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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# DARBELİ KIRMATAŞ KOLON DESTEKLİ RADYE TEMEL SİSTEMLERİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

**Yusuf AVCİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA**
**2023**

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**


ÖZET ..... i
ABSTRACT ..... ii
TEŞEKKÜR ..... iii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... iv
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... vii
1. GİRİŞ ..... 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ..... 6
3. MATERYAL ve YÖNTEM ..... 12
3.1. Materyal ..... 12
3.1.1. DKTK sistemleri ..... 12
3.1.2. DKTK yapım yöntemleri ..... 13
3.1.2.1. Geopier sistemi (yer değiştirme metodu) ..... 13
3.1.2.2. Geopier sistemi üretim metodu ..... 14
3.1.2.3. Impact sistemi (etki metodu) ..... 15
3.1.2.4. Impact sistemi imalat yöntemi ..... 16
3.1.3. Tekil darbeli kırmataş kolonu ile ilgili bilgiler ..... 16
3.2. Yöntem ..... 18
3.2.1. Tekil darbeli kırmataş kolonunun modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ..... 18
3.2.1.1. Modelleme ve analiz detayları ..... 19
3.2.2. Darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ..... 22
3.2.2.1. Parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesi analiz detayları ..... 23
3.2.3. İstatistiksel anlamlılık ve optimizasyon analizleri ..... 31
3.2.3.1. Varyans analizi (ANOVA) ..... 32
3.2.3.2. Tepki yüzey optimizasyon yöntemi ..... 32
3.2.3.3. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma optimizasyon yöntemi ..... 32
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA ..... 40
4.1. Tekil DKTK'nın Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ve Analizin Doğrulanması ..... 40
4.2. Parametrik Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ..... 45
4.3. İstatistiksel Anlamlılık ve Optimizasyon Analizlerinin Sonuçları ..... 70
4.3.1. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları ..... 70
4.3.2. Tepki yüzey optimizasyon yöntemi sonuçları ..... 71
4.3.3. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma optimizasyon yöntemi sonuçları ..... 74
4.3.4. Optimizasyon analizinin doğrulanması ..... 76
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER ..... 78
5.1. Sonuçlar ..... 78
5.2. Öneriler ..... 79
KAYNAKLAR ..... 81
ÖZGEÇMİŞ ..... 86

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## DARBELİ KIRMATAŞ KOLON DESTEKLİ RADYE TEMEL SİSTEMLERİNİN ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

**Yusuf AVCİ**

**Harran Üniversitesi**
**Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN**
**Yıl: 2023, Sayfa: 86**

Bu tez çalışmasında, darbeli kırmataş kolonları (DKTK) ile desteklenen radye temel sistemlerinde güvenli tasarım ve maliyet dengesi çerçevesinde optimum tasarıma ulaşmak için çok sayıda üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada sahada yükleme testi yapılmış tekil DKTK üç boyutlu modellenerek sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilip model doğrulanmıştır. Doğrulama sonrası, DKTK'lar arası mesafe, radye temel kalınlığı ve DKTK elastisite modüllerinin değiştirilmesiyle 81 farklı kombinasyonda radye temel-DKTK grubu sistemi oluşturulup analiz edilmiştir. Tüm sistemlerde yer alan tüm DKTK'ların ve radye temellerin deformasyonları detaylı grafikler oluşturularak incelenmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler ile yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi ve Tepki Yüzey Metodu kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasında tüm girdiler serbest veri aralığında bırakılırken maliyet ve deformasyon bağımlı değişkenleri dengeli bir tasarıma ulaşabilmek için her iki yöntemde de minimize edilmiştir. Değişen parametrelerin oturma ve maliyet üzerine etkisi incelenmiştir. Çok amaçlı olarak gerçekleştirilen optimizasyonlarda belirtilen iki farklı yöntem birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Daha yüksek bir arzu edilebilirlik değerine sahip olan yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Optimizasyon Yöntemi tarafından sunulan çözümler optimum tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasından elde edilen verilere dayalı üç boyutlu yeni bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek optimizasyon analizi doğrulanmıştır. Böylece radye temel-DKTK sistemleri için proje uygulayıcılarına ve araştırmacılara yol gösterecek maliyet-güvenlik dengesi kurulmuş optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi, Darbeli kırmataş kolonlar, Zemin iyileştirme, Optimizasyon, Radye temel

## ABSTRACT

**MSc Thesis**

**THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF RAFT FOUNDATION SYSTEMS SUPPORTED WITH RAMMED AGGREGATE PIERS**

**Yusuf AVCİ**

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

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Arda Burak EKMEN**
**Year: 2023, Page: 86**

In this thesis, numerous three-dimensional finite element analyzes were conducted to reach the optimum design within the framework of safe design and cost balance in raft foundation systems supported by rammed aggregate piers (RAP). In the first stage, a finite element analysis was performed, and the model was verified by three-dimensional modeling of a single RAP, which was subjected to a loading test in the field. Behind verification, 81 different combinations of raft foundation-RAP group systems were created and analyzed by varying the distance between the RAPs, the raft foundation thickness, and the RAP elasticity modules. Deformations of all RAPs and raft foundations in all systems were examined by creating detailed graphics. An optimization study was conducted utilizing the novel Goal Attainment Method supported by artificial intelligence and the Response Surface Method with the data obtained from the analysis results. In the optimization study, all the inputs were in range, while the dependent variables of cost and deformation were minimized in both methods to reach a balanced design. The effects of varying parameters on settlement and cost were examined. Two different methods specified in the optimizations performed as multi-objectives were compared with each other. The solutions offered by the artificial intelligence-supported novel Goal Attainment Method, which has a higher desirability value, were determined as the optimum design parameters. The optimization analysis was verified by performing a new three-dimensional finite element analysis based on the data obtained from the optimization study. Accordingly, optimum design parameters for raft foundation-RAP systems have been received, with a cost-safety balance that will guide project practitioners and researchers.



**KEYWORDS:** Three-dimensional finite element analysis, Rammed aggregated piers, Soil improvement, Optimization, Raft foundation

# TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitiminde desteklerini her daim hissettiğim ve her yönden örnek aldığım kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN (Harran Üniversitesi) ve eğitim hayatım boyunca yanımda olan, beni destekleyen ve maddi manevi yardımları sayesinde bugüne gelmemi sağlayan aile üyelerimin her birine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa No**

Şekil 1.1. Yükleme testi gerçekleştirilmiş tekil DKTK'nın konumu ve plan görünümü..... 4
Şekil 3.1. DKTK sistemlerinin diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması ..... 13
Şekil 3.2. Geopier sistemi imalat adımları ..... 15
Şekil 3.3. Tekil DKTK'nın gerçek geometrik biçimi kullanılarak oluşturulan 3B SE modeli..... 20
Şekil 3.4. Tekil DKTK ve zemin katmanlarının yakın plan görüntüleri ..... 20
Şekil 3.5. Tekil DKTK ve zemin katmanlarının 3B SE ağının genel görüntüsü..... 21
Şekil 3.6. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde değişen parametrelere göre oluşan kombinasyonlar ..... 25
Şekil 3.7. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K1, K2 ve K3)..... 26
Şekil 3.8. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K4, K5 ve K6)..... 26
Şekil 3.9. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K7, K8 ve K9)..... 26
Şekil 3.10. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K1, K2 ve K3 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü ..... 28
Şekil 3.11. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K4, K5 ve K6 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü ..... 29
Şekil 3.12. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K7, K8 ve K9 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü ..... 30
Şekil 3.13. Yapay zeka destekli geliştirilen algoritma ..... 34
Şekil 3.14. Yapay sinir ağları kullanılarak ağ oluşturulurken dikkate alınan parametreler..... 35
Şekil 3.15. Yapay sinir ağları ile oluşturulmuş en iyi ağın performansıyla ilgili iterasyonlara bağlı MSE değerleri..... 36
Şekil 3.16. Yapay sinir ağları ile oluşturulmuş en iyi ağın performansıyla ilgili hata histogramı..... 37
Şekil 3.17. YSA ile oluşturulmuş en iyi ağın istatistiksel değerlendirmesi..... 38
Şekil 4.1. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 1,2) ..... 41
Şekil 4.2. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 3,4) ..... 42
Şekil 4.3. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 5,6)..... 42
Şekil 4.4. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 7)..... 43
Şekil 4.5. Tekil DKTK için deneysel ve nümerik yük-oturma sonuçları ..... 44
Şekil 4.6. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (36.62 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-1 ..... 46
Şekil 4.7. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (36.62 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-2 ..... 47
Şekil 4.8. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (329.61 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-1 ..... 48

Şekil 4.9. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en yüksek DKTK elastisite modülüne (329.61 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-2 ..... 49
Şekil 4.10. DKTK grupları destekli radye temellerin her bir kombinasyonu için elde edilen maksimum deformasyonlarının sonuçları ..... 50
Şekil 4.11. DKTK grupları destekli radye temellerin elastisite modülüne bağlı radye temel sisteminde oluşan maksimum deformasyonlarının sonuçları ..... 52
Şekil 4.12. DKTK grupları destekli radye temellerin radye temel kalınlığına bağlı elde edilen maksimum deformasyonlarının sonuçları ..... 53
Şekil 4.13. DKTK grupları destekli radye temellerin kolon aralığına bağlı radye temel sistemindeki maksimum deformasyonlarının sonuçları ..... 54
Şekil 4.14. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =2.8 m için elde edilen sonuçlar ..... 55
Şekil 4.15. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =4.2 m için elde edilen sonuçlar ..... 56
Şekil 4.16. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =5.6 m için elde edilen sonuçlar ..... 58
Şekil 4.17. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar ..... 60
Şekil 4.18. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar ..... 61
Şekil 4.19. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6 m için elde edilen sonuçlar ..... 62
Şekil 4.20. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar ..... 64
Şekil 4.21. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar ..... 65
Şekil 4.22. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6. m için elde edilen sonuçlar ..... 66
Şekil 4.23. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar ..... 67
Şekil 4.24. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar ..... 68
Şekil 4.25. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6 m için elde edilen sonuçlar ..... 69
Şekil 4.26. Tepki Yüzey Yöntemi kullanılarak oluşturulmuş optimizasyon grafikleri; a-c) deformasyon bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, d-f) maliyet katsayısı bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, g-ı) arzu edilebilirlik grafikleri .... 73
Şekil 4.27. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma yöntemi kullanılarak oluşturulmuş optimizasyon grafikleri; a-c) deformasyon bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, d-f) maliyet katsayısı bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, g-ı) arzu edilebilirlik grafikleri ..... 75
Şekil 4.28. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması ..... 77

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa No**

Çizelge 3. 1. Sıkıştırılmış agrega, alüvyal kil ve düşük plastisiteli siltin parametreleri ..... 17
Çizelge 3. 2. Tekil darbeli kırmataş kolonun zemin parametreleri ..... 17
Çizelge 3. 3. Yapay sinir ağları ile fonksiyon oluşturmak için tercih edilen seçenekler..... 35
Çizelge 4. 1. ANOVA sonuçları..... 71
Çizelge 4. 2. Bu çalışmadaki tüm optimizasyon yöntemleri için belirlenen değişken tanımları..... 72
Çizelge 4. 3. Tepki Yüzey Yöntemi ile elde edilen optimizasyonun sonuçları..... 72
Çizelge 4. 4. Yapay zeka destekli hedefe ulaşma yöntemi ile elde edilen optimizasyonun sonuçları.. 74

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| B | Radye Temel Genişliği |
| $c'$ | Efektif Kohezyon |
| $D_E$ | Darbeli Kırmataş Kolonu Elastisite Modülü |
| $df$ | Serbestlik Derecesi |
| $d_i$ | Arzu Edilebilirlik Fonksiyonu |
| DKTK | Darbeli Kırmataş Kolon |
| E | Elastisite Modülü |
| F(x) | Hedef |
| G | Tasarım Hedefi |
| $K_a$ | Kolon Aralığı |
| L | Radye Temel Uzunluğu |
| m/m | Merkezden Merkeze Kolonlar Arası Mesafe |
| $MS_x$ | Ortalama Kare |
| $R_k$ | Radye Temel Kalınlığı |
| $SS_x$ | Kareler Toplamı |
| 3B SE | Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar |
| w | Ağırlık Katsayısı |
| YSA | Yapay Sinir Ağları |
| $Y$ | Hedef Fonksiyonu |
| $\gamma$ | Birim Hacim Ağırlık |
| $\Psi(^\circ)$ | Dilatasyon Açısı |
| $\Phi'(^\circ)$ | Efektif İçsel Sürtünme Açısı |
| $v'$ | Efektif Poison Oranı |

# 1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği projelerinde mevcut zemin ortamının yapıyı güvenli bir şekilde taşıyabilecek yeterli kapasiteye sahip olmaması halinde çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Aşırı oturma, taşıma gücü yetersizliği, zemin sıvılaşması ve duraysızlık gibi mühendislik problemleri barındıran zeminler, iyileştirme uygulamalarına gereksinim duyabilmektedir. Yapıların geoteknik ve sismik risklerinin değerlendirilmesi sonucunda, yapı sahasının yerinin değiştirilmesi ya da arzu edinilen özellikleri taşımayan zeminin kaldırılıp yerine uygun zeminlerin kullanılması düşünülebilinir, fakat bu yöntemlerin uygulanabilirliği özellikle ekonomik sebeplerden dolayı uygun görülmemektedir. Proje için efektif olan zemin iyileştirme yöntemlerinin seçiminde çoğunlukla zeminin tipi, yapı türü, uygulanacak yükün mertebesi, uygulanabilirlik, maaliyet ve/veya süre önemli rol oynamaktadır. Bu etkenler dikkate alınarak proje için zemin iyileştirme yöntemlerinden darbeli kırmataş kolonlar, taş kolonlar, jet grout, vibrokompaksiyon-vibroflatasyon vb. güçlendirme yöntemleri tercih edilebilmektedir. Mühendislik projelerinde yapılacak olan zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, yeterli olmayan zeminlerdeki taşıma kapasitesinin artmasını sağlamak, temel oturmalarını uygun seviyelere indirebilmek ve gerekli durumlarda diğer zemin problemlerinin önüne geçmektir.

Mühendislik alanındaki zemin problemleri için, zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi veya birkaçı çeşitli etkenler dikkate alınarak uygulanıp zemin iyileştirilmesi sağlanabilir. Özellikle 1970'li yıllardan itibaren geliştirilen çok sayıda yeni yöntem ile sorunlu olan zeminlerin güçlendirilmesi yapılmakta, zeminlerde oluşan oturma sorunu engellenmekte ve temellerin taşıma gücünün arttırılması sağlanmaktadır. Darbeli kırmataş kolonlar, uzun bir süredir zeminlerin taşıma gücünü arttırmak amacıyla kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir (Lawton ve Fox, 1994). Son yıllarda zeminlerin taşıma kapasitesinin arttırılmasında ve oturmaların azaltılmasında darbeli kırmataş kolon (DKTK) elemanlarının kullanımı artmıştır. Gün geçtikçe darbeli kırmataş kolonların popülerliğini arttırması, dünyada bu yöntemin zemin iyileştirme tekniğinde kullanılmasında önemli bir konuma gelmesini

sağlamıştır. Genel itibariyle zeminin yerine geçerek düşey darbeleme sayesinde kırmataşın sıkıştırılmasını temel alan DKTK, zayıf ve yetersiz olan zeminlerin güçlendirilmesinde tercih edilen bir metottur (Fox ve Cowell, 1998). Diğer yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve imalatının daha kolay olmasından dolayı darbeli kırmataş kolonlar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha önceden kazımı yapılan kuyu boşluklarına dolgu uygulanmasıyla güçlü agrega katmanlarının özel bir biçimde dizayn edilmiş bir tokmak yardımıyla sıkıştırılmasıyla darbeli kırmataş kolonlar üretilir (Fox ve Cowell, 1998). Darbe ile sıkıştırma uygulanmasının ardından kuyu içerisinde yer alan agrega; yatay bir şekilde kolonun baş kısmından dibine yönünde genişleme yapar, çevre zemininde ön gerilme kazanılmasını sağlar ve böylelikle zemin güçlendirilmesi sağlanır (Handy ve White 2006 I- II; White ve ark., 2004).

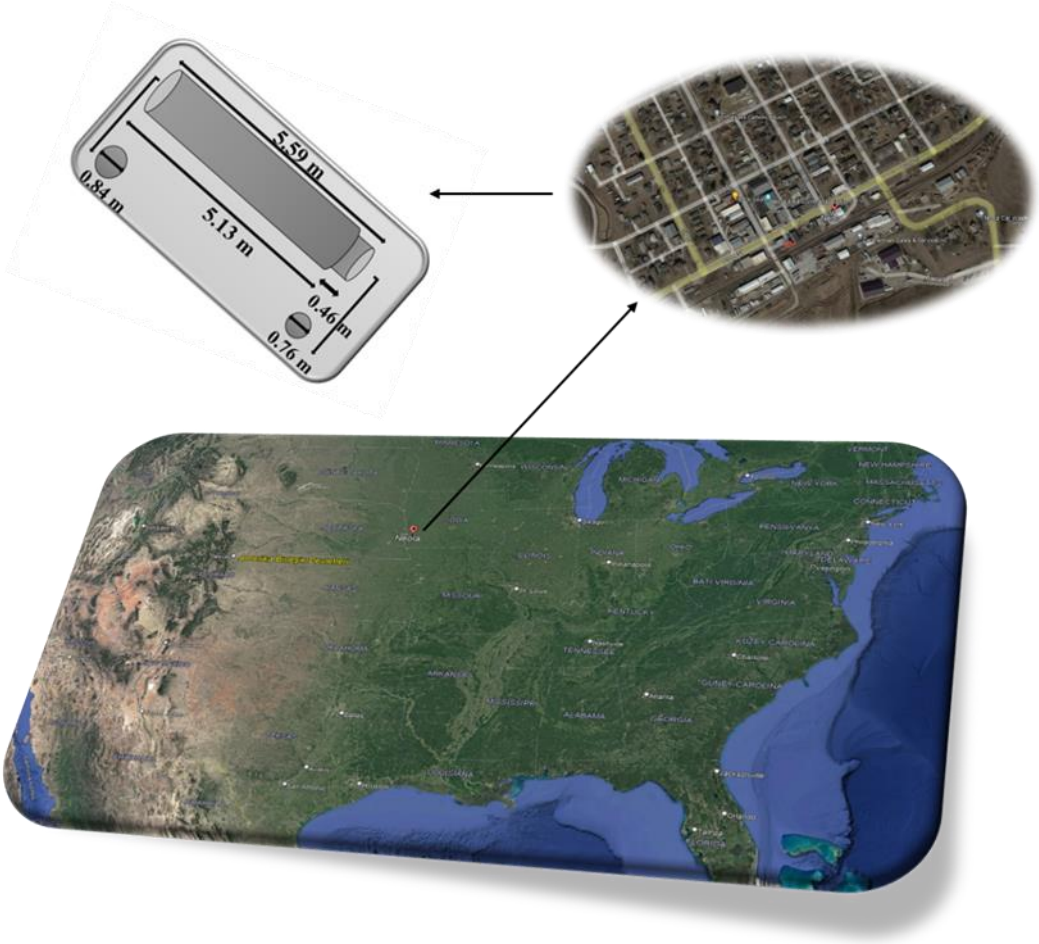
DKTK'lar, uygulama kolaylığı ve diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre önemli ölçüde ekonomik olmalarından dolayı, sorunlu zeminlerin güçlendirilmesinde ve diğer zemin sorunlarının giderilmesinde tercih edilirler. DKTK elemanları konut projeleri, ulaşım yapıları, enerji yapıları, liman sahaları ve daha birçok alanda kullanım alanına sahiptir. DKTK elemanlarının en önemli avantajı, kolonların üretilmesi sırasında düşey darbeleme sonucunda zeminlerde meydana gelen yan gerilmelerin oluşmasını sağlayarak, güçlü dayanım ve rijitlik özelliklerinin oluşmasını sağlamaktır (Handy ve White 2006 I- II; White ve Suleiman 2004; White ve ark, 2006). Özellikle DKTK ile ilgili 1989 yılından itibaren farklı bölgelerde araştırmalar yapılmıştır (örneğin, Lawton ve ark., 1994; Wissmann ve ark., 2002; Kwong ve ark., 2002; Allgood ve ark., 2003; Pham 2005; Suleiman ve White 2006; White ve ark., 2007; Pham ve White 2007; Andrews ve ark., 2009; Chen ve ark., 2009; Thompson ve Suleiman 2010; Halabian ve ark., 2012; Osman ve Hashim 2016; Algin ve Gumus 2018; Mohamed 2019; Thum ve ark., 2021). Son yıllarda DKTK'lar ile ilgili nümerik analizler de literatürde yaygınlaşmıştır. Chen ve ark., (2009) tekil DKTK'nın sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Algin ve Gumus (2018) ise DKTK grubu destekli temeller için detaylı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir.

Birçok mühendislik çalışmasının ana hedefi en ekonomik ve en güvenli tasarımının yapılmasını sağlamaktır. Optimizasyon çalışması ile güvenli ve ekonomik

tasarımlar dizayn edilebilmektedir. Optimizasyonu yapılmış bir sistem, yeterli seviyede performansı minimum maliyet düzeyinde koruyarak maksimum ekonomik çözüme ulaşmayı sağlayan bir tasarım olarak tanımlanmaktadır (Russo ve Viggiani, 1998). Optimum çözümlerin dizayn edilmesi, günümüzde mühendislik çalışmalarında temel gereksinim haline gelmiştir. Bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle birlikte mühendislik çalışmalarında karmaşık optimizasyon problemlerinin hızlı bir şekilde çözülebilmesi mümkün olmuştur. Bir sistemdeki kaynakların belirlenen amaca yönelik olarak en verimli ve uygun şekilde kullanılması optimizasyon çalışması ile sağlanabilir. Geoteknik mühendisliği kapsamındaki tasarımlarda optimizasyon kullanımı artarak devam etmektedir (örneğin; Basudhar, 2008; Zhang ve ark., 2009, October; Zhang ve ark., 2011; Fang, 2012; Nama ve ark., 2015; Zhao ve ark., 2016; Seitz ve Grabe, 2016; Alamanis, 2017; Zevgolis ve ark., 2018; Lafifi ve ark., 2019; Yin ve ark., 2019; Smith ve ark., 2020; Ekmen ve ark., 2020; Wolf ve ark., 2020, September; Xu ve ark., 2020, July; Kashani ve ark., 2021; Lohar ve ark., 2021; Xue ve ark., 2021; Khajehzadeh ve ark., 2022).

Pucker ve Grabe, (2011) yaptıkları çalışmada geoteknik mühendisliğinde yapısal optimizasyonun uygulamasını konu edinmişlerdir. Algin, (2016) Tepki Yüzey Yöntemini kullanarak jet-grout destekli radye temeller için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Hajihassani ve ark, (2018) geoteknik mühendisliğinde parçacık sürüsü optimizasyonu uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Yin ve ark, (2018) geoteknik mühendisliğinde zemin parametrelerinin belirlenmesi için optimizasyon teknikleri kullandıkları bir çalışma yürütmüşlerdir.

Bu çalışma kapsamında, DKTK destekli radye temel parametrelerini optimize etmek için çok sayıda (81 adet) üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) analizleri yapılmıştır. İlk aşamada Şekil 1.1.'de gösterilen Neola, Iowa (Amerika Birleşik Devletleri) bölgesindeki sahada tek bir DKTK için sahada yapılmış gerçek yükleme testinden (White ve ark., 2003; Pham 2005) yararlanılarak modeller hazırlanmıştır.




Şekil 1.1. Yükleme testi gerçekleştirilmiş tekil DKTK'nın konumu ve plan görünümü

White ve ark. (2003) tarafından sunulan çalışmadaki DKTK'yı esas alan Chen ve ark. (2009) ve Pham (2005)'in çalışmasında yer alan model ve zemin parametreleri kullanılarak Abaqus (2014) programı ile üç sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Zemin ortamının karmaşık yapısından dolayı DKTK'nın göstereceği performansı kavrayabilmek, çeşitli yükler etkisi sonucunda yapacağı oturma ve kolon sıkılığını tespit etmek için sahada gerçekleştirilen yükleme testinin sonuçları, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yük-deformasyon ilişkisi incelerek bu çalışmadaki tekil DKTK için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi doğrulanmıştır. Doğrulama sonrası, 81 farklı kombinasyonda radye temel altına DKTK grupları modellenmiş ve analiz edilmiştir. DKTK destekli radye temellerin üç boyutlu sonlu elemanlar analizine tabi tutulmasından sonra analiz sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak en uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Optimizasyon

çalışmasına veri sağlamak amacıyla DKTK elastisite modülleri, radye temel kalınlıkları ve kolon aralıkları değiştirilerek parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri Abaqus (2014) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler incelenerek optimizasyon çalışmasında kullanılacak olan faktörler ve bağımlı değişkenler belirlenmiştir.

Bu çalışma, DKTK sistemlerinin inşa sonrasını referans alan 3B SE modellemelerinin çeşitli teknikler kullanılarak nasıl güvenli ve ekonomik bir dizayn oluşturulacağını açıklamaktadır. Yapılan tasarımlarda radye temel kalınlığı, kolon aralıkları ve DKTK elastisite modülündeki değişimlerin oturmaya etkisi incelenmiştir. Üst düzey korelasyon katsayısına sahip optimizasyon fonksiyonu elde etmek için bu çalışma kapsamında yapay zeka desteğiyle en iyi yöntemin otomatik seçildiği yeni kodlama geliştirilmiştir. Böylece üst düzey korelasyon katsayısına sahip tahmin fonksiyonu optimizasyon analizinde kullanılmıştır. 81 farklı kombinasyonda tasarımı yapılmış olan modellerin sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen veriler yardımıyla iki farklı teknikle (Tepki Yüzey Yöntemi ve Yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi) yapılan optimizasyon çalışmasıyla DKTK sistemleri için en uygun, güvenli ve ekonomik tasarım parametreleri elde edilmiştir. Birden çok optimizasyon yöntemi aynı problem tipi için kullanılıp birbiriyle kıyaslanarak arzu edilebilirlik düzeyi en yüksek çözüm sistemi seçilmiştir. Böylece genel radye temel-darbeli kırmataş kolon grubu sistemleri için yeni yöntemlerle yüksek korelasyon değerlerindeki fonksiyonlar kullanılarak araştırmacılara yol gösterecek en uygun tasarımlar sunulmuştur.

# 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lawton ve ark. (1994), temel altına kısa darbeli kırmataş kolonlarını koyarak oturmaların kontrolü hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir.

Fox ve ark. (1998), DKTK'ların yapım aşamasını şu şekilde tanımlamıştır: Projede tespit edilmiş olan derinlik ve çapların dikkate alınmasıyla bir kazma aparatı yardımıyla boşluk açılır. Açılan boşluğun sonuna kırmataş kolon malzemesi yerleştirilmesiyle sıkılaştırılma işlemi uygulandıktan sonra DKTK'lar 30 cm'lik bir bölme şeklinde oluşturulur. Bölmelerde yapılan işlemlerin aynısı zemin yüzeyine varıncaya kadar devam edilir ve bunun sayesinde zeminde güçlü bir tabaka elde edilir.

Kwong ve ark. (2002), darbeli kırmataş kolonları kullanarak heyelanların duraylılığının sağlanması için bir çalışma yapmışlardır.

Wissmann ve ark. (2002, March), oturmalar ve genel stabilite kontrolü amacıyla darbeli kırmataş kolonlarını kullandıkları bir çalışma yapmışlardır. Arazi ve laboratuvar çalışmaları yürüterek, darbeli kırmataş kolonları, tasarım parametrelerini tespit etmişlerdir.

Allgood ve ark. (2003), yumuşak organik zeminler ve turba üzerine darbeli kırmataş kolonlarını kullanarak temeller için bir çalışma yapmışlardır.

Pham ve ark. (2005), darbeli kırmataş kolon sistemlerinin destek mekanizmaları hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir.

Suleiman ve White (2006), yapmış oldukları çalışmada darbeli kırmataş kolonlarında yük transferini incelemişlerdir.

Demir (2007), 22 m kalınlığında yumuşak kil ve orta katı kil tabakalarının oluşturduğu killi zemin üzerine 4 m yüksekliğinde yapılacak olan dolgu tabakasının

alt kısmında temel zemininin oturmalarını ve taşıma gücünü incelemiştir. Taşıma gücü hesapları ve oturmalar klasik hesap yöntemleri ile Plaxis programının kullanılmasıyla elde edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İyileştirilmemiş zemin üzerinde dolgu inşa edilmesinde davranış modeli, klasik hesap yöntemi ve sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmış, sonrasında iyileştirilmiş zeminin üzerinde taş kolon ve geopier kolonlar ile dolgu yapılması sağlanarak modellerin yük etkisi altında davranışları analiz edilmiştir.

Pham ve White (2007), rijit kare temellere destek sağlayan sıkıştırılmış agregalı ayakların mekanik davranışının incelendiği çalışmada, iki bölümden oluşan bir dizinin ikinci kısmını yapmışlardır. İki ayak destekli temel ve üç izole ayağın basınç testleri sırasındaki davranışlarını, eksenel simetrik bir sonlu eleman modeli ile simüle etmişlerdir ve deneysel bulgularla kıyaslanmalarını yapmışlardır.

White ve ark. (2007), izole rijit temellere destek sağlayan darbeli kırmataş kolon gruplarının mekanik davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, 2.8 ve 5.1 m olan iki farklı ayak uzunluğunda 0.76 m çapında dört DKTK ile desteklenmiş iki farklı 2.3 m kare betonarme temel üzerine inşa edilmiş yük testlerinden elde edilen deneysel test sonuçlarını sunmuşlardır.

Andrews ve ark. (2009), DKTK sistemini kullandıkları çalışmayla küresel stabilite, taşıma kapasitesi ve oturma kontrolünde iyileştirmeleri inceleyerek değerlendirmeler yapmışlardır.

Chen ve ark. (2009)'ın, tek bir DKTK üzerinde gerçekleştirilen yük testi için yapmış oldukları çalışma, yükleme boyunca boşluk genişlemesi simülasyonunu ve yapılan üç boyutlu sayısal bir analizi içermektedir. Sayısal modelin doğrulamasını, kolonun üst ve ucunda hesaplanan oturmalar ile ölçülen değerlerin karşılaştırması ile yapmışlardır.

Thompson ve Suleiman (2010), DKTK tasarım metotlarının yük-deformasyon ilişkisini ve materyal belirleme işlemlerini, Plaxis 2D programını kullanarak

araştırmışlardır. Tespit edilmiş boşluk duvar yer değiştirmesi ile volumetrik gerilme modelleme metotlarını ele almışlardır.

Demir (2011), laboratuvarda bir darbeli kırmataş kolonunu fiziksel olarak kırmataş kolon makinesini geliştirerek üretmiştir. Üretmiş olduğu darbeli kırmataş kolonunun Plaxis 2D sonlu elemanlar programında farklı malzeme parametreleri kullanarak modellemesini yapmış ve modelde gerçekleştirdiği sayısal analizlerle zemin davranışını araştırmıştır.

Kurt (2011), sorunlu zemini güçlendirmek için 4 DKTK'dan ve 4 taş kolondan oluşan sekiz kolonlu sistem kullanarak, Kırklareli iline bağlı Lüleburgaz ilçesindeki Sarımsaklı sahasında bir çalışma yürütmüştür. 50 cm çapında ve 6.50 m boyundaki kolonlar, on üç farklı inşa yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve bu kolonlara yükleme testi uygulanmıştır. Yük altında meydana gelen deformasyonlar, taşıma gücü ve rijitlik modülü faktörleri, yükleme testi sonuçlarından faydalanılarak Plaxis 2D programı aracılığıyla belirlenmiştir. Bütün analizler, SP (etki yöntemi yardımıyla üretilen DKTK elemanı), SPD (yer değiştirme yöntemi yardımıyla üretilen taş kolon elemanı) ve SPR (ön delgi yöntemi yardımıyla üretilen taş kolon) için yapılmıştır. Kurt (2011), DKTK'ların taş kolonlara kıyasla maliyet, yapım kolaylığı, önemli oranda zemin sorunlarını önleme ve istenilen taşıma gücünün oluşmasını sağlama açısından daha uygun bir zemin güçlendirme metodu olduğunu, sahada yapılmış olan yükleme testleriyle göstermiştir.

Halabian ve ark. (2012), yapmış oldukları çalışmada zemin güçlendirme metotlarından biri olarak kullanılan DKTK'ların tekil eleman ve grup olarak kullanımındaki durumlarını sonlu elemanlar analizleriyle araştırmışlardır. Mohr-Coulomb ve plastisite (cap plasticity) modellerini yapmış oldukları çalışmadaki temellere destek sağlayan darbeli kırmataş kolonlarda kullanarak, kolon ve zemin etkileşimini kavrayabilmek amacıyla sayısal analizler yapmışlardır.

Beşler (2013), DKTK ile güçlendirilmiş zeminlerde yükleme etkisiyle oluşan zemin parametrelerindeki değişimleri, Plaxis 3D yazılımıyla yapmış olduğu

çalışmadan ve sahada yapılmış deneylerden elde edilen sonuçları kullanarak incelemiştir. Güçlendirilmiş zeminlerin taşıma gücü verileri temel alınarak, arazide yapılan yükleme deneyleri ile ulaşılan sonuçlar ve mevcut metotlardaki tahmin edilen veriler arasında büyük farklılıkların olmadığı belirlenmiştir. Fakat, mevcut yöntemlerle tahmin edilen elastik oturma miktarları, sahada yapılmış deneylerin dikkate alınmadığı koşullarda, sonlu elemanlar ile tespit edilmiş olan değerlere göre, saha ölçümlerinden farklılıklar göstermiştir. Beşler (2013), DKTK sistemlerinin kullanımının yetersiz zeminlerin güçlendirilmesinde, zeminin rijitlik seviyesini ve dayanım gücünü arttırmada önemli bir etkisinin olduğunu yaptığı çalışmayla ortaya koymuştur.

Demir (2013), kil zemin bölgelerinin içerisinde oluşturulmuş DKTK elemanlarının durumlarının tasarım deneyleri ile araştırılması konusunu ele alarak bir çalışma yürütmüştür.

Kuruoglu ve ark. (2013), temel altına darbeli kırmataş kolonlar yerleştirerek, temel altındaki oturmaların ve iyileştirme faktörünün tahmin edilmesini, iki elastisite modülü (36 MPa ile 72 MPa), iki kohezyon (20 kPa ile 30 kPa), iki boyut (2.4 m ile 4.8 m) ve iki alan oranı (0.087 ile 0.34) kullanarak araştırmışlardır.

Kanmaz (2014), rijit kolonlar için göçme durumları, yerleştirme biçimleri ve hesap yöntemleri hakkında analizler yaparak bir çalışma yürütmüştür. Yapılan analizlerin sonucunda oturma miktarlarının azaldığı görülmüştür.

Bal ve Öner (2015), saha yükleme testleri ile DKTK elemanlarının düşey yöndeki yükler etkisiyle oluşan deformasyonunu ve davranış performansını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, deneyler 13 farklı bölgede imal edilmiş 63 kolon ile gerçekleştirilmiştir.

Çetin ve ark. (2015), 63 farklı sahada üretilen DKTK'nın davranışını incelemişlerdir. Arazide yapılmış deneylerin sonuçlarını, temsili SPT $N_{60}$'ın bir fonksiyonu şeklinde normal hale getirerek çeşitli eğriler elde etmişlerdir.

Bal ve Teymur (2016), üç çeşit üretim metodu yardımıyla taş kolonların performansını deneysel yükleme testlerinden elde edilen sonuçlar ile değerlendirmişlerdir.

Mungan (2016), zeminin kırmataş kolonları ile iyileştirilmesi konusunu detaylı bir şekilde ele almıştır.

Osman ve Hashim (2016), geleneksel zemin iyileştirmeye bir alternatif olan darbeli kırmataş kolonları, deneysel sonuçlar vasıtasıyla değerlendirmişlerdir. 20 cm çapa ve 60 cm uzunluğa sahip üç adet DKTK deney sahasına inşa edilmiştir. Osman ve Hashim (2016), birçok yaklaşık yöntem kullanarak DKTK ile desteklenmiş ve desteklenmemiş zeminlerdeki temellerin davranışını ve oturmalarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, zeminlerin güçlendirilmesinde taşıma gücü yetersiz zeminlerin DKTK ile desteklenmesinin önemli bir etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Öner ve ark. (2016), üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapmış oldukları çalışma kapsamında darbeli kırmataş kolonlardaki grup etkisini incelemişlerdir. 50 cm çaplı ve boyları 17 m olan, etki sistemi ile yapılmış DKTK elemanları yardımıyla sorunlu zemin sahalarındaki güçlendirmeyi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırmışlardır.

Çetin ve ark. (2017), iyileştirilmiş liman alanında darbeli kırmataş kolonlar ile yapılmış saha yükleme deneyinden elde edilen verilerle oturma davranışını incelemişlerdir. Bölgede, sıvılaşmaya karşı saf bir tabaka elde edilmesi ve sismik yüklerin etkisinde oturma miktarlarının azaltılması amacıyla 1.5-2 metrelik mesafelerde 6-18 m uzunluğunda kare geometrisinde DKTK üretimi yapılarak çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Algin ve Gumus, (2018), çalışmalarında darbeli kırmataş kolon destekli temellerde parametrik 3B SE analizleri gerçekleştirerek temel oturmaları hakkında incelemeler yapmışlardır. DKTK'ların inşa sonrası aşamasını, kurulum etkisini, derinlikle geometrik değişimini ve zemin ortamının üniform olmayan davranışını

dikkate alarak 3B SE modellemeleri oluşturmuşlardır. Karmaşık bir temel sisteminin 3B SE modellemesi için görüntü işleme tekniğini kullanmışlardır ve ilk sayısal modellemede, bir deneme DKTK'sı için literatürde daha önceden yapılmış iyi bilinen deneysel sonuçlarla karşılaştırma yaparak doğrulama sağlamışlardır. Doğrulamanın ardından parametrik bir çalışma ile, DKTK grubu ile desteklenen bir temelin tüm temel sistemiyle birlikte analizini, temel elemanları arasında karşılıklı etkileşimi dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Yüklerin, malzeme özelliklerinin, temel boyutlarının, DKTK aralığının ve uzunluklarının oturma üzerindeki etkilerini, çok sayıda tasarım konfigürasyonu ve zemin koşullarını dikkate alarak incelemişlerdir. 3B SE analizinden elde edilen sonuçlara dayalı bir yerleşim modeli geliştirebilmek amacıyla çoklu doğrusal olmayan regresyon analizleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışma ile ayrıca, önerilen istatistiksel modelin, değişkenlerin dikkate alınan sınır değerleri dahilinde, uç taşıyıcı DKTK grupları destekli temellerin oturma iyileştirmelerini tahmin etmek için arzu edilebilir şekilde doğru bir istatistiksel model olduğunu göstermişlerdir.

Çetin ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışmada, DKTK ve beton kolon üretiminin ardından zemindeki davranışın değişimini CPT sonuçları yardımıyla değerlendirerek incelemişlerdir.

Mohammed (2019), yürütmüş olduğu çalışmada DKTK ile güçlendirilmiş zeminlerin yükleme etkisindeki durumunu araştırmıştır.

Thum ve ark. (2021), sıvılaşabilir zeminde darbeli kırmataş kolonlarının sayısal modellemesi hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir.

Bal ve ark. (2021), Türkiye'de bir atıksu arıtma tesisinde darbeli kırmataş kolon sistemi ile iyileştirilmiş zeminler üzerine inşa edilmiş yapıların su testleri sırasındaki oturma performanslarını yaptıkları çalışmada sunmuşlardır.

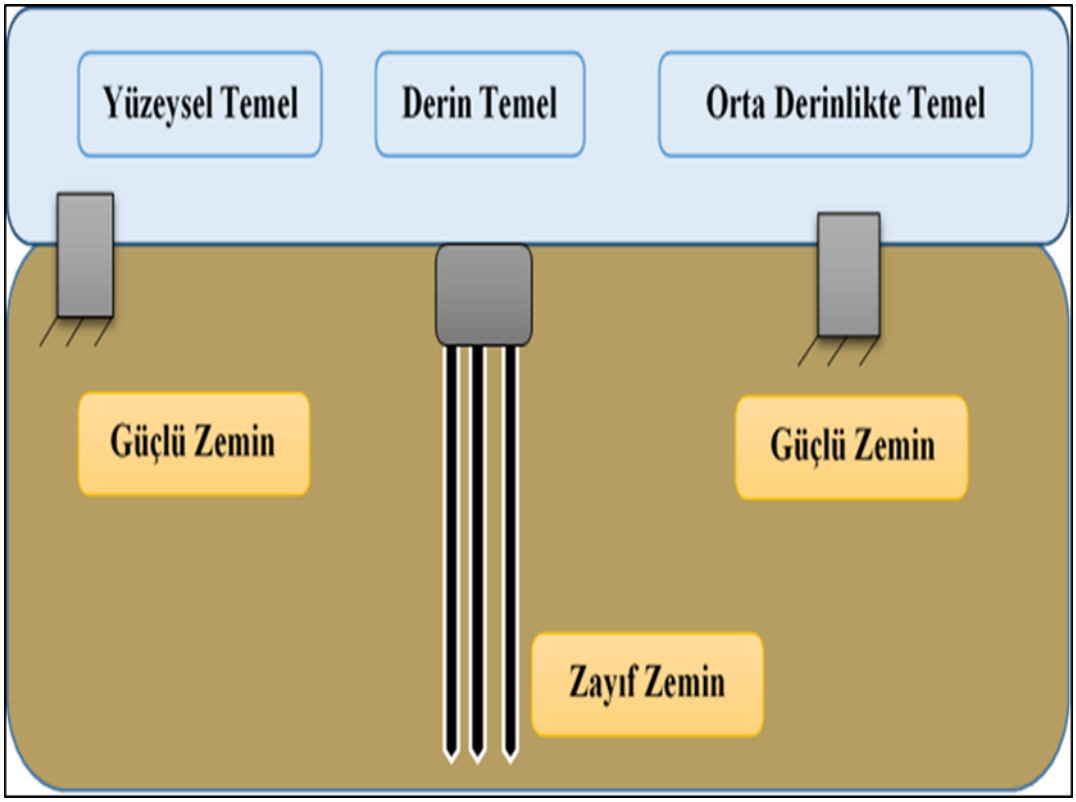
# 3. MATERYAL ve YÖNTEM

## 3.1. Materyal

Bu tez kapsamında, darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin tasarım ilkeleri araştırıldığından çalışmanın temel materyalini darbeli kırmataş kolon sistemleri ve imalat yöntemleri oluşturmuştur. Bu bölüm içerisinde darbeli kırmataş kolon sistemlerine değinilip çalışmanın en önemli noktalarından biri olan darbeli kırmataş kolon yönteminin tanımı, tasarımı, uygulama alanları ve imalat yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Aynı zamanda tasarımlarda dikkate alınan tekil darbeli kırmataş kolonu ile ilgili bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

### 3.1.1. DKTK sistemleri

Darbeli kırmataş kolonlar (DKTK), elverişsiz zeminlerin güçlendirilmesinde ekonomik bir yöntem olmasından ötürü son zamanlarda kullanımı gittikçe artan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. 1980'li yıllarda Amerika'da, DKTK yöntemi oturmaları istenilen düzeylere indirmek ve zayıf zeminlerde inşa edilen temellerin dayanımını arttırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntem Türkiye' de son yıllar içerisinde zemin iyileştirmede yaygınlaşarak tercih edilen bir metot haline gelmiştir. DKTK'nın öteki taş kolon imalat metotlarından farkı, kolonların granüler malzemesinin sıkıştırılmasıyla elde edilmesidir. Darbeli kırmataş kolonlar; birçok mühendislik yapısının güçlendirilmesini orta derinlikte temel kullanarak sağlamaktadır. DKTK sistemlerinin diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.




Şekil 3.1. DKTK sistemlerinin diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması

### 3.1.2. DKTK yapım yöntemleri

Darbeli kırmataş kolon sistemlerinin uygulama yöntemleri farklı imalat sistemlerine göre ayrılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, DKTK elemanlarının uygulanmasının ilk olarak geliştirildiği klasik bir yöntem olan Geopier sistemi (yer değiştirme metodu) hakkında bilgi verilerek, Geopier sisteminin imalat yöntemi anlatılmıştır. DKTK imalat yöntemlerinden bir diğeri olan ve özellikle son yıllarda kullanımı gittikçe artan Impact sistemi (etki metodu) tasarımı ve uygulama yöntemine de bu bölümde yer verilmiştir.

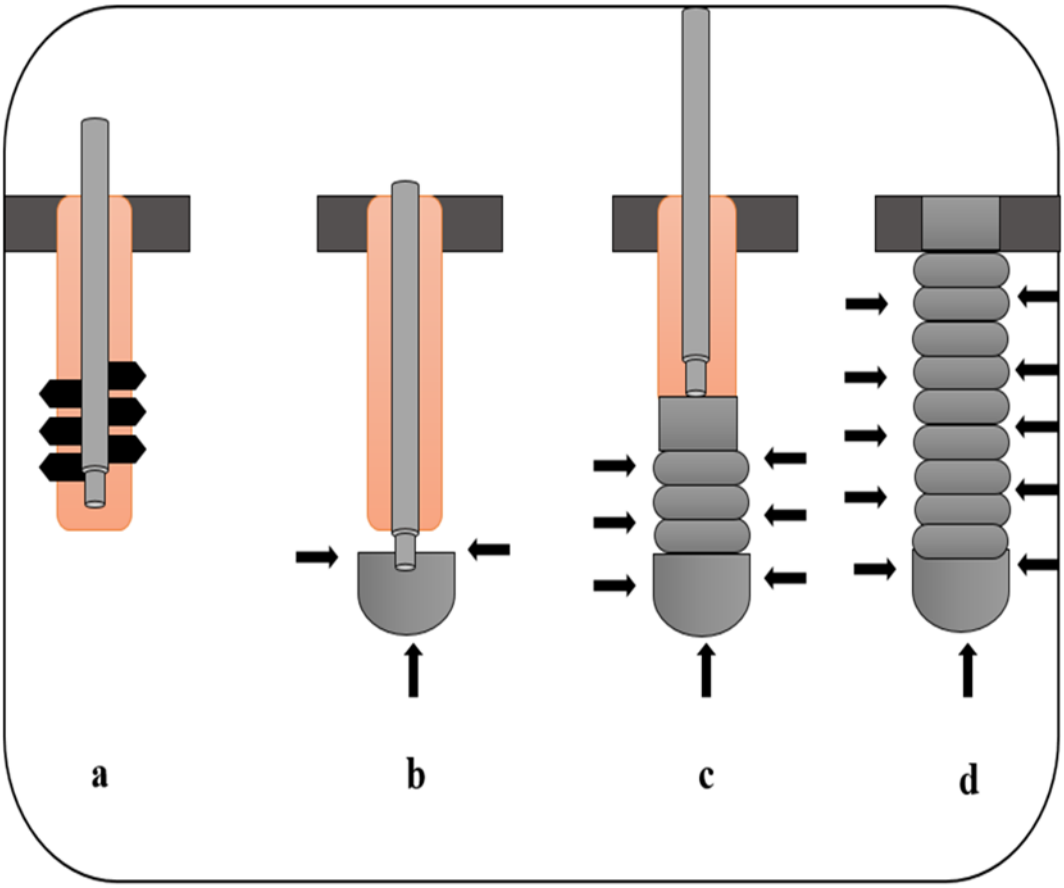
#### 3.1.2.1. Geopier sistemi (yer değiştirme metodu)

DKTK yapım yöntemlerinden biri olan Geopier sistemi, zayıf zeminin çıkartılıp yerine kolon hacmi kadar kırmataş doldurulmasıyla üretilen, zeminlerin güçlendirilmesindeki DKTK yöntemidir. Bu yöntemde burgu ile ön delme yapılarak

düşey darbelemenin etkisiyle sıkıştırılma işlemi yapılır. Özellikle proje ihtiyaçları baz alındığında, zemin taşıma kapasitesinin arttırılmasında ve farklı oturmaların uygun düzeylere getirilmesinde kullanılan oldukça etkili bir yöntemdir. Geopier sisteminde kullanılan çeşitli ekipmanlar mevcuttur. Bu yöntemde kullanılan dört ekipman muhafaza borusu, burgu, yükleyici ve tokmaktan oluşmaktadır.

### 3.1.2.2. Geopier sistemi üretim metodu

Geopier imalatının yapımı dört bölümden oluşmaktadır (Lawton ve Fox 1994, Lawton ve ark. 1994, Wissmann ve Fox 2000, Wissmann ve ark. 2000). Öncelikle zemin içerisinde mevcut olan 76 cm çapına sahip bir burgu sayesinde istenilen derinliğe göre bir kuyu açılır (Şekil 3.2.-a). Kuyu açılma işlemi esnasında yeraltı suyunun olması halinde, kuyu açılması işleminden önce muhafaza borusu çakılması işlemine geçilir. Tasarım ihtiyaçları baz alınarak kuyu derinliği 2 m ile 8 m arasında değişebilir ve kolon boyları 8,5 m'ye kadar olabilir. Açılmış olan kuyu 46 cm kalınlığında kırmataş malzemesi ile doldurularak tokmak yardımıyla 30 cm oranında bir bölme oluşacak biçimde darbeleme yapılır ve sıkıştırma işlemi uygulanır (Şekil 3.2.-b). Yapılan işlemlerin tekrar edilmesiyle sıkıştırılmış tabakaların zemin yüzeyinde sonlanması sağlanır (Şekil 3.2.-c-d). Geopier sisteminde geri dönüşümlü beton agregaları, kırmataş malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Orta yumuşaklığa sahip olan zeminler için de granüler malzeme olarak kum da kullanılabilmektedir. Geopier sistemi ile üretilen DKTK elemanları bulunan ortamda taşıma gücünün 480 kPa'ya kadar arttırılmasını sağlayabilmektedir. Geopier yönteminde, ortalama her gün 30-50 kolon yapılabilmektedir.




Şekil 3.2. Geopier sistemi imalat adımları

### 3.1.2.3. Impact sistemi (etki metodu)

DKTK yapım yöntemlerinden biri olan Impact sistemi, istenilen derinlik seviyesine göre mandrelin çakılmasıyla boşalan kırmataşın mandrel içerisine ilave edilmesiyle üretilir. Bu sistem zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde kullanılır. Bu yöntemde mandrelin zemini yan taraflara doğru itmesiyle zeminin yerine geçmesi ve düşey darbeleme enerjisi sayesinde kırmataşın sıkıştırılması işlemi uygulanır. Impact sistemi, proje ihtiyaçları ve hedeflenen doğrultular dikkate alınarak oturmaların uygun düzeylere indirilmesinde, zeminlerin taşıma gücünün arttırılmasında, konsolidasyonun hızlandırılmasında, şev ve dolguların stabilitesinin sağlanmasında ve sıvılaşmayı engellemede oldukça etkili olan bir yöntemdir. Impact sisteminde kullanılan çeşitli ekipmanlar mevcutur. Bu yöntemde kullanılan dört ekipman, etki makinesi, yükleyici, hazne ve mandrelden oluşmaktadır.

### 3.1.2.4. Impact sistemi imalat yöntemi

Kuyu içerisinde yer alan mevcut zeminin yanlara doğru yer değiştirmesini gerçekleştirerek zeminin sık hale gelmesini sağlayan bu metotta, uç kısmına plaka konulmuş 36 cm çaplı mandrel, istenilen tasarım derinliği seviyesine varıncaya kadar aşağı çekilir ve kırmataş eklenmesi ile tamamlanır. Bu işlemin ardından, mandrelin 1 m yukarı kaldırılması ve uygulanan basınç ile 67 cm aşağı seviyeye çekilmesiyle, 33 cm kalınlığında sıkıştırılmış 50 cm çapında bir bölme oluşturulmuş olur. Kolonun üst kısmına varıncaya kadar aynı işlemler devam ettirilerek sonraki bölmeler de oluşturulur. Sabit kuvvet ve vibratörün hareketli enerjisi sayesinde sıkıştırma yapılır. Bu yöntemde, tokmak ile hem düşey hem de yatay yönde sıkıştırma yapılır. Her iki yönde yapılan bu sıkıştırma işlemi sayesinde, oturma düzeyleri kontrol altına alınarak zeminin sağlamlılığı ve taşıma gücü arttırılır. Bu yöntem ile günde ortalama 40-100 kolon imalatı yapılabilmektedir.

### 3.1.3. Tekil darbeli kırmataş kolonu ile ilgili bilgiler

Darbeli kırmataş kolon elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi için proje sahasında çeşitli araştırmalar ve testler yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Amerika Birleşik Devletleri'nin Iowa eyaletinde bulunan Neola bölgesinde tekil darbeli kırmataş kolon denemeleri (Pham, 2005; White ve ark., 2003) dikkate alınmıştır.

Neola test sahasında gerçekleştirilen, boşluk suyu basıncı ölçümü, koni penetrasyon testi (CPT), presiyometre testi (PMT), dilatometre testi (DMT) ve sondaj kesme testi (BST) ile yürütülen çalışmalar sonucunda geoteknik verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır (Pham, 2005). Neola bölgesinde yapılan saha araştırması ve yürütülen testler sonucu elde edilen veriler, bu sahanın, buzul ve yıpranmış anakayanın üzerinde yer alan 13 m kalınlığında yumuşak alüvyallı bir kil tabakasından oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Alüvyallı kil çoğunlukla üniformdur ve zemin yüzeyine yakın 1 m kalınlığındaki düşük plastisiteli siltin altında yer almaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda ayrıca yeraltı suyu seviyesinin sahanın 2 m altında olduğu da

gözlemlenmiştir. Çizelge 3.1. sıkıştırılmış agrega, alüvyal kil ve düşük plastisiteli siltin geoteknik özelliklerini ayrıntılı bir şekilde göstermektedir (Pham, 2005; White ve ark., 2003).

Çizelge 3. 1. Sıkıştırılmış agrega, alüvyal kil ve düşük plastisiteli siltin parametreleri (Pham, 2005; White ve ark., 2003)

| **USCS sınıflandırması** | **$\gamma$ (kN/m$^3$)** | ***E* (MPa)** | ***v´*** | **$\Phi$´(˚)** | ***c´*(kPa)** | **$\Psi$ (˚)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Agrega (GP)** | 21 | 183.12 | 0.2 | 47 | 4 | 12 |
| **Alüvyal kil (CL)** | 18.9 | 9 | 0.2 | 24 | 2 | 0 |
| **Düşük plastisiteli silt (ML)** | 18.9 | 27.12 | 0.2 | 35 | 2 | 0 |

Neola test sahasında üretilen tekil darbeli kırmataş kolonun üretimi için, öncelikle 0.76 m çapında ve 5.05 m uzunluğunda bir boşluk kazılmıştır (Pham, 2005). Geri doldurma ve sıkıştırma işlemi özel olarak tasarlanmış eğimli bir tokmak kullanılarak yapılmıştır. Sıkıştırma uygulamasından önce ve sonra eğimli tokmak üzerindeki bir referans noktasında yaklaşık olarak 80 mm'ye eşit bir yer değiştirme ölçülmüştür (Pham, 2005). İlk başta kazılan 0.76 m çapındaki boşluğun yarıçapı, sıkıştırmadan sonra ölçüldüğünde yaklaşık 40 mm artmıştır. Bu sebeple, tokmakla sıkıştırma işlemi uygulandıktan sonra tekil darbeli kırmataş kolonun gerçek uzunluğu ve çapı, ilk kazılan boşluktan 80 mm daha büyük olarak belirlenmiştir (Pham, 2005). Tekil darbeli kırmataş kolonun 0.84 m çapında ve 5.13 m uzunluğunda olduğu ölçülmüştür (Pham, 2005). Tekil darbeli kırmataş kolonun üzerine ek olarak 0.46 m uzunluğunda ve 0.76 m çapında başlık yapılmıştır. Neola bölgesinde üretimi yapılan bu tekil darbeli kırmataş kolonun zemin parametrelerinin özellikleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir (Pham, 2005; White ve ark., 2003).

Çizelge 3. 2. Tekil darbeli kırmataş kolonun zemin parametreleri (Pham, 2005; White ve ark., 2003)

| **Malzeme İsmi** | **$\gamma$ (kN/m$^3$)** | ***E* (MPa)** | ***v´*** | **$\Phi$´(˚)** | ***c´*(kPa)** | **$\Psi$ (˚)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DKTK** | 21 | 183.12 | 0.2 | 47 | 4 | 12 |

## 3.2. Yöntem

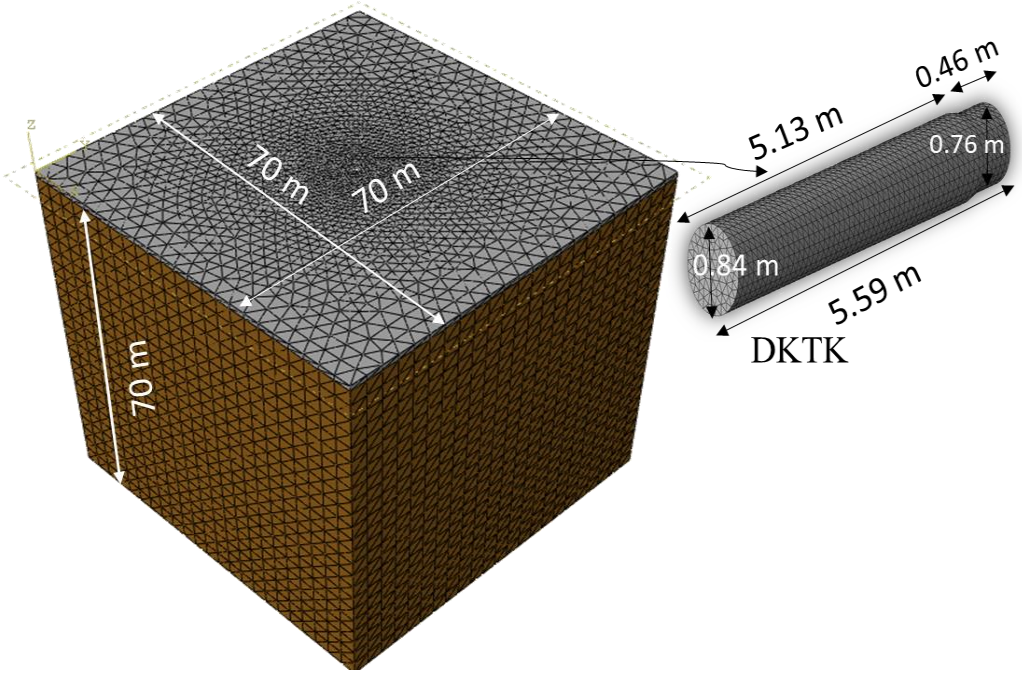
Bu tez çalışmasında, darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin tasarım prensiplerini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi esaslı çalışan yazılımlardan biri olan Abaqus (2014) programı ile tasarımı yapılan modellerden elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalardan faydalanarak gerçek deney verileri ve literatürde yapılmış olan diğer sonlu eleman modellerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Bu bölümde tekil darbeli kırmataş kolonunun modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile darbeli kırmataş kolon grupları destekli radye temellerin modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi anlatılmıştır. İstatistiksel anlamlılık ve optimizasyon analizleri Yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi ve Tepki Yüzey Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tekil darbeli kırmataş kolonuna ait modelleme ve analiz detayları ile darbeli kırmataş kolon grupları destekli radye temel sistemlerine ait olan parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesinin analiz detayları ve istatistiksel modelleme-optimizasyon analizi bilgileri bu bölümde sunulmuştur.

### 3.2.1. Tekil darbeli kırmataş kolonunun modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi

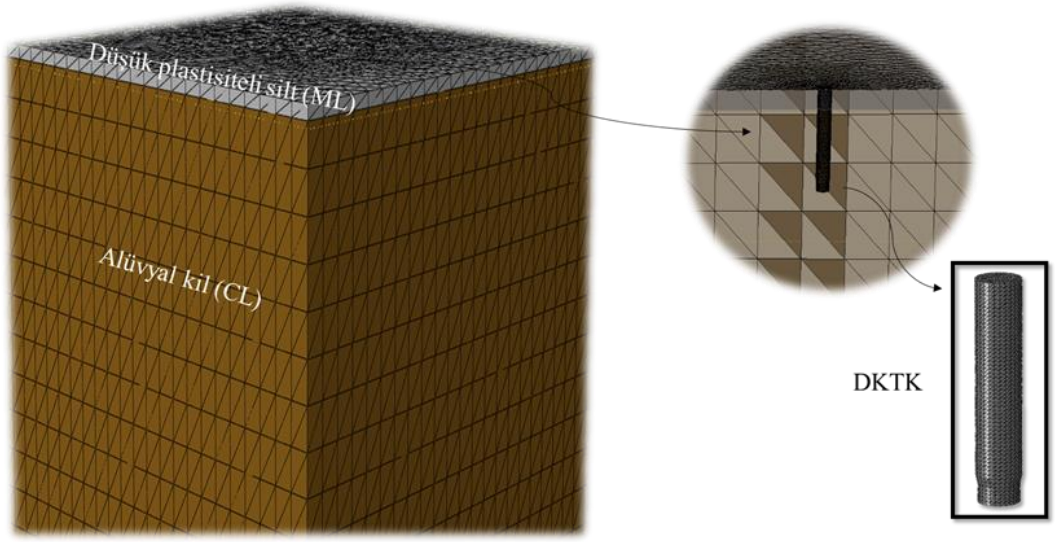
Bu bölümde tekil darbeli kırmataş kolonunun modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizine yer verilmiştir. Tekil darbeli kırmataş kolonun modelleme ve analiz detayları hakkında bilgiler bu bölümde yer almakla birlikte tekil darbeli kırmataş kolonunun üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçları ve analizin doğrulanması bu tez çalışmasının “4. Bölümünde” sunulmuştur.

### 3.2.1.1. Modelleme ve analiz detayları

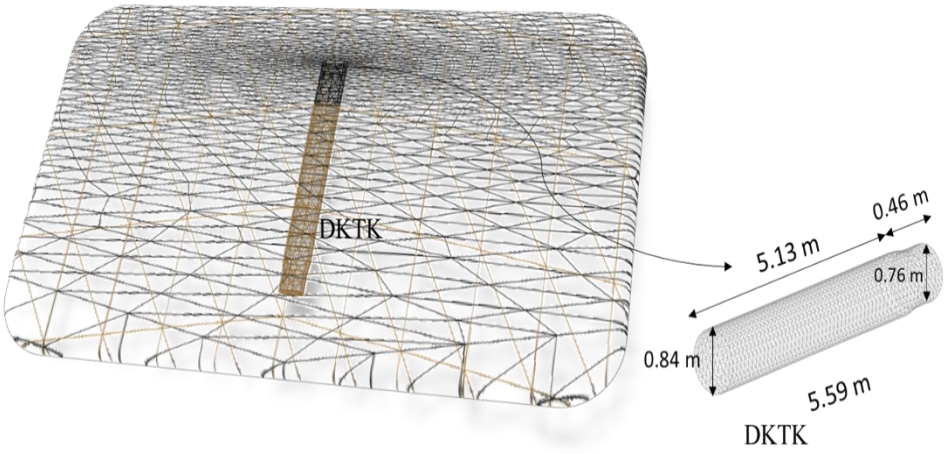
Tekil darbeli kırmataş kolonun tasarım detayları için, Neola bölgesinde üretilen deneme kolonuyla ilgili bilgiler sunan çeşitli araştırmacılar (White ve ark,. 2003; Pham., 2005; Chen ve ark., 2009) dikkate alınmıştır. Tekil DKTK'nın bulunduğu zemin ortamıyla birlikte üç boyutlu katı modellemesinde, tüm sistem parçaları uygun ağ elemanlarına bölünebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada tekil DKTK, zemin ortamıyla birlikte gerçeğe oldukça yakın bir biçimde ayrıntılı olarak, dikkate alınan çalışmalardaki (White ve ark,. 2003; Pham., 2005; Chen ve ark., 2009) orijinal boyutlarıyla modellenmiştir. Tekil DKTK'nın zemin ortamı ile hatasız bağlantısını sağlayabilmek amacıyla tekil DKTK ve zemin ortamı üç boyutlu bir şekilde ayrı katı modeller olarak uygun geometrilerde tasarlanmıştır. Modelin üç boyutlu sonlu elemanlar analizi için Abaqus (2014) programı kullanılmıştır. Modelin tamamında yakınsama çalışması yürütülerek, üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Deformasyon ve gerilmelerin sınır şartlarından etkilenmeden ulaşabileceği maksimum derinliği incelemek amacıyla, doğrulama analizi için zemin derinliği 70 m olarak seçilmiştir. Sınır şartları göz önünde bulundurularak modelin boyutları 70x70x70 m olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan modelde öncelikle zemin formu oluşturulmuştur. Daha sonraki aşamada tekil DKTK 0.84 m çapında, 5.13 m uzunluğunda dizayn edilmiştir ve tekil DKTK üzerine ek olarak 0.76 m çaplı ve 0.46 m uzunluklu bir başlık yapılmıştır. Tekil DKTK formu zeminin merkezinde oluşturulmuştur. Şekil 3.3., 3.4. ve 3.5.'te bu çalışma kapsamında gerçek zemin ortamında tasarlanan tekil DKTK modelinin üç boyutlu görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.3.'te tekil DKTK'nın gerçek geometrik biçimi kullanılarak oluşturulan 3B SE modeli, Şekil 3.4.'te tekil DKTK ve zemin katmanlarının yakın plan görüntüleri ve Şekil 3.5.'te 3B SE ağının genel görüntüsü gösterilmektedir.




Şekil 3.3. Tekil DKTK'nın gerçek geometrik biçimi kullanılarak oluşturulan 3B SE modeli




Şekil 3.4. Tekil DKTK ve zemin katmanlarının yakın plan görüntüleri




Şekil 3.5. Tekil DKTK ve zemin katmanlarının 3B SE ağının genel görüntüsü

Tasarlanan modelde kullanılacak olan parametreler Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de yer alan veriler dikkate alınarak modele tanımlanmıştır. Modelin geometrik kontrolü yapılarak hatasız olarak tasarlanan parçaların birleştirilmesi sağlanmıştır. Modelde alüvyal kil ve düşük plastisiteli siltten oluşan zemin ortamı ile tekil DKTK'ya ait olan materyaller ayrı ayrı tanımlanmıştır. Zemin ortamında mevcut olan 1 m kalınlığındaki düşük plastisiteli silt (ML) ve sınır şartları göz önüne alınarak tasarlanmış olan 69 m kalınlığındaki alüvyal kil (CL) modelde gerçeğe uygun biçimde oluşturulmuştur. Üretilen modeller, nonlineer analize uygun formatta tasarlanmıştır. Zemin davranış modeli olarak Mohr-Coulomb kullanılmıştır. Tekil DKTK ve zemin ortamının materyal tanımlama işleminin ardından modeldeki parçaların bağlantıları oluşturulmuştur. Tekil DKTK ile zeminin, üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesine uygun olacak biçimde Abaqus (2014) programında birbirlerine bağlantılarının yapılmasıyla, parçaların etkileşimde olmaları sağlanmıştır. Yüzeyden yüzeye temas seçeneği kullanılarak, parçalar arası bağlantılar oluşturulmuştur. Tekil DKTK'nın alt ve yan yüzeyleri ile zemin bağlantısı yapılarak etkileşim sağlanmıştır. Tasarımı Abaqus (2014) programında oluşturulmuş olan model için, alan yükü kullanılarak yük tanımlaması yapılmıştır. Modelde yeraltı suyu dikkate alınmış olup efektif parametreler kullanılmıştır. Yükleme işlemi için tekil DKTK'nın üst yüzeyi seçildikten sonra, alan yükü seçilen yüzeye uygulanmıştır. Yükleme işleminin ardından analizin sınır şartlarından etkilenmemesi amacıyla yakınsama çalışması yürütülerek, mesnetlerin yerleştirileceği bölgeler tespit edildikten sonra sınır şartları modele tanımlanmıştır. Modelin en alt ve yan yüzeylerinde düşey ve yatay

deformasyonlar sınırlandırılmıştır. Modelin üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde, analizin hassaslığı ve süresi dikkate alınarak ağ elemanlarına bölme işlemi son aşamada gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan modelde, tekil DKTK'nın karmaşık yapısından ötürü standart ağ elemanlarına bölme işlemi kullanılmamıştır. Tekil DKTK'nın karmaşık yapısı düşünülerek hassas bağlantı noktalarının hatasız bir biçimde ağ elemanlarına bölünebilmesi için tetrahedron elemanlar kullanılarak işlem tamamlanmıştır.

Tasarlanan modelde, hassas noktalardaki ağ elemanları otomatik olarak sıkılaştırılarak, analiz sırasında iterasyon sorunlarının ortaya çıkması engellenmiştir. Ağ elemanlarına bölme işleminin ardından analiz öncesinde gerekli kontroller sağlanarak modelde oluşabilecek hataların önüne geçilmiştir. Analiz sırasında yakınsama hatalarına yol açabilecek bağlantı noktalarında gerekli değişiklikler modele uygulanmıştır. Yapılan analizin ilk yükleme aşamasında 50 kN'luk yük modele tanımlanarak nonliner analiz başlatılmıştır. Yük-deformasyon ilişkisi belirlenerek sonuçların deneysel verilerle ve literatürdeki çalışmalarla (Pham, 2005; Chen ve ark., 2009) karşılaştırılabilmesi amacıyla yükleme aşamasına sırasıyla 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN, 300 kN ve 350 kN'luk yüklemelerle devam edilmiştir. Abaqus (2014) yazılımında yapılan analizler esnasında, uyarılar göz önüne alınarak, gerekli görülen durumlarda analizlerin yürütüldüğü iş istasyonunun işlem kapasitesi sanal bellek kullanılarak arttırılmıştır.

Sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş olan 7 adet farklı yük aşamasına sahip modelin analizleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Analizleri tamamlanan modellerin analiz raporları hassas ve ayrıntılı bir biçimde oluşturulmuştur.

### 3.2.2. Darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi

Bu bölümde darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin modellenmesi ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizine yer verilmiştir. Darbeli kırmataş kolon destekli

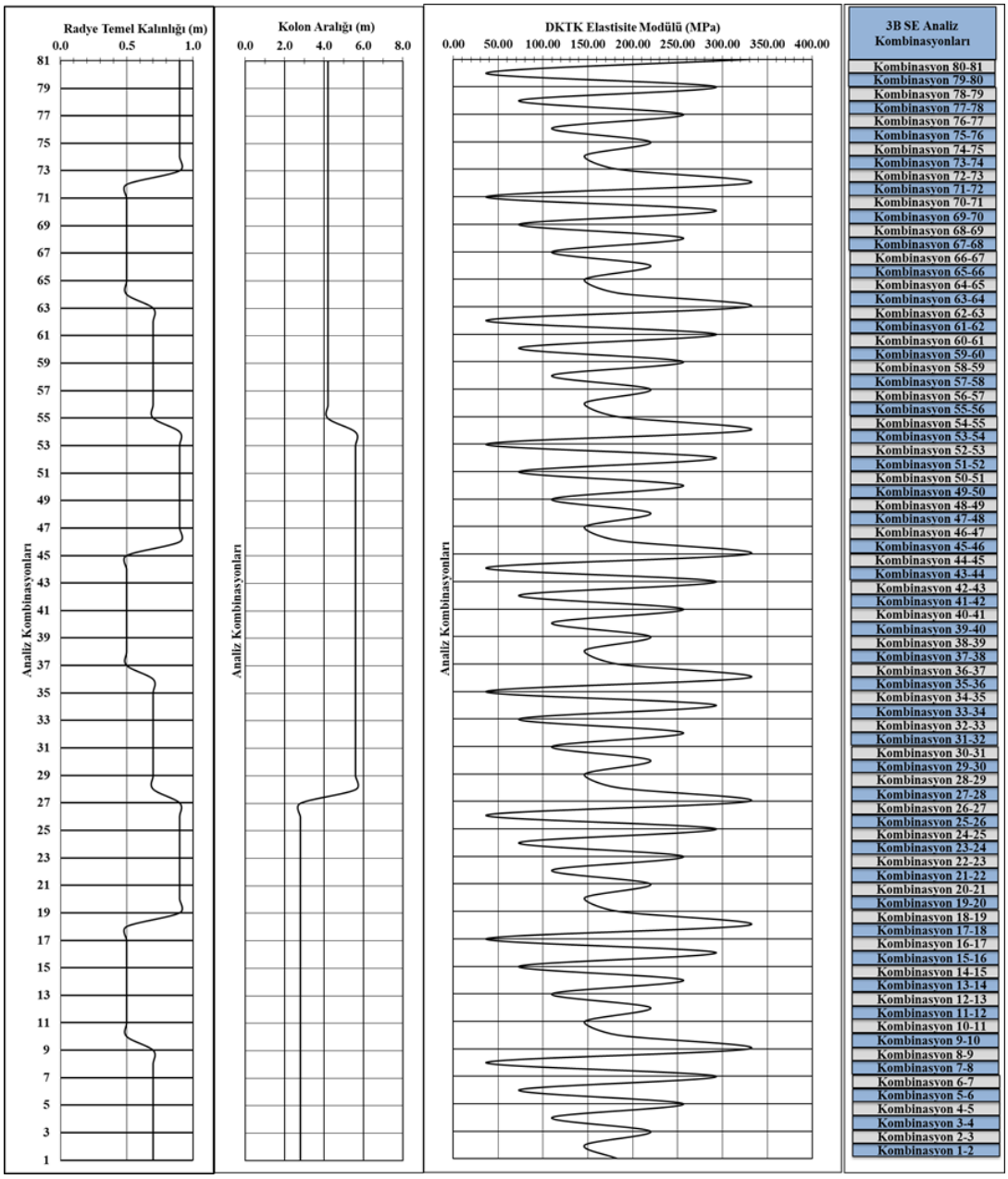
radye temellerin parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçları bu tez çalışmasının "4. Bölümünde" sunulmuştur.

### 3.2.2.1. Parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesi analiz detayları

Analiz doğrulama süreci tamamlandıktan sonra DKTK destekli radye temel sistemlerinin üç boyutlu modellenmesi ve parametrik analizlerinin yapılması aşamasına geçilmiştir.

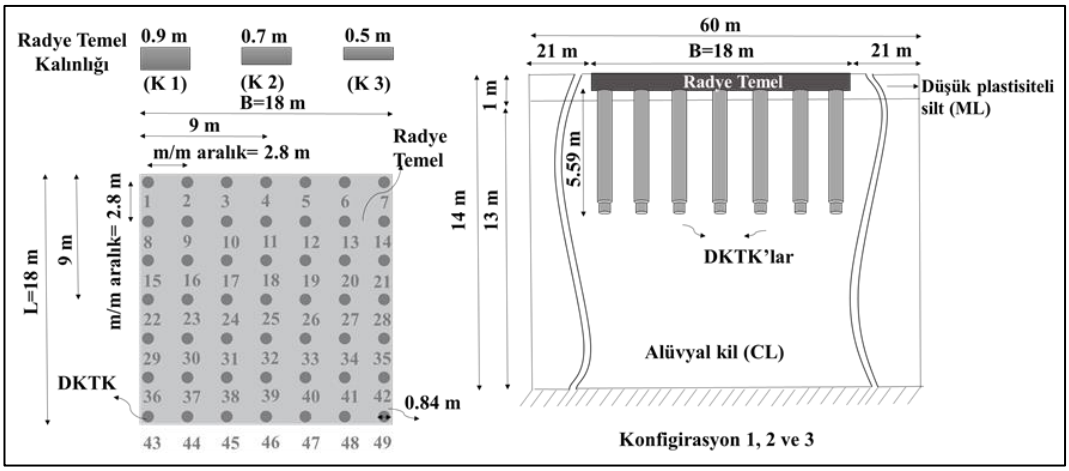
DKTK destekli radye temel sistemlerinin her biri için radye temel kalınlıkları, DKTK elemanlarının elastisite modülleri ve DKTK sayıları kombinasyonu oluşturulmuştur. DKTK destekli radye temel sistemleri için yapılan kombinasyonlar ile grup kolonlarının radye temel oturmasına olan etkisi incelenmiştir. Optimizasyon analizlerinin yapılmasında kullanılacak verilerin elde edilmesi amacıyla parametrik değişkenliğin sağlandığı 81 kombinasyon elde edilmiştir. Kombinasyonlar dikkate alınarak DKTK-radye temel sistemi konfigürasyonları kurulmuştur. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için optimizasyon analizlerinde girdi olarak kullanılacak, radye temel kalınlıkları, DKTK elemanlarının elastisite modülleri ve kolon aralıkları parametrik olarak değiştirilmiştir. Parametrik değişimlerle elde edilen kombinasyonlar, en güvenli ve en ekonomik tasarımın belirlenebilmesi için optimizasyon çalışmasına veri sağlamayı amaçlamıştır. Konfigürasyonlarda kullanılacak olan radye temel 18x18m boyutlarında kare biçiminde seçilmiştir ve radye temel kalınlıkları modele uygun bir şekilde 0.5 m, 0.7 m ve 0.9 m olarak 3 düzeyde değiştirilmiştir. DKTK elemanlarının elastisite modülleri 9 düzeyde değiştirilmiştir. DKTK elemanları için Çizelge 3.2.'de verilen asıl elastisite modülü (183.12 MPa) %20, %40, %60 ve %80 oranlarında 4 düzeyde arttırılıp azaltılarak parametrik değişkenler belirlenmiştir. DKTK'nın asıl elastisite modülü (183.12 MPa), belirtilen oranlarda arttırılarak sırasıyla 219.74 MPa, 256.37 MPa, 292.99 MPa ve 329.61 MPa parametrik değişkenleri elde edilmiştir. Aynı oranlardaki azaltma durumlarında ise 146.5 MPa, 109.87 MPa, 73.25 MPa ve 36.62 MPa olarak parametrik değişkenler elde edilmiştir. DKTK gruplarının kolon sayıları merkezden merkeze (m/m) kolonlar arası mesafelerin değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Uygun tasarımlar

için kolonlar arası mesafeler 2.8 m, 4.2 m ve 5.6 m olacak şekilde seçilmiştir. DKTK gruplarındaki kolonlar arası mesafeler 2.8 m olarak belirlendiğinde kolon sayısı 49, kolonlar arası mesafeler 4.2 m olduğunda kolon sayısı 25 ve kolonlar arası mesafeler 5.6 m olarak değiştirildiğinde kolon sayısı 16 olarak elde edilmiştir. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için değişen parametreleri ve buna bağlı oluşan tüm kombinasyonları gösteren detaylı grafik Şekil 3.6.'da sunulmuştur. İlk aşamada Şekil 3.6.'da sunulan kombinasyonların modellere tanımlanıp uygulanabilmesi için konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Radye kalınlığı, DKTK elastisite modülleri ve kolon aralıklarının oluşturduğu parametrik değişkenlerin yer aldığı modellerin tasarımı için 9 ayrı model konfigürasyonu elde edilmiştir. Tasarlanan 9 farklı modele, 9 farklı düzeyde DKTK elastisite modülü tanımlanarak toplamda 81 adet model kombinasyonu elde edilmiştir. Şekil 3.7., 3.8. ve 3.9. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için farklı konfigürasyonların modellerdeki tasarım durumlarını göstermektedir. Şekil 3.7., DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için K1, K2 ve K3 konfigürasyonlarının görünümlerini gösterirken, Şekil 3.8., K4, K5 ve K6 konfigürasyonlarının görünümlerini ve Şekil 3.9. ise K7, K8 ve K9 konfigürasyonlarının görünümlerini göstermektedir.

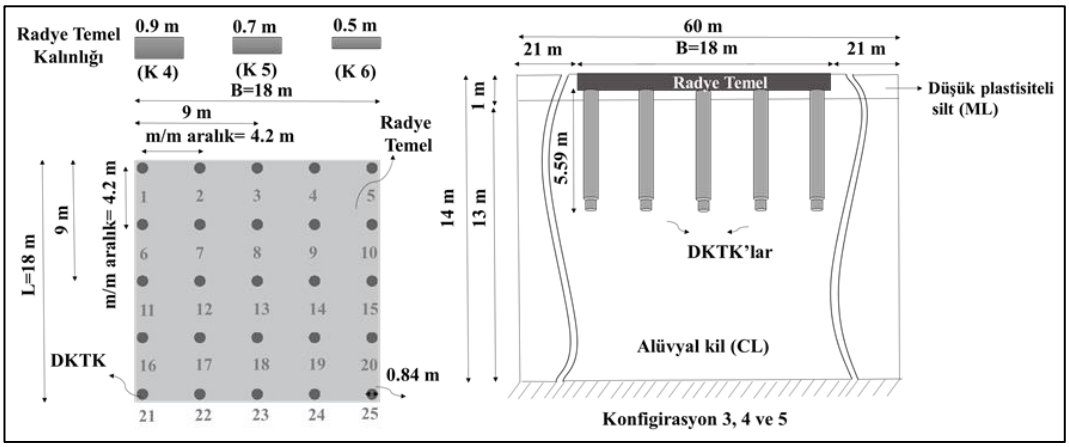



Şekil 3.6. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde değişen parametrelere göre oluşan kombinasyonlar

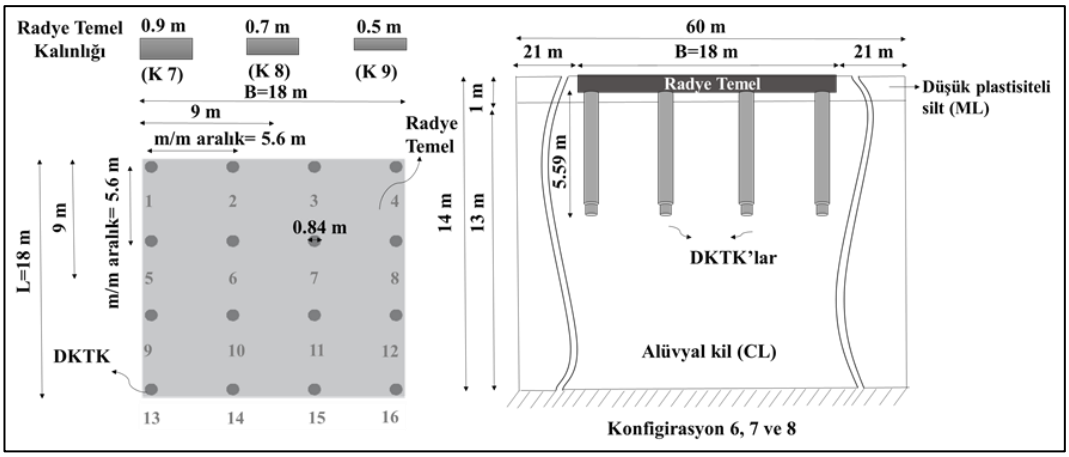
Şekil 3.6.'da sunulan kombinasyonların elde edilmesi için Şekil 3.7., 3.8. ve 3.9.'da gösterilen konfigürasyonlar kullanılarak her bir model ayrı ayrı tasarlanmış ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuştur. DKTK grupları destekli radye temel sistemlerinin üç boyutlu katı modellenmesinde, tüm sistem parçaları uygun ağ elemanlarına bölünebilecek şekilde tasarlanmıştır.




Şekil 3.7. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K1, K2 ve K3)

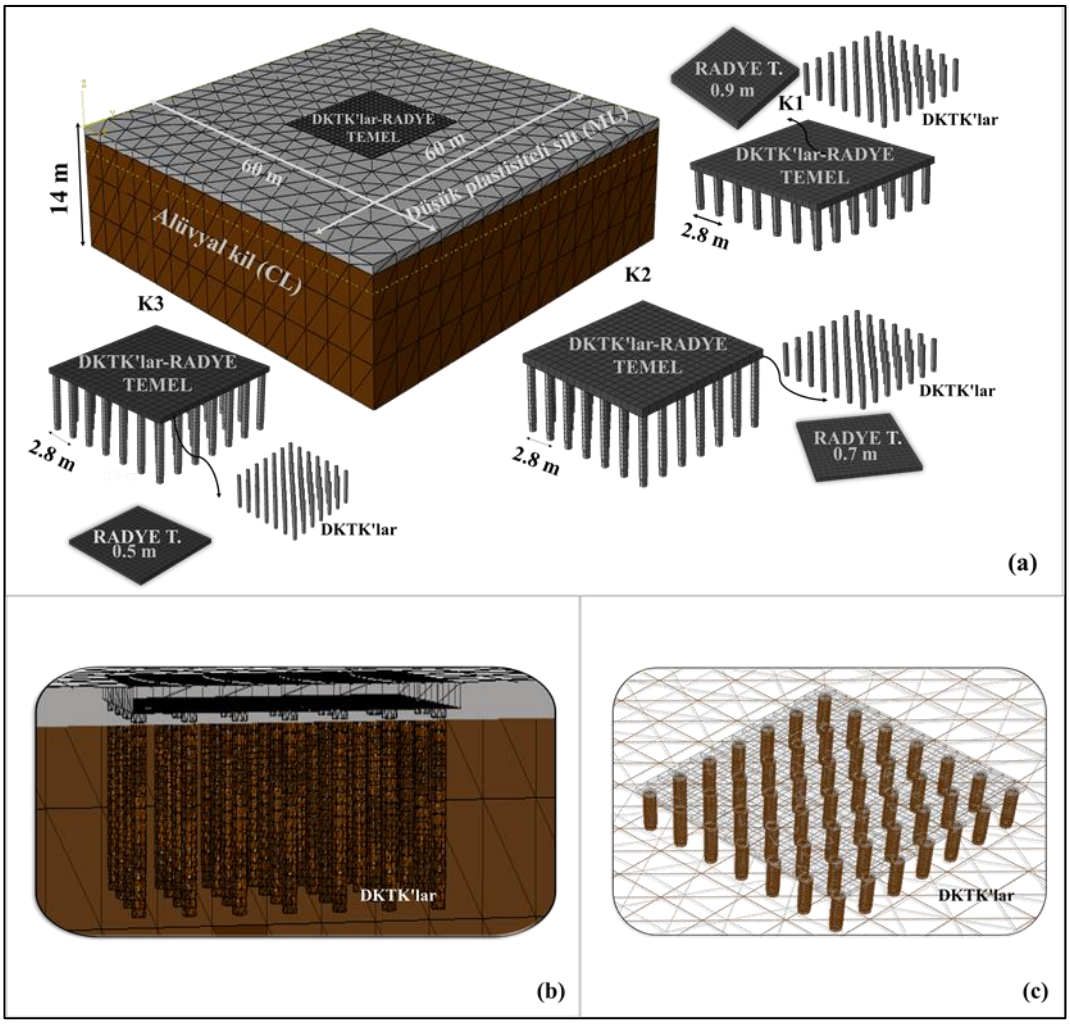



Şekil 3.8. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K4, K5 ve K6)

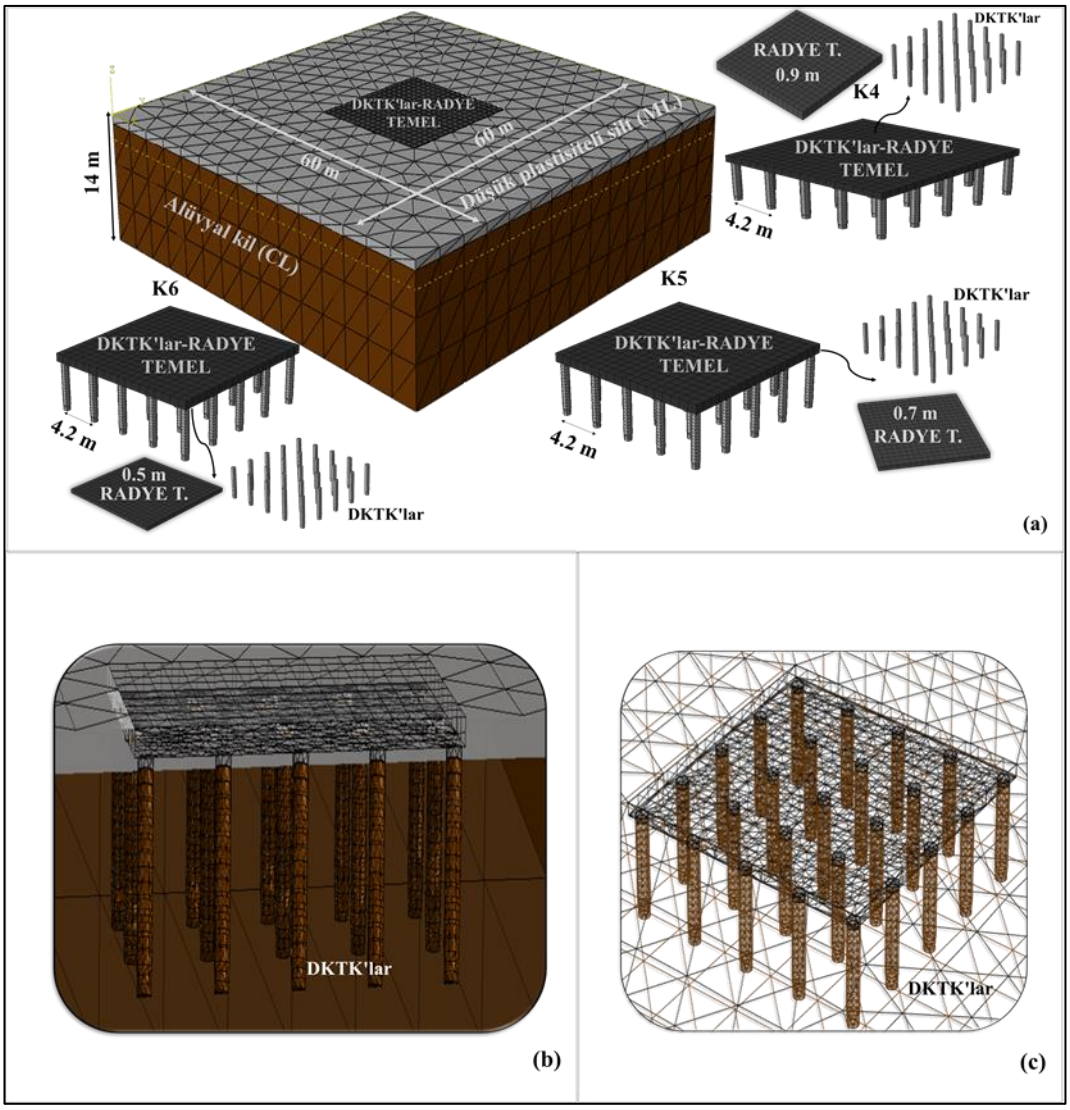



Şekil 3.9. Parametrik çalışma için DKTK grupları destekli radye temel sistemleri konfigürasyonları (K7, K8 ve K9)

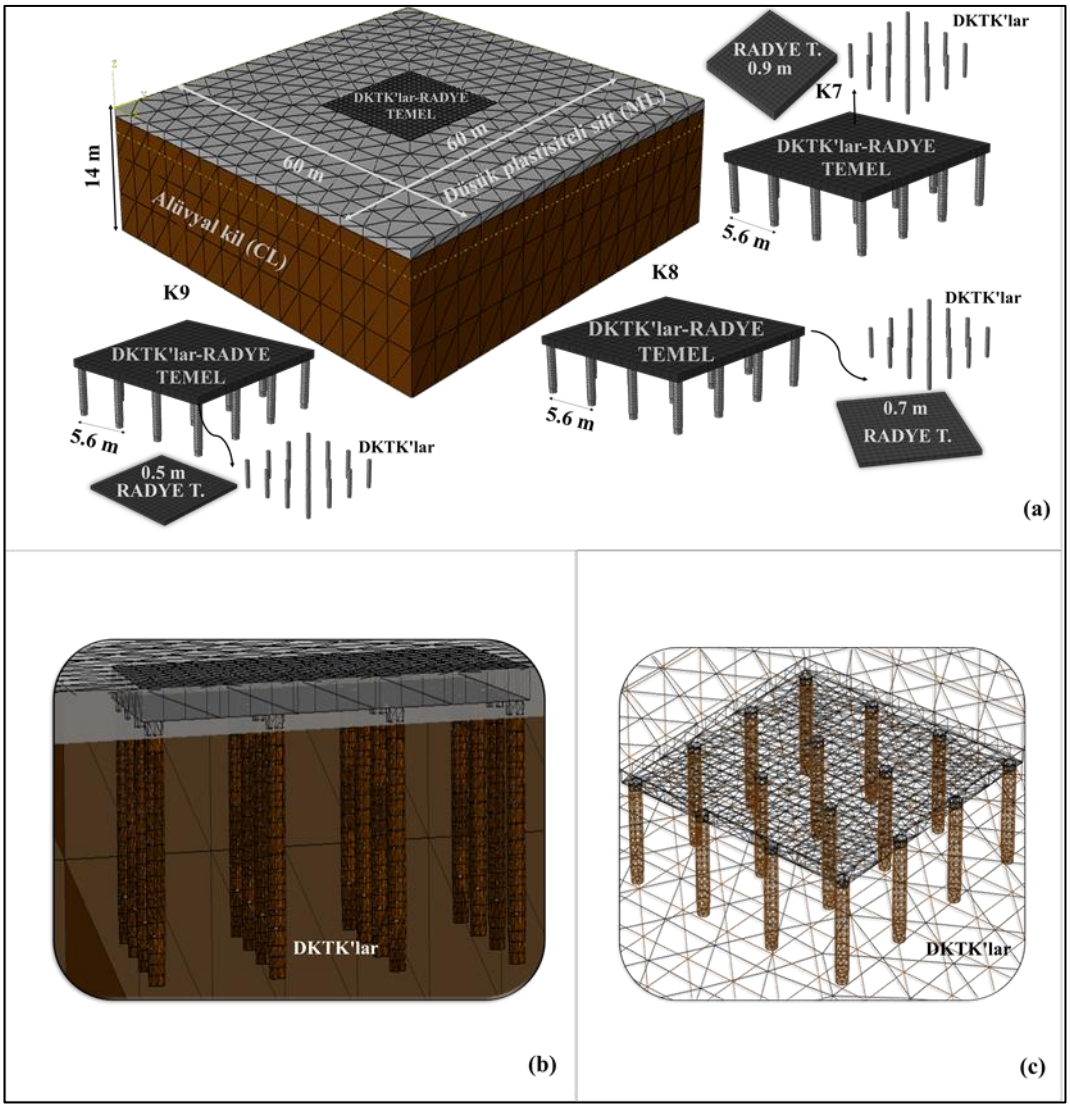
DKTK gruplarındaki kolonların tasarımı dikkate alınan çalışmalardaki (Pham 2005; Chen ve ark. 2009) orijinal boyutlarıyla modellenmiştir. Her bir kombinasyon için oluşturulan modeller ayrı ayrı üç boyutlu katı modeller halinde tasarlanmıştır. Modellerin üç boyutlu sonlu elemanlar analizi Abaqus (2014) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma için yüksek ağ sayısında çok sayıda analiz yapılacağından çözüm süresi ve tutarlı sonuç dengesi kurularak optimum model boyutları belirlenmiştir. Sınır şartları ve doğrulama analizi dikkate alınarak parametrik çalışmada kullanılacak model 60x60x14 m boyutlarında tasarlanmıştır. Modelde ilk olarak 60x60x14 m boyutlarından oluşan katı zemin formu oluşturulmuştur. DKTK gruplarındaki kolonlar 0.84 m çapında, 5.13 m uzunluğunda dizayn edilmiştir ve kolonlara gerçek duruma uygun olarak 0.76 m çaplı ve 0.46 m uzunluklu bir ek başlık yapılmıştır. DKTK grupları radye temelin altına üniform bir biçimde yerleştirilmiştir. Gerçek zemin ortamına uygun olarak tasarlanan DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları Şekil 3.10., 3.11. ve 3.12.'de gösterilmektedir. Şekil 3.10. (a), 3.11. (a) ve 3.12. (a)'da her bir konfigürasyon için (K1-K9) geliştirilen tetrahedral hacimsel elemanlara sahip tipik 3B SE parçaları sunulmuştur. DKTK grup geometrisinin iç ağı Şekil 3.10. (b), 3.11. (b) ve 3.12. (b)'de sunulmuş olup Şekil 3.10. (c), 3.11. (c) ve 3.12. (c)'de konfigürasyonlar için SE ağının genel görünümünü göstermektedir.




Şekil 3.10. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K1, K2 ve K3 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü




Şekil 3.11. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K4, K5 ve K6 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü




Şekil 3.12. DKTK grubu destekli radye temellerin üç boyutlu modellemesinin detayları; (a) konfigürasyon K7, K8 ve K9 için geliştirilen SE ağının genel görünümü, (b) DKTK grup geometrisinin iç ağı, (c) konfigürasyonlar için SE ağı genel görünümü

Her bir kombinasyon için modellerde kullanılacak olan parametreler Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2. ile Şekil 3.6.'da sunulan veriler dikkate alınarak belirlenmiştir. Modellerde 13 m kalınlığındaki alüvyallı kil (CL) ve 1 m kalınlığındaki düşük plastisiteli siltten (ML) oluşan zemin ortamı, radye temel ve DKTK gruplarına ait olan materyaller ayrı ayrı tanımlanmıştır. Tasarımı yapılan modeller, nonlineer analize uygun bir biçimde oluşturulmuştur. Zemin davranış modeli olarak Mohr-Coulomb kullanılmıştır. Materyal tanımlama işleminin ardından, Abaqus (2014) programında DKTK grupları ve radye temel bağlantılarının yapılmasıyla, parçaların etkileşimde olmaları sağlanmıştır. İlk olarak radye temelin zemin tabakasına ve kolonlara olan ara-

yüzey teması tanımlanmıştır. Radye temelin alt yüzeyi, zemin tabakasına ve kolonların üst yüzeylerine arayüz sürtünme değeri tanımlanarak bağlanmıştır. Daha sonra DKTK gruplarında yer alan her bir kolonun alt ve yan yüzeyleri ile zemin bağlantısı yapılarak etkileşim sağlanmıştır. Kolonların etkileşiminin sorunsuz yapılabilmesi amacıyla her bir kolon için yüzey seçme işlemi hassas bir biçimde yapılarak parçalar arası bağlantılar oluşturulmuştur. Parametrik çalışma ile optimizasyon analizlerine veri sağlamak amacıyla radye temel sistemine modelde uygulanacak üniform basınç değeri 70 kPa olarak belirlenmiştir ve modelde efektif parametreler kullanılmıştır. Mesnetlerin yerleştirileceği bölgeler tespit edildikten sonra sınır şartları, modelin en alt ve yan yüzeylerinde düşey ve yatay deformasyonlar sınırlandırılacak biçimde tanımlanmıştır. Model tasarımının son aşamasında ağ elemanlarına bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. DKTK gruplarının karmaşık yapısından dolayı standart ağ elemanlarına bölme işlemi yerine, hassas bağlantı noktalarının hatasız bir biçimde ağ elemanlarına bölünebilmesi için tetrahedron elemanlar kullanılmıştır. Analizlerin doğru sonuç vermesi için yakınsama çalışması ile hassas bir çözüm sağlayacak ağ sayısı belirlenmiş ve her bir modelin analizi öncesinde gerekli kontroller sağlanarak modellerde oluşabilecek hatalar engellenmiştir. Her bir modelde gerekli kontroller tamamlandıktan sonra nonlineer analiz başlatılmıştır. Analizler başarılı bir şekilde tamamlandıktan sonra analiz raporundaki veriler detaylıca incelenerek optimizasyon için gerekli formata getirilmiştir. Böylece sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş olan 81 farklı modelin optimizasyon çalışmasında kullanılacak verileri elde edilmiştir.

### 3.2.3. İstatistiksel anlamlılık ve optimizasyon analizleri

Bu bölümde istatistiksel anlamlılık ve optimizasyon analizlerine yer verilmiştir. Darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçlarından alınan veriler kullanılarak bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu kısımda varyans analizi (ANOVA), Tepki Yüzey Optimizasyon Yöntemi ve Yeni Hedefe Ulaşma Optimizasyon Yöntemi hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. İstatistiksel anlamlılık ve optimizasyon analizlerinin sonuçları bu tez çalışmasının “4. Bölümünde” sunulmuştur.

### 3.2.3.1. Varyans analizi (ANOVA)

Bu çalışma kapsamındaki parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile ulaşılan verilerin anlamlılığını incelemek için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. ANOVA türü olarak Genel Doğrusal Model (GLM) tercih edilmiştir. Radye temel kalınlığı, DKTK elastisite modülü ve kolon aralıkları bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Deformasyon ve maliyet katsayısı parametreleri ise bağımlı değişkenler olarak sisteme tanımlanmıştır. ANOVA-GLM ile gerçekleştirilen analizlerde belirtilen bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki anlamlılık durumları istatistiksel olarak araştırılmıştır.

### 3.2.3.2. Tepki yüzey optimizasyon yöntemi

Optimum çözümlere ulaşmak için kullanılan önemli metotlardan biri olan Tepki Yüzey Optimizasyon Yönteminde (Anderson ve Whitcomb, 2016) sonuçlar hem sayısal veriler olarak hem de grafiksel olarak sunulur. Tepki Yüzey optimizasyon yönteminde, sisteme tanımlanan verilere bağlı olarak bir fonksiyon oluşturulur ve seçilen modelin yeterliliğini test edilir. En çok istenen duruma ulaşmak için "Arzu Edilebilirlik" fonksiyonu ($d_i$) maksimize edilir. Denklem 1'de arzu edilebilirlik fonksiyonunun tanım aralığı gösterilmiştir.

$$0 \leq d_i \leq 1 \quad (1)$$

1 değerine yaklaşılması en çok istenen duruma doğru gidildiğini göstermektedir. Çizelge 4.2.'de bu çalışmadaki tüm optimizasyon yöntemleri için belirlenen değişken tanımları gösterilmiştir.

### 3.2.3.3. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma optimizasyon yöntemi

Hedefe Ulaşma optimizasyon yöntemi Gembicki (1974) tarafından geliştirilmiş olup günümüzdeki optimizasyon problemlerine çok amaçlı çözüm sağlayabilecek yapıdadır. Hedefe Ulaşma optimizasyonu için MATLAB (2017)'de bir fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyon ile çok amaçlı olarak optimizasyonlar başarılı bir şekilde

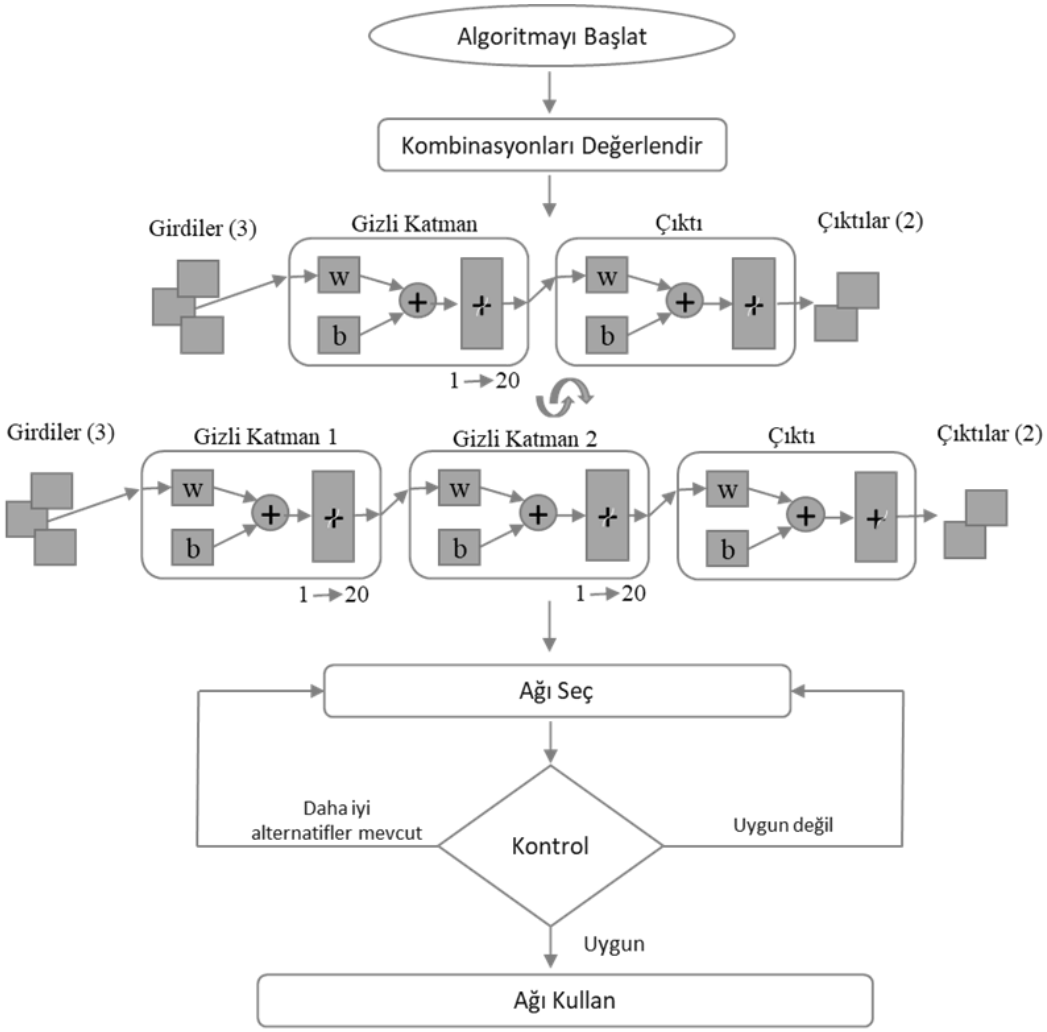
gerçekleştirilebilmektedir. Hedefe Ulaşma optimizasyon yöntemi denklem 2'de (Gembicki, 1974; MATLAB, 2017) gösterilen esaslara dayanır.

$$F(x)-w\gamma \leq G \quad (2)$$

Denklem 2'de yer alan F(x) parametresi hedefi, γ hedef fonksiyonunu, w ağırlık katsayısını, G ise tasarım hedefini tanımlamaktadır. Hedefe Ulaşma optimizasyon yönteminde problemler hedeflere bağlı olarak tanımlanır. Bir çözüm seti oluşturulurken ağırlık katsayıları ve hedefler dikkate alınır.

MATLAB (2017)'de yer alan Hedefe Ulaşma fonksiyonunda çoklu arzu edilebilirlik ve grafik desteği özelliği bulunmamaktadır. Ayrıca kullanılacak fonksiyonun oluşturulmasıyla ilgili hazır bir kod yapısı bulunmamaktadır. "Arzu edilebilirlik" değeri Tepki Yüzey yönteminde de anlatıldığı gibi istenilen duruma ne derecede ulaşıldığını gösteren önemli bir parametredir. Bu kapsamda Ekmen ve ark (2020), tarafından tanıtılan Hedefe Ulaşma yöntemi bu çalışmada yapay zeka ile geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Geliştirilmiş bu yeni optimizasyon yöntemi grafiksel çözümler sunduğundan ve yapay zeka ile oluşturulmuş içe aktarılabilen fonksiyonların kullanımına olanak sağladığından diğer optimizasyon algoritmalarına göre avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada Geliştirilmiş Hedefe Ulaşma optimizasyon yöntemini yüksek dereceli regresyona sahip fonksiyonlarla desteklemek için Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır. Veri tahmin fonksiyonlarının oluşturulabilmesi için uygun sayıda nöron ve gizli katman seçimi yapılmıştır. Yapay zeka desteğiyle bu çalışma kapsamında geliştirilen en iyi yöntemin otomatik seçildiği yeni kodlama sayesinde optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere üst düzey korelasyon katsayısına sahip tahmin fonksiyonu oluşturulmuştur. Yapay zeka destekli geliştirilen algoritma Şekil 3.13.'de sunulmuştur.



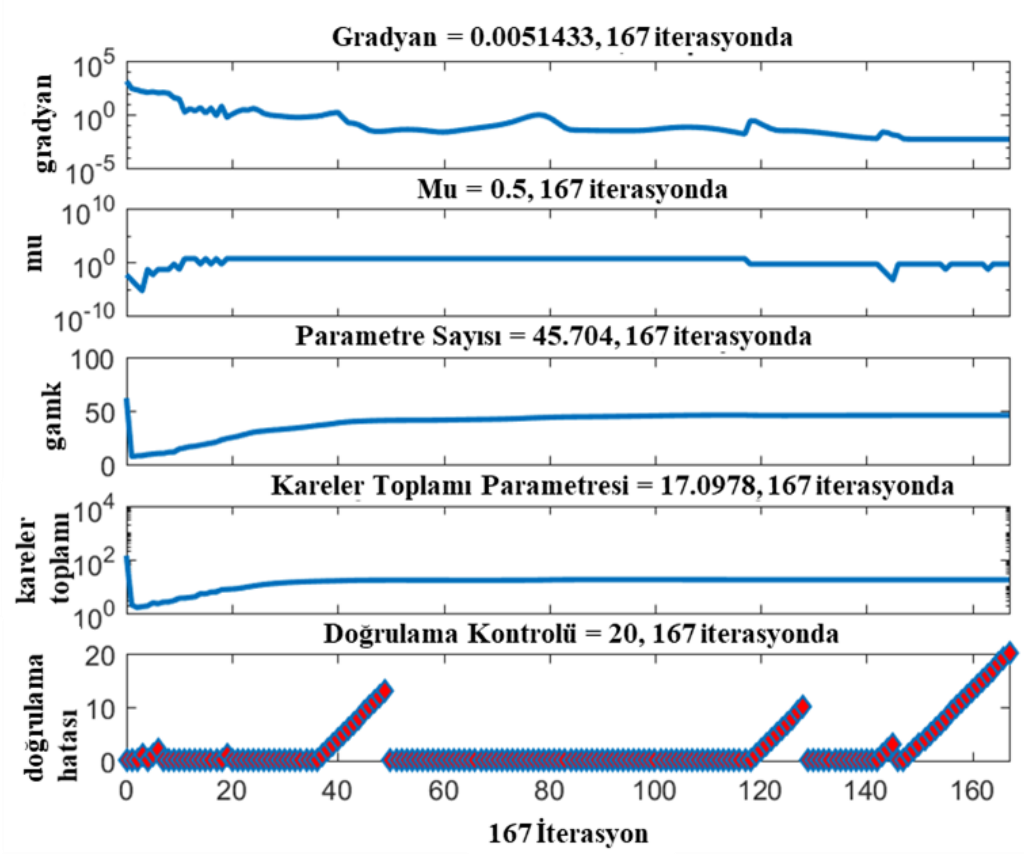

Şekil 3.13. Yapay zeka destekli geliştirilen algoritma

Yapay sinir ağlarına tanımlanan veri setinde üç girdi ve iki çıktı bulunmaktadır. Nöron sayısı 1'den 20'ye kadar değiştirilmiştir. En iyi sonucu alabilmek için analizlerde hem tek hem de çift gizli katman kullanılmıştır. Her katman için 20 farklı nöron işleme alınmıştır. Böylece 420 farklı ağ oluşturulup en iyi sonucu veren fonksiyon kullanılmıştır. Çözüm süresi ve istatistiksel veriler dikkate alındığından en iyi sonuç 1 katman ve 10 adet nöron kullanılarak elde edilmiştir. Analizlerde kullanılacak veriler rastgele ayrılmıştır ve bu verilerin %70'i eğitim %15'i test, %15'i ise doğrulama şeklinde belirlenmiştir. Çözüm sisteminde Bayesian Regularization yöntemi tercih edilmiştir. Oluşturulacak yapay sinir ağının performansını iyileştirmek için Ortalama Karasel Hata (MSE) değerleri kullanılmıştır. Çizelge 3.3.'de yapay sinir ağları ile fonksiyon oluşturmak için tercih edilen seçenekler gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3. Yapay sinir ağları ile fonksiyon oluşturmak için tercih edilen seçenekler

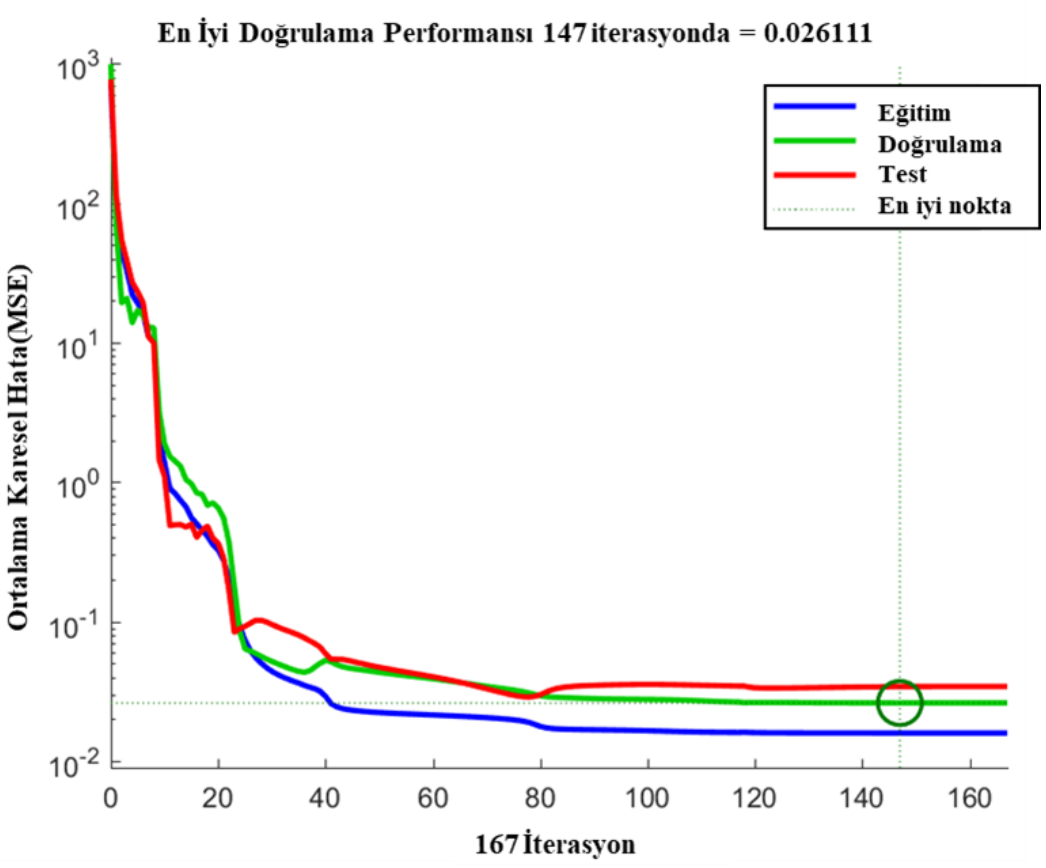
| Kullanılan Yöntem | Bayesian Regularization |
|---|---|
| İterasyonlar | 167 |
| Veri dağılımı | Rastgele |
| Eğitim, test ve doğrulama veri setinin dağılımı (%) | 70-15-15 |
| İyileştirme işlevi | MSE |
| Nöron sayısı | 1'den 20'ye |
| Gizli katman kombinasyonları | 1'den 2'ye |

Şekil 3.14., 3.15., 3.16. ve 3.17.'de yapay sinir ağları ile oluşturulmuş en iyi ağın performansıyla ilgili veriler gösterilmiştir.



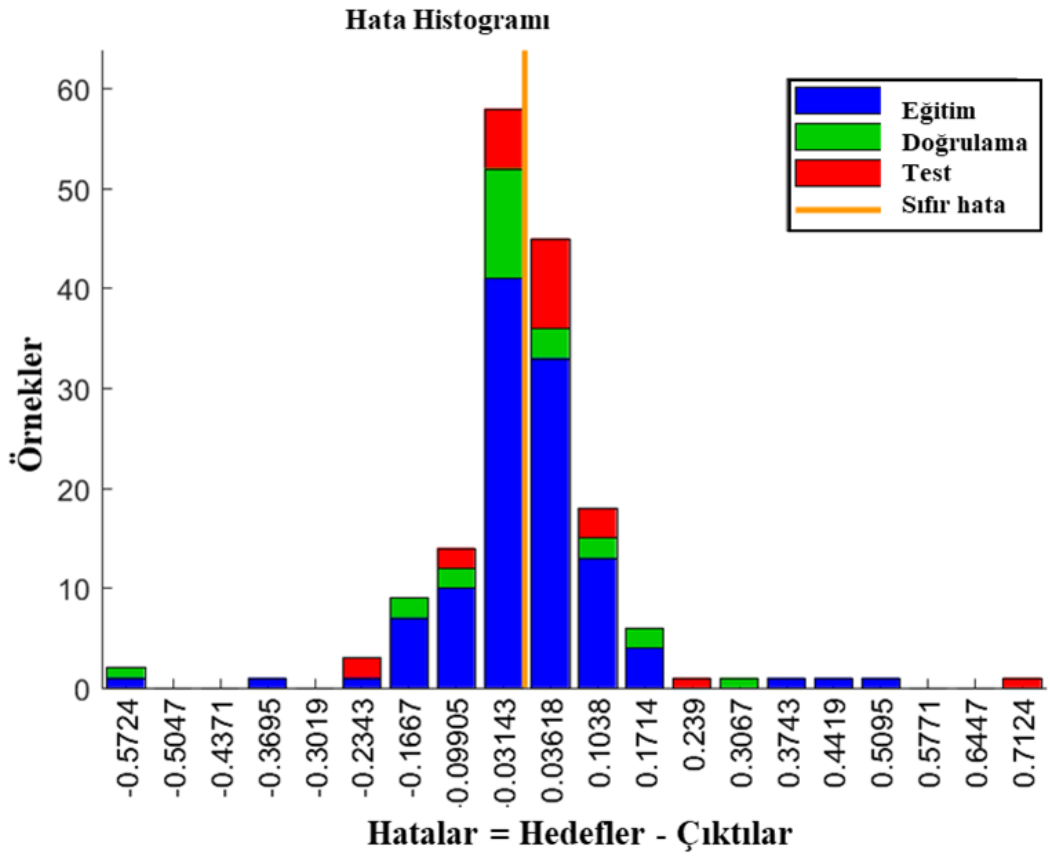

Şekil 3.14. Yapay sinir ağları kullanılarak ağ oluşturulurken dikkate alınan parametreler

Şekil 3.14.'de ağ oluşturulurken dikkate alınan parametreler sunulmuştur. Hatalı uyumu önlemek için oluşturulan ağın doğrulama kontrol değerleri gösterilmiştir. Ayrıca yapay sinir ağının eğitim algoritmasında yakınsama ve hata fonksiyonlarını yöneten MU-Gradyan değerleri sunulmuştur.



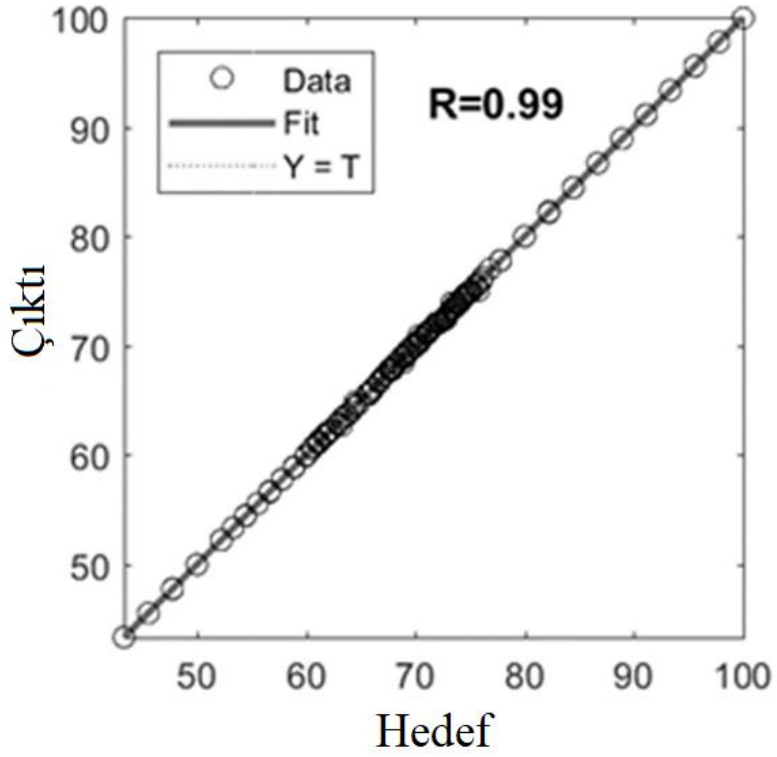

Şekil 3.15. Yapay sinir ağları ile oluşturulmuş en iyi ağın performansıyla ilgili iterasyonlara bağlı MSE değerleri

Şekil 3.15.'te iterasyonlara bağlı MSE değerleri ve en iyi performansın elde edildiği iterasyon (147) gösterilmiştir. Seçilen iterasyondan sonra hatalı uyumu önlemek sistemin durma işlevinin devreye girdiği görülmüştür.




Şekil 3.16. Yapay sinir ağları ile oluşturulmuş en iyi ağın performansıyla ilgili hata histogramı

Şekil 3.16.'da test, eğitim ve doğrulama verileri için hata histogramı sunulmuştur.




Şekil 3.17. YSA ile oluşturulmuş en iyi ağın istatistiksel değerlendirmesi

Şekil 3.17.'de yapay sinir ağları ile oluşturulan fonksiyonun R değeri sunulmuştur. Bu değer oluşturulan fonksiyonun hedefe oldukça iyi düzeyde erişebildiğini göstermektedir.

Şekil 3.13.'de özetlenen yeni algoritma ile nöron ve gizli katman kombinasyonları denenerek yapay zeka desteğiyle iyi derecede veri tahmini yapabilen bir fonksiyon elde edilmiştir. Bu fonksiyonun Geliştirilmiş Hedefe Ulaşma optimizasyon yönteminde kullanılmasıyla yüksek arzu edilebilirlik derecesinde optimizasyon yapılabileceği ön görülmüştür. Elde edilen fonksiyon optimizasyon algoritmasına entegre edilmiştir.

Çizelge 4.2.'de sunulan parametre tanımları Tepki Yüzey yönteminde olduğu gibi Geliştirilmiş Hedefe Ulaşma yönteminde için de kullanılmıştır.

Tepki Yüzey ve Hedefe Ulaşma optimizasyon yöntemlerini doğru bir şekilde karşılaştırabilmek amacıyla tüm değişkenlerin hedef ve sınırları her iki yöntemde de

aynı şekilde tanımlanmıştır. Yeni Geliştirilmiş Hedefe Ulaşma ve Tepki Yüzey yöntemleri birbirleriyle karşılaştırılarak en iyi sistemin seçilmesi sağlanmıştır. Böylece en iyi sistemi belirlemek için birden fazla yöntemin birbiriyle kıyaslanmasıyla optimizasyon yapılması yaklaşımı literatüre kazandırılmıştır. Çizelge 4.2.'de gösterildiği üzere optimizasyon analizinde deformasyon ve maliyet katsayısı minimize edilip bağımsız değişkenler serbest bırakılmıştır.

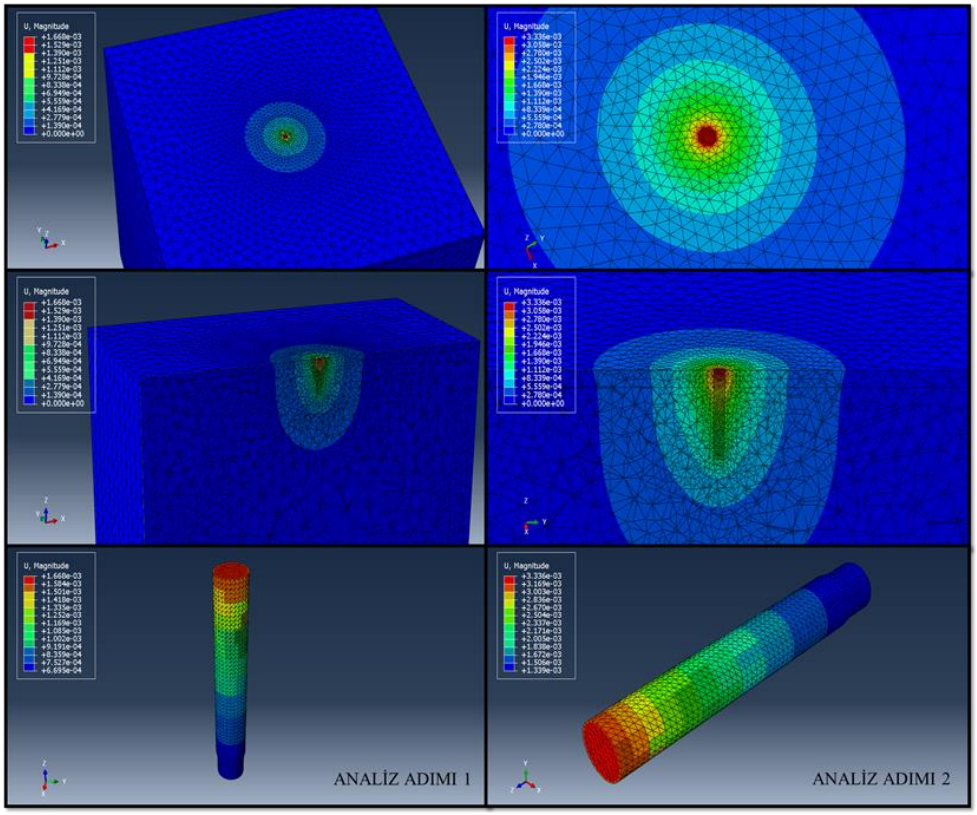
# 4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, tekil darbeli kırmataş kolon ve DKTK-radye temel sistemleri üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kapsamında modellenerek darbeli kırmataş kolon destekli radye temellerin optimum tasarımı araştırılmıştır. Zemin özellikleri ve tekil darbeli kırmataş kolonun tasarım detayları için, Neola bölgesinde üretilen deneme kolonuyla ilgili bilgiler sunan çeşitli araştırmacılar (White ve ark,. 2003; Pham., 2005; Chen ve ark., 2009) dikkate alınmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri hem tekil DKTK hem de radye-DKTK sistemi için Abaqus (2014) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan tekil DKTK'nın üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-oturma ilişkisi, deneysel sonuçlarla (Pham, 2005) ve Chen ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu çalışmadaki üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deformasyon eğrisinin deneysel sonuçlarla (Pham, 2005) ve Chen ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan doğrulamanın ardından darbeli kırmataş kolon destekli radye temel kombinasyonları modellenerek parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmiş olup sonuçlara bu bölümde yer verilmiştir. Parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak çok-amaçlı olarak yürütülen optimizasyon çalışması, Yeni Hedefe Ulaşma ve Tepki Yüzey Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık, optimizasyon analizlerinin sonuçları ve optimizasyon analizinin doğrulanması bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

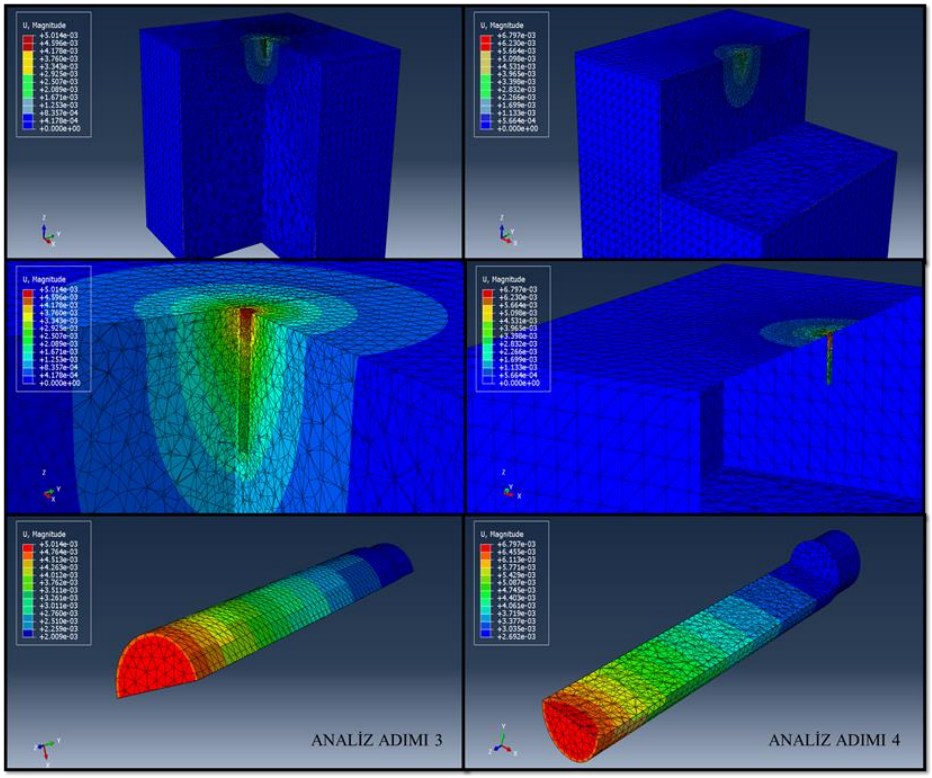
## 4.1. Tekil DKTK'nın Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ve Analizin Doğrulanması

Problemli zeminlerde, zeminin dayanım kapasitesini arttırmak ve zeminlerde oluşan deformasyonları azaltmak için tercih edilen zemin iyileştirme çeşitlerinden biri olan DKTK elemanlarının etkisinin dikkate alındığı bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik yük-

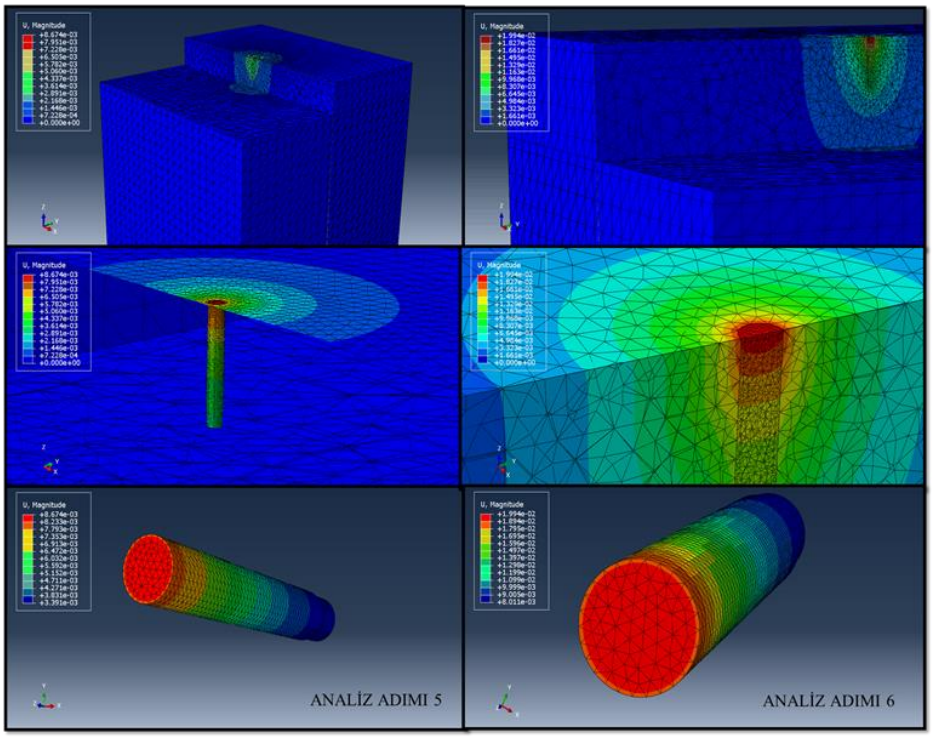
deformasyon ilişkisinin karşılaştırılması ile doğrulanacak analizlerin verilerini elde etmek için her yükleme aşamasından ayrı ayrı sonuçlar elde edilmiştir. Tasarlanan modellerin sonlu elemanlar analizlerinin sonuç görselleri Abaqus (2014) programı aracılığıyla oluşturulmuştur. Her bir aşamada ayrı ayrı tanımlanan 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN, 300 kN ve 350 kN yüklerinin oluşturduğu 7 adım için gerçekleştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerine ait düşey deformasyon değerlerinin yer aldığı sonuçlar Şekil 4.1, 4.2., 4.3. ve 4.4.'te sunulmuştur. Şekil 4.1. analiz adımı 1 ile 2, Şekil 4.2. analiz adımı 3 ile 4, Şekil 4.3. analiz adımı 5 ile 6 ve Şekil 4.4. analiz adımı 7'ye ait sonuçları göstermektedir. Analiz sonuçlarından görüleceği üzere hem düşey hem de yatay yönde oluşan deformasyonlar sınır şartlarından etkilenmemiştir. Derinliğe bağlı oluşan gerilme ve deformasyonların 12-12.5 metre seviyesinde son bulduğu belirlenmiştir. Doğrulama modelinden elde edilen deformasyonların sınır şartlarına olan uzaklıklarının dikkate alınması parametrik modellerin daha efektif boyutlarda tasarlanmasını sağlamıştır.



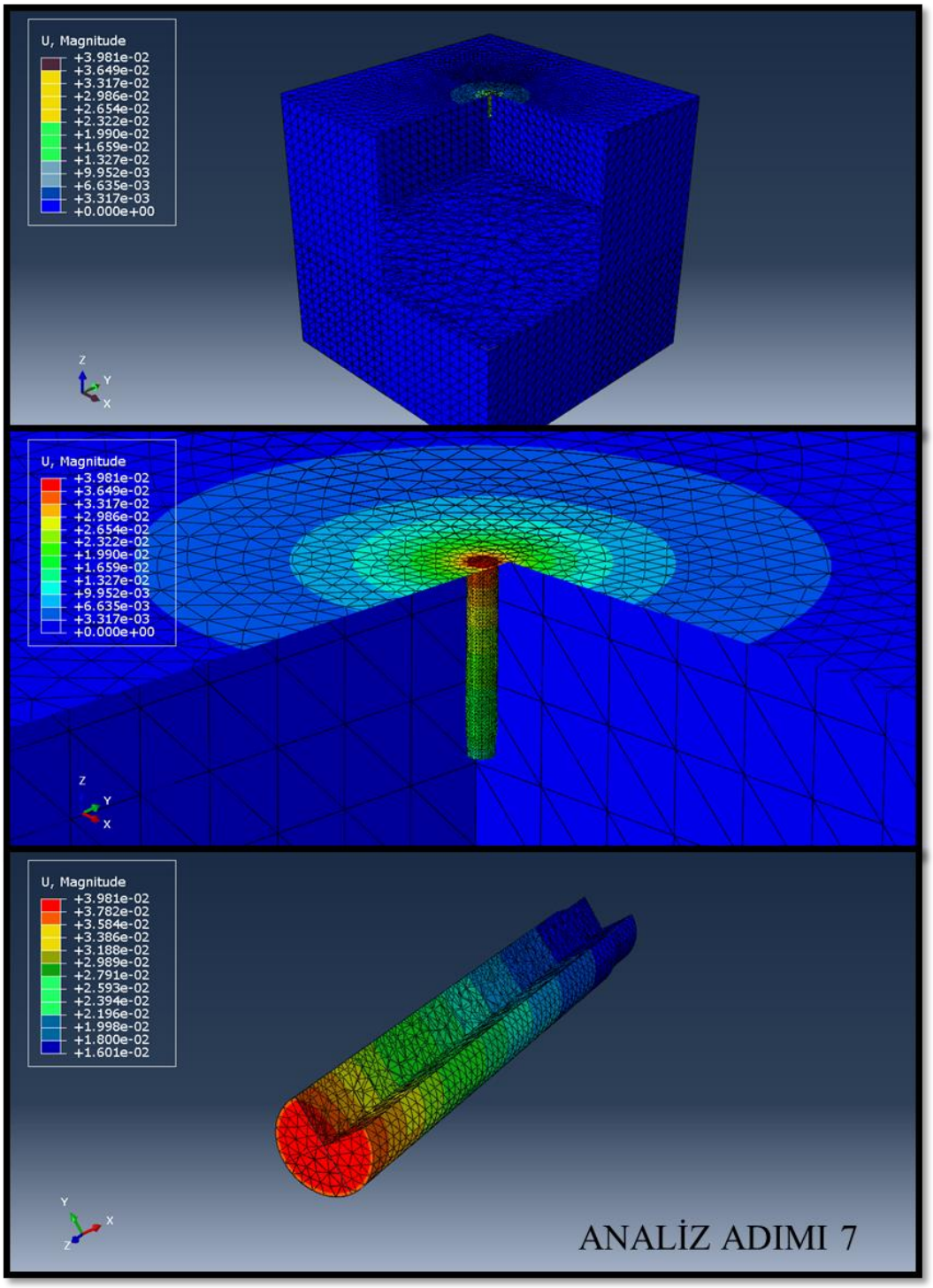

Şekil 4.1. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 1,2)




Şekil 4.2. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 3,4)



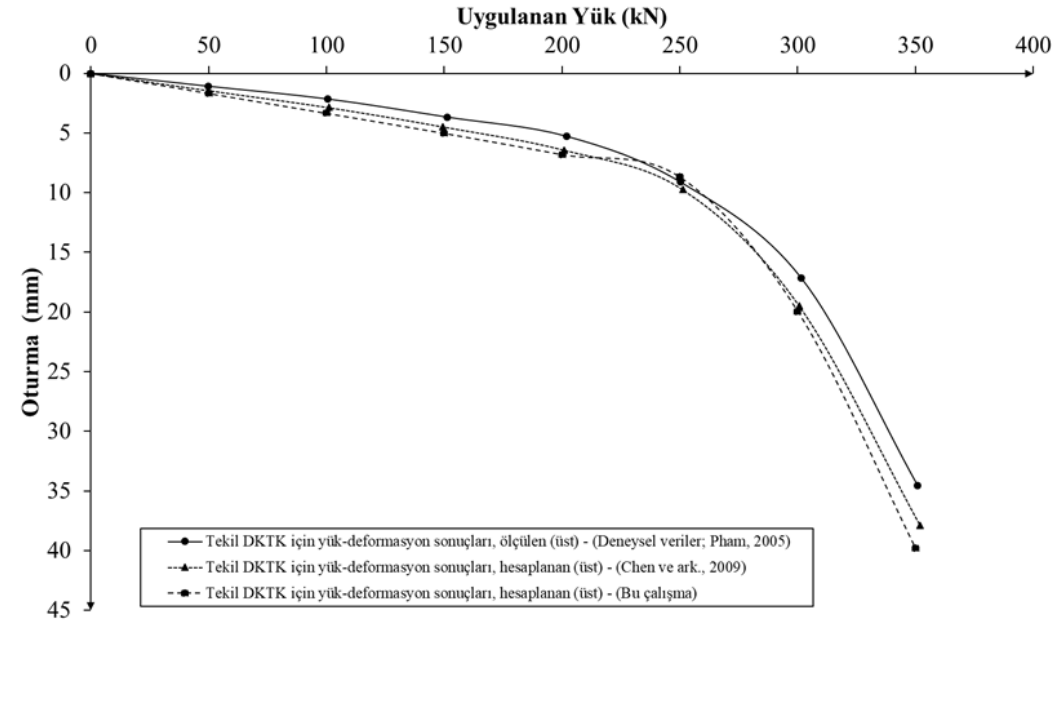

Şekil 4.3. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 5,6)




Şekil 4.4. Tekil DKTK elemanlarının sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonlarının görünümü (Analiz adımı 7)

Tasarımı yapılan tekil darbeli kırmataş kolon modelinin üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçlarından elde edilen düşey deformasyon değerleri, analiz doğrulaması için yük-deformasyon ilişkilerinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Şekil 4.5. bu tez kapsamında tekil DKTK'nın üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-oturma ilişkisinin, deneysel sonuçlarla (Pham, 2005) ve Chen ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanmasını göstermektedir. Şekil 4.5.'teki yatay eksen uygulanan 50 kN-350 kN arasındaki değişen yüklerin değerlerini gösterirken, düşey eksen oturma miktarlarını ifade etmektedir. Düşey deformasyonların (oturma miktarları) yükleme adımları boyunca 0-40 mm arasında değiştiği Şekil 4.5.'te görülmektedir.

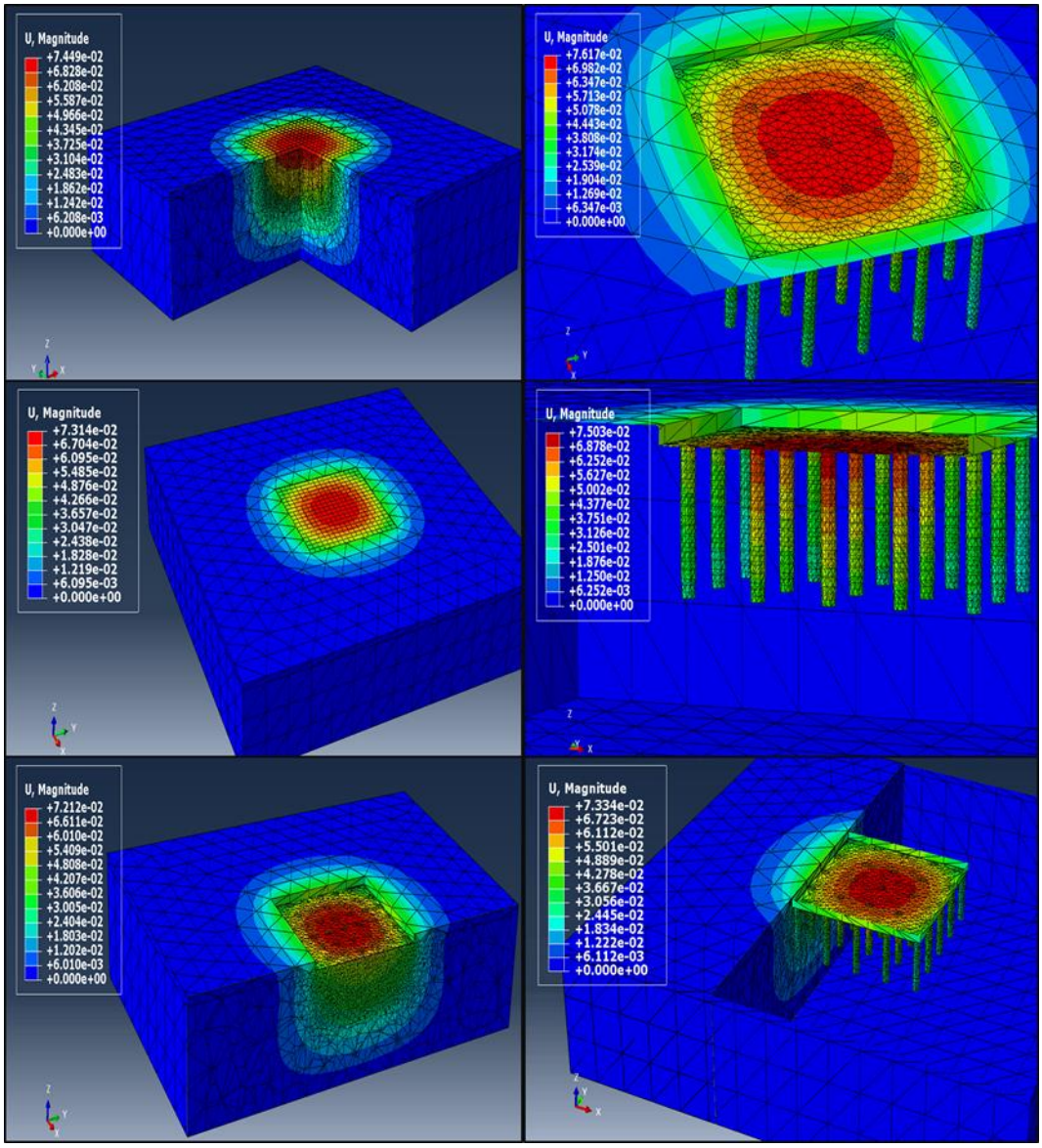



Şekil 4.5. Tekil DKTK için deneysel ve nümerik yük-oturma sonuçları

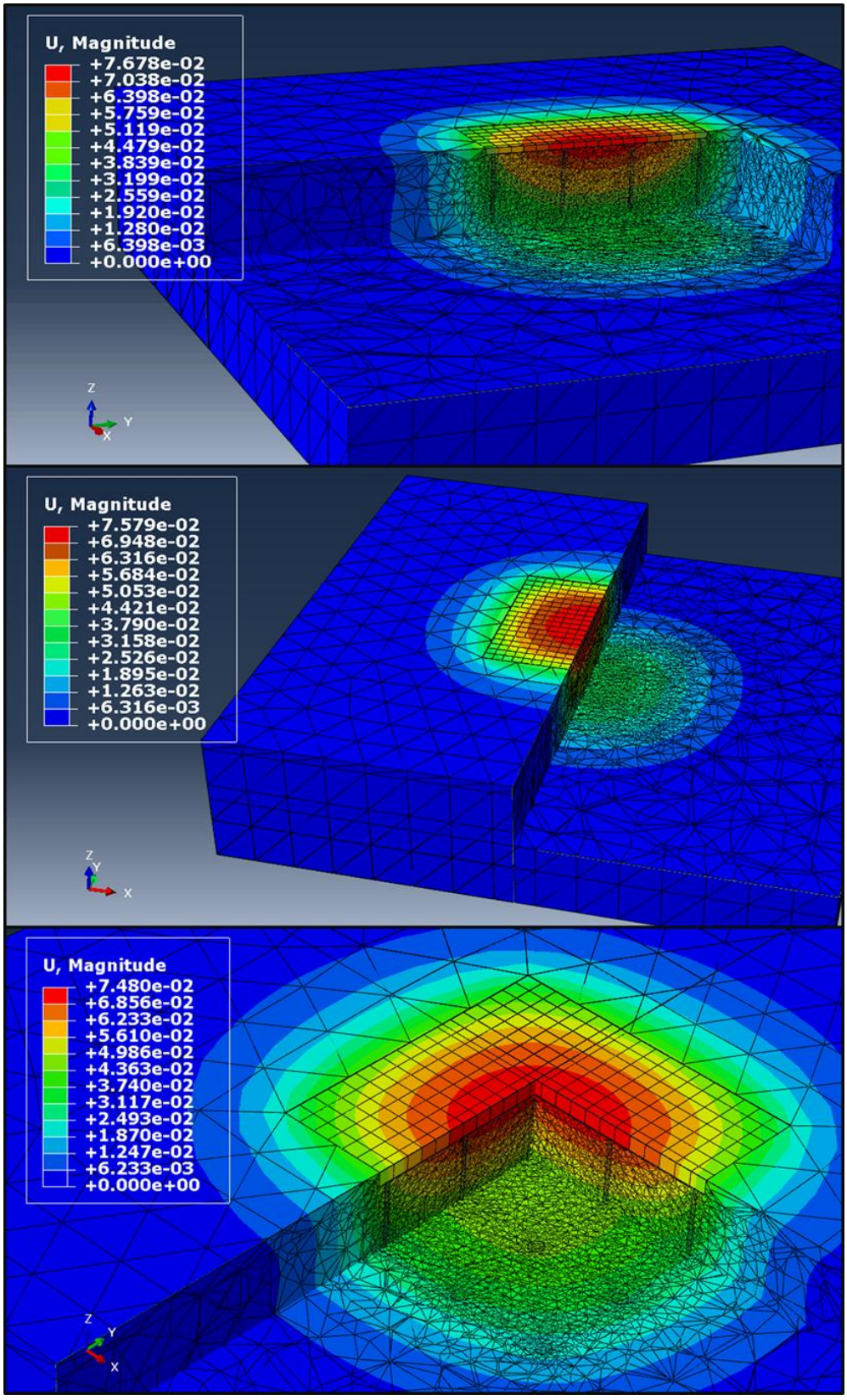
Bu çalışmadaki üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deformasyon eğrisinin deneysel sonuçlarla (Pham, 2005) ve Chen ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen analiz verileriyle oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Böylece bu çalışmadaki tekil DKTK için sonlu elemanlar analizi doğrulanmıştır. Doğrulama sonrası dikkate alınan tekil DKTK ve zemin parametrelerinden yararlanılarak DKTK grupları destekli radye temellerin modellenip analizlerinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

## 4.2. Parametrik Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Bölüm 4.1.'de detayları verilen üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin doğrulanmasının ardından radye temel kalınlığı ve kolon aralıkları 3 düzeyde değiştirilerek toplam 9 ayrı konfigürasyon oluşturulmuştur. Şekil 3.10., 3.11. ve 3.12.'de gösterilen her bir konfigürasyon için DKTK elastisite modülleri ayrı ayrı 9 düzeyde değiştirilerek toplamda 81 farklı kombinasyonun üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekçi modeller kullanılarak yapılmıştır. Böylece optimizasyon analizlerinde bağımsız değişken olarak belirlenen parametreler için bütün olası kombinasyonlar değerlendirilmiştir. DKTK grupları destekli radye temel sistemlerinin parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde Şekil 3.6.'da sunulan 81 adet kombinasyonun verileri dikkate alınmıştır. Tamamlanan 81 farklı sonlu elemanlar analizinde radye temel ve her bir kolon için ayrı ayrı düşey deformasyon sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen düşey deformasyon sonuçlarından seçilen kritik kombinasyonlar Şekil 4.6., 4.7., 4.8. ve 4.9.'da sunulmuştur. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7. radye temel kalınlıkları ve kolon aralıklarının değiştiği her konfigürasyonda DKTK'nın en düşük elastisite modülü olan 36.62 MPa değeri için gerçekleştirilmiş 9 farklı analizin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.8. ve Şekil 4.9. ise her konfigürasyonda DKTK'nın en yüksek elastisite modülü olan 329.61 MPa değeri için gerçekleştirilmiş 9 farklı analizin sonuçlarını göstermektedir.

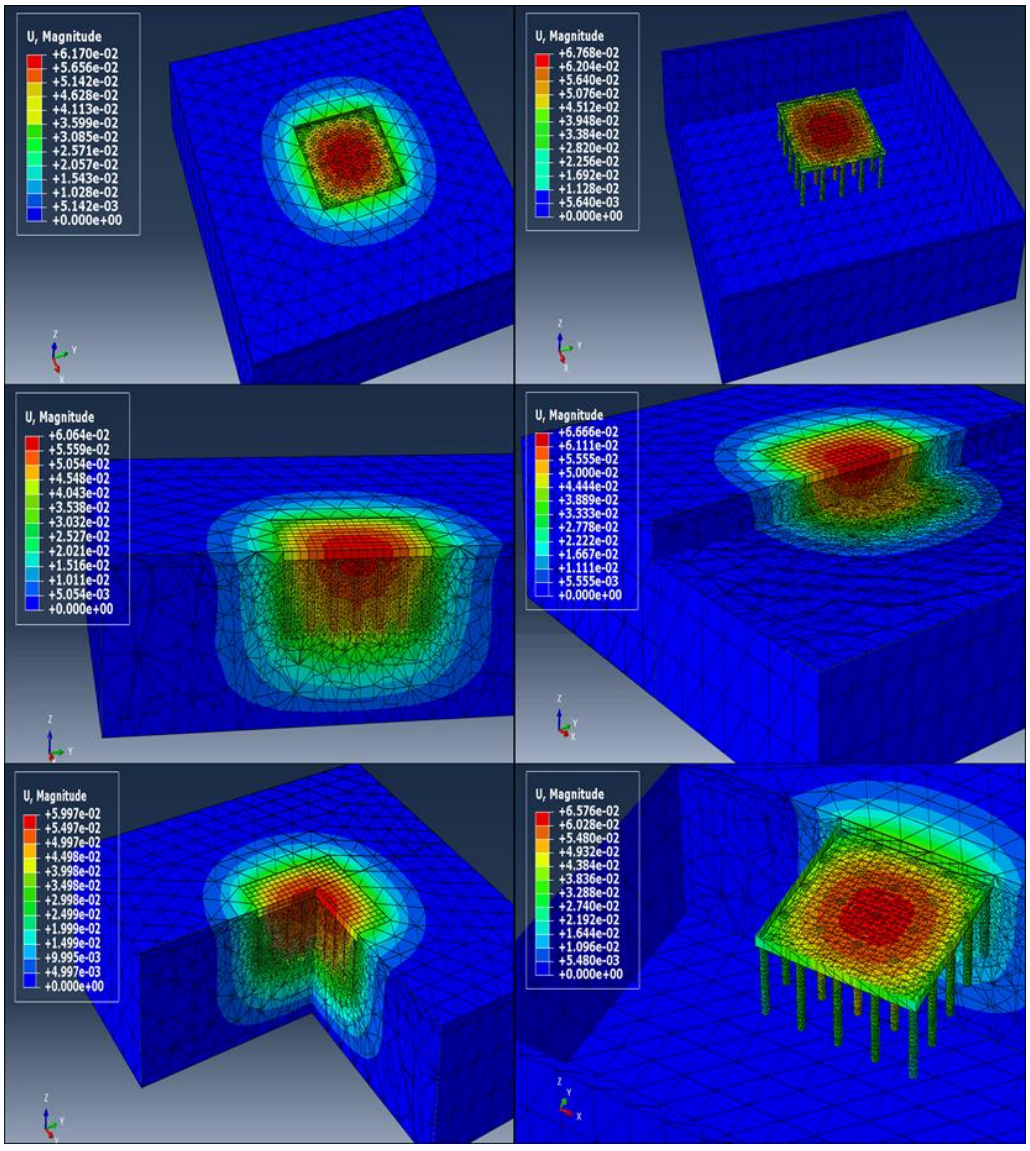



Şekil 4.6. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (36.62 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-1

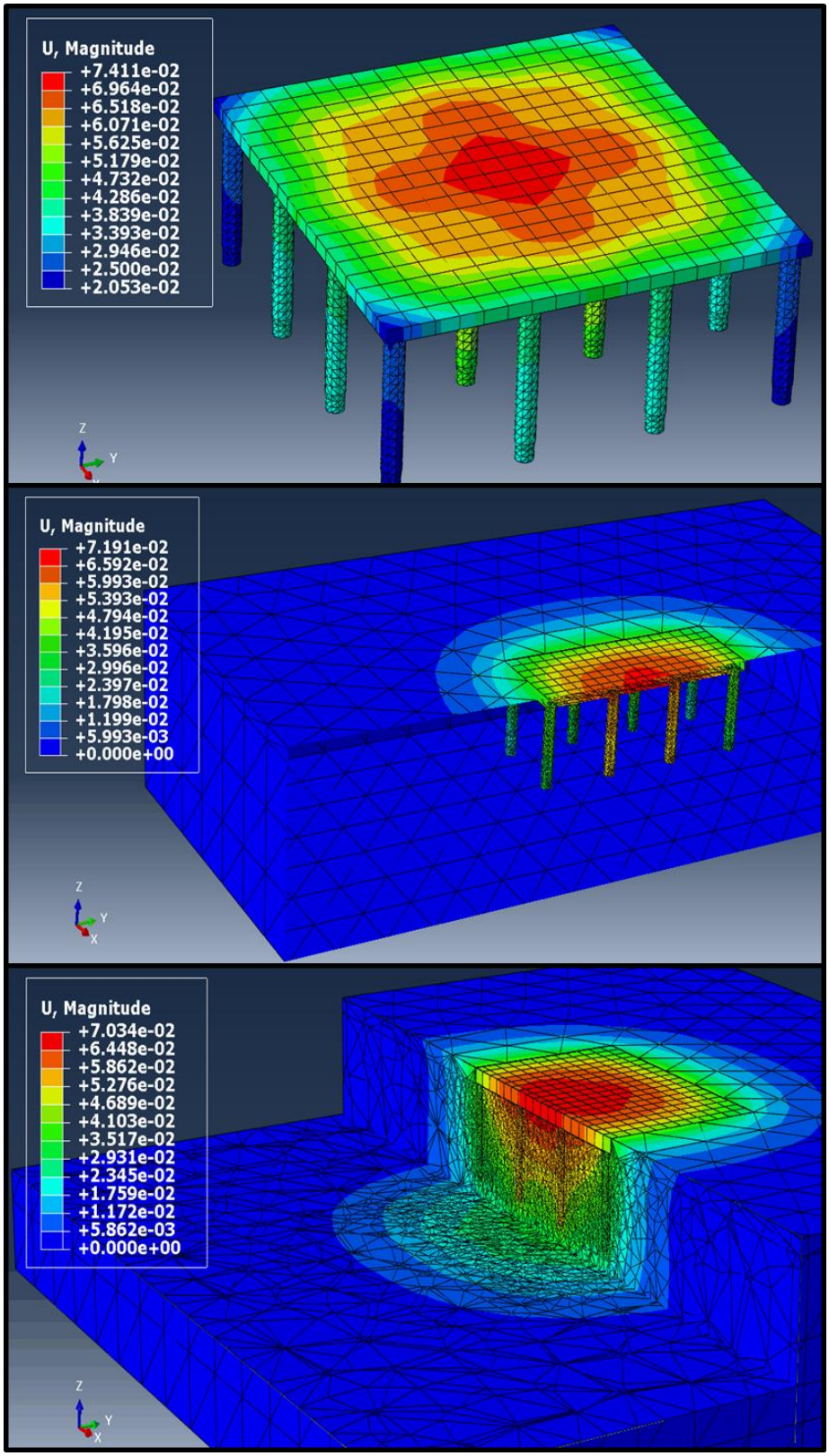



Şekil 4.7. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (36.62 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-2

Şekil 4.6.-4.9.'daki analiz sonuçları, DKTK'ların elastisite modüllerinin 9 farklı model için en yüksek ve en düşük olduğu kombinasyonlarda radye temel kalınlığı arttıkça oturma miktarının doğrusal olmayan bir biçimde azaldığını ve kolon aralıkları arttıkça oturma miktarının arttığını göstermektedir. Maksimum oturmaların temelin merkezinde olduğu ve derinliğe bağlı oluşan gerilme ve deformasyonların 12 metre seviyesinde son bulduğu görülmektedir.

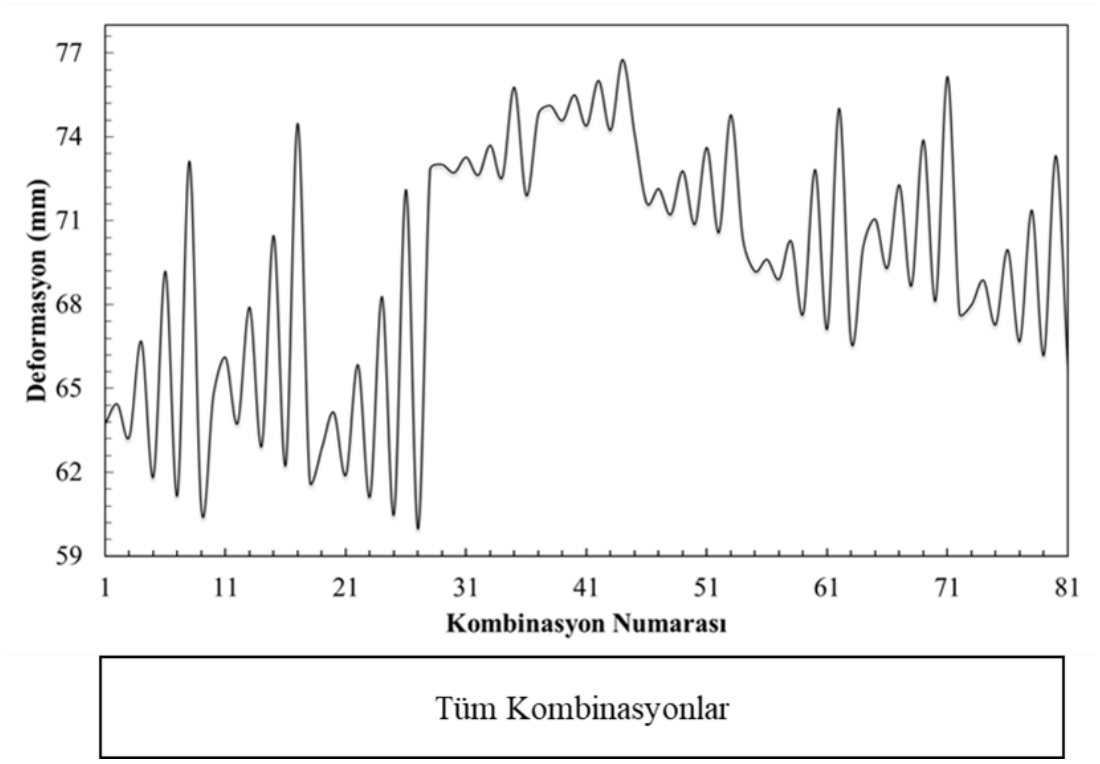



Şekil 4.8. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en düşük DKTK elastisite modülüne (329.61 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-1



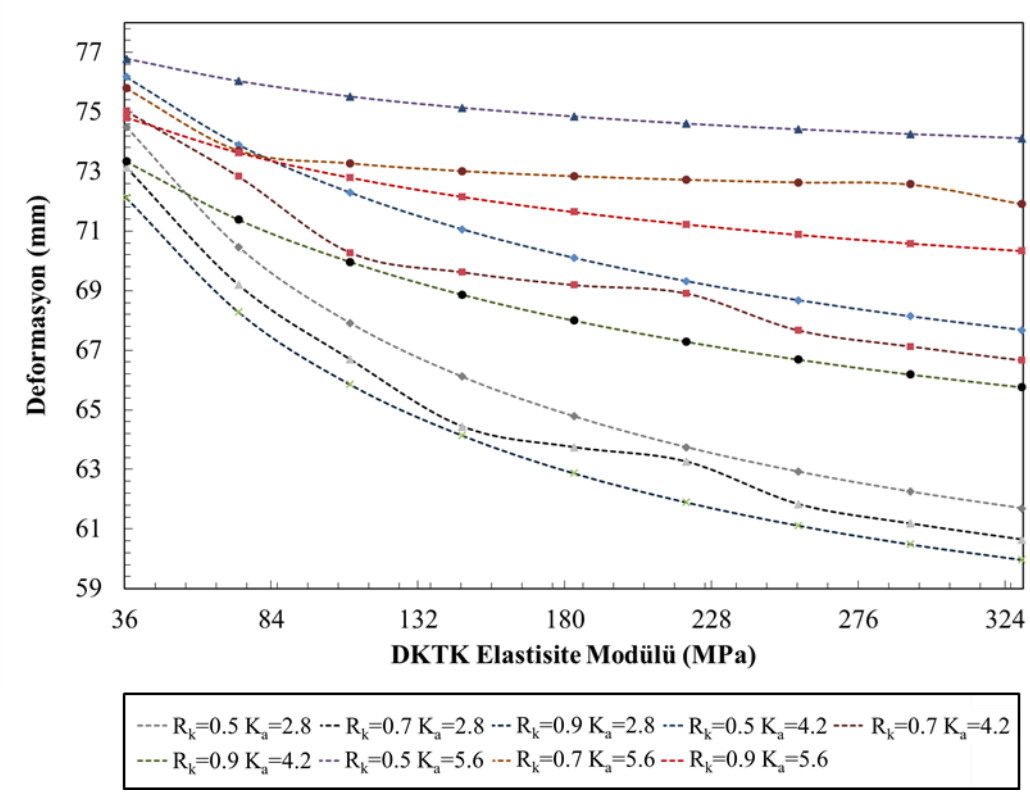

Şekil 4.9. DKTK grupları destekli radye temel sistemleri için parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde en yüksek DKTK elastisite modülüne (329.61 MPa) göre oluşan kombinasyonların üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen düşey deformasyonları-2

Radye temel merkezi altında yer alan kolonların daha yüksek bir gerilmeye maruz kalarak daha fazla deforme olduğu belirlenmiştir. Deformasyonların sınır şartlarına ulaşmaması modelin doğru şekilde tasarlandığını ve yakınsama çalışmasının başarılı olduğunu göstermiştir. Sonuçların daha detaylı bir biçimde incelenmesi için üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak radye temel kalınlığı, kolon aralıkları ve DKTK elastisite modüllerinin değişiminin maksimum oturmaya olan etkisi grafiksel olarak belirlenmiştir. Şekil 4.10.-4.13.'te bağımsız değişkenlerin maksimum deformasyon üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.10.'da, detayları Şekil 3.6'da sunulmuş olan her bir kombinasyon için elde edilen maksimum deformasyonlar gösterilmiştir. Şekil 4.11. DKTK'ların elastisite modülüne ($D_E$) bağlı radye temel sisteminde oluşan maksimum deformasyonları, Şekil 4.12. ise radye temel kalınlığına ($R_k$) bağlı elde edilen maksimum deformasyonları göstermektedir. Şekil 4.13.'te kolon aralığına ($K_a$) bağlı radye temel sistemindeki maksimum deformasyonlar sunulmuştur.



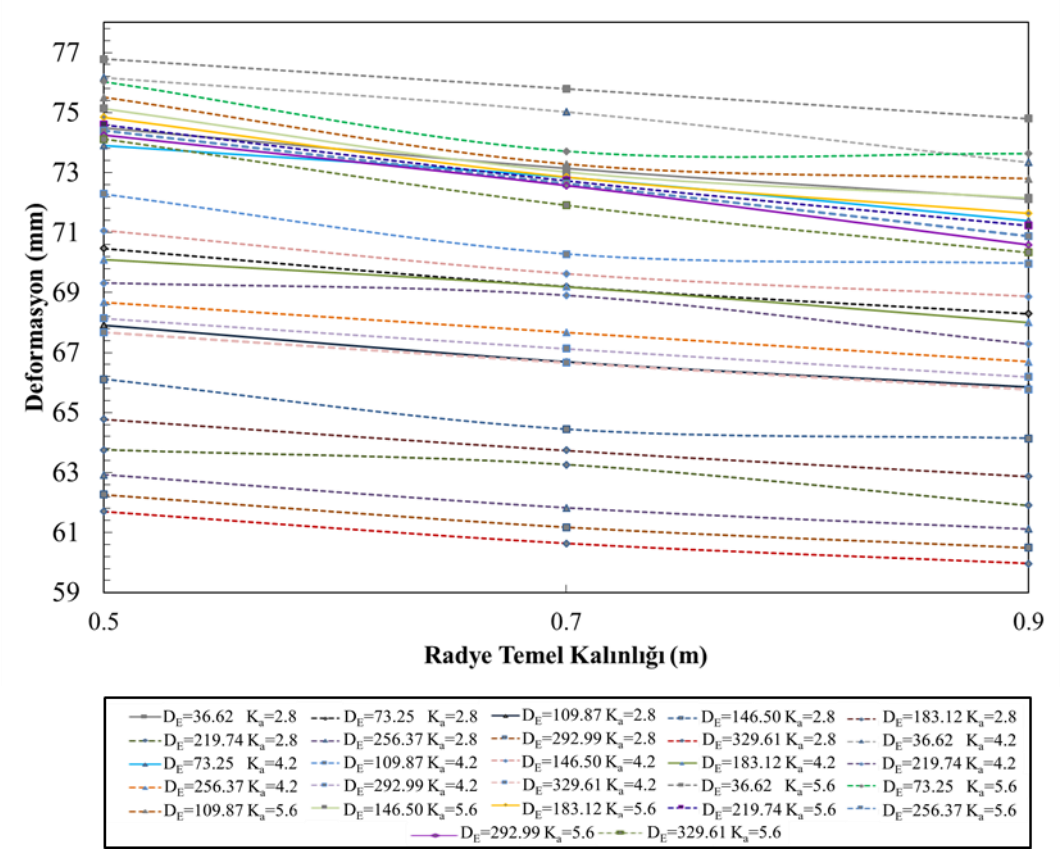

Şekil 4.10. DKTK grupları destekli radye temellerin her bir kombinasyonu için elde edilen maksimum deformasyonlarının sonuçları

81 farklı kombinasyona göre deformasyon değişiminin gösterildiği Şekil 4.10.'da en düşük deformasyon değerinin 59.97 mm (27.kombinasyon) ve en yüksek deformasyon değerinin ise 76.78 mm (44.kombinasyon) olduğu görülmektedir. Şekil 3.6.'da görülebileceği üzere 27. kombinasyon 0.9 m radye temel kalınlığı, 2.8 m kolon aralığı ve 329.61 MPa DKTK elastisite modülü kullanılarak elde edilen tasarıma aittir. 44. Kombinasyon ise; 0.5 m radye temel kalınlığı, 5.6 m kolon aralığı ve 36.62 MPa DKTK elastisite modülü kullanılarak oluşturulan modele aittir. 27 nolu kombinasyon maliyet açısından en pahalı, 44.kombinasyon ise en ucuz olarak belirlenmiştir. Radye temellerdeki oturma değerinin güvenli sınırlar içinde olup olmadığı Eurocode 7'ye (BS-EN-1994-1, 2004) bakılarak tespit edilebilir. Eurocode 7'de (BS-EN-1994-1, 2004) müsaade edilebilir oturma değeri temel tabanının % 0.5'i olacak kadar önerilmiştir (Algin, 2016 ve 2018). Tasarımı yapılan radye temelin genişliği 18 m olarak belirlendiğinden Eurocode 7 (BS-EN-1994-1, 2004) dikkate alındığında bu temel için müsaade edilebilir oturma miktarı 90 mm olarak belirlenmiştir. Yapılmış olan analizler sonucunda 81 farklı kombinasyondan bulunan oturma değerlerinin her birinin müsaade edilebilir oturma değeri olan 90 mm'den az olduğu tespit edilmiştir. Böylece 81 adet farklı kombinasyon kullanılarak elde edilen her bir modelin tasarımının güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu çalışma kapsamında optimizasyon analizleri ile hem en güvenli hem de en ekonomik tasarım araştırılmıştır.



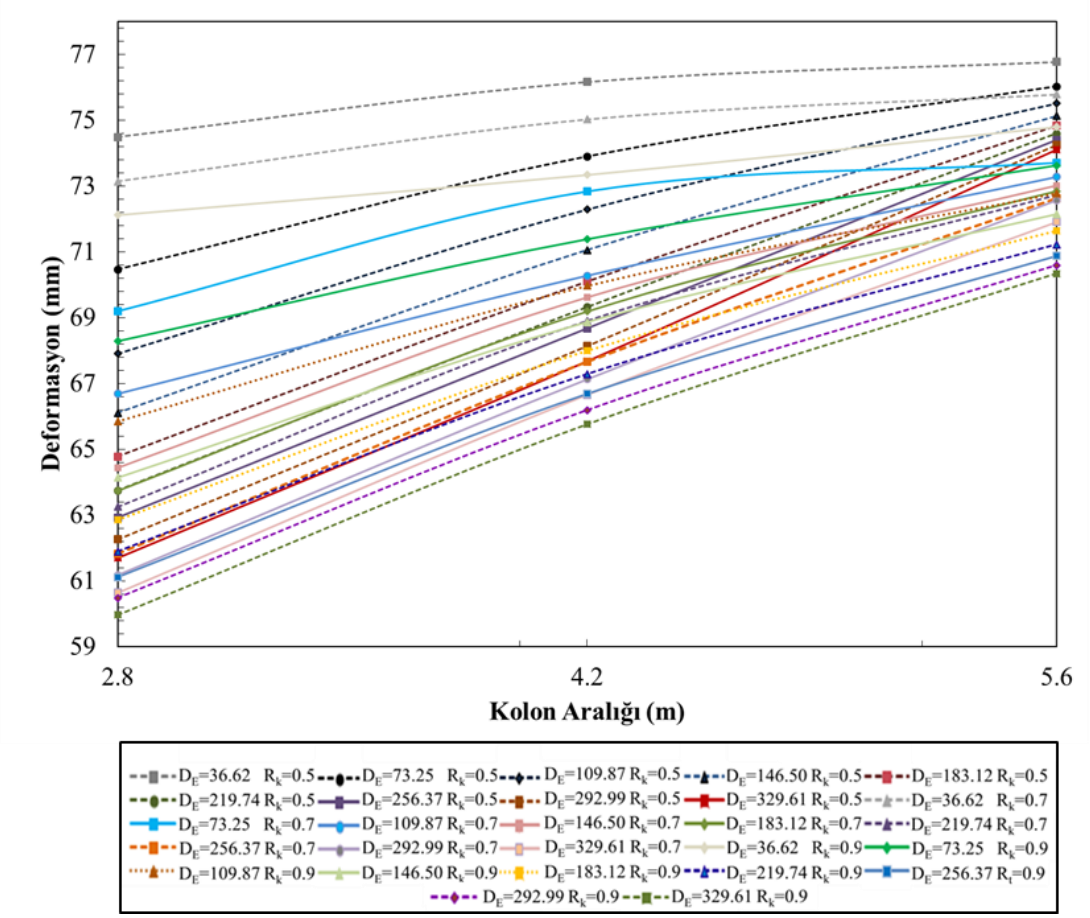

Şekil 4.11. DKTK grupları destekli radye temellerin elastisite modülüne bağlı radye temel sisteminde oluşan maksimum deformasyonlarının sonuçları

Şekil 4.11.'de DKTK elastisite modüllerinin artmasının deformasyon değerlerinde önemli bir nonlineer azalma sağladığı gösterilmiştir. Her bir seri için en düşük (36.62 MPa) ve en yüksek (329.61MPa) DKTK elastisite modülleri için değişen deformasyonlar incelendiğinde; elastisite modüllerinin artmasının, oturmanın azaltılmasında %3.47-17.17 oranları arasında etkili olduğu belirlenmiştir. Deformasyonlardaki en yüksek azalma oranı %17.17 ile $R_k$=0.5 m-$K_a$=2.8 m kombinasyonunda görülürken, en düşük azalma oranı ise % 3.47 ile $R_k$=0.5 m-$K_a$=5.6 m kombinasyonunda görülmüştür. Bu oranlar DKTK elastisite modülünün deformasyon üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir.




Şekil 4.12. DKTK grupları destekli radye temellerin radye temel kalınlığına bağlı elde edilen maksimum deformasyonlarının sonuçları

Şekil 4.12. kolon aralıklarının ve DKTK elastisite modülünün aynı olduğu kombinasyonlarda radye temel kalınlığının artmasının oturma miktarının doğrusal olmayan bir biçimde azalmasını sağladığını göstermiştir. Her bir kombinasyonda en düşük (0.5 m) ve en yüksek (0.9 m) radye temel kalınlıkları için değişen deformasyonlar incelendiğinde deformasyonlardaki en yüksek azalma oranı % 5.08 ile $K_a$=5.6 m-$D_E$=329.61 MPa kombinasyonunda görülürken, en düşük azalma oranı ise % 2.80 ile $K_a$=2.8 m- $D_E$=329.61 MPa kombinasyonunda görülmüştür. Radye temel kalınlığı değişiminin deformasyon üzerinde DKTK elastisite modülü kadar etkili bir parametre olmadığı belirlenmiştir.

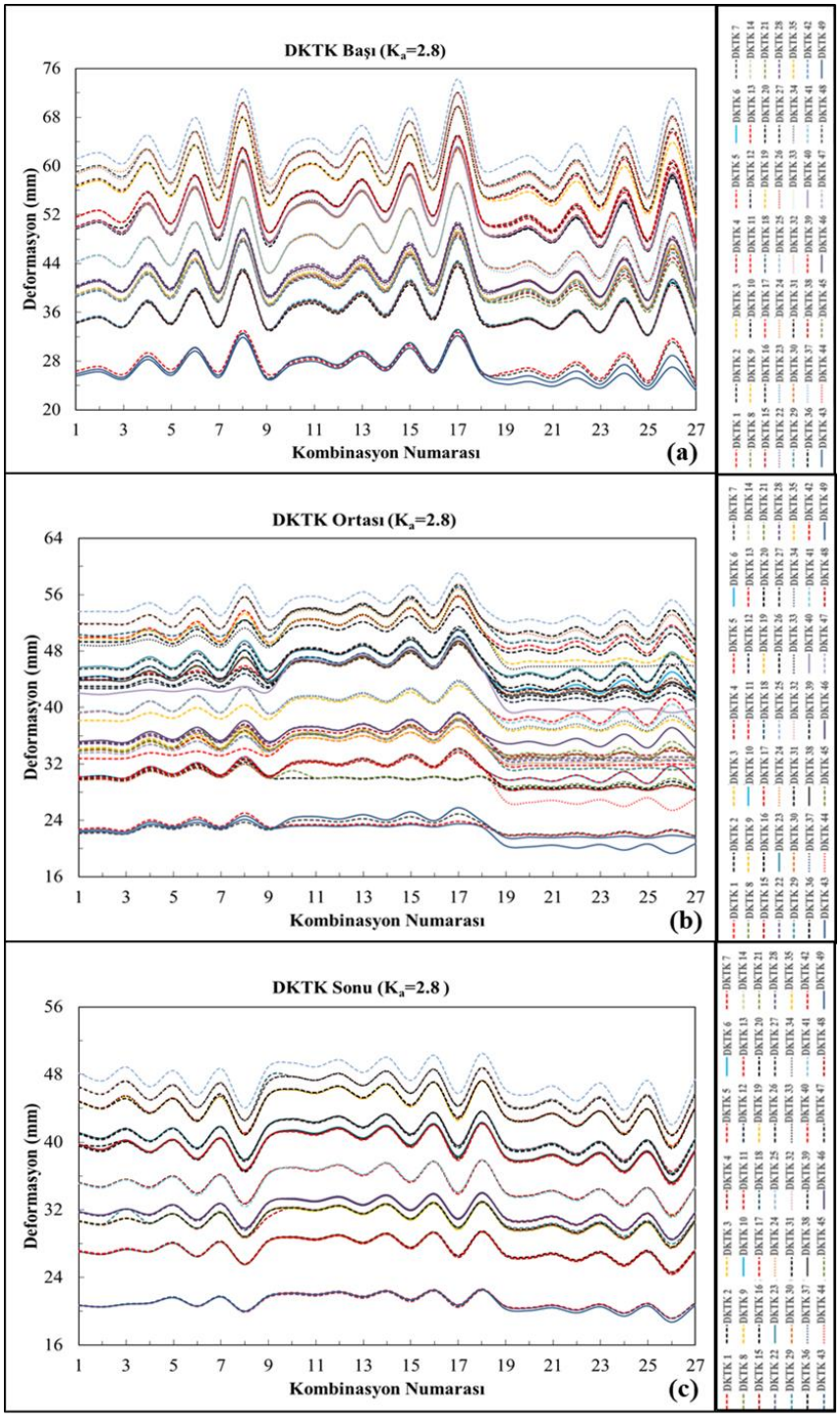



Şekil 4.13. DKTK grupları destekli radye temellerin kolon aralığına bağlı radye temel sistemindeki maksimum deformasyonlarının sonuçları

Şekil 4.13. radye temel kalınlığı ve DKTK elastisite modülünün aynı olduğu kombinasyonlarda kolon aralıklarının artmasının oturma miktarının doğrusal olmayan bir biçimde artmasına neden olduğunu göstermektedir. Her bir kombinasyonda en düşük (2.8 m) ve en yüksek (5.6 m) kolon aralıkları için değişen deformasyonlara bakıldığında, deformasyonlardaki en yüksek artma oranı % 20.11 ile $R_k$=0.5 m- $D_E$=329.61 MPa kombinasyonunda görülürken, en düşük artma oranı ise % 3.07 ile $R_k$=0.5 m- $D_E$=36.62 MPa kombinasyonunda görülmüştür. Bu oranlar kolon aralığının deformasyon değişimi üzerinde en önemli faktör olduğunu göstermiştir.

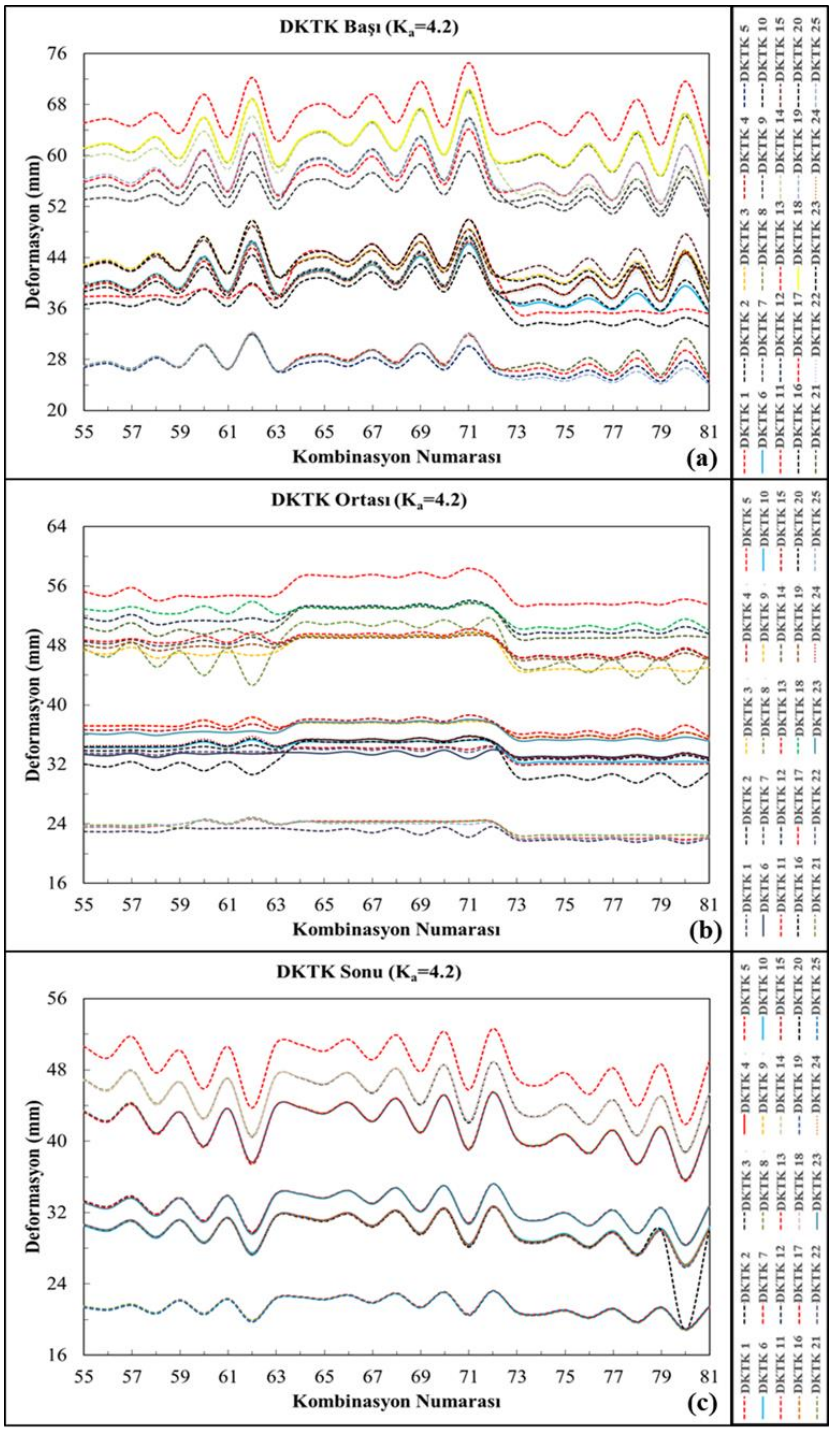
Şekil 4.10.- 4.13.'te yer alan deformasyon değişim grafikleri birlikte dikkate alındığında deformasyon üzerinde en fazla etkisi olan değişkenin kolon aralıkları, en az etkisi olan değişkenin ise radye temel kalınlığı olduğu görülmektedir. Optimizasyon

çalışmasında kullanılacak bağımsız değişkenlerin deformasyona katkısı sırasıyla kolon aralıkları, DKTK elastisite modülü ve radye temel kalınlığı şeklindedir.




Şekil 4.14. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =2.8 m için elde edilen sonuçlar

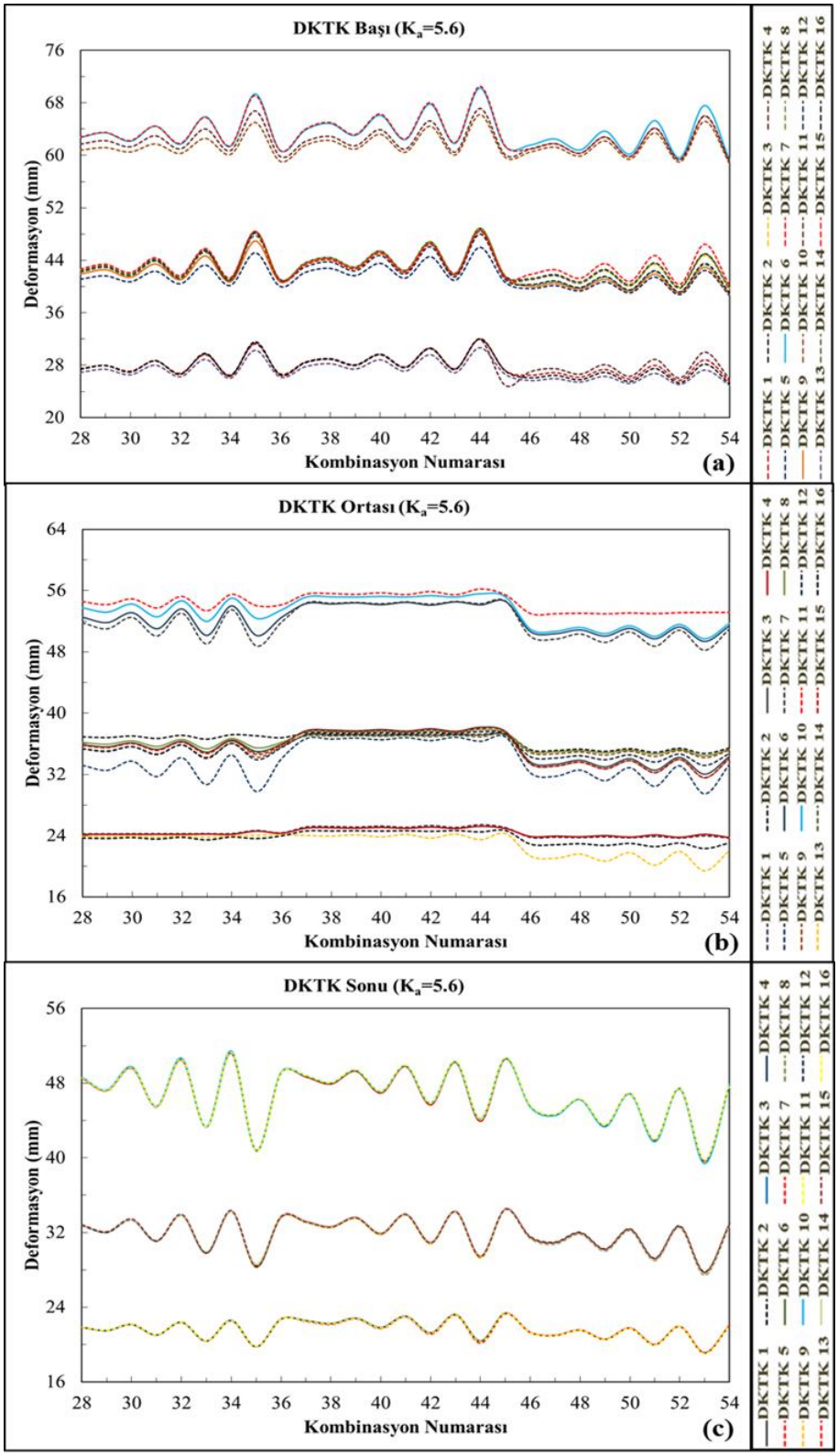
Şekil 4.14.- 4.16.'da her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve dip bölgelerindeki deformasyon sonuçları sunulmuştur.




Şekil 4.15. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =4.2 m için elde edilen sonuçlar

Şekil 4.14. (a-c)'de baş, orta ve son kısımlarında deformasyonları gösterilen DKTK'lar içinde 25 numaralı DKTK'nın her üç bölgede de en yüksek deformasyona uğrayan kolon olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.7. incelendiğinde $K_a$=2.8 m için 25 numaralı DKTK'nın radye temelin merkez bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Böylece 49 DKTK'lı sistemde en çok gerilmeye maruz kalan kolonların radye temel merkezi altında yer alan kolonlar olduğu tespit edilmiştir. $K_a$=2.8 m için en az deformasyona uğrayan DKTK'lar ise radye temel sisteminin sol ve sağ alt köşelerinde yer alan 43 ve 49 numaralı DKTK'lardır. Böylece köşe noktalarda yer alan kolonların en az gerilmeye maruz kaldığı görülmüştür.

Şekil 4.15. (a-c)'de baş, orta ve son kısımlarında deformasyonları gösterilen DKTK'lar içinde 13 numaralı DKTK'nın her üç bölgede de en yüksek deformasyona uğrayan kolon olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.8.'de $K_a$ =4.2 m için 13 numaralı DKTK'nın radye temelin merkez bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Böylece 25 DKTK'lı sistemde en çok gerilmeye maruz kalan kolonların 49 kolonlu sistemdeki gibi radye temel merkezi altında yer alan kolonlar olduğu tespit edilmiştir. $K_a$=4.2 m için en az deformasyona uğrayan DKTK'lar ise radye temel sisteminin sol üst ve sağ alt köşelerinde yer alan 1 ve 25 numaralı DKTK'lardır.

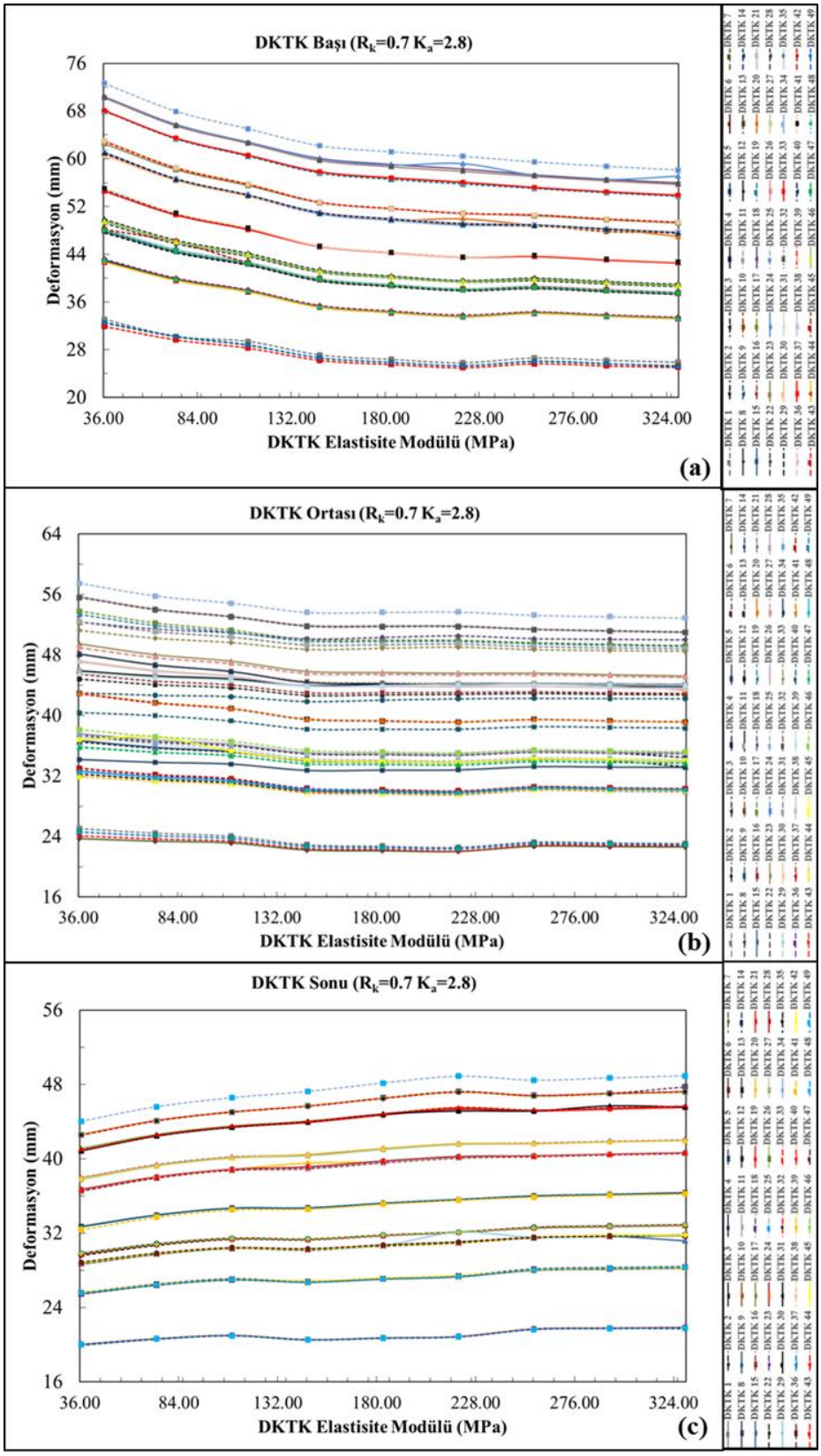



Şekil 4.16. Her bir kombinasyon için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$ =5.6 m için elde edilen sonuçlar

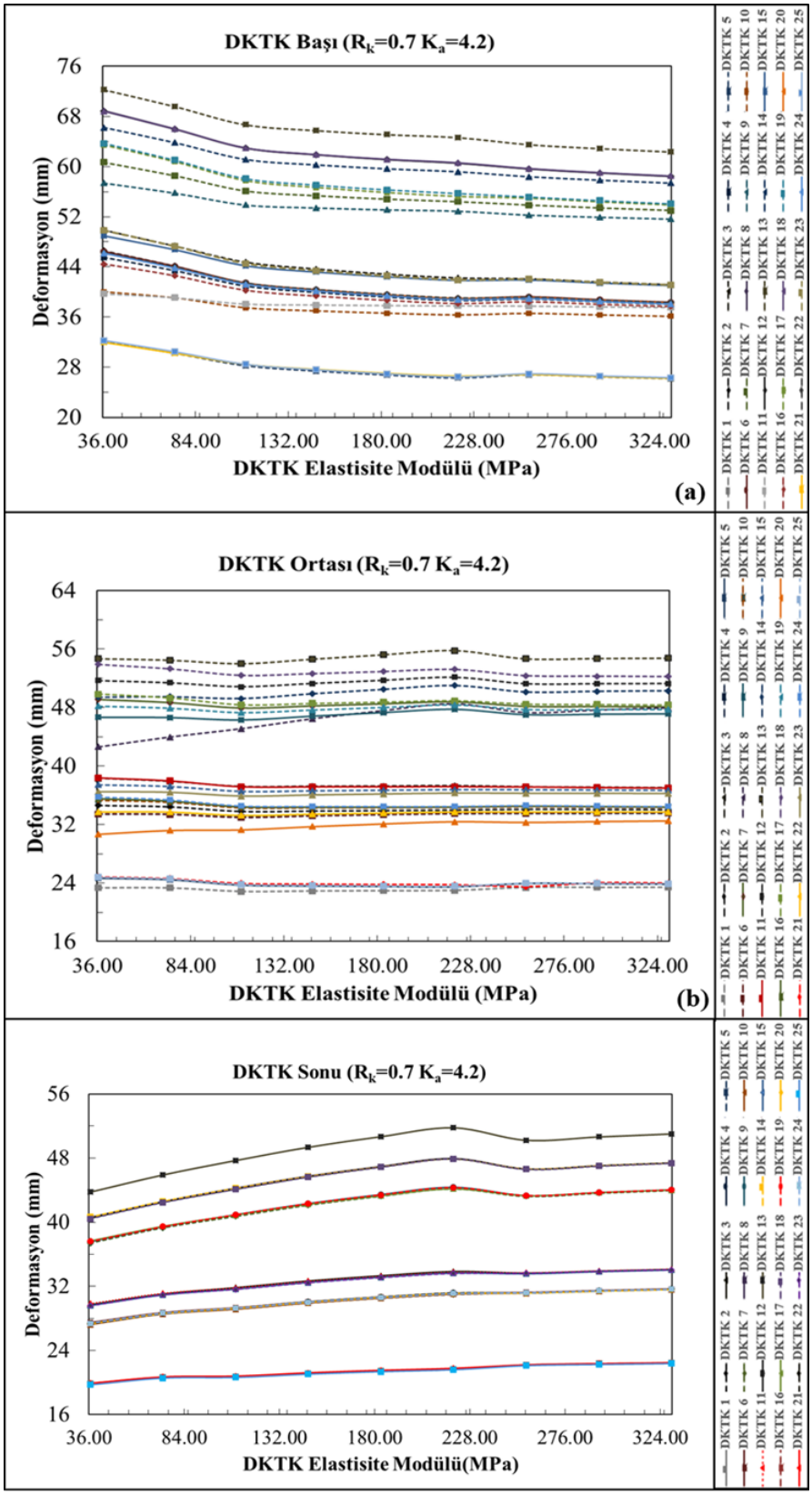
Şekil 4.16. (a-c)'de baş kısmında 6 numaralı DKTK'nın en çok deformasyona uğradığı, orta ve son kısımlarında ise 11 numaralı DKTK'nın en yüksek deformasyona uğrayan kolon olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.9.'da $K_a$ =5.6 m için 6 ve 11 numaralı DKTK'ların radye temelin merkez bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Böylece 16 DKTK'lı sistemde en çok gerilmeye maruz kalan kolonların diğer konfigürasyonlarda olduğu gibi radye temel merkezi altında yer alan kolonlar olduğu tespit edilmiştir. $K_a$ =5.6 m için en az deformasyona uğrayan DKTK'lar ise radye temel sisteminin köşe noktalarında yer alan kolonlardır.

Tüm konfigürasyonlar birlikte değerlendirildiğinde $K_a$ =2.8 m olan sistemlerde DKTK'ların yeterli deformasyona uğrayarak radye temel sistemine gelen gerilmeleri karşılamada oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. $K_a$=5.6 m olan sistemlerde ise DKTK'ların gelen gerilmeyi taşımada diğer sistemlere göre daha az etkili olduğu ve bu sebeple radye temeldeki oturmaların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. $K_a$=4.2 m olan sistemlerin ise diğer iki konfigürasyona göre maliyet-güvenli tasarım açısından daha dengeli bir davranış gösterdiği görülmüştür. Güvenli tasarım-maliyet dengesini sağlayan en iyi sistem detaylı olarak bu çalışmanın optimizasyon analizleriyle ilgili olan kısmında araştırılmıştır.

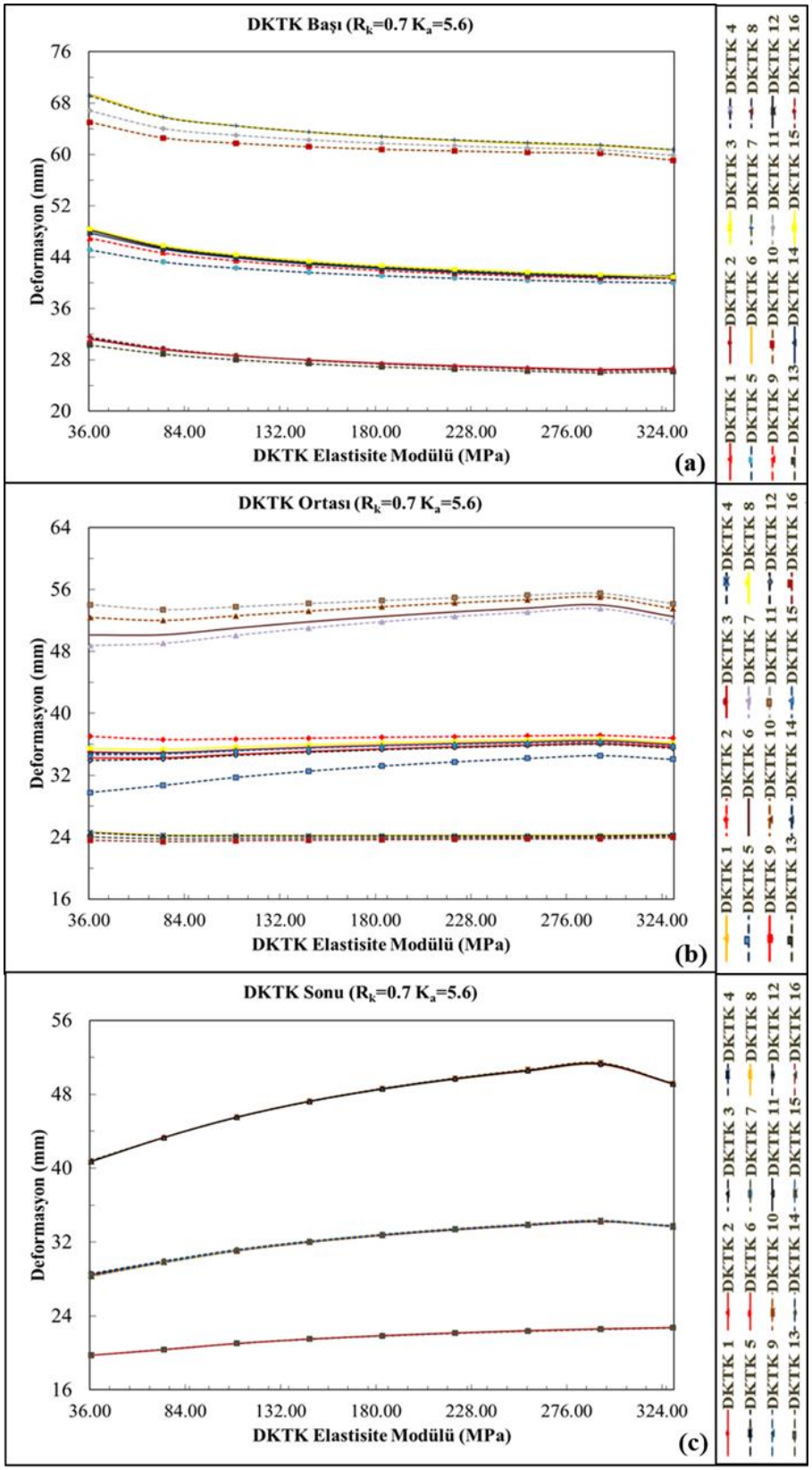
Şekil 4.17.-4.19.'da $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları sunulmuştur.




Şekil 4.17. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar

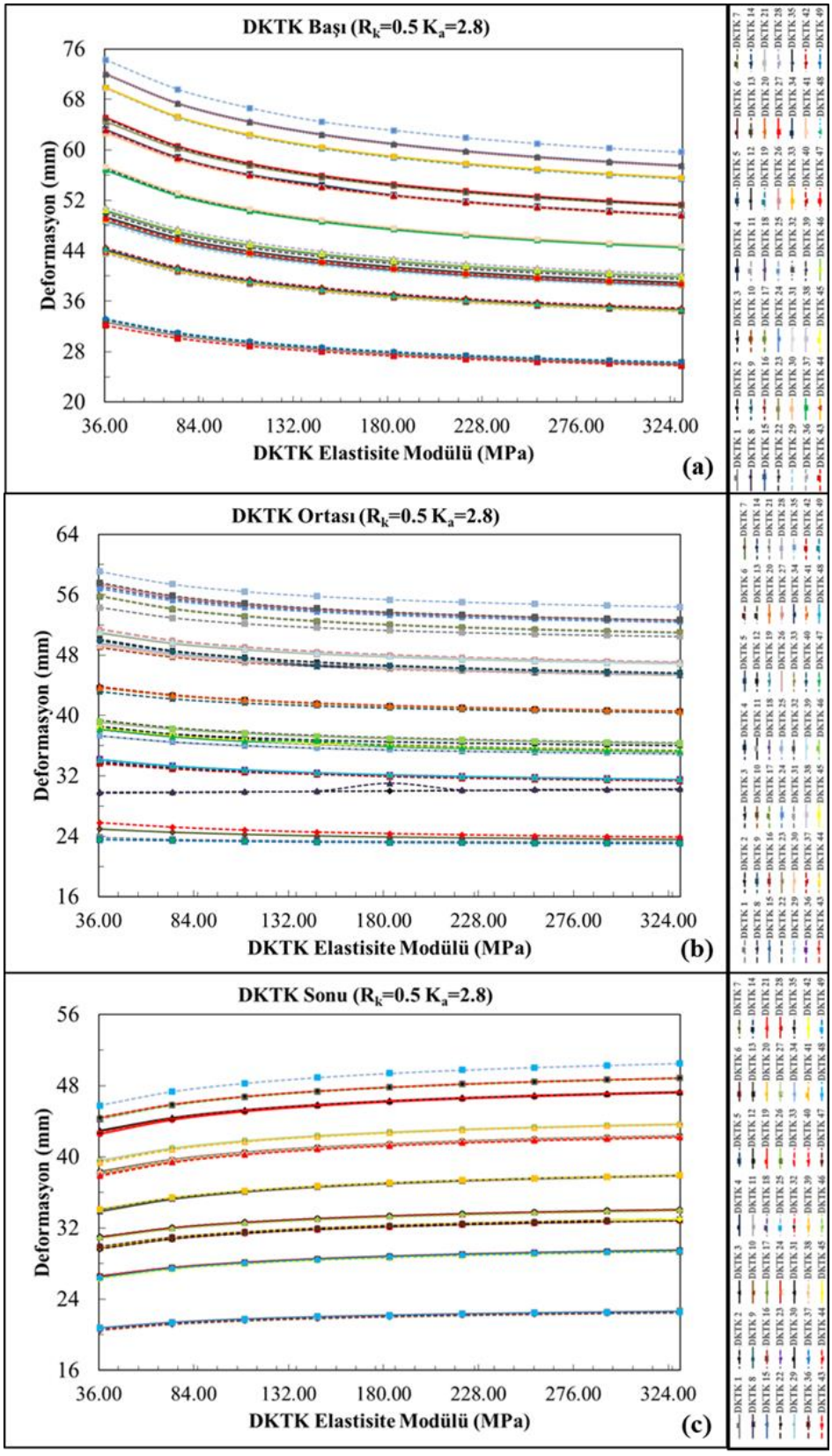



Şekil 4.18. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar

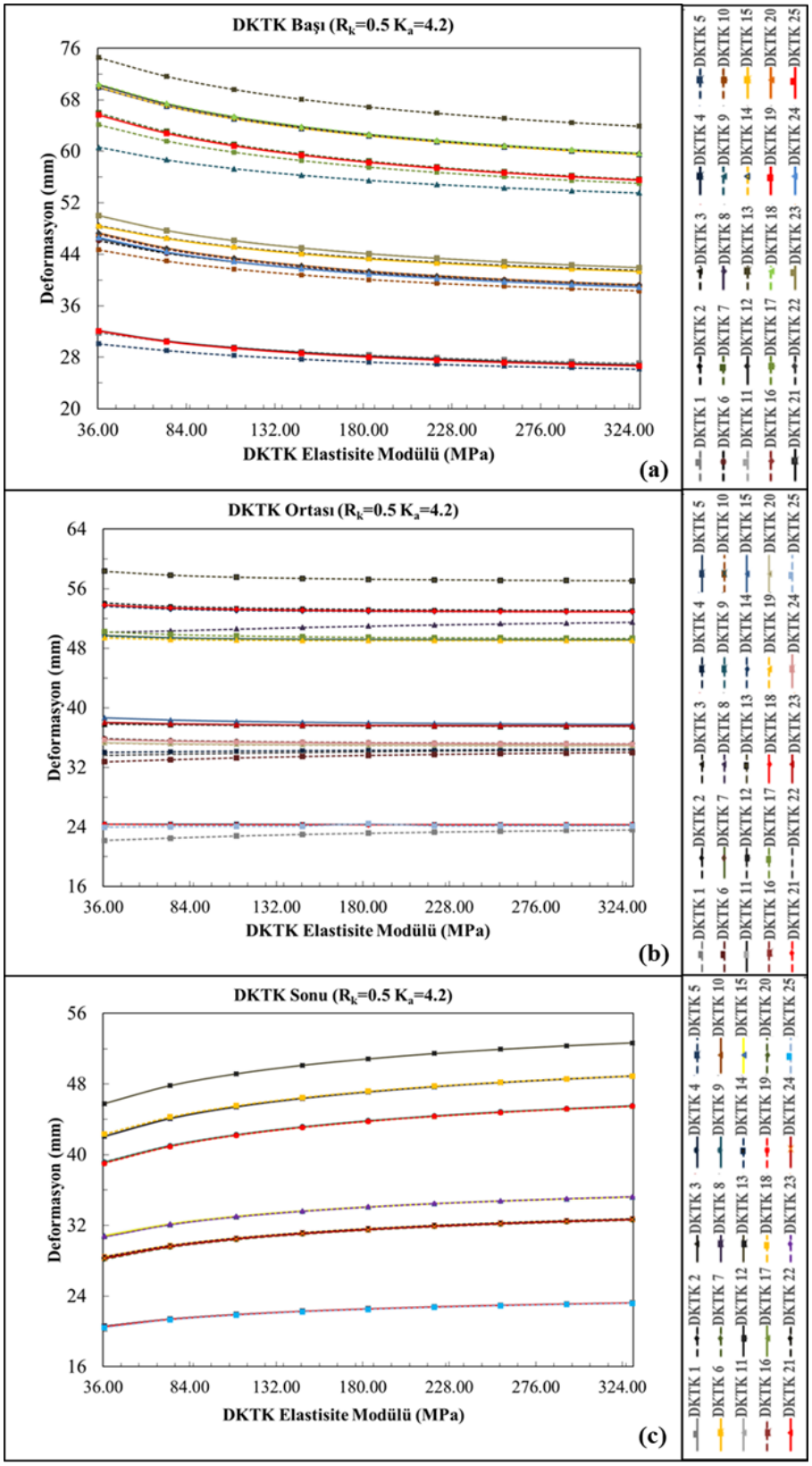



Şekil 4.19. $R_k$=0.7 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve merkez bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6 m için elde edilen sonuçlar

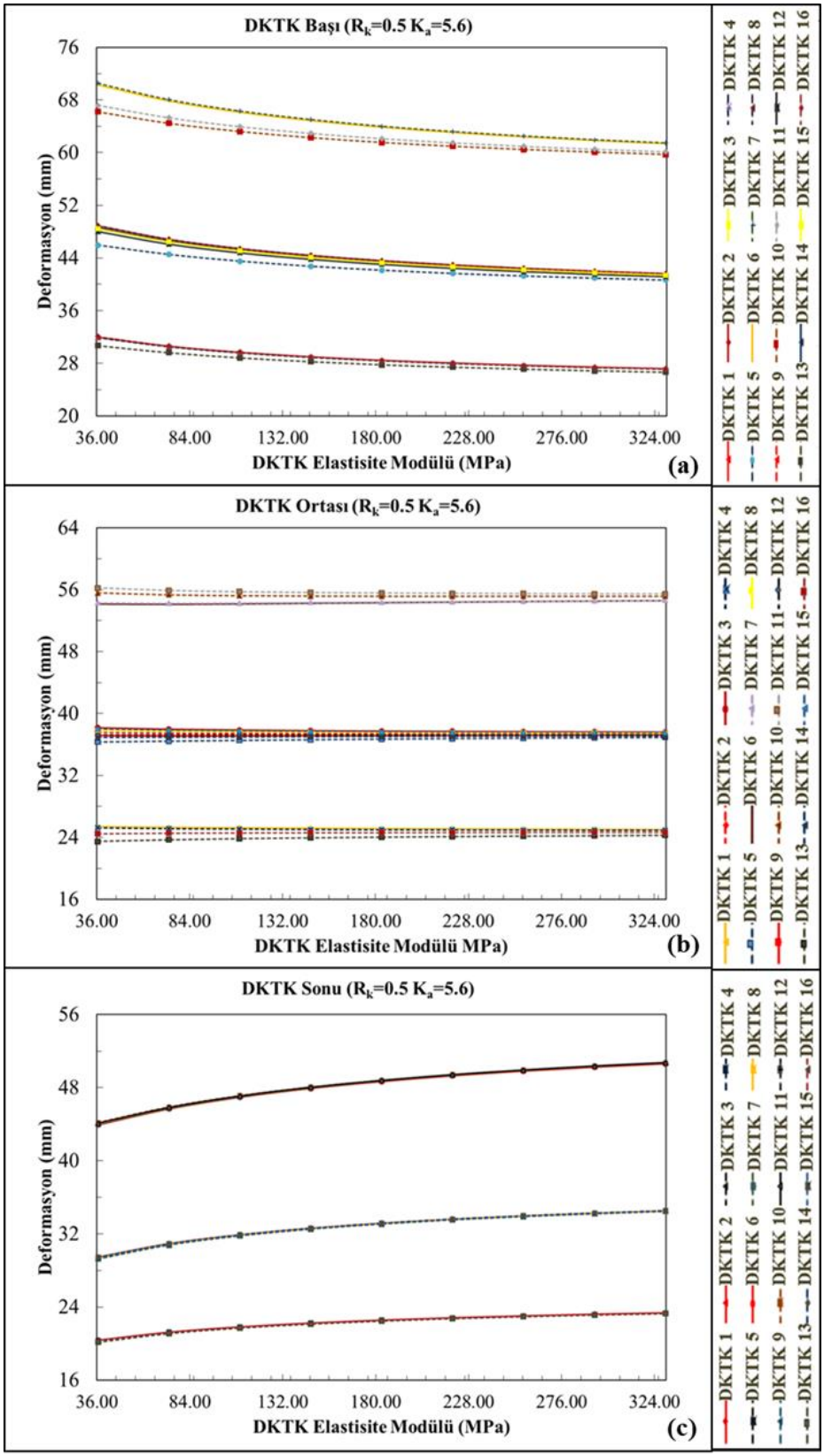
Kolonların baş bölgelerinde oluşan deformasyonların, kolonların elastisite modülü ile ters orantılı ancak doğrusal olmayan bir ilişki içinde olduğu Şekil 4.17. (a), 4.18. (a) ve 4.19. (a)'da görülmektedir. Şekil 4.17. (b), 4.18. (b) ve 4.19. (b)'de sunulan kolonların orta bölgelerinde oluşan deformasyonlar incelendiğinde elastisite modülüne bağlı net bir eğilim gözlenmemiştir, DKTK ve elastisite modülüne bağlı farklı eğilimler ortaya çıkmıştır. Kolonların son bölgelerinde oluşan deformasyonların, kolonların elastisite modülü ile orantılı ancak doğrusal olmayan bir ilişki içinde olduğu Şekil 4.17. (c), 4.18. (c) ve 4.19. (c)'de görülmektedir. Rijitliği yüksek olmayan kolonlarda deformasyonların son bölgede sönümlenmesi nedeniyle belirtilen biçimde eğilimler oluşmuştur. Şekil 4.17.-4.19. (a-c)'de en çok deformasyona maruz kalan kolonların Şekil 4.14.- 4.16.'da olduğu gibi radye temelin merkezi çevresinde yer aldığı görülmektedir. En az deformasyona uğrayan kolonların ise radye temelin köşe noktalarında bulunduğu benzer bir biçimde Şekil 4.17., 4.18. ve 4.19.'da sunulmuştur.



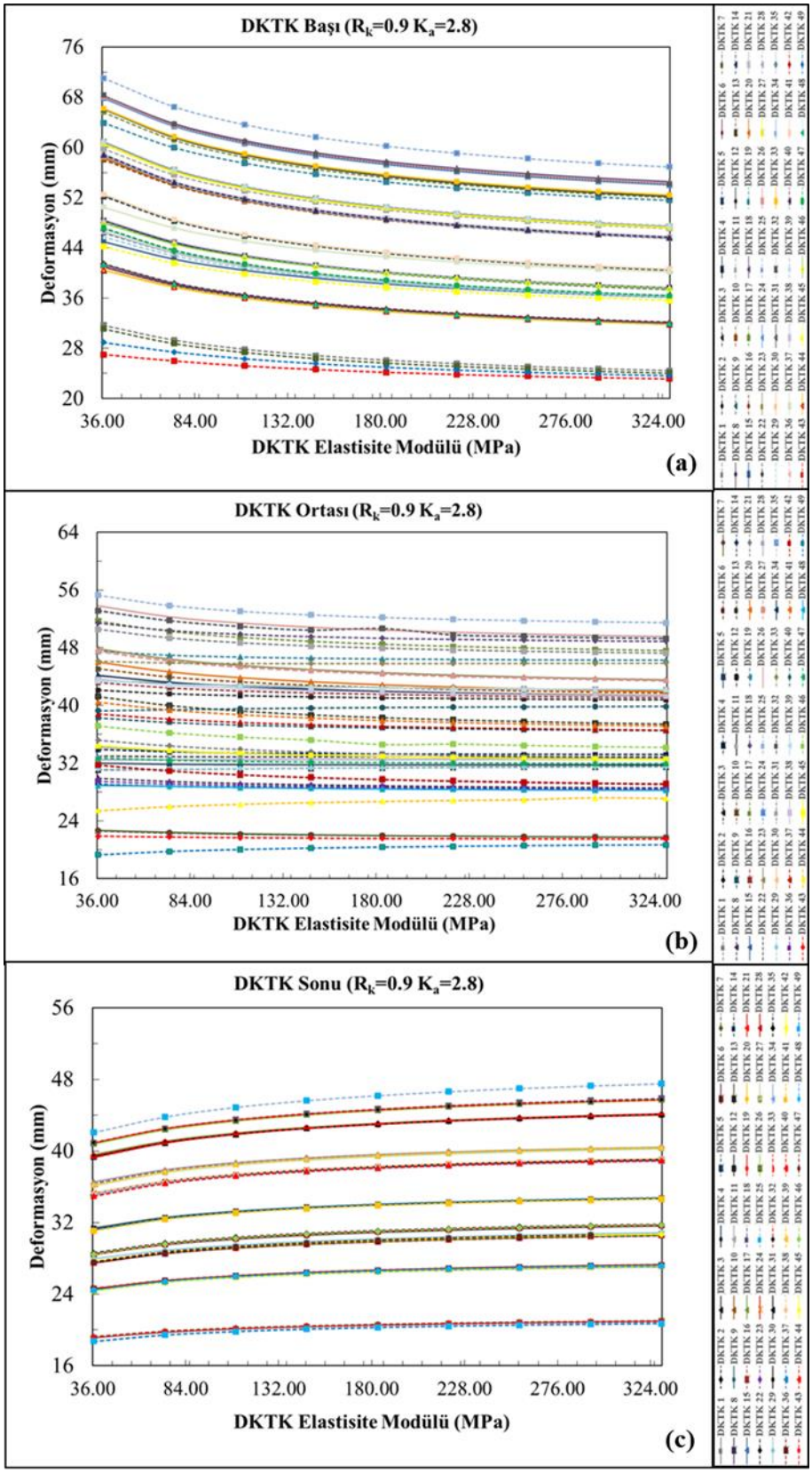

Şekil 4.20. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar



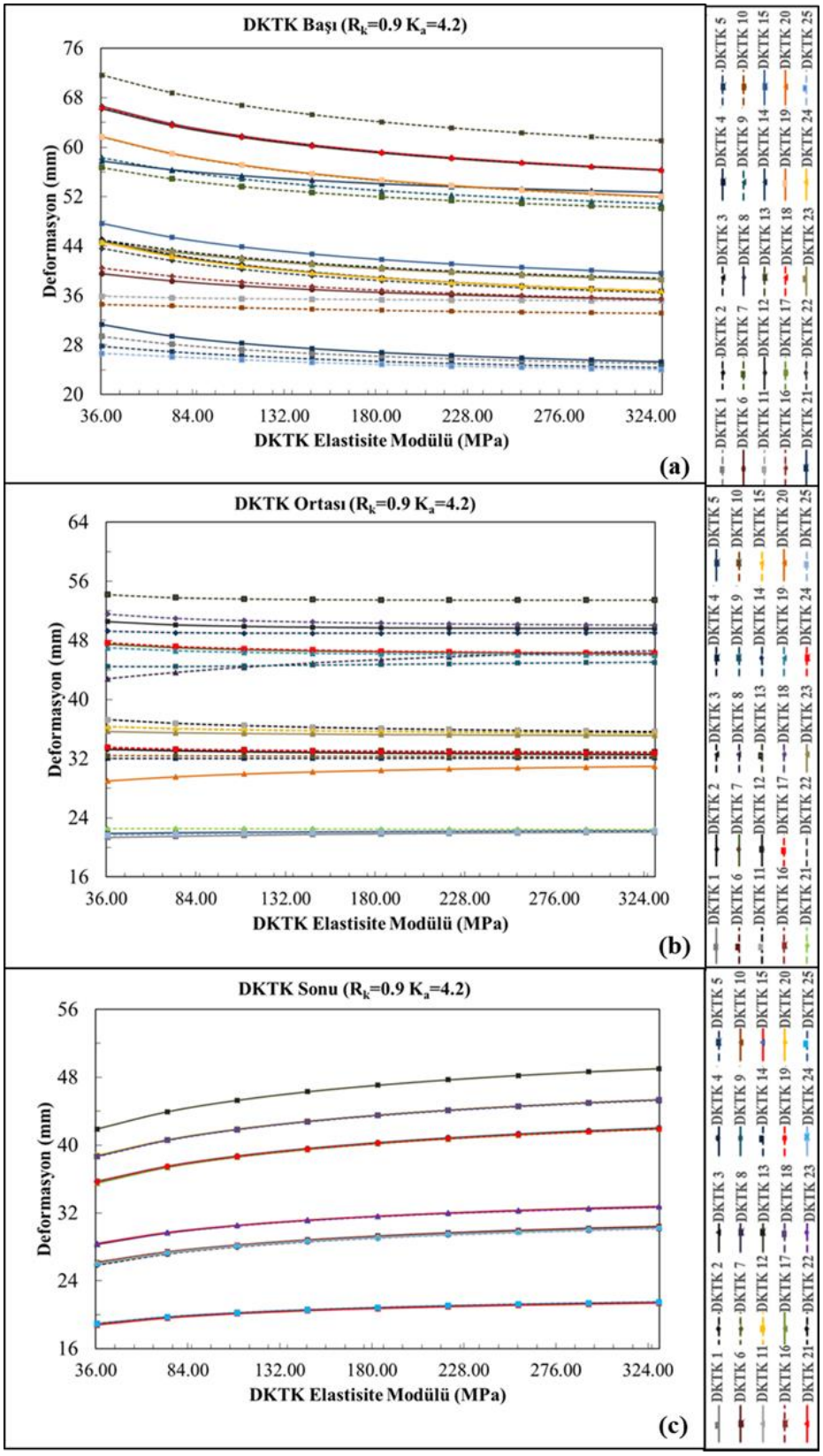

Şekil 4.21. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar



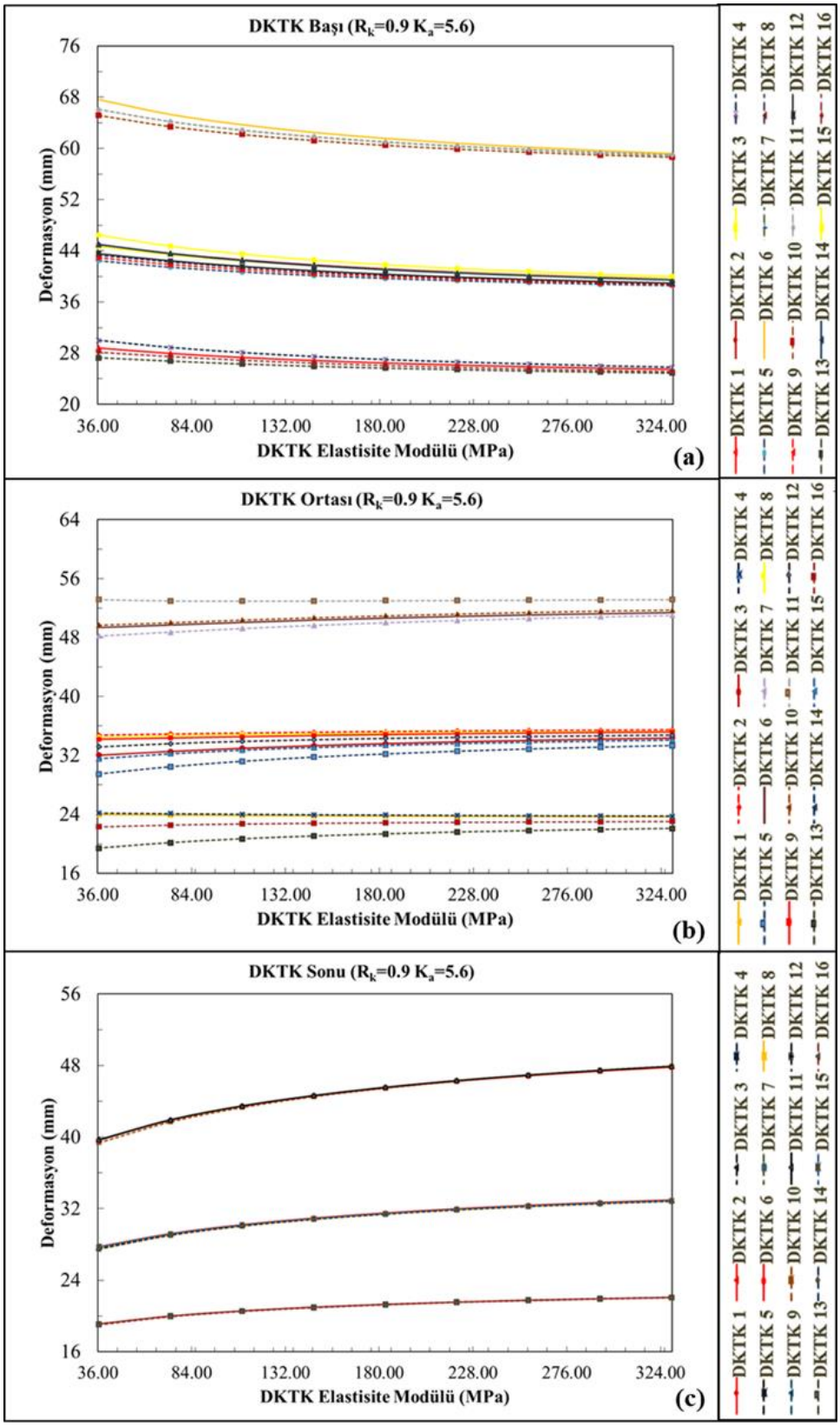

Şekil 4.22. $R_k$=0.5 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6. m için elde edilen sonuçlar




Şekil 4.23. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=2.8 m için elde edilen sonuçlar




Şekil 4.24. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=4.2 m için elde edilen sonuçlar




Şekil 4.25. $R_k$=0.9 m için DKTK grupları destekli radye temel sisteminde yer alan tüm kolonların baş, orta ve son bölgelerindeki DKTK elastisite modülüne bağlı deformasyon sonuçları; a-c) $K_a$=5.6 m için elde edilen sonuçlar

Şekil 4.20.-4.25. (a-c)'de kolonların baş, orta ve son bölgelerinde oluşan deformasyonların Şekil 4.17.- 4.19. (a-c) ile benzer eğilim gösterdiği belirlenmiştir. $R_k$=0.5 ve 0.9 m için belirlenen kombinasyonların (Şekil 4.20.-4.25.) analiz sonuçlarına göre kolonların baş bölgelerinde oluşan deformasyonlar, kolonların elastisite modülü ile ters orantılı ancak doğrusal olmayan bir ilişki içerisindedir. Orta bölgede standart bir eğilim elde edilmemiştir, kolonların elastisite modülü ve konumlarına göre farklı eğilimler ortaya çıkmıştır. DKTK'ların son bölgesinde genel olarak elastisite modülünün artışına bağlı olarak deformasyonlarda da artış görülmüştür. Kolon dibine özgü gerçekleşen bu durum, rijitliği düşük olan kolonlarda deformasyonların dip bölgeye ulaşmadan üst kısımlarda sönümlenmesi nedeniyle oluşmuştur.

Şekil 4.17-4.25.'te yer alan tüm kombinasyonlarda radye temel kalınlığı değişiminin deformasyon eğilimlerini çok etkilemediği belirlenmiştir.

## 4.3. İstatistiksel Anlamlılık ve Optimizasyon Analizlerinin Sonuçları

Bu bölümde varyans analizi (ANOVA) sonuçları, Tepki Yüzey Optimizasyon Yöntemi Sonuçları ve Hedefe Ulaşma Optimizasyon Yöntemi Sonuçları sunulmuştur.

### 4.3.1. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Bu çalışma kapsamındaki varyans analizleri %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1.'de ANOVA sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 4. 1. ANOVA sonuçları

| Bağımlı Değişkenler | Varyasyon kaynağı | İstatistiksel parametreler | | | | | Anlamlılık | Katkı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Serbestlik Derecesi (*df*) | Kareler toplamı ($SS_x$) | Ortalama kare ($MS_x$) | F | P-değeri | | |
| Deformasyon (mm) | $R_k$ | 79.07 | 2 | 39.53 | 23.27 | <0.05 | Evet | 4.76 |
| | $K_a$ | 958.19 | 2 | 479.09 | 282.01 | <0.05 | Evet | 57.72 |
| | $D_E$ | 507.49 | 8 | 63.43 | 37.34 | <0.05 | Evet | 30.57 |
| | Hata | 115.51 | 68 | 1.69 | | | | 6.95 |
| Maliyet Katsayısı | $R_k$ | 1066.67 | 2 | 533.33 | 67999991.82 | <0.05 | Evet | 6.53 |
| | $K_a$ | 12600 | 2 | 6300 | 803249903.4 | <0.05 | Evet | 77.14 |
| | $D_E$ | 2667.07 | 8 | 333.38 | 42506372.01 | <0.05 | Evet | 16.32 |
| | Hata | 0.0005 | 68 | $7.84 \times 10^{-6}$ | | | | $3.26 \times 10^{-6}$ |

$R_k$= Radye Temel Kalınlığı (m), $K_a$= Kolon Aralığı (m), $D_E$= DKTK Elastisite Modulü (MPa)

ANOVA'da anlamlılığı ifade eden P-değerleri analiz sonucunda incelenmiştir ve P-değerlerinin tümünün 0.05'ten küçük olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.1.). Böylece Çizelge 4.1.'de gösterilen bağımsız değişkenlerin tümünün değişimlerinin maliyet katsayısı ve deformasyon bağımlı değişkenleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. ANOVA sonuçlarına göre Taguchi yöntemi ile (örneğin Algin 2016, Algin 2018, Ekmen ve ark. 2020) değişim aralıklarına bağlı olarak her bağımsız değişkenin bağımlı değişkenlere sağladığı yüzdesel katkı hesaplanmıştır. Çizelge 4.1.'de yer alan yüzdesel katkı verilerine göre, maliyet katsayısı ve deformasyon bağımlı değişkenlerini en çok etkileyen faktörün sırasıyla %77.14 ve %57.72 oranlarında kolon aralıkları olduğu belirlenmiştir. Kolon aralıklarının değişimi doğrudan kolon sayısını etkilediğinden bu parametrenin çoklu analizlerdeki önemi istatistiksel olarak da görülmüştür. Maliyet katsayısı ve deformasyon bağımlı değişkenlerini etkileyen diğer faktörlerin katkı yüzdesi büyükten küçüğe sırasıyla DKTK'ların elastisite modülü ve radye temel kalınlığı olmuştur. Radye temel kalınlığı değişimi istatistiksel olarak anlamlı olsa da deformasyon ve maliyete olan katkısı azdır. Araştırılan tüm faktörler istatistiksel olarak anlamlı olduğundan optimizasyon çalışmasında yer almıştır.

### 4.3.2. Tepki yüzey optimizasyon yöntemi sonuçları

Çizelge 4.2.'de bu çalışmadaki tüm optimizasyon yöntemleri için belirlenen değişken tanımları gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. Bu çalışmadaki tüm optimizasyon yöntemleri için belirlenen değişken tanımları

| | Parametreler | Hedef | Alt Limit | Üst Limit |
|---|---|---|---|---|
| **Faktörler** | $R_k$ | Serbest | 0.5 | 0.9 |
| | $K_a$ | Serbest | 2.8 | 5.6 |
| | $D_E$ | Serbest | 36.62 | 329.61 |
| **Çıktılar** | Deformasyon (mm) | Minimize | 59.97 | 76.78 |
| | Maliyet Katsayısı | Minimize | 43.33 | 100 |

$R_k$= Radye Temel Kalınlığı (m), $K_a$= Kolon Aralığı (m), $D_E$= DKTK Elastisite Modulü (MPa)

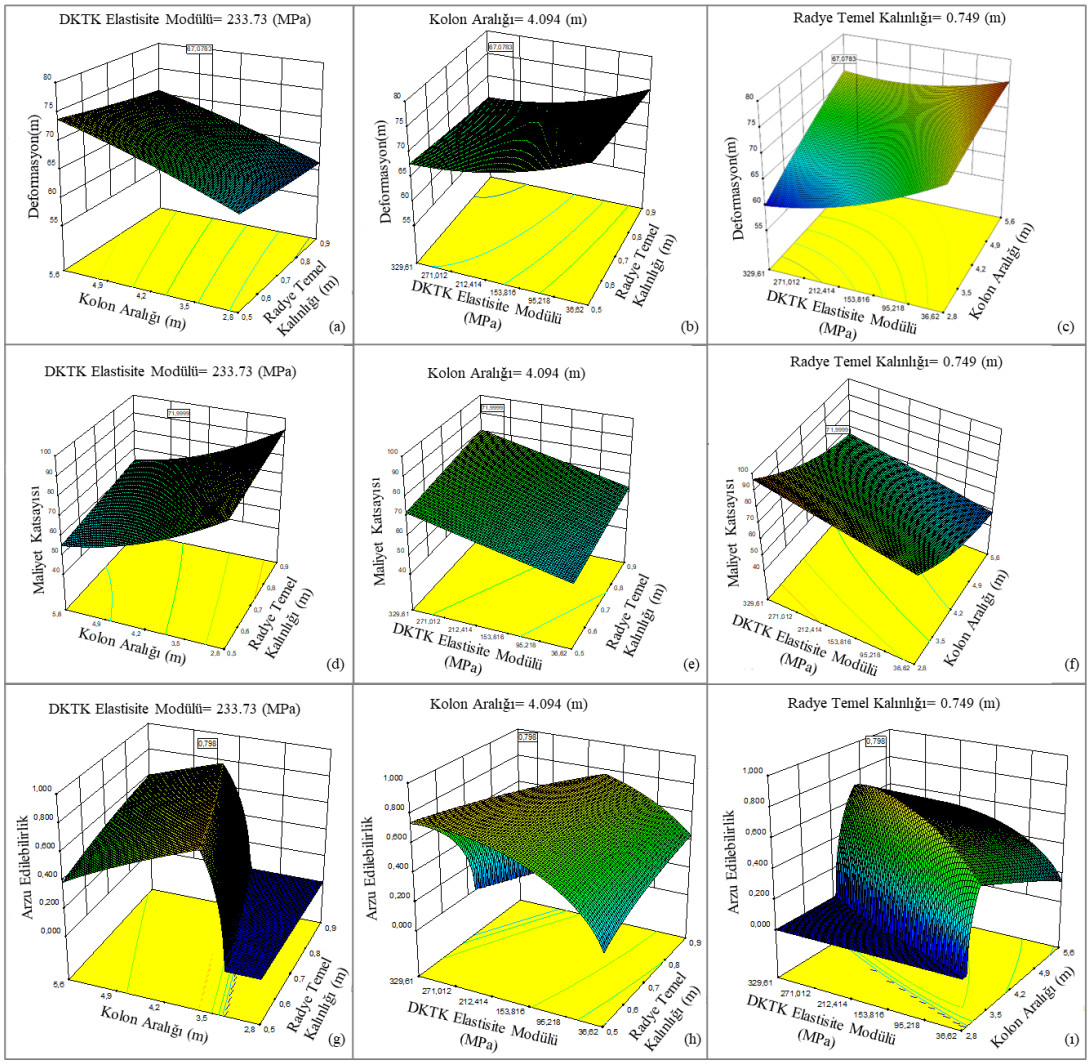
Tepki Yüzey Yöntemi ile optimizasyon analizleri gerçekleştirmek için Design Expert (2016) programı kullanılmıştır. Çizelge 4.3.'de Tepki Yüzey Yöntemi ile yürütülen optimizasyon çalışmasının sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 4. 3. Tepki Yüzey Yöntemi ile elde edilen optimizasyonun sonuçları

| | Faktörler | Çıktılar | Arzu edilebilirlik |
|---|---|---|---|
| **Tepki Yüzey Yöntemi ile Çözüm** | $R_k$=0.749 | Deformasyon = 67.08 mm | 0.798 |
| | $K_a$=4.094 | Maliyet Katsayısı=72 | |
| | $D_E$=233.73 | | |

$R_k$= Radye Temel Kalınlığı (m), $K_a$= Kolon Aralığı (m), $D_E$= DKTK Elastisite Modulü (MPa)

Tepki Yüzey Yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda maliyet ve deformasyon arasında bir denge sağlanarak bir çözüm sistemi oluşturulmuştur. Elde edilen çözümde radye temel kalınlığı 0.749 m, kolon aralıkları 4.094 m ve DKTK elastisite modülleri 233.73 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerlere karşılık hesaplanan maliyet katsayısı 72 ve deformasyon değeri 67.08 mm olarak elde edilmiştir. Önerilen çözüm sisteminin arzu edilebilirlik değeri 0.798 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.26.'da Tepki Yüzey Yöntemi ile elde edilmiş optimizasyon grafikleri sunulmuştur.




Şekil 4.26. Tepki Yüzey Yöntemi kullanılarak oluşturulmuş optimizasyon grafikleri; a-c) deformasyon bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, d-f) maliyet katsayısı bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, g-ı) arzu edilebilirlik grafikleri

Şekil 4.26. (a)'da DKTK'ların elastisite modülünün sabit olduğu durumda (233.73 MPa) kolon aralıklarının artışı ile deformasyonun arttığı ve radye temel kalınlığının artışı ile deformasyonun azaldığı gösterilmiştir. Şekil 4.26. (b)'de kolon aralıklarının sabit olduğu durumda (4.094 m) DKTK elastisite modüllerinin ve radye temel kalınlığının artışı ile deformasyonun azaldığı görülmektedir. Şekil 4.26. (c)'de radye temel kalınlığının sabit olduğu durumda (0.749 m) DKTK elastisite modüllerinin artışı ile deformasyonun azaldığı ve kolon aralıklarının artışı ile deformasyonun arttığı sunulmuştur. Şekil 4.26. (d)'de DKTK'ların elastisite modülünün sabit olduğu durumda (233.73 MPa) kolon aralıklarının artışı ile maliyetin

azaldığı ve radye temel kalınlığının artışı ile maliyetin arttığı gösterilmiştir. Şekil 4.26. (e)'de kolon aralıklarının sabit olduğu durumda (4.094 m) DKTK elastisite modüllerinin ve radye temel kalınlığının artışı ile maliyetin arttığı görülmektedir. Şekil 4.26. (f)'de radye temel kalınlığının sabit olduğu durumda (0.749 m) DKTK elastisite modüllerinin artışı ile maliyetin arttığı ve kolon aralıklarının artışı ile maliyetin azaldığı sunulmuştur. Şekil 4.26. (g-ı)'da ise optimizasyon çözüm aralıkları gösterilmiş ve optimum noktayı belirten maksimum arzu edilebilirlik değerleri işaretlenmiştir. Arzu edilebilirlik grafikleri değerlendirildiğinde istenen duruma yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ancak daha dengeli bir optimizasyon çözümünün olup olmadığını incelemek için bir diğer optimizasyon yöntemi olan Yeni Hedefe Ulaşma yöntemi geliştirilerek kullanılmıştır.

### 4.3.3. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma optimizasyon yöntemi sonuçları

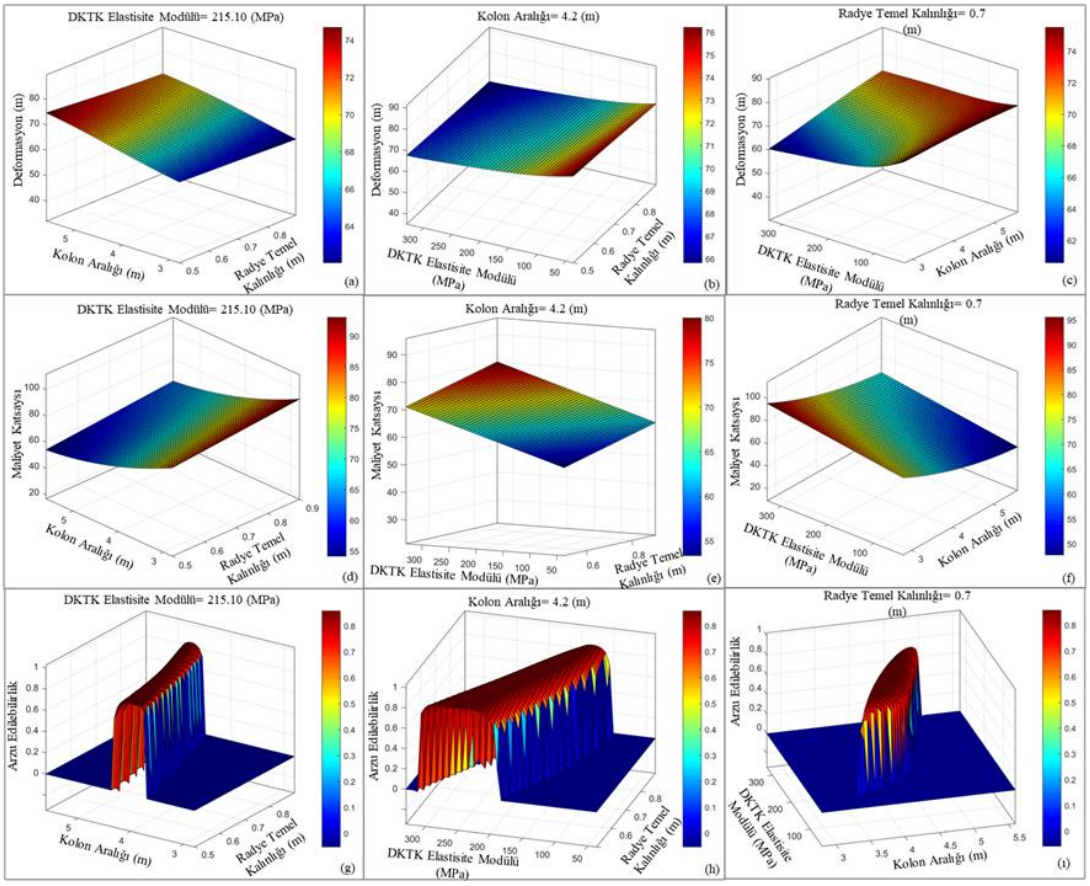
MATLAB (2017) programı kullanılarak yapay zeka ile geliştirilmiş Hedefe Ulaşma Yöntemi ile optimizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4.'te yapay zeka ile geliştirilmiş Hedefe Ulaşma Yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyonun sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 4. 4. Yapay zeka destekli hedefe ulaşma yöntemi ile elde edilen optimizasyonun sonuçları

| | Faktörler | Çıktılar | Arzu edilebilirlik |
|---|---|---|---|
| **Hedefe Ulaşma Yöntemi ile Çözüm** | $R_k$=0.70<br>$K_a$=4.2<br>$D_E$=215.10 | Deformasyon = 68.6 mm<br>Maliyet Katsayısı=68.61 | 0.857 |

$R_k$= Radye Temel Kalınlığı (m), $K_a$= Kolon Aralığı (m), $D_E$= DKTK Elastisite Modülü (MPa)

Şekil 4.27.'de yapay zeka destekli Hedefe Ulaşma Yöntemi ile elde edilmiş optimizasyon grafikleri sunulmuştur.



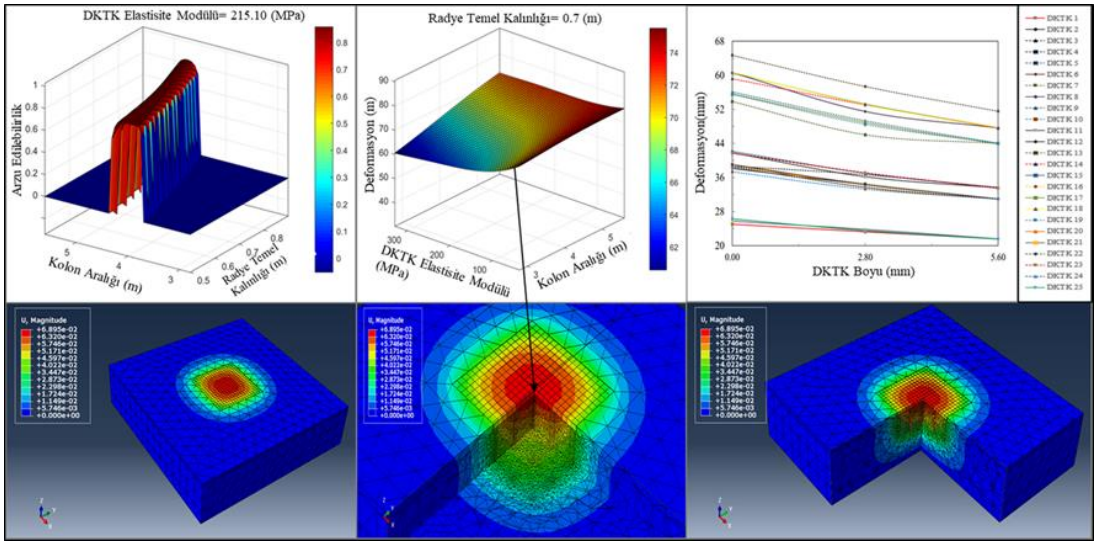

Şekil 4.27. Yapay zeka destekli yeni hedefe ulaşma yöntemi kullanılarak oluşturulmuş optimizasyon grafikleri; a-c) deformasyon bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, d-f) maliyet katsayısı bağımlı değişkenine göre elde edilen 3B regresyon grafikleri, g-ı) arzu edilebilirlik grafikleri

Yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi kullanılarak oluşturulmuş Şekil 4.27. (a-f)'de gösterilen 3B regresyon grafiklerinin eğilimleri Şekil 4.26. (a-f) ile benzerlik göstermektedir. DKTK elastisite modülü, radye kalınlığı ve kolon aralıklarının deformasyon ve maliyet katsayısına etkisi her iki optimizasyon yönteminde de aynı şekilde görülmüştür. Ancak Şekil 4.27. (g-ı)'de sunulan arzu edilebilirlik değerleri incelendiğinde Yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi kullanılarak elde edilmiş arzu edilebilirlik grafiklerinin Tepki Yüzey Yöntemine göre daha yüksek değerlere ulaştığı ve daha geniş çözüm aralığı sağladığı görülmektedir. Sayısal olarak arzu edilebilirlik değerleri incelendiğinde her iki optimizasyon yöntemin de başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Fakat yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi ile elde edilen çözümde maliyet deformasyon dengesi daha iyi kurulmuş ve daha düşük maliyetle kabul edilebilir bir deformasyon

değerine ulaşılmıştır. Kolonlar arası mesafeler daha fazla ve radye temel kalınlığı Tepki Yüzey Yöntemine göre daha düşük olarak belirlenmiştir. Bu nedenle Yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yönteminin arzu edilebilirlik değerlerinin Tepki Yüzey Yöntemine göre daha yüksek olduğu ve istenilen duruma daha çok yaklaşıldığı görülmüştür. Geliştirilmiş Hedefe Ulaşma Yönteminin yapay zeka desteğiyle yüksek regresyon değerlerine sahip fonksiyon elde etmesi optimizasyon açısından avantaj sağlamıştır. Böylece bu optimizasyon probleminin çözümü için çalışılan iki yöntem arasından yapay zeka destekli yeni geliştirilmiş Hedefe Ulaşma Yöntemi ile elde edilen çözüm seçilmiştir.

### 4.3.4. Optimizasyon analizinin doğrulanması

Optimizasyon analizini doğrulamak amacıyla yapay zeka destekli yeni geliştirilmiş Hedefe Ulaşma Yöntemi çözüm sisteminin önerdiği veriler kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4.'de belirