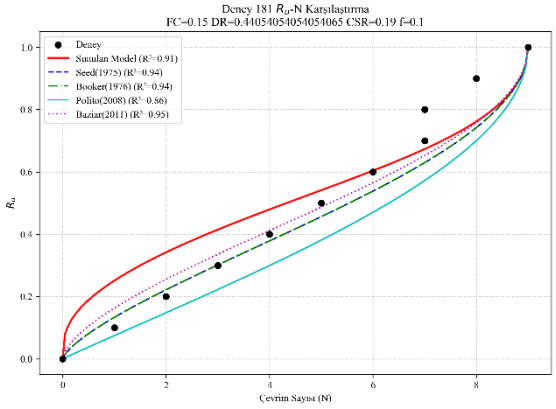

Deney 176 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.7411444141689373 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.87)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

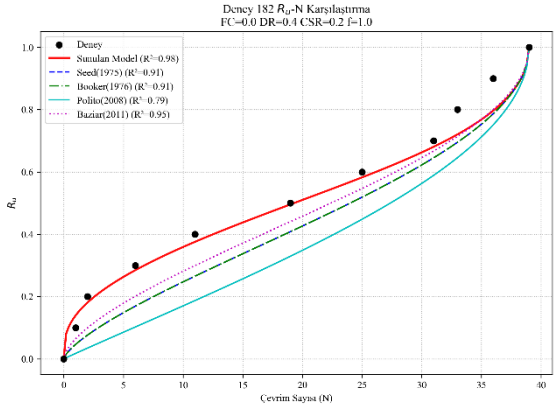

Deney 177 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5640326975476838 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.80)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

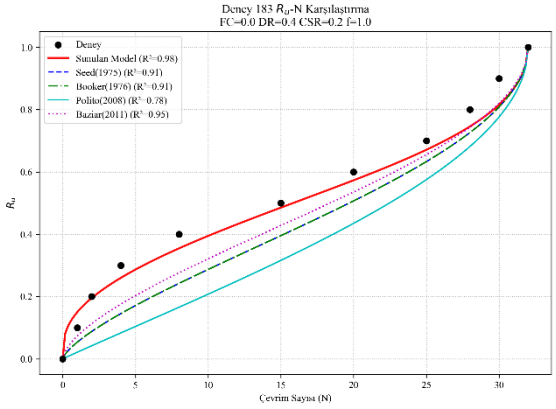

Deney 178 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.4822888282833787456 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.96)
Seed(1975) (R^2=0.98)
Booker(1976) (R^2=0.98)
Polito(2008) (R^2=0.92)
Baziar(2011) (R^2=0.99)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

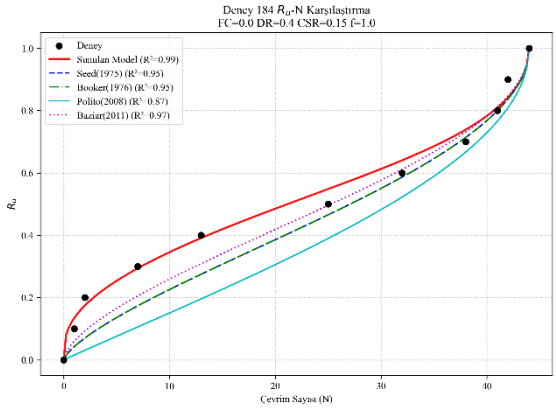

Deney 179 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.29155313351498635 CSR=0.128 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.88)
Seed(1975) (R^2=0.83)
Booker(1976) (R^2=0.83)
Polito(2008) (R^2=0.68)
Baziar(2011) (R^2=0.87)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

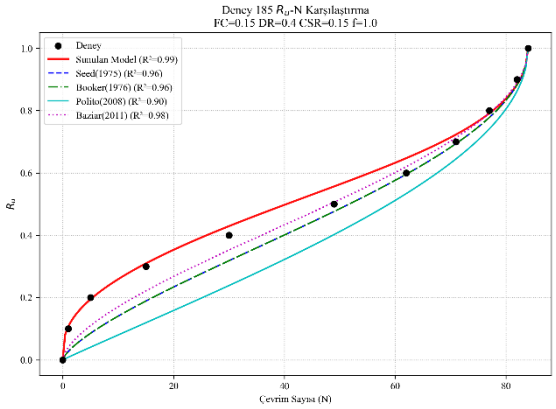

Deney 180 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6872586872586869 CSR=0.2 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.83)
Seed(1975) (R^2=0.95)
Booker(1976) (R^2=0.95)
Polito(2008) (R^2=0.95)
Baziar(2011) (R^2=0.93)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

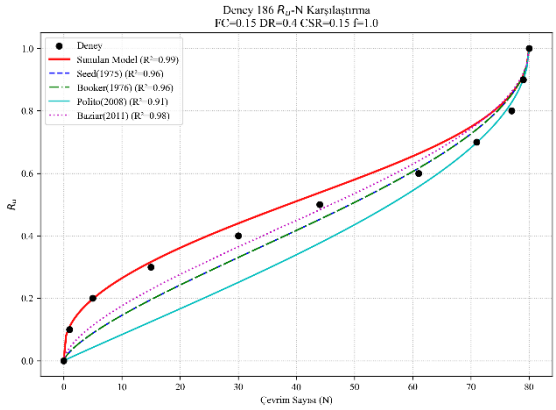

Deney 181 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.44054054054054065 CSR=0.19 f=0.1
Deney
Sunulan Model (R^2=0.91)
Seed(1975) (R^2=0.94)
Booker(1976) (R^2=0.94)
Polito(2008) (R^2=0.86)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

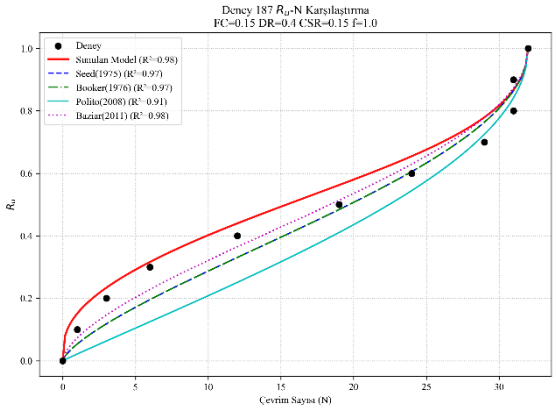

Deney 182 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.91)
Booker(1976) (R^2=0.91)
Polito(2008) (R^2=0.79)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

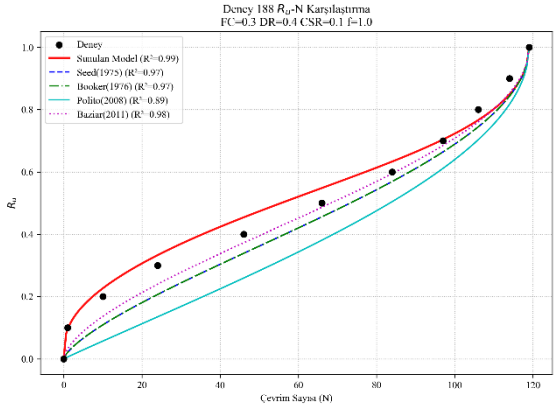

Deney 183 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.91)
Booker(1976) (R^2=0.91)
Polito(2008) (R^2=0.78)
Baziar(2011) (R^2=0.95)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

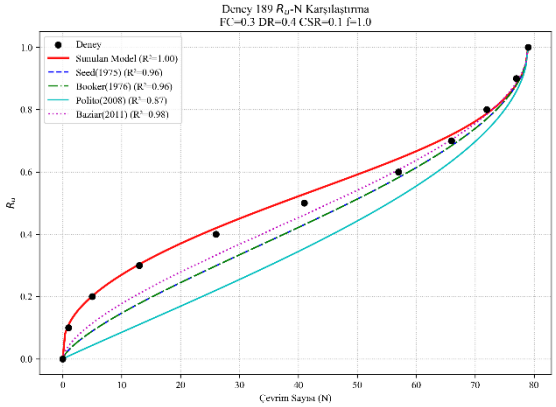

Deney 184 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.95)
Booker(1976) (R^2=0.95)
Polito(2008) (R^2=0.87)
Baziar(2011) (R^2=0.97)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

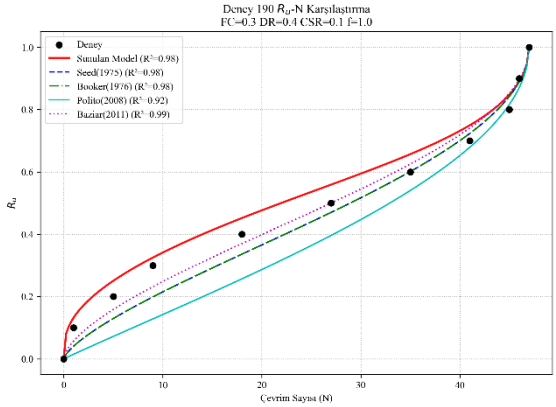

Deney 185 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.96)
Booker(1976) (R^2=0.96)
Polito(2008) (R^2=0.90)
Baziar(2011) (R^2=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

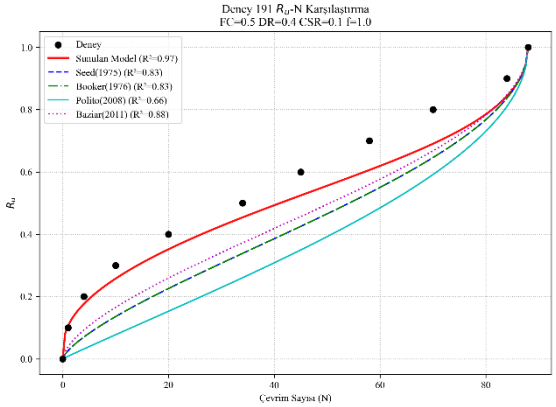

Deney 186 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.91)
Baziar(2011) (R²=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

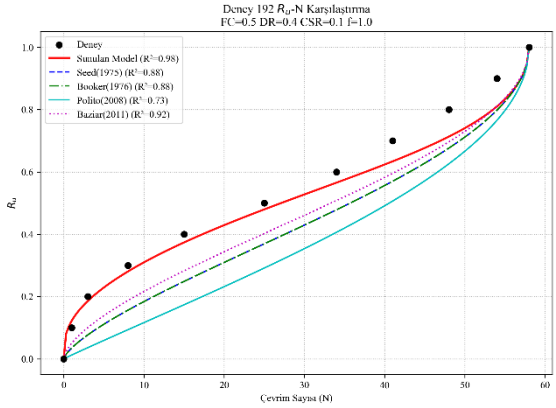

Deney 187 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.91)
Baziar(2011) (R²=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

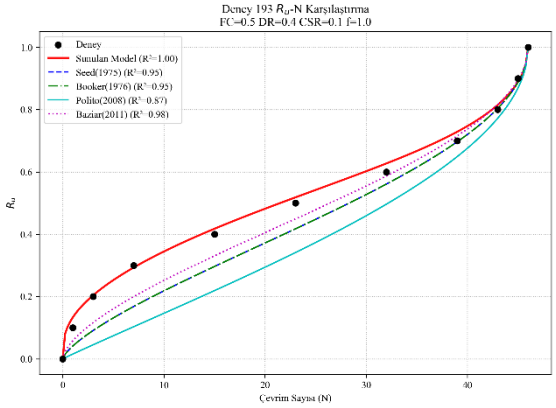

Deney 188 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.89)
Baziar(2011) (R²=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

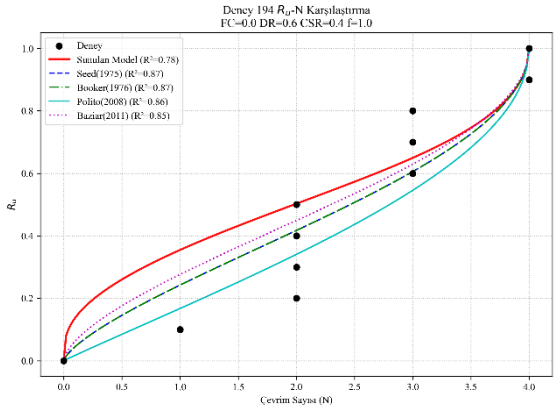

Deney 189 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=1.00)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

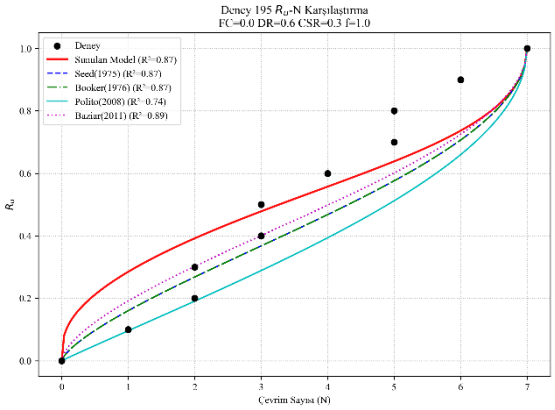

Deney 190 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.99)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

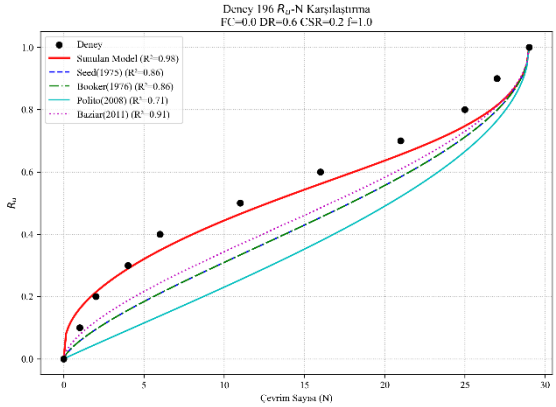

Deney 191 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.66)
Baziar(2011) (R²=0.88)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

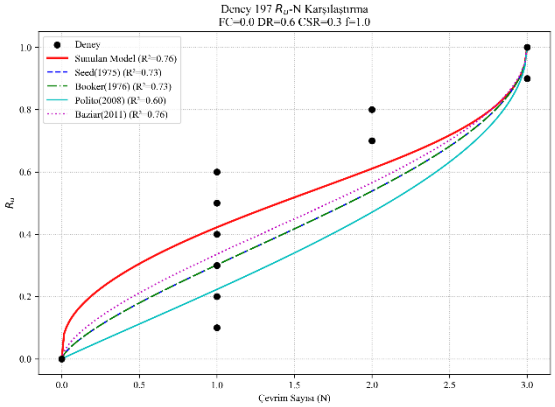

Deney 192 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.88)
Booker(1976) (R²=0.88)
Polito(2008) (R²=0.73)
Baziar(2011) (R²=0.92)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

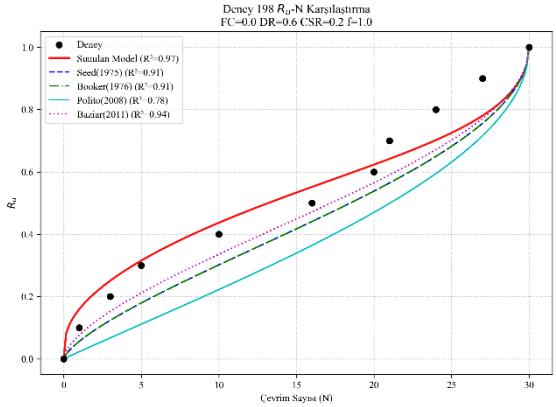

Deney 193 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R²=1.00)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

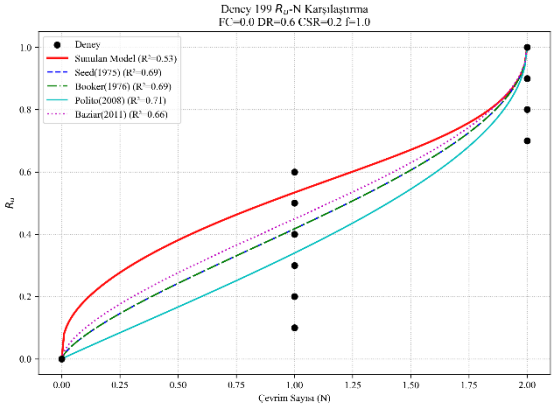

Deney 194 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.4 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.78)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.86)
Baziar(2011) (R^2=0.85)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

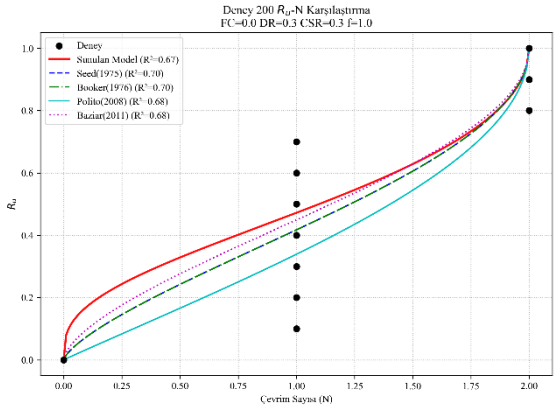

Deney 195 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.87)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.74)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

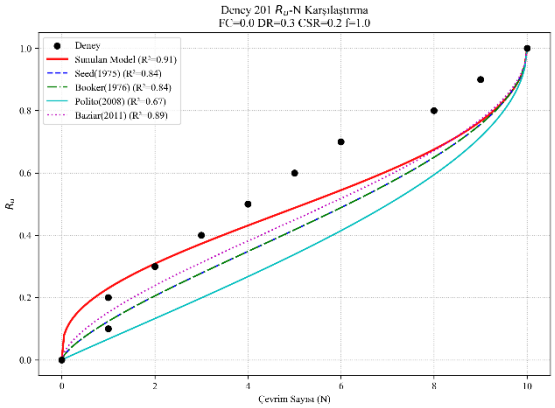

Deney 196 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.98)
Seed(1975) (R^2=0.86)
Booker(1976) (R^2=0.86)
Polito(2008) (R^2=0.71)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

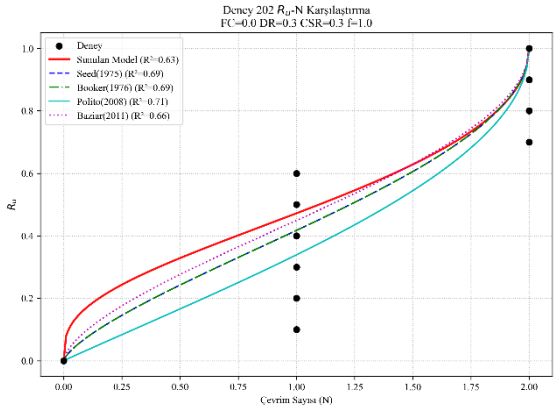

Deney 197 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.76)
Seed(1975) (R^2=0.73)
Booker(1976) (R^2=0.73)
Polito(2008) (R^2=0.60)
Baziar(2011) (R^2=0.76)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

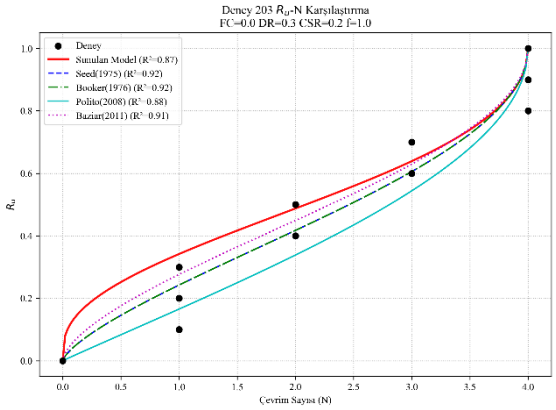

Deney 198 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.97)
Seed(1975) (R^2=0.91)
Booker(1976) (R^2=0.91)
Polito(2008) (R^2=0.78)
Baziar(2011) (R^2=0.94)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

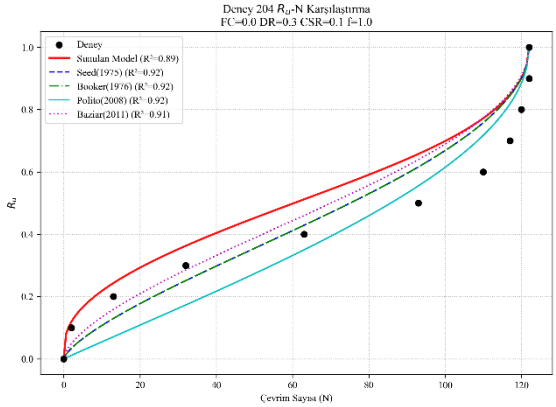

Deney 199 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.53)
Seed(1975) (R^2=0.69)
Booker(1976) (R^2=0.69)
Polito(2008) (R^2=0.71)
Baziar(2011) (R^2=0.66)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

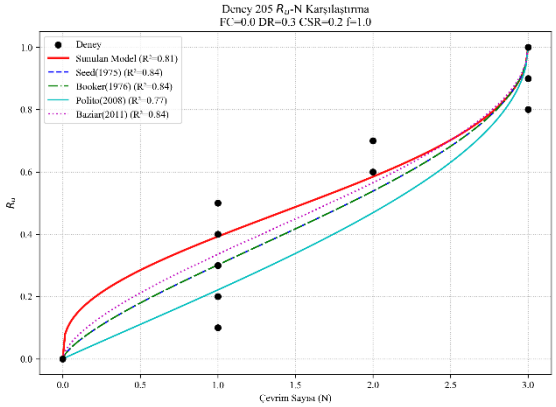

Deney 200 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.67)
Seed(1975) (R^2=0.70)
Booker(1976) (R^2=0.70)
Polito(2008) (R^2=0.68)
Baziar(2011) (R^2=0.68)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

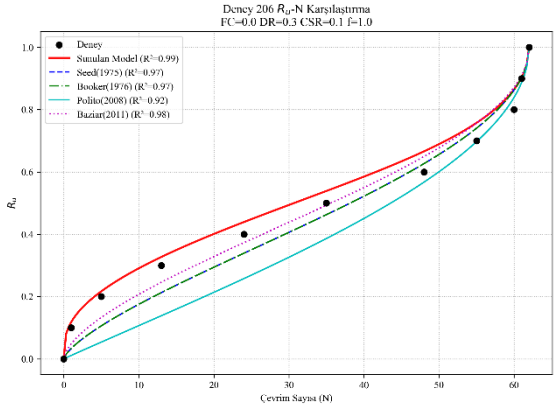

Deney 201 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.91)
Seed(1975) (R^2=0.84)
Booker(1976) (R^2=0.84)
Polito(2008) (R^2=0.67)
Baziar(2011) (R^2=0.89)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

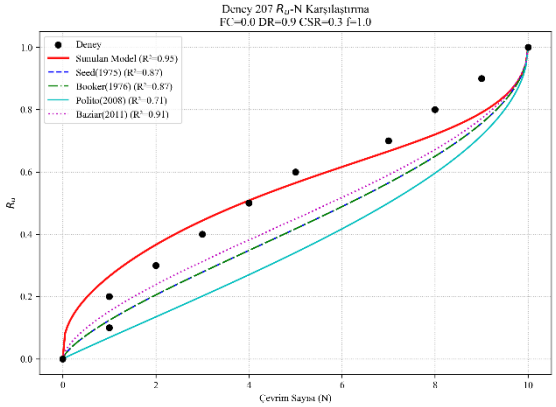

Deney 202 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.63)
Seed(1975) (R^2=0.69)
Booker(1976) (R^2=0.69)
Polito(2008) (R^2=0.71)
Baziar(2011) (R^2=0.66)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

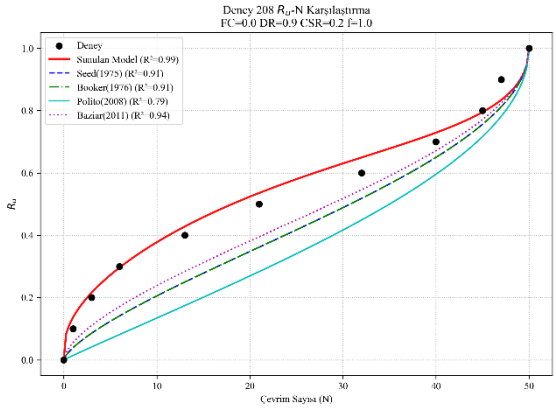

Deney 203 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.87)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.88)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)


Deney 204 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.89)
Seed(1975) (R^2=0.92)
Booker(1976) (R^2=0.92)
Polito(2008) (R^2=0.92)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

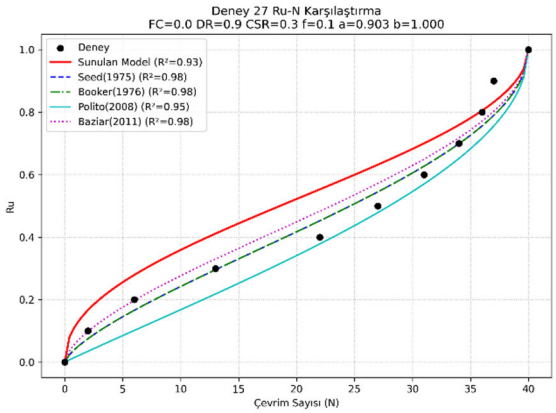

Deney 205 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.81)
Seed(1975) (R^2=0.84)
Booker(1976) (R^2=0.84)
Polito(2008) (R^2=0.77)
Baziar(2011) (R^2=0.84)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

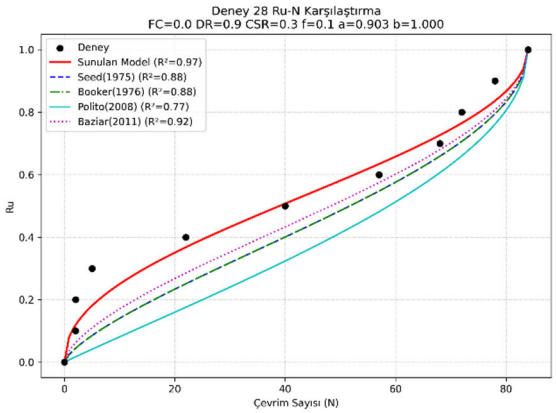

Deney 206 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.1 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.97)
Booker(1976) (R^2=0.97)
Polito(2008) (R^2=0.92)
Baziar(2011) (R^2=0.98)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

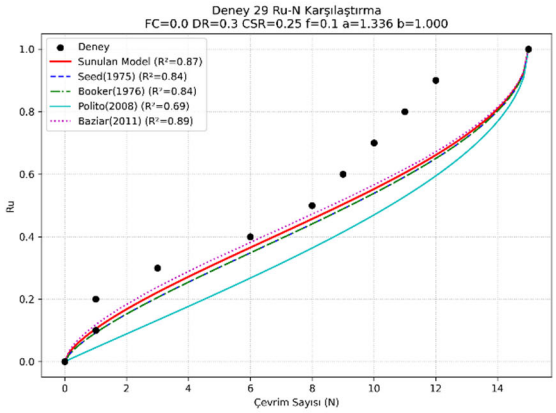

Deney 207 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.9 CSR=0.3 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.95)
Seed(1975) (R^2=0.87)
Booker(1976) (R^2=0.87)
Polito(2008) (R^2=0.71)
Baziar(2011) (R^2=0.91)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

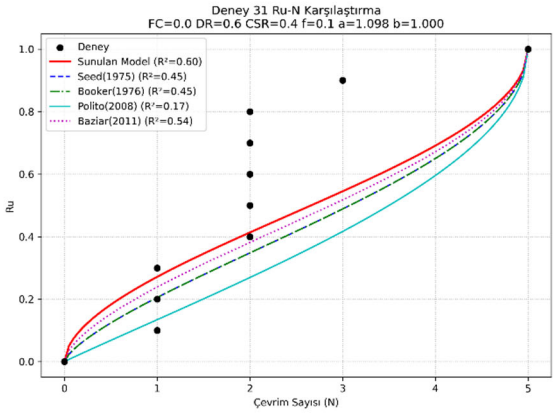

Deney 208 R_u-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.9 CSR=0.2 f=1.0
Deney
Sunulan Model (R^2=0.99)
Seed(1975) (R^2=0.91)
Booker(1976) (R^2=0.91)
Polito(2008) (R^2=0.79)
Baziar(2011) (R^2=0.94)
R_u
Çevrim Sayısı (N)

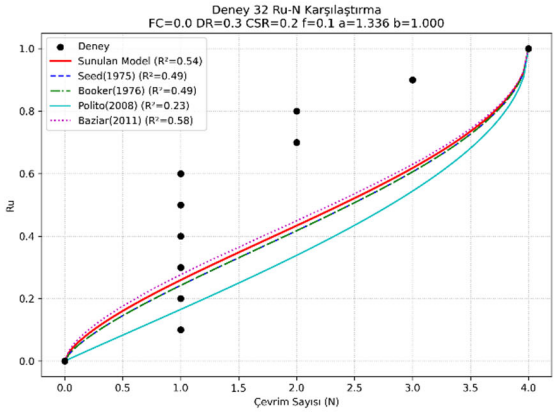
Ek Açıklamalar-B : Model 2 (Logaritmik Hibrit) Veri Seti Grafikleri

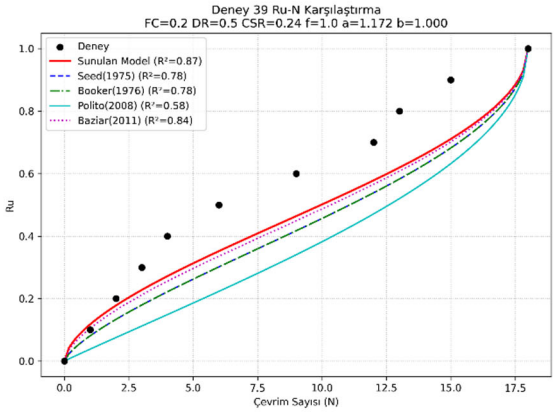


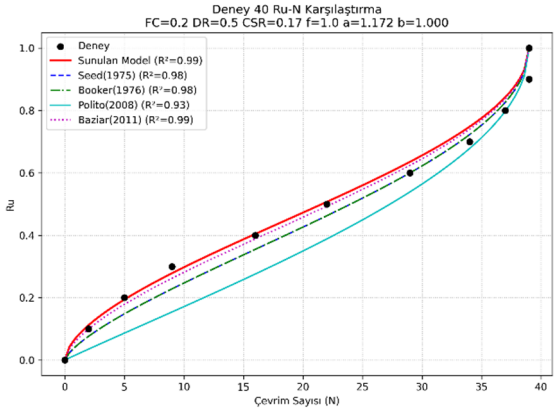


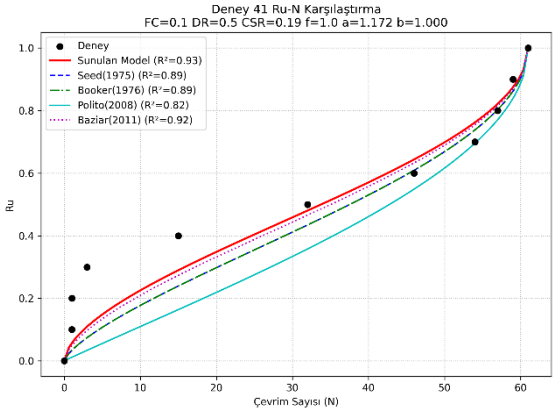


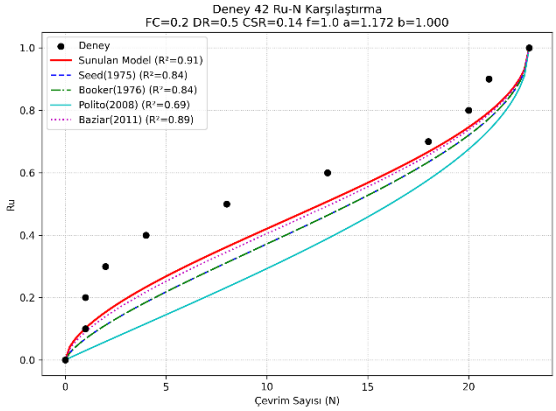


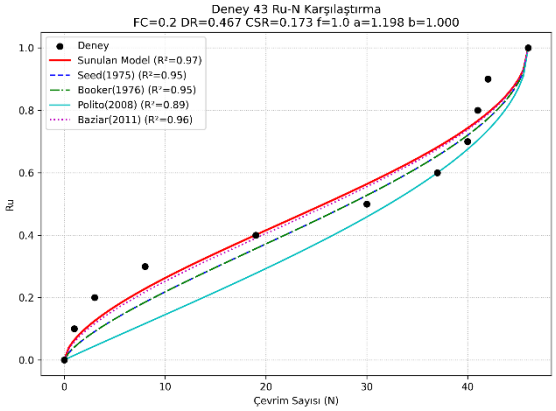


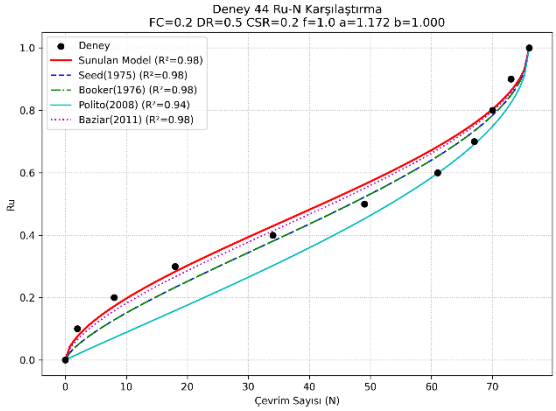


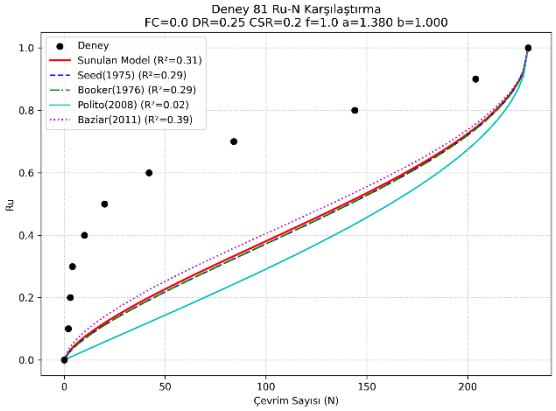

Deney 40 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.17 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.93)
Baziar(2011) (R²=0.99)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

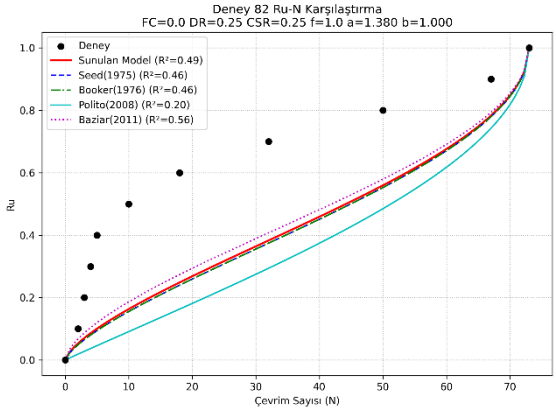

Deney 41 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.5 CSR=0.19 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.93)
Seed(1975) (R²=0.89)
Booker(1976) (R²=0.89)
Polito(2008) (R²=0.82)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

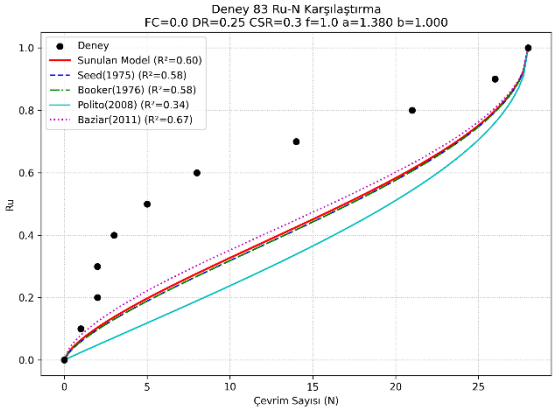

Deney 42 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.14 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.91)
Seed(1975) (R²=0.84)
Booker(1976) (R²=0.84)
Polito(2008) (R²=0.69)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

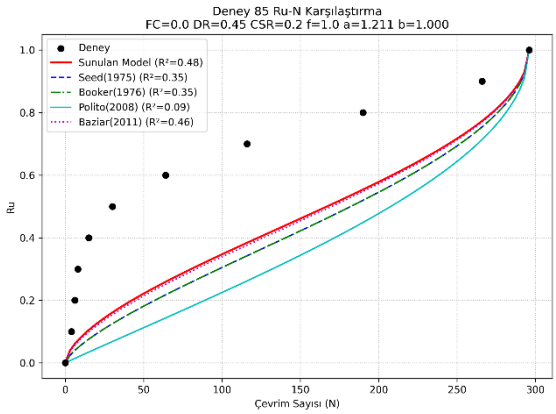

Deney 43 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.467 CSR=0.173 f=1.0 a=1.198 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.89)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

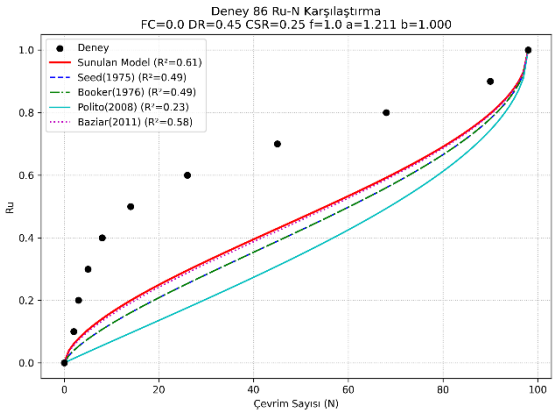

Deney 44 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5 CSR=0.2 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

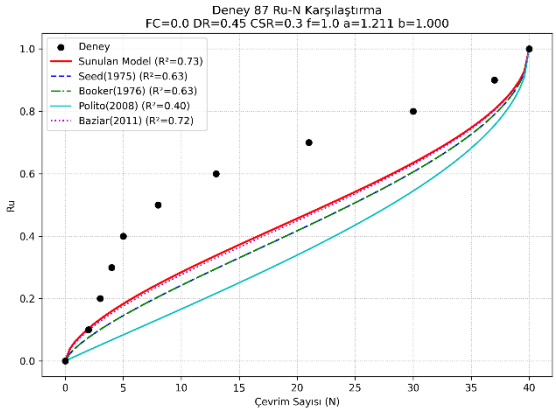

Deney 81 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.2 f=1.0 a=1.380 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.31)
Seed(1975) (R²=0.29)
Booker(1976) (R²=0.29)
Polito(2008) (R²=0.02)
Baziar(2011) (R²=0.39)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

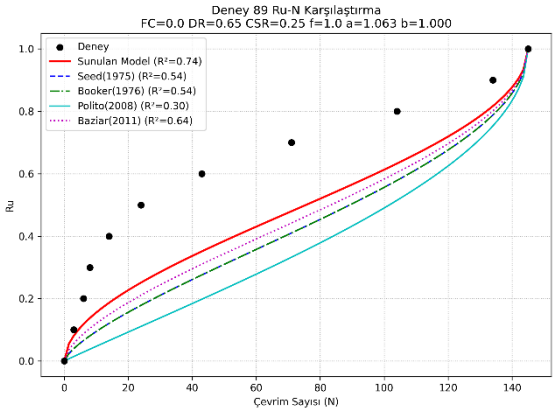

Deney 82 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.25 f=1.0 a=1.380 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.49)
Seed(1975) (R²=0.46)
Booker(1976) (R²=0.46)
Polito(2008) (R²=0.20)
Baziar(2011) (R²=0.56)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

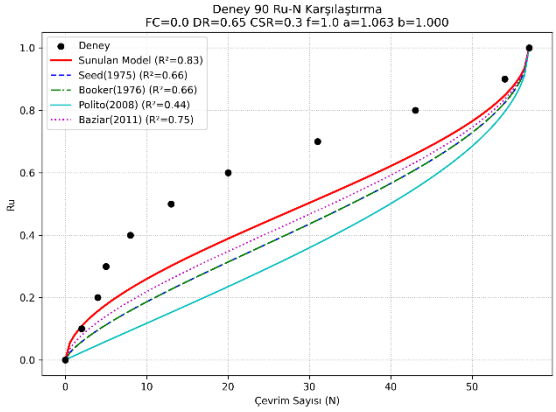

Deney 83 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.3 f=1.0 a=1.380 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.60)
Seed(1975) (R²=0.58)
Booker(1976) (R²=0.58)
Polito(2008) (R²=0.34)
Baziar(2011) (R²=0.67)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

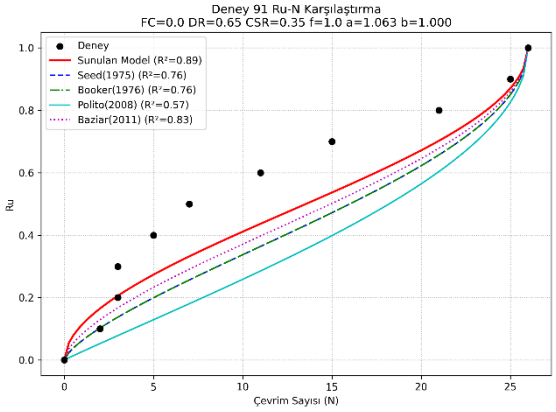

Deney 85 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.2 f=1.0 a=1.211 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.48)
Seed(1975) (R²=0.35)
Booker(1976) (R²=0.35)
Polito(2008) (R²=0.09)
Baziar(2011) (R²=0.46)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

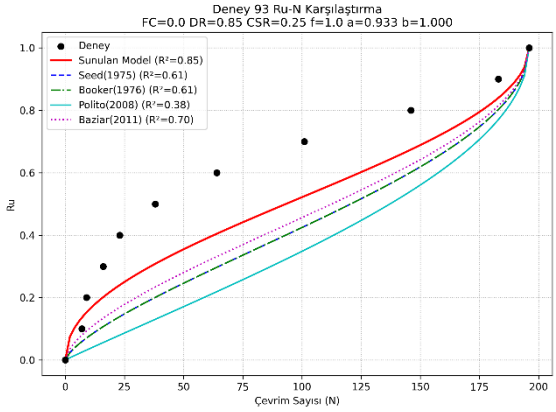

Deney 86 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.25 f=1.0 a=1.211 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.61)
Seed(1975) (R²=0.49)
Booker(1976) (R²=0.49)
Polito(2008) (R²=0.23)
Baziar(2011) (R²=0.58)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

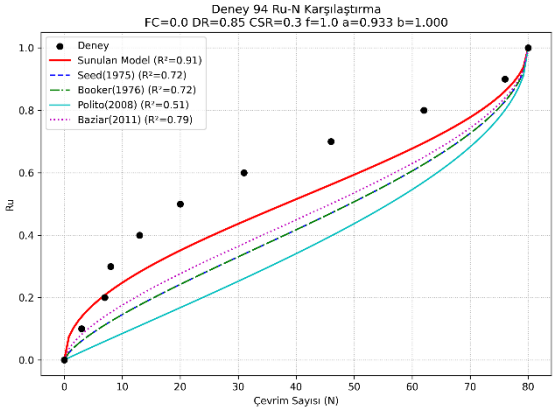

Deney 87 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.45 CSR=0.3 f=1.0 a=1.211 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.73)
Seed(1975) (R²=0.63)
Booker(1976) (R²=0.63)
Polito(2008) (R²=0.40)
Baziar(2011) (R²=0.72)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

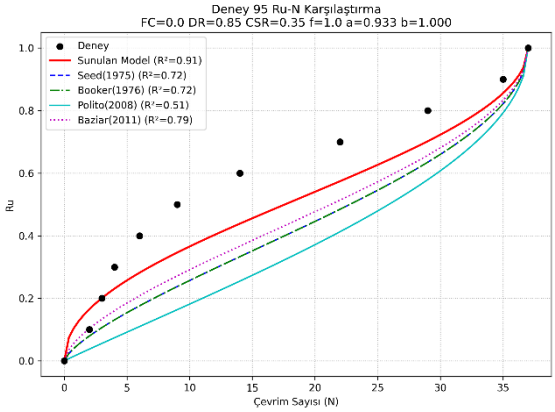

Deney 89 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.25 f=1.0 a=1.063 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.74)
Seed(1975) (R²=0.54)
Booker(1976) (R²=0.54)
Polito(2008) (R²=0.30)
Baziar(2011) (R²=0.64)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

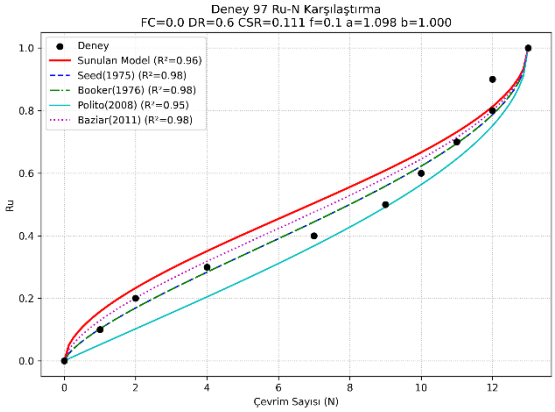

Deney 90 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.3 f=1.0 a=1.063 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.83)
Seed(1975) (R²=0.66)
Booker(1976) (R²=0.66)
Polito(2008) (R²=0.44)
Baziar(2011) (R²=0.75)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

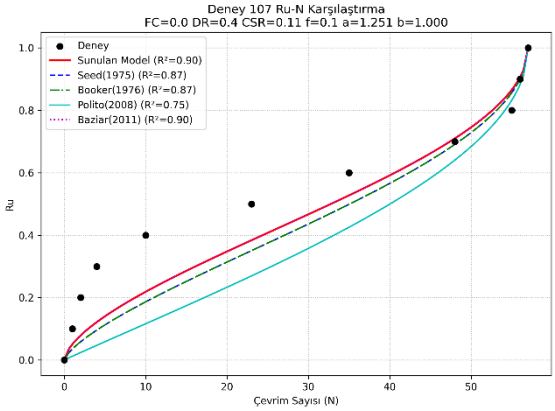

Deney 91 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.65 CSR=0.35 f=1.0 a=1.063 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.76)
Booker(1976) (R²=0.76)
Polito(2008) (R²=0.57)
Baziar(2011) (R²=0.83)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

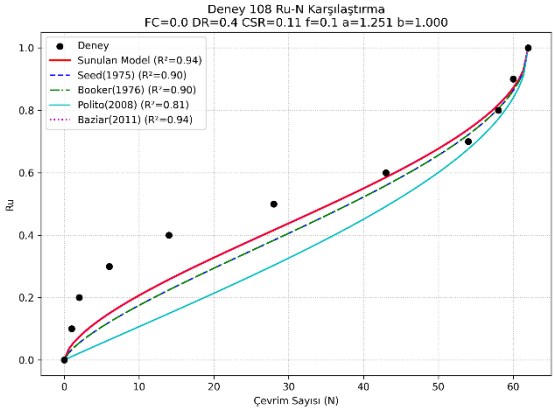

Deney 93 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.25 f=1.0 a=0.933 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.85)
Seed(1975) (R²=0.61)
Booker(1976) (R²=0.61)
Polito(2008) (R²=0.38)
Baziar(2011) (R²=0.70)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

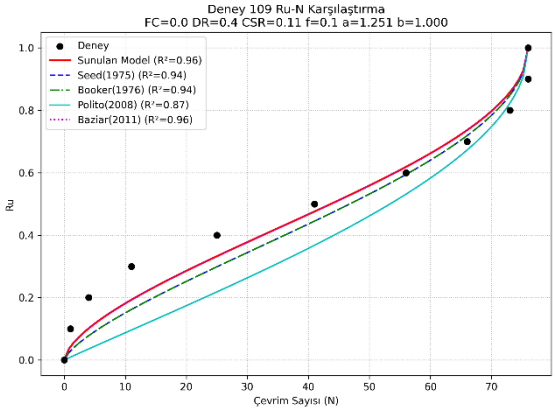

Deney 94 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.3 f=1.0 a=0.933 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.91)
Seed(1975) (R²=0.72)
Booker(1976) (R²=0.72)
Polito(2008) (R²=0.51)
Baziar(2011) (R²=0.79)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

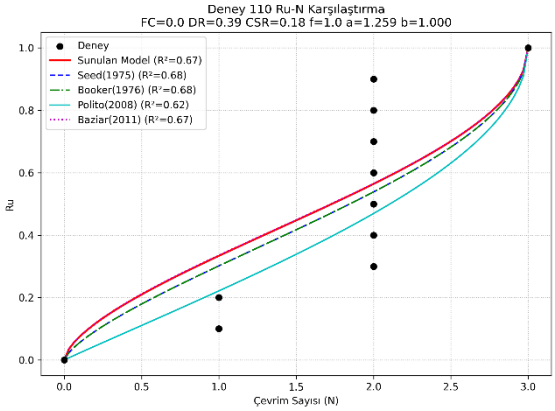

Deney 95 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.85 CSR=0.35 f=1.0 a=0.933 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.91)
Seed(1975) (R²=0.72)
Booker(1976) (R²=0.72)
Polito(2008) (R²=0.51)
Baziar(2011) (R²=0.79)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

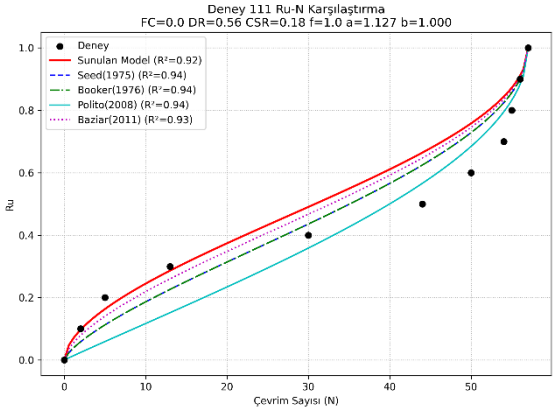

Deney 97 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.111 f=0.1 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.95)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

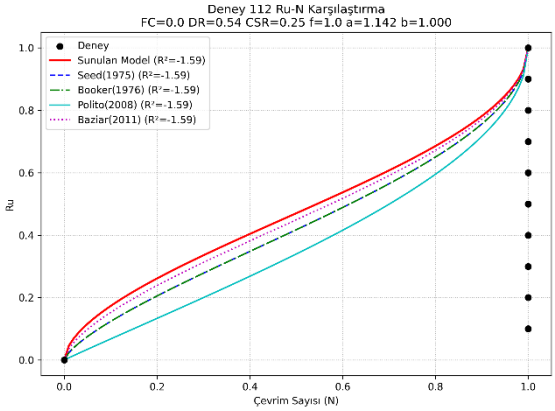

Deney 107 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.90)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.75)
Baziar(2011) (R²=0.90)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

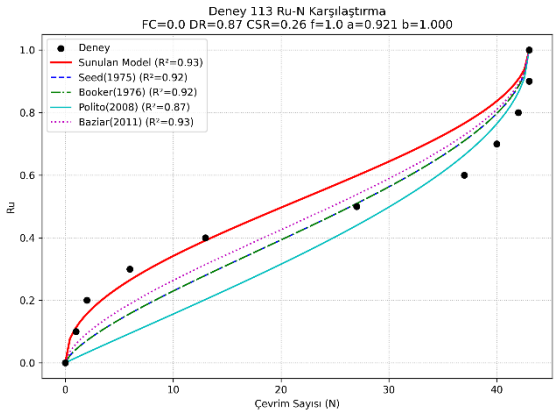

Deney 108 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.94)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.81)
Baziar(2011) (R²=0.94)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

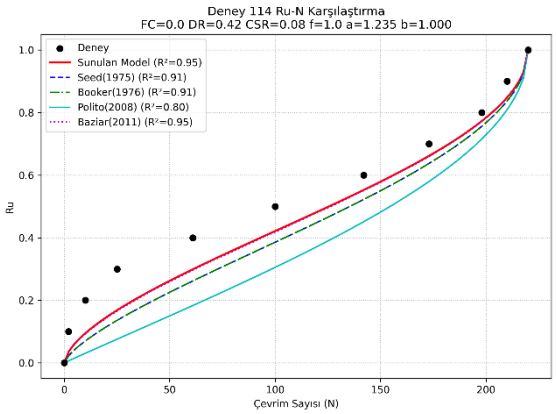

Deney 109 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.11 f=0.1 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

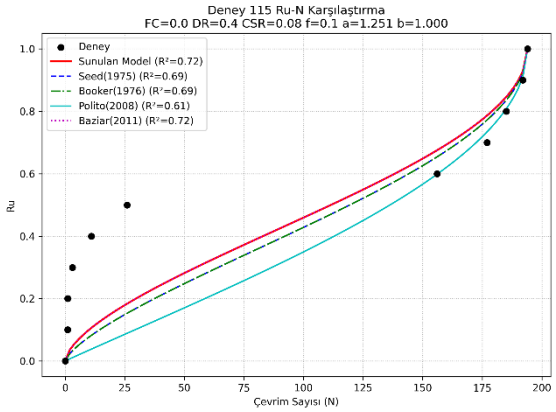

Deney 110 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.39 CSR=0.18 f=1.0 a=1.259 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.67)
Seed(1975) (R²=0.68)
Booker(1976) (R²=0.68)
Polito(2008) (R²=0.62)
Baziar(2011) (R²=0.67)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

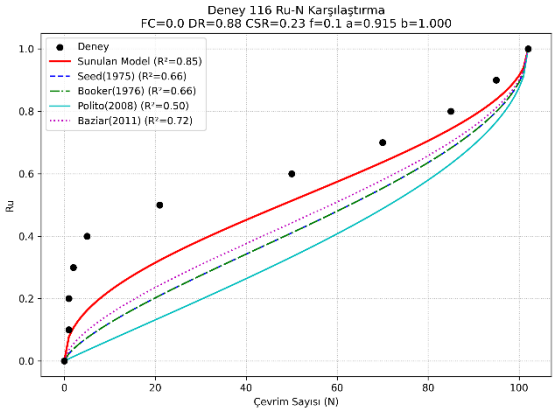

Deney 111 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.56 CSR=0.18 f=1.0 a=1.127 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.92)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.93)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

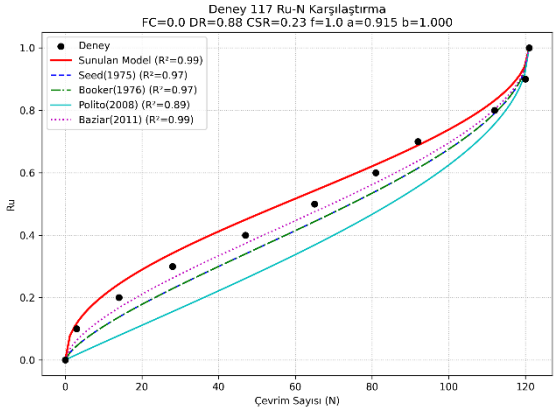

Deney 112 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.54 CSR=0.25 f=1.0 a=1.142 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=-1.59)
Seed(1975) (R²=-1.59)
Booker(1976) (R²=-1.59)
Polito(2008) (R²=-1.59)
Baziar(2011) (R²=-1.59)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

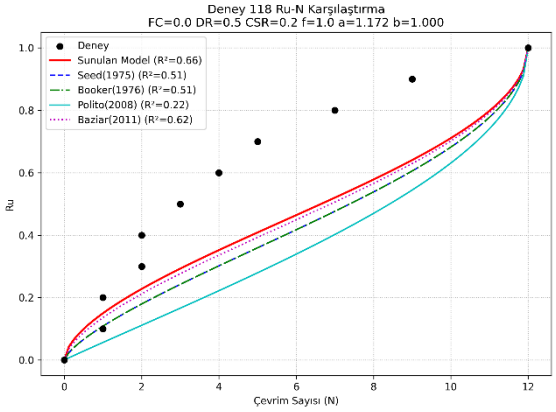

Deney 113 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.87 CSR=0.26 f=1.0 a=0.921 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.93)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.93)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

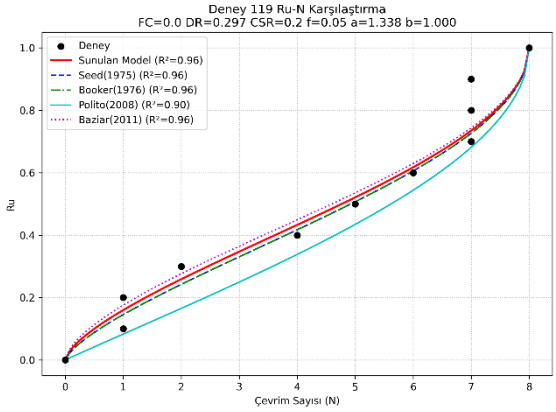

Deney 114 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.42 CSR=0.08 f=1.0 a=1.235 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.91)
Booker(1976) (R²=0.91)
Polito(2008) (R²=0.80)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

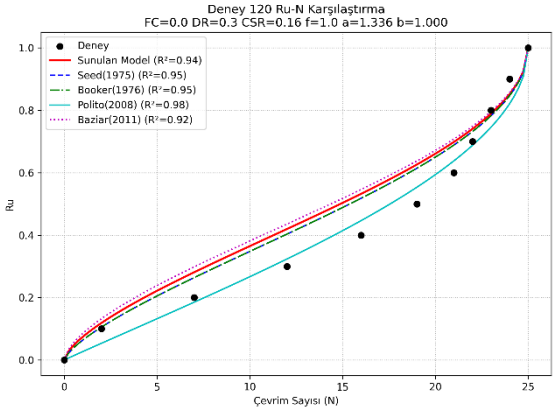

Deney 115 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.08 f=0.1 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.72)
Seed(1975) (R²=0.69)
Booker(1976) (R²=0.69)
Polito(2008) (R²=0.61)
Baziar(2011) (R²=0.72)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

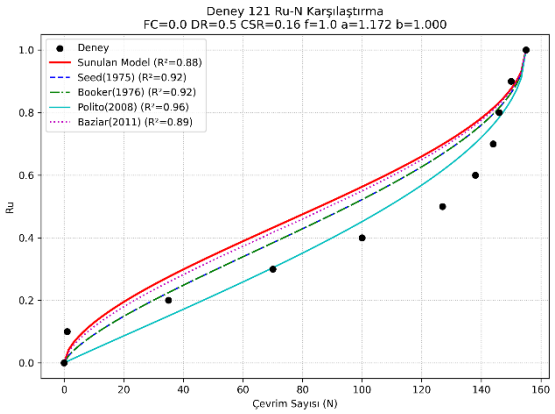

Deney 116 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.88 CSR=0.23 f=0.1 a=0.915 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.85)
Seed(1975) (R²=0.66)
Booker(1976) (R²=0.66)
Polito(2008) (R²=0.50)
Baziar(2011) (R²=0.72)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

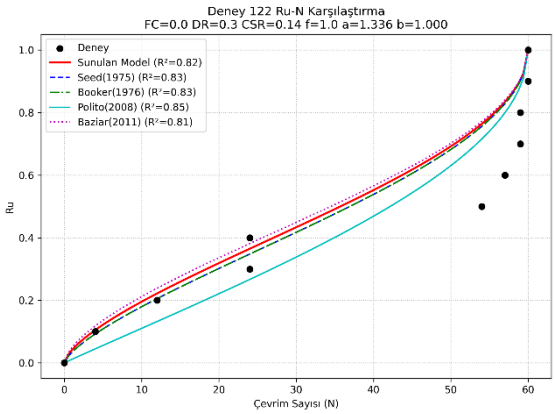

Deney 117 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.88 CSR=0.23 f=1.0 a=0.915 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.89)
Baziar(2011) (R²=0.99)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

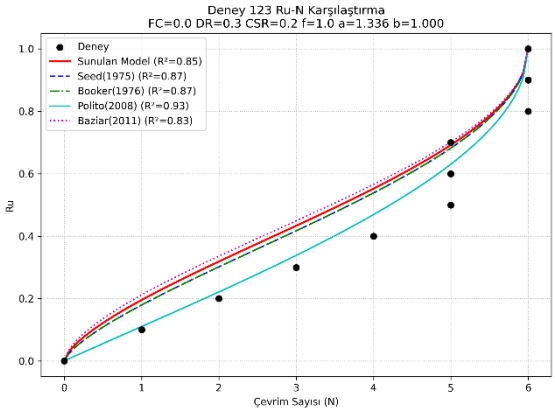

Deney 118 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.2 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.66)
Seed(1975) (R²=0.51)
Booker(1976) (R²=0.51)
Polito(2008) (R²=0.22)
Baziar(2011) (R²=0.62)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

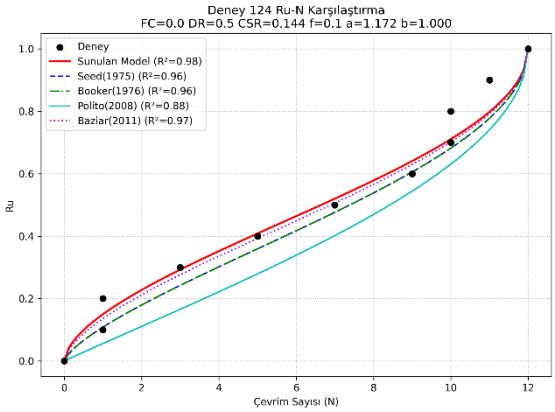

Deney 119 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.297 CSR=0.2 f=0.05 a=1.338 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.90)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

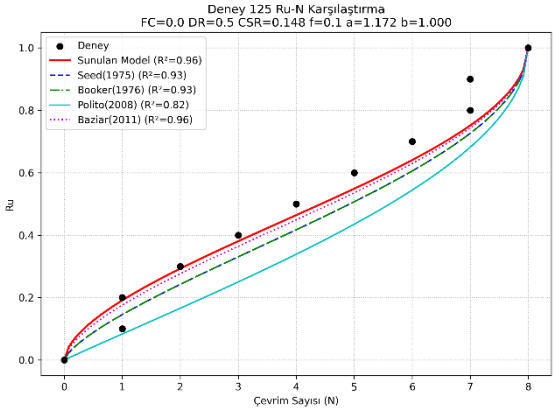

Deney 120 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.16 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.94)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.98)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

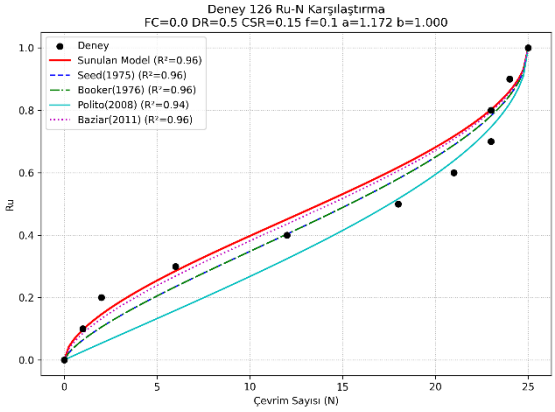

Deney 121 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.16 f=1.0 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.88)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.96)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

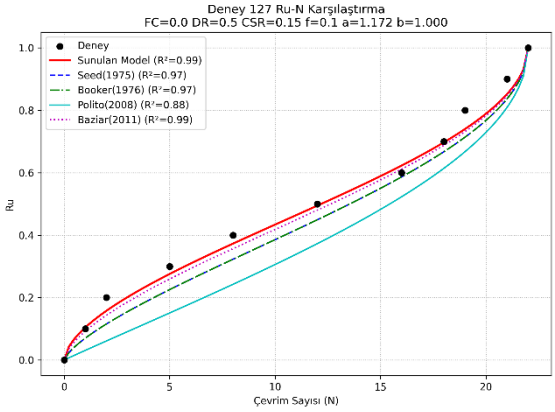

Deney 122 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.14 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.82)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.85)
Baziar(2011) (R²=0.81)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

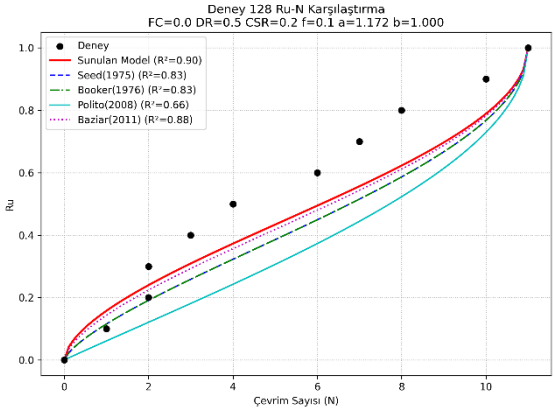

Deney 123 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.85)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.93)
Baziar(2011) (R²=0.83)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

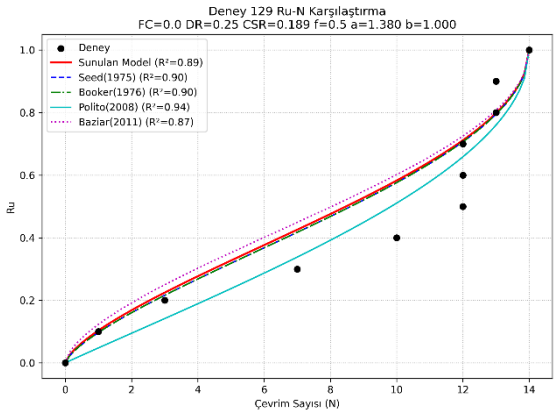

Deney 124 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.144 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.88)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

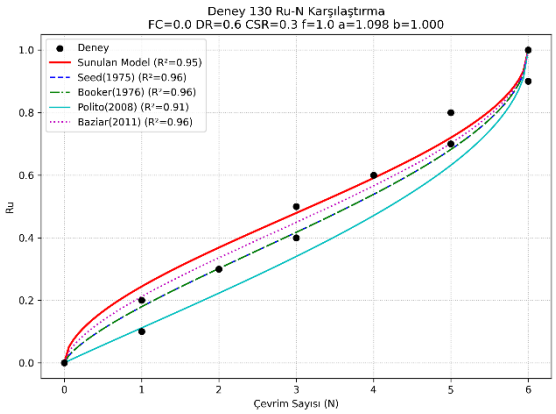

Deney 125 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.148 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.93)
Booker(1976) (R²=0.93)
Polito(2008) (R²=0.82)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

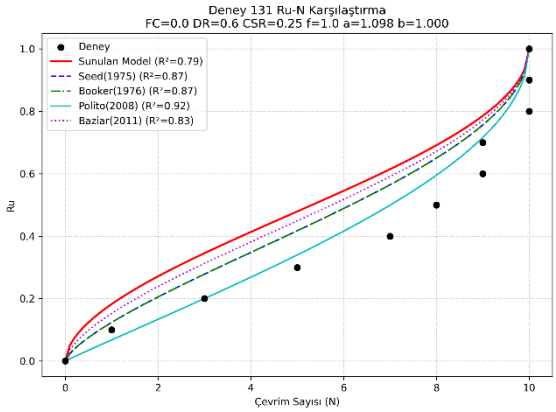

Deney 126 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.15 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

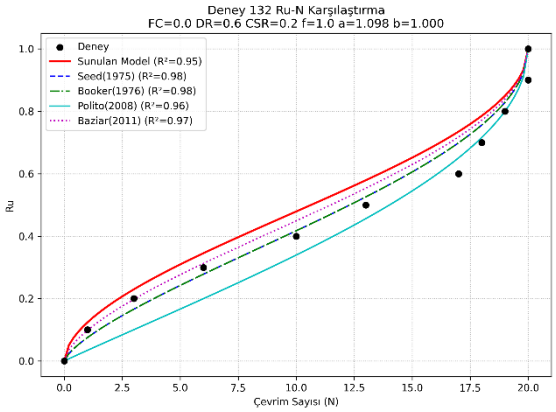

Deney 127 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.15 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.88)
Baziar(2011) (R²=0.99)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

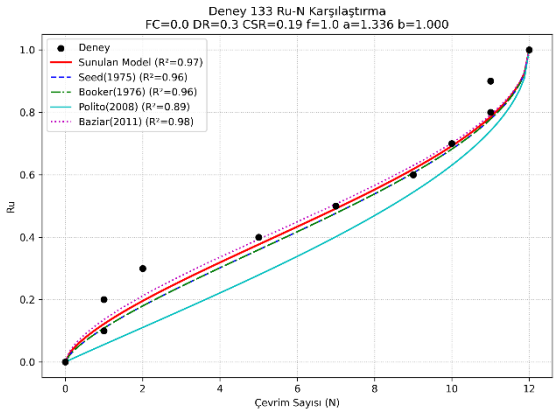

Deney 128 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.2 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.90)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.66)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

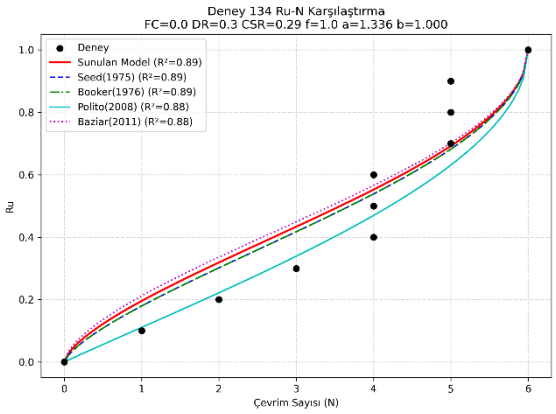

Deney 129 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.25 CSR=0.189 f=0.5 a=1.380 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.87)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

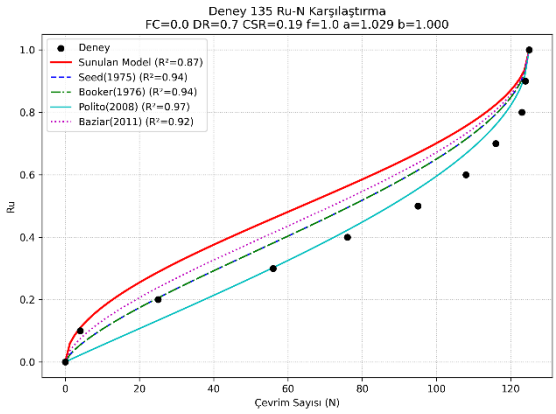

Deney 130 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.91)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

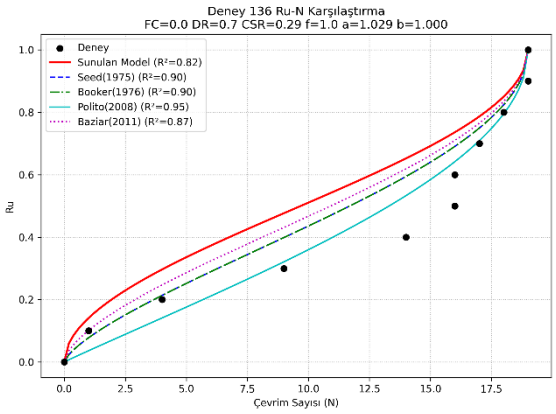

Deney 131 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.25 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.79)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.83)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

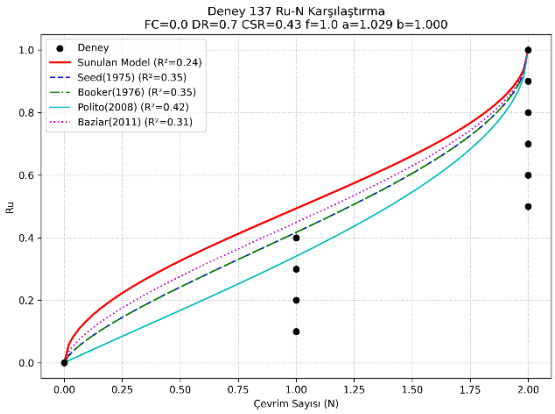

Deney 132 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.96)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

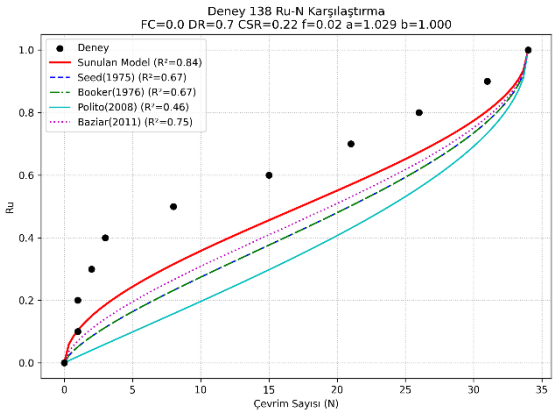

Deney 133 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.19 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.89)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

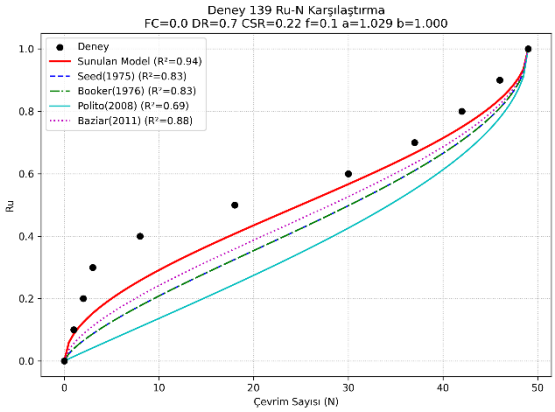

Deney 134 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.29 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.89)
Booker(1976) (R²=0.89)
Polito(2008) (R²=0.88)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

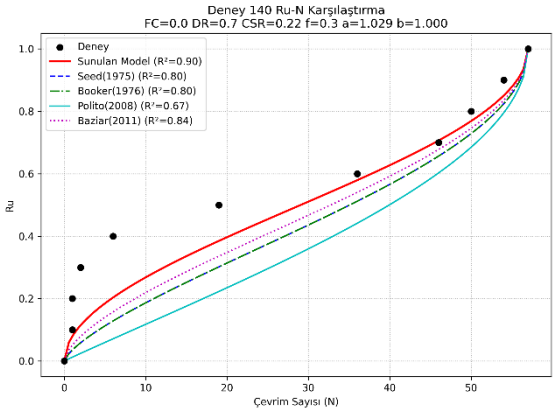

Deney 135 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.19 f=1.0 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.87)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.97)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

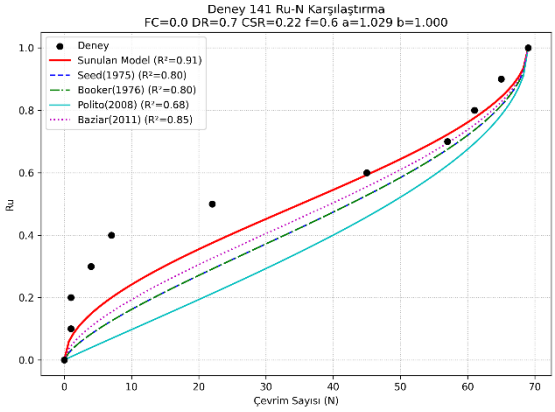

Deney 136 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.29 f=1.0 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.82)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.95)
Baziar(2011) (R²=0.87)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

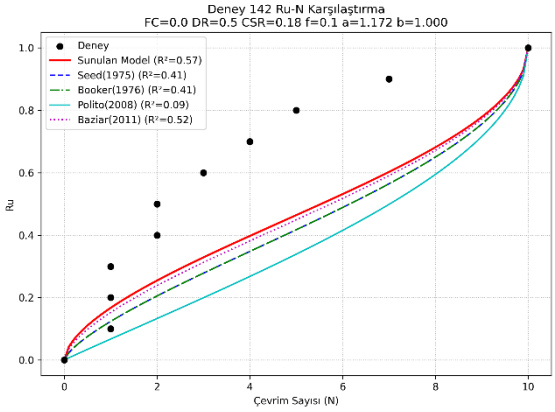

Deney 137 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.43 f=1.0 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.24)
Seed(1975) (R²=0.35)
Booker(1976) (R²=0.35)
Polito(2008) (R²=0.42)
Baziar(2011) (R²=0.31)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

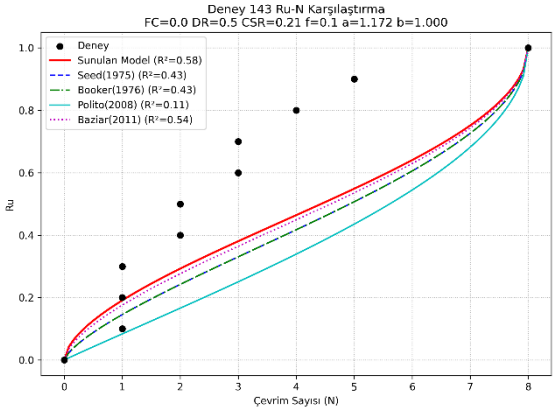

Deney 138 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.02 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.84)
Seed(1975) (R²=0.67)
Booker(1976) (R²=0.67)
Polito(2008) (R²=0.46)
Baziar(2011) (R²=0.75)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

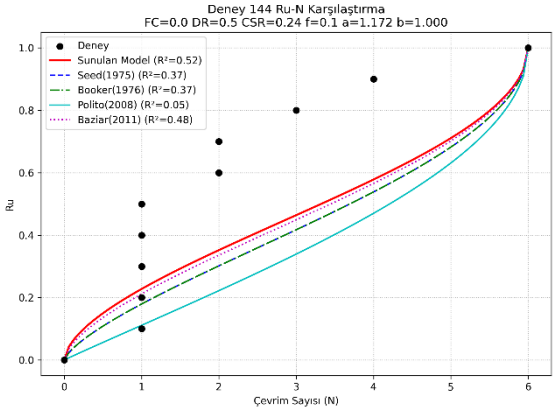

Deney 139 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.1 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.94)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.69)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

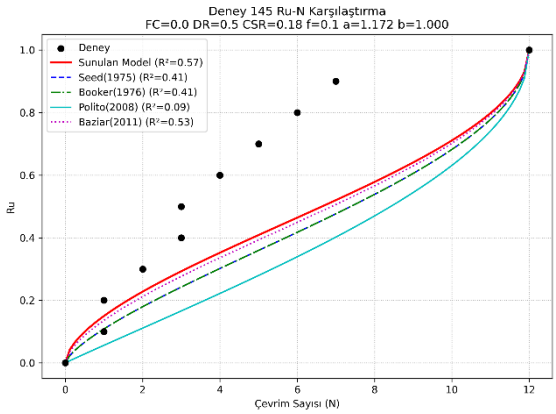

Deney 140 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.3 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.90)
Seed(1975) (R²=0.80)
Booker(1976) (R²=0.80)
Polito(2008) (R²=0.67)
Baziar(2011) (R²=0.84)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

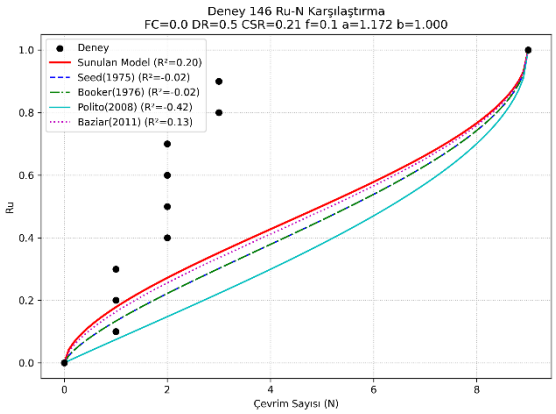

Deney 141 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.7 CSR=0.22 f=0.6 a=1.029 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.91)
Seed(1975) (R²=0.80)
Booker(1976) (R²=0.80)
Polito(2008) (R²=0.68)
Baziar(2011) (R²=0.85)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

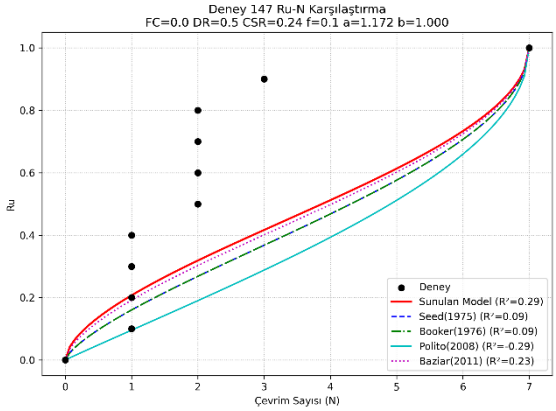

Deney 142 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.57)
Seed(1975) (R²=0.41)
Booker(1976) (R²=0.41)
Polito(2008) (R²=0.09)
Baziar(2011) (R²=0.52)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

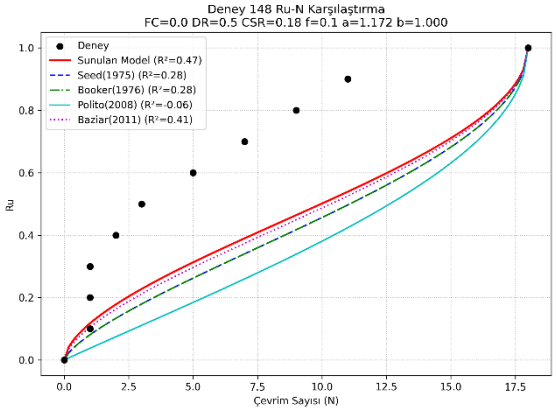

Deney 143 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.58)
Seed(1975) (R²=0.43)
Booker(1976) (R²=0.43)
Polito(2008) (R²=0.11)
Baziar(2011) (R²=0.54)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

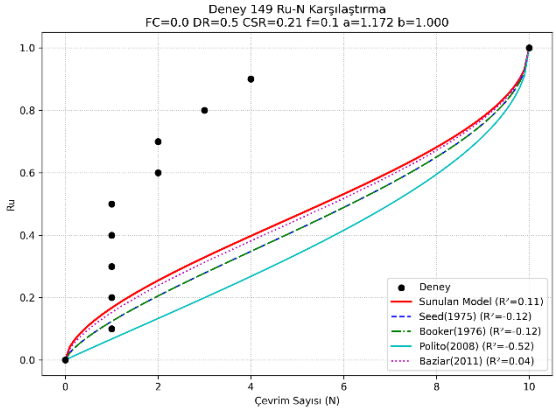

Deney 144 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.52)
Seed(1975) (R²=0.37)
Booker(1976) (R²=0.37)
Polito(2008) (R²=0.05)
Baziar(2011) (R²=0.48)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

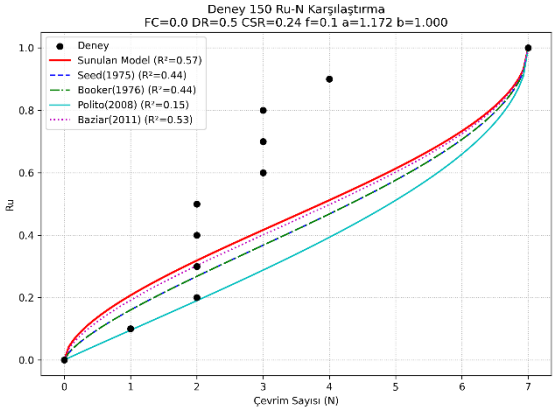

Deney 145 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.57)
Seed(1975) (R²=0.41)
Booker(1976) (R²=0.41)
Polito(2008) (R²=0.09)
Baziar(2011) (R²=0.53)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

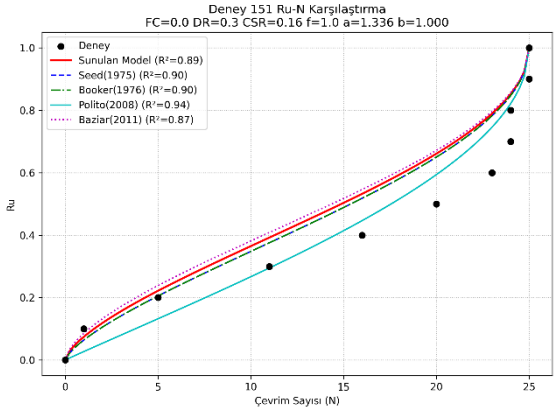

Deney 146 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.20)
Seed(1975) (R²=-0.02)
Booker(1976) (R²=-0.02)
Polito(2008) (R²=-0.42)
Baziar(2011) (R²=0.13)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

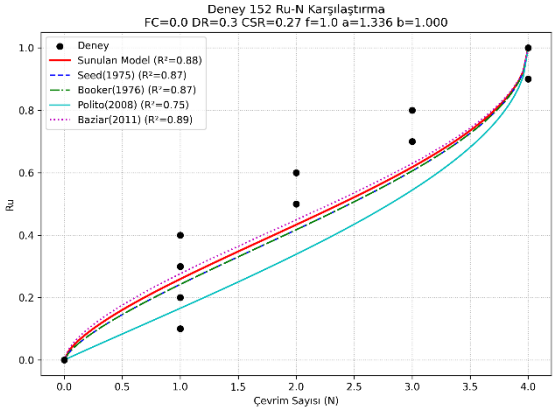

Deney 147 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.29)
Seed(1975) (R²=0.09)
Booker(1976) (R²=0.09)
Polito(2008) (R²=-0.29)
Baziar(2011) (R²=0.23)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

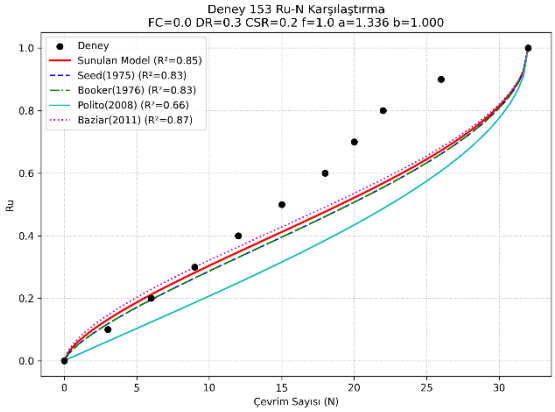

Deney 148 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.18 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.47)
Seed(1975) (R²=0.28)
Booker(1976) (R²=0.28)
Polito(2008) (R²=-0.06)
Baziar(2011) (R²=0.41)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

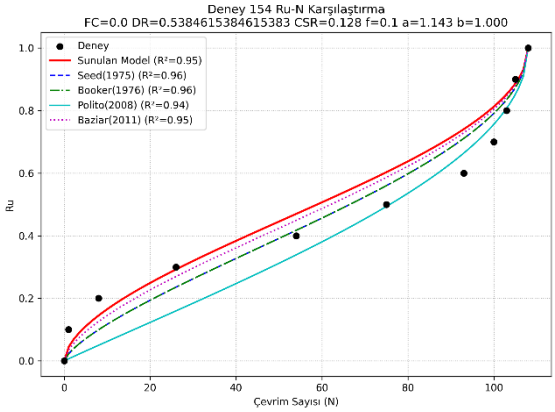

Deney 149 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.21 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.11)
Seed(1975) (R²=-0.12)
Booker(1976) (R²=-0.12)
Polito(2008) (R²=-0.52)
Baziar(2011) (R²=0.04)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

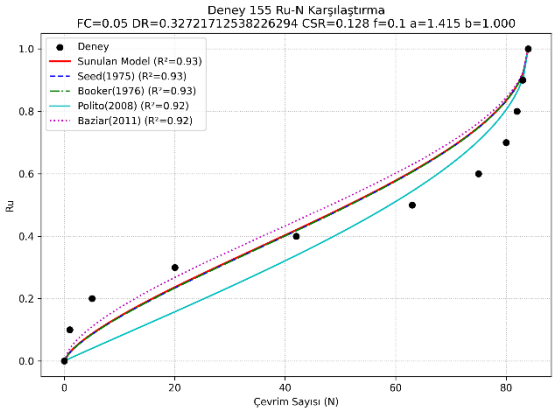

Deney 150 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5 CSR=0.24 f=0.1 a=1.172 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.57)
Seed(1975) (R²=0.44)
Booker(1976) (R²=0.44)
Polito(2008) (R²=0.15)
Baziar(2011) (R²=0.53)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

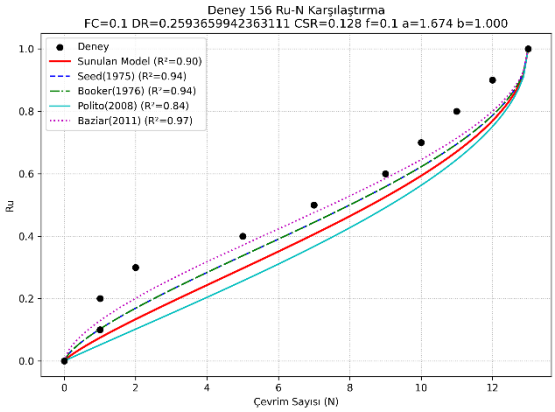

Deney 151 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.16 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.87)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

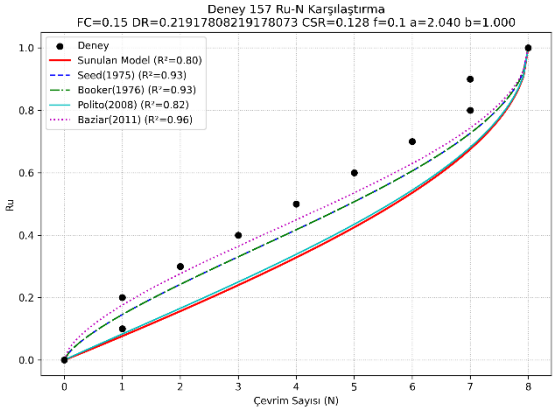

Deney 152 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.27 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.88)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.75)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

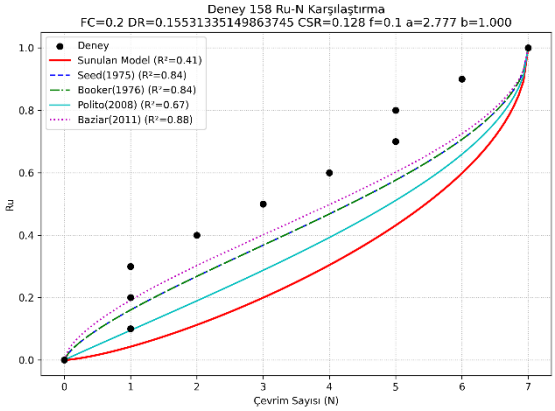

Deney 153 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.85)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.66)
Baziar(2011) (R²=0.87)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

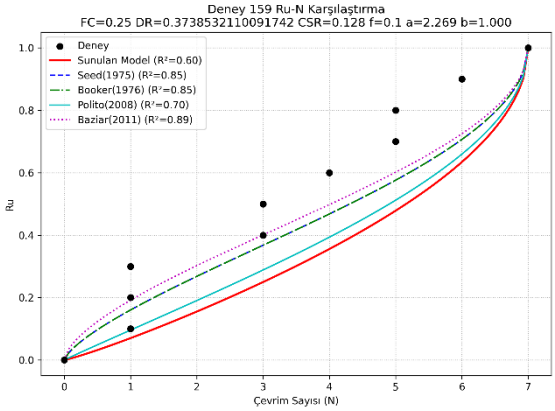

Deney 154 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.5384615384615383 CSR=0.128 f=0.1 a=1.143 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.94)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

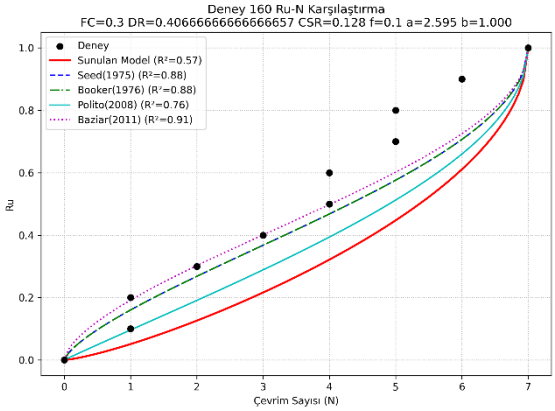

Deney 155 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.05 DR=0.32721712538226294 CSR=0.128 f=0.1 a=1.415 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.93)
Seed(1975) (R²=0.93)
Booker(1976) (R²=0.93)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

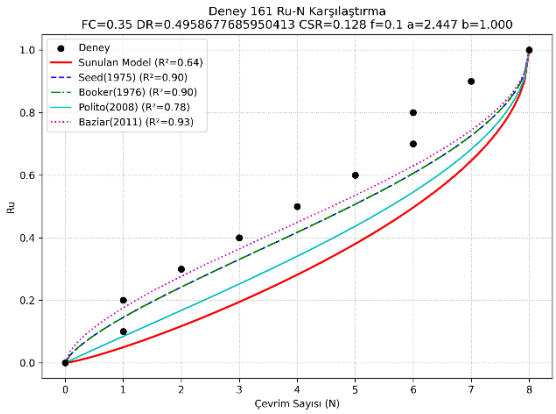

Deney 156 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.2593659942363111 CSR=0.128 f=0.1 a=1.674 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.90)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.84)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

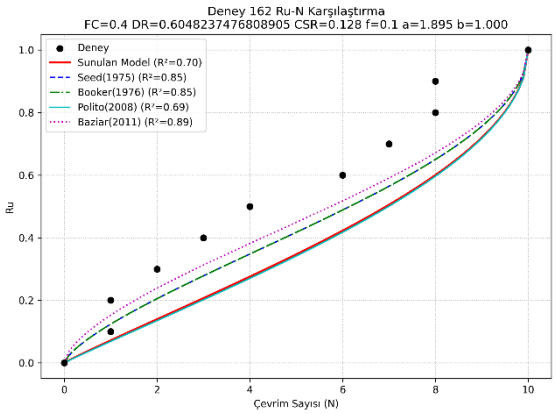

Deney 157 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.21917808219178073 CSR=0.128 f=0.1 a=2.040 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.80)
Seed(1975) (R²=0.93)
Booker(1976) (R²=0.93)
Polito(2008) (R²=0.82)
Baziar(2011) (R²=0.96)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

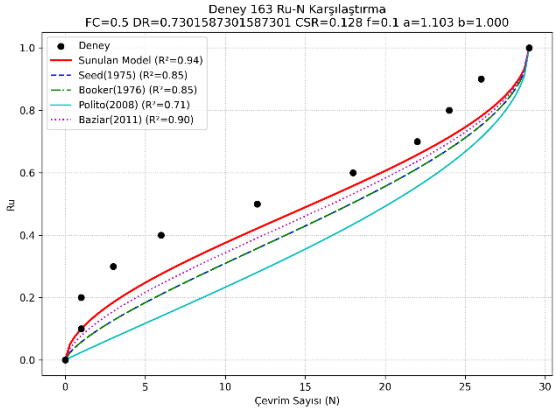

Deney 158 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.15531335149863745 CSR=0.128 f=0.1 a=2.777 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.41)
Seed(1975) (R²=0.84)
Booker(1976) (R²=0.84)
Polito(2008) (R²=0.67)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

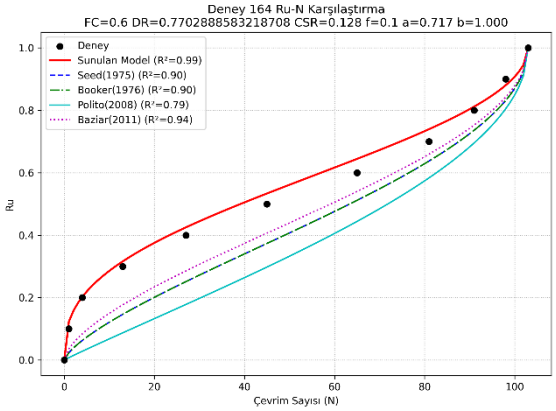

Deney 159 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.25 DR=0.3738532110091742 CSR=0.128 f=0.1 a=2.269 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.60)
Seed(1975) (R²=0.85)
Booker(1976) (R²=0.85)
Polito(2008) (R²=0.70)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

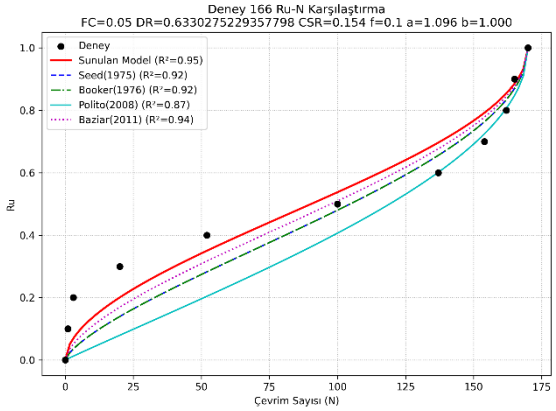

Deney 160 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.40666666666666657 CSR=0.128 f=0.1 a=2.595 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.57)
Seed(1975) (R²=0.88)
Booker(1976) (R²=0.88)
Polito(2008) (R²=0.76)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

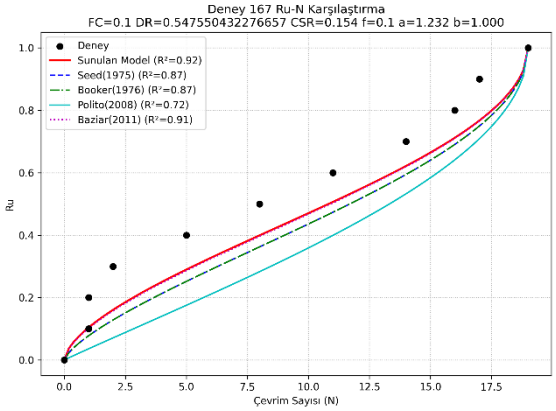

Deney 161 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.35 DR=0.4958677685950413 CSR=0.128 f=0.1 a=2.447 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.64)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.78)
Baziar(2011) (R²=0.93)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

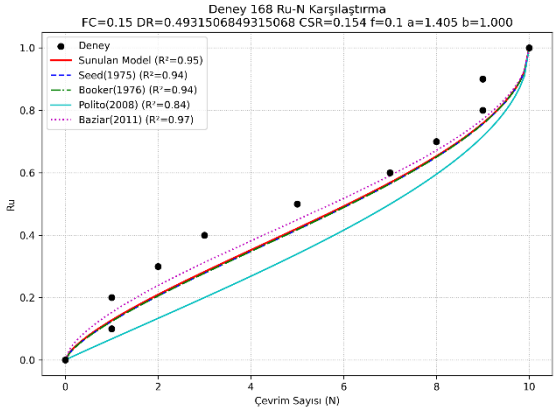

Deney 162 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.4 DR=0.6048237476808905 CSR=0.128 f=0.1 a=1.895 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.70)
Seed(1975) (R²=0.85)
Booker(1976) (R²=0.85)
Polito(2008) (R²=0.69)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

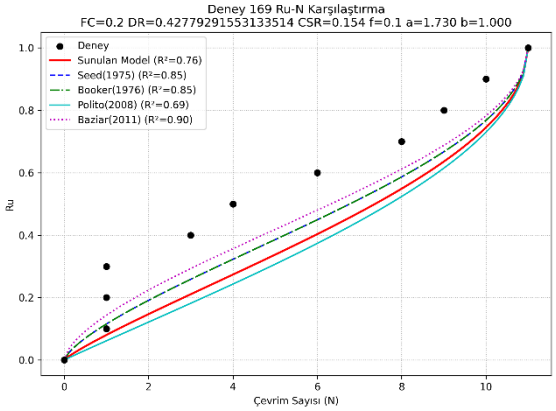

Deney 163 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.7301587301587301 CSR=0.128 f=0.1 a=1.103 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.94)
Seed(1975) (R²=0.85)
Booker(1976) (R²=0.85)
Polito(2008) (R²=0.71)
Baziar(2011) (R²=0.90)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

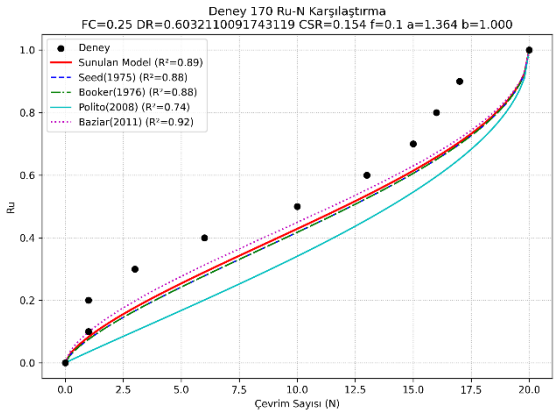

Deney 164 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.6 DR=0.7702888583218708 CSR=0.128 f=0.1 a=0.717 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.90)
Booker(1976) (R²=0.90)
Polito(2008) (R²=0.79)
Baziar(2011) (R²=0.94)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

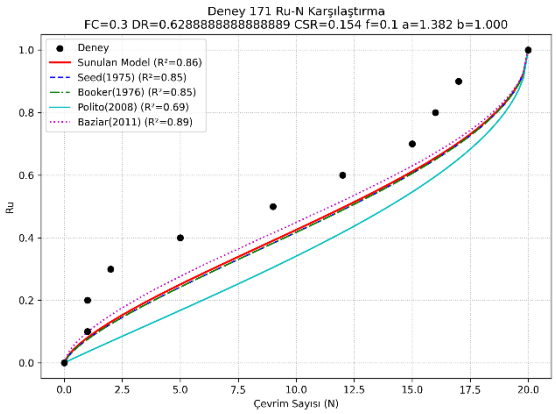

Deney 166 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.05 DR=0.6330275229357798 CSR=0.154 f=0.1 a=1.096 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.94)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

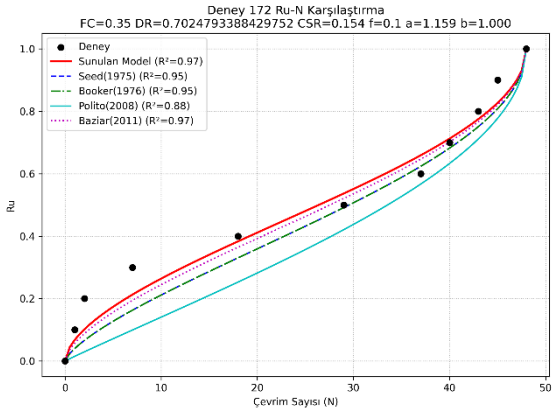

Deney 167 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.1 DR=0.547550432276657 CSR=0.154 f=0.1 a=1.232 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.92)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.72)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

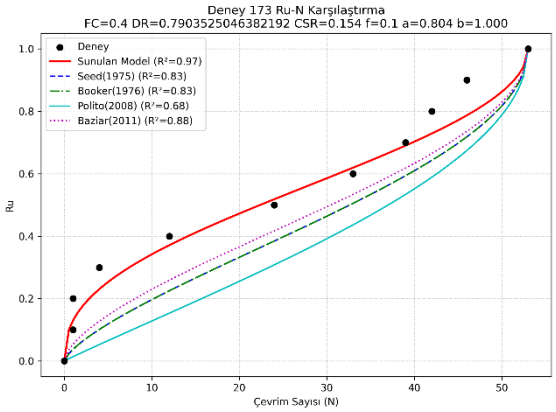

Deney 168 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4931506849315068 CSR=0.154 f=0.1 a=1.405 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.84)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

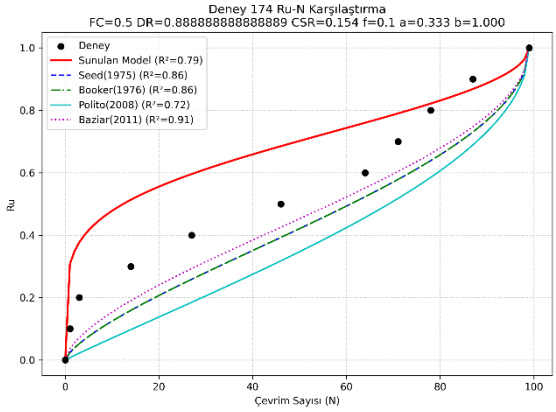

Deney 169 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.42779291553133514 CSR=0.154 f=0.1 a=1.730 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.76)
Seed(1975) (R²=0.85)
Booker(1976) (R²=0.85)
Polito(2008) (R²=0.69)
Baziar(2011) (R²=0.90)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

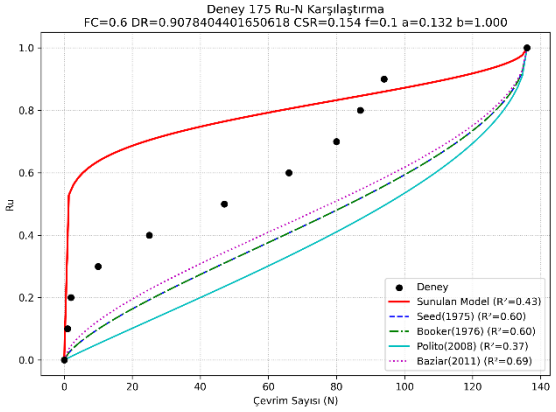

Deney 170 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.25 DR=0.6032110091743119 CSR=0.154 f=0.1 a=1.364 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.88)
Booker(1976) (R²=0.88)
Polito(2008) (R²=0.74)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

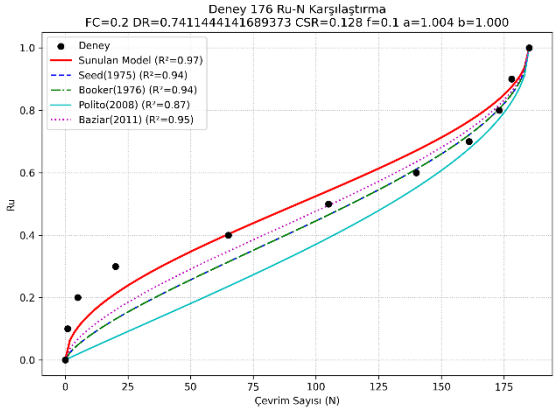

Deney 171 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.6288888888888889 CSR=0.154 f=0.1 a=1.382 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.86)
Seed(1975) (R²=0.85)
Booker(1976) (R²=0.85)
Polito(2008) (R²=0.69)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

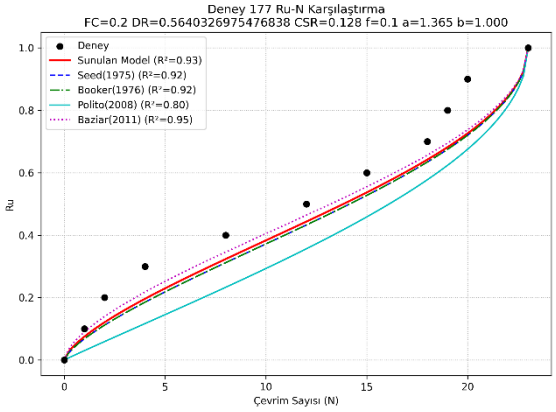

Deney 172 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.35 DR=0.7024793388429752 CSR=0.154 f=0.1 a=1.159 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.88)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

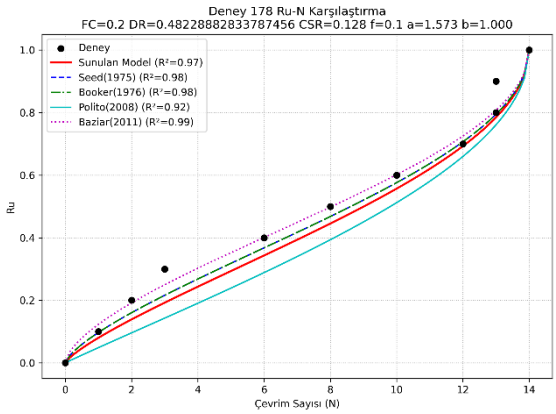

Deney 173 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.4 DR=0.7903525046382192 CSR=0.154 f=0.1 a=0.804 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.68)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

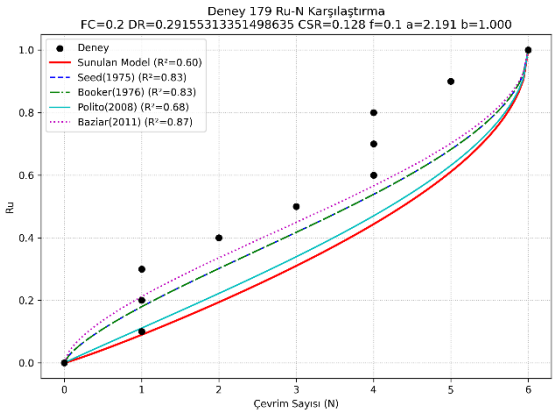

Deney 174 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.8888888888888889 CSR=0.154 f=0.1 a=0.333 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.79)
Seed(1975) (R²=0.86)
Booker(1976) (R²=0.86)
Polito(2008) (R²=0.72)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

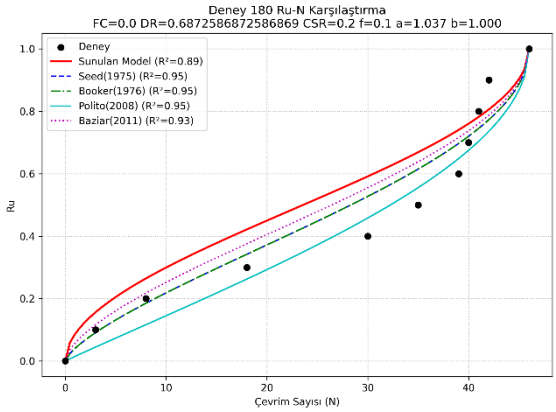

Deney 175 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.6 DR=0.9078404401650618 CSR=0.154 f=0.1 a=0.132 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.43)
Seed(1975) (R²=0.60)
Booker(1976) (R²=0.60)
Polito(2008) (R²=0.37)
Baziar(2011) (R²=0.69)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

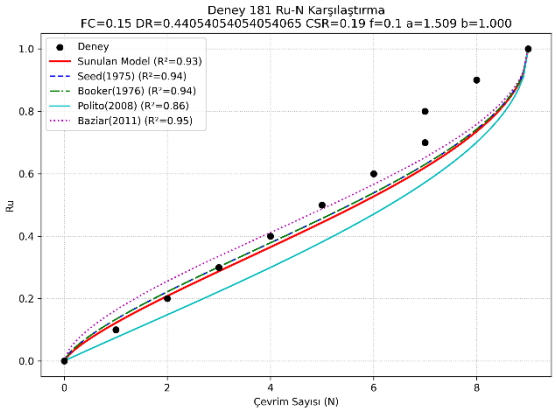

Deney 176 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.7411444141689373 CSR=0.128 f=0.1 a=1.004 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

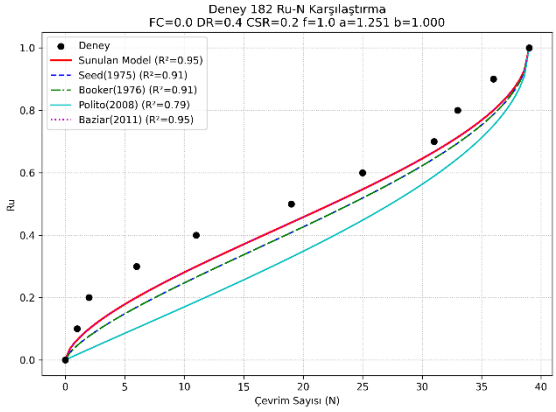

Deney 177 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.5640326975476838 CSR=0.128 f=0.1 a=1.365 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.93)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.80)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

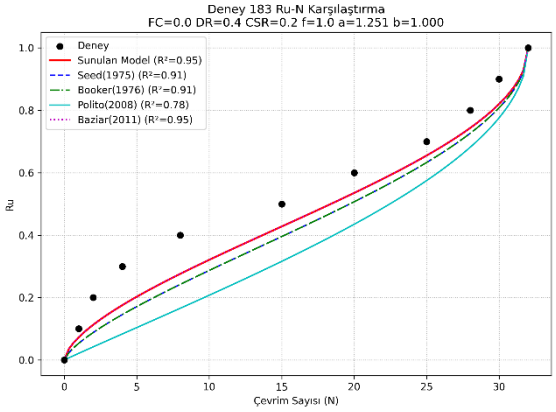

Deney 178 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.48228882833787456 CSR=0.128 f=0.1 a=1.573 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.99)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

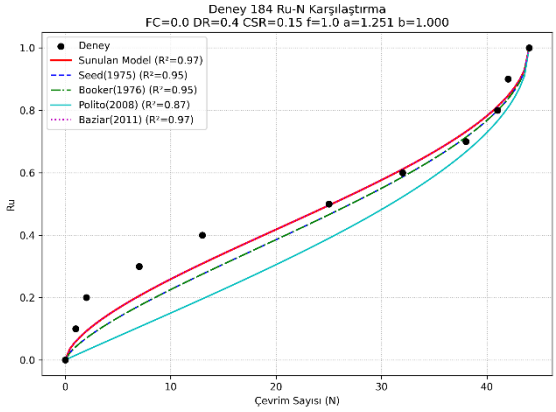

Deney 179 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.2 DR=0.29155313351498635 CSR=0.128 f=0.1 a=2.191 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.60)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.68)
Baziar(2011) (R²=0.87)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

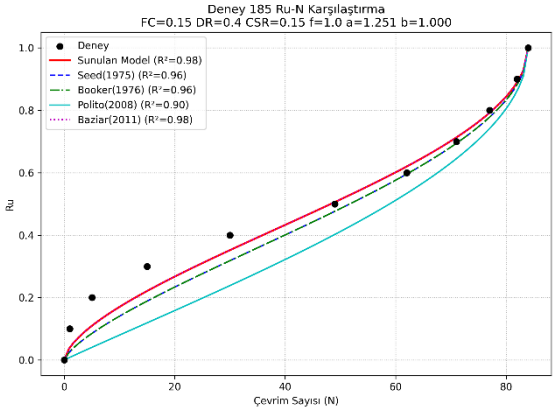

Deney 180 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6872586872586869 CSR=0.2 f=0.1 a=1.037 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.89)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.95)
Baziar(2011) (R²=0.93)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

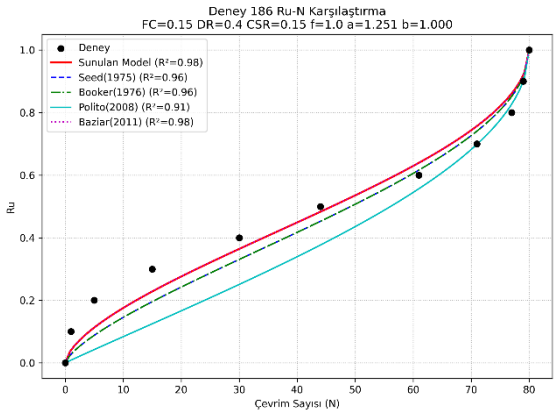

Deney 181 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.44054054054054065 CSR=0.19 f=0.1 a=1.509 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.93)
Seed(1975) (R²=0.94)
Booker(1976) (R²=0.94)
Polito(2008) (R²=0.86)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

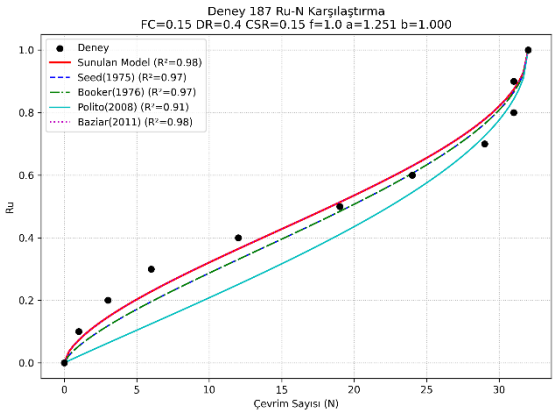

Deney 182 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.2 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.91)
Booker(1976) (R²=0.91)
Polito(2008) (R²=0.79)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

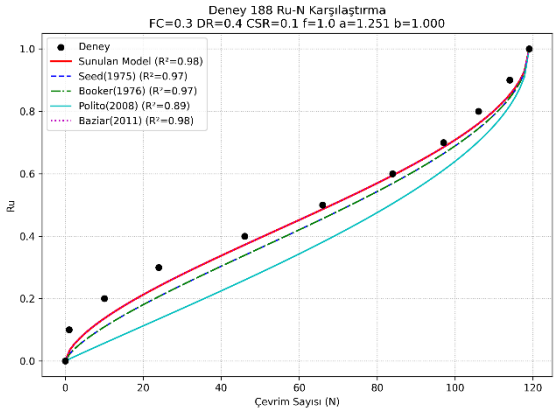

Deney 183 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.2 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.91)
Booker(1976) (R²=0.91)
Polito(2008) (R²=0.78)
Baziar(2011) (R²=0.95)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

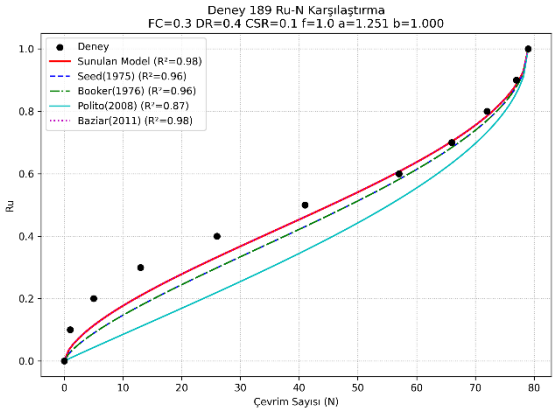

Deney 184 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.97)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

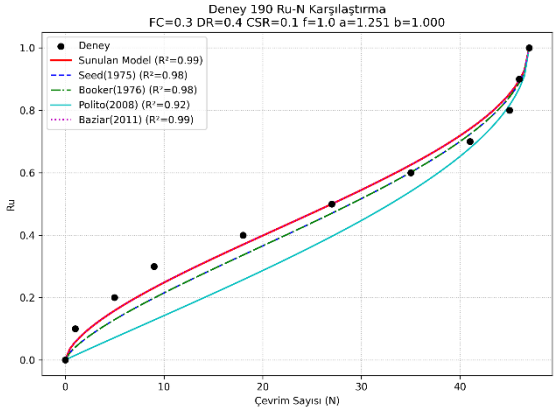

Deney 185 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.90)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

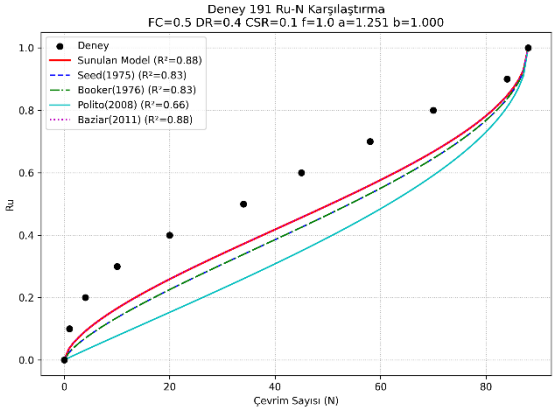

Deney 186 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.91)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

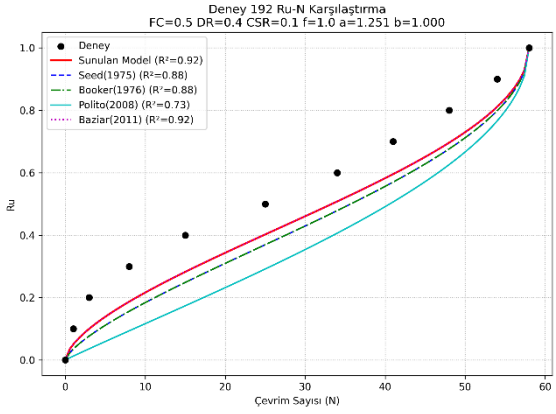

Deney 187 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.15 DR=0.4 CSR=0.15 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.91)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

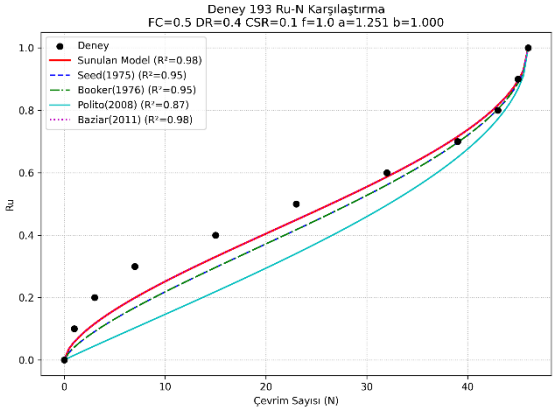

Deney 188 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.89)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

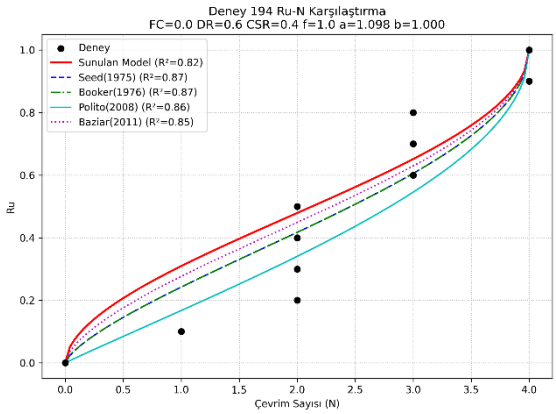

Deney 189 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.96)
Booker(1976) (R²=0.96)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

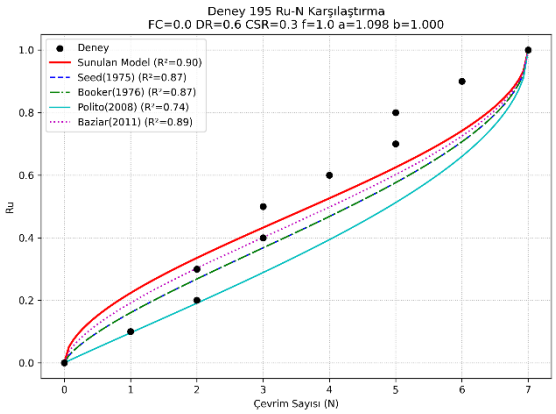

Deney 190 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.3 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.98)
Booker(1976) (R²=0.98)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.99)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

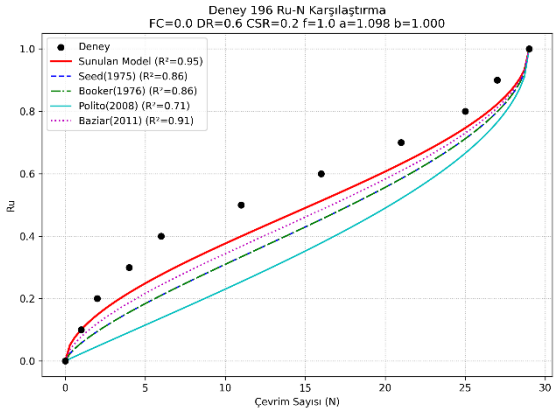

Deney 191 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.88)
Seed(1975) (R²=0.83)
Booker(1976) (R²=0.83)
Polito(2008) (R²=0.66)
Baziar(2011) (R²=0.88)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

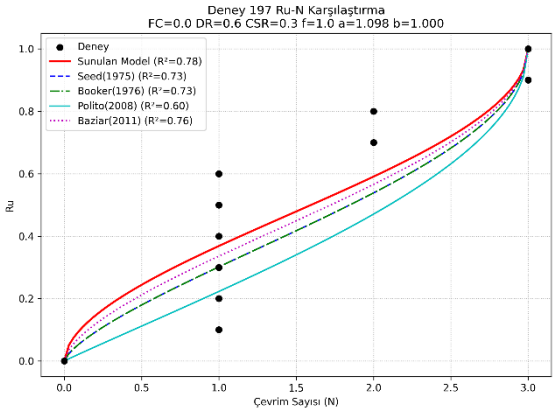

Deney 192 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.92)
Seed(1975) (R²=0.88)
Booker(1976) (R²=0.88)
Polito(2008) (R²=0.73)
Baziar(2011) (R²=0.92)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

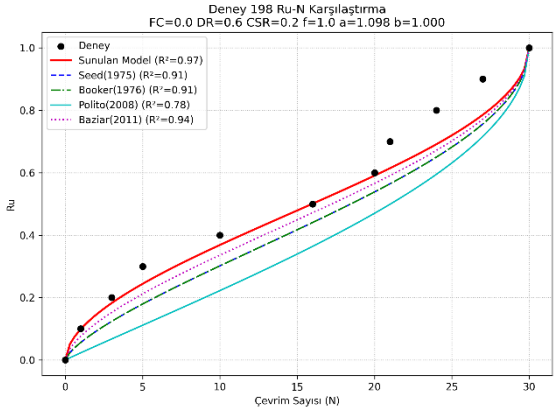

Deney 193 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.5 DR=0.4 CSR=0.1 f=1.0 a=1.251 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.95)
Booker(1976) (R²=0.95)
Polito(2008) (R²=0.87)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

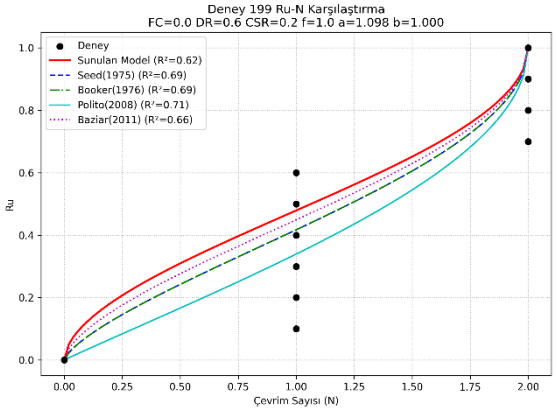

Deney 194 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.4 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.82)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.86)
Baziar(2011) (R²=0.85)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

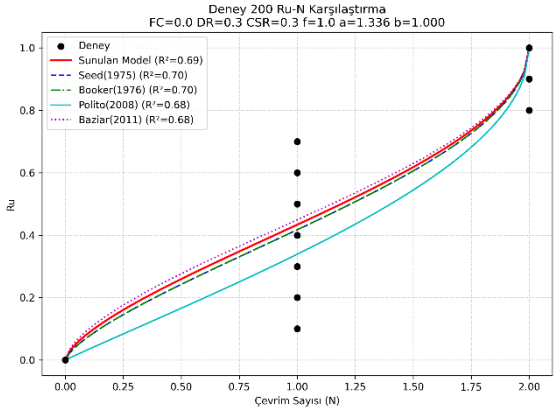

Deney 195 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.90)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.74)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

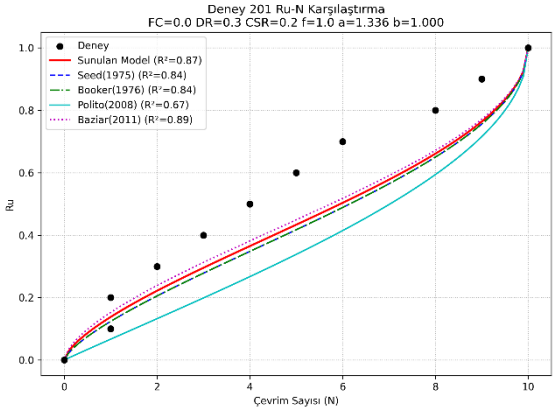

Deney 196 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.95)
Seed(1975) (R²=0.86)
Booker(1976) (R²=0.86)
Polito(2008) (R²=0.71)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

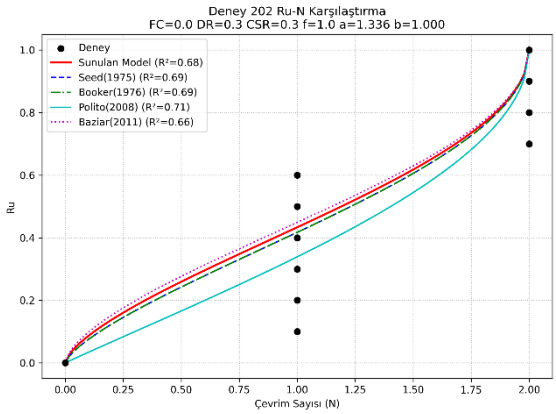

Deney 197 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.3 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.78)
Seed(1975) (R²=0.73)
Booker(1976) (R²=0.73)
Polito(2008) (R²=0.60)
Baziar(2011) (R²=0.76)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

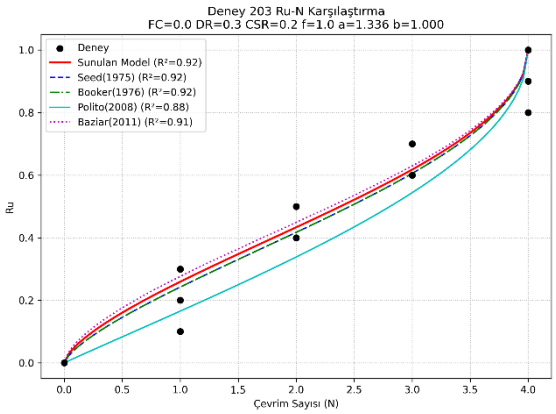

Deney 198 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.97)
Seed(1975) (R²=0.91)
Booker(1976) (R²=0.91)
Polito(2008) (R²=0.78)
Baziar(2011) (R²=0.94)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

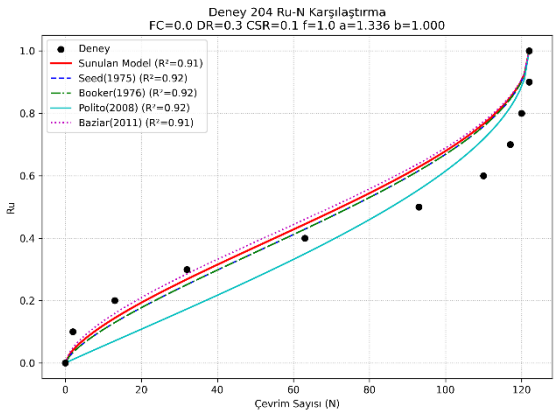

Deney 199 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.6 CSR=0.2 f=1.0 a=1.098 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.62)
Seed(1975) (R²=0.69)
Booker(1976) (R²=0.69)
Polito(2008) (R²=0.71)
Baziar(2011) (R²=0.66)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

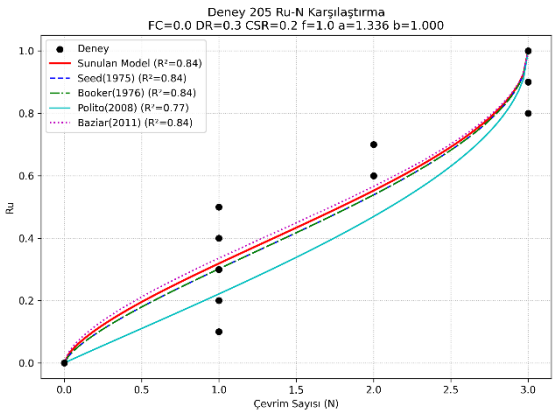

Deney 200 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.3 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.69)
Seed(1975) (R²=0.70)
Booker(1976) (R²=0.70)
Polito(2008) (R²=0.68)
Baziar(2011) (R²=0.68)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

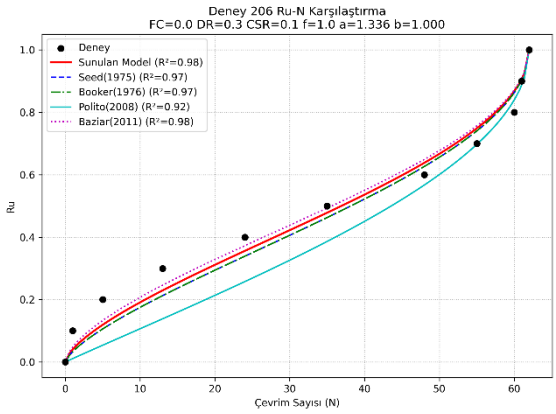

Deney 201 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.87)
Seed(1975) (R²=0.84)
Booker(1976) (R²=0.84)
Polito(2008) (R²=0.67)
Baziar(2011) (R²=0.89)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

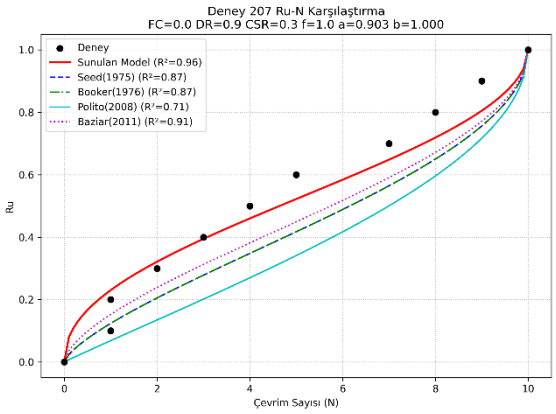

Deney 202 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.3 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.68)
Seed(1975) (R²=0.69)
Booker(1976) (R²=0.69)
Polito(2008) (R²=0.71)
Baziar(2011) (R²=0.66)
Ru
Çevrim Sayısı (N)

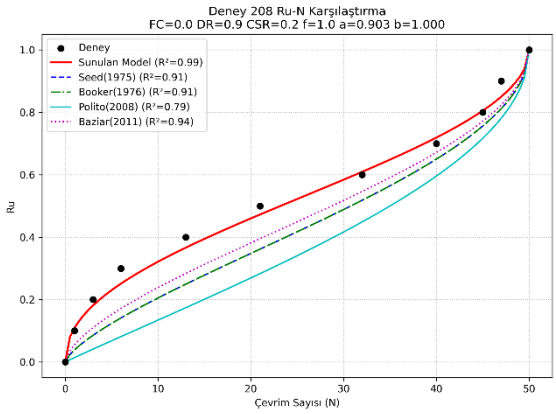

Deney 203 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.92)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.88)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)


Deney 204 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.1 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.91)
Seed(1975) (R²=0.92)
Booker(1976) (R²=0.92)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)


Deney 205 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.2 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.84)
Seed(1975) (R²=0.84)
Booker(1976) (R²=0.84)
Polito(2008) (R²=0.77)
Baziar(2011) (R²=0.84)
Ru
Çevrim Sayısı (N)


Deney 206 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.3 CSR=0.1 f=1.0 a=1.336 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.98)
Seed(1975) (R²=0.97)
Booker(1976) (R²=0.97)
Polito(2008) (R²=0.92)
Baziar(2011) (R²=0.98)
Ru
Çevrim Sayısı (N)


Deney 207 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.9 CSR=0.3 f=1.0 a=0.903 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.96)
Seed(1975) (R²=0.87)
Booker(1976) (R²=0.87)
Polito(2008) (R²=0.71)
Baziar(2011) (R²=0.91)
Ru
Çevrim Sayısı (N)


Deney 208 Ru-N Karşılaştırma
FC=0.0 DR=0.9 CSR=0.2 f=1.0 a=0.903 b=1.000
Deney
Sunulan Model (R²=0.99)
Seed(1975) (R²=0.91)
Booker(1976) (R²=0.91)
Polito(2008) (R²=0.79)
Baziar(2011) (R²=0.94)
Ru
Çevrim Sayısı (N)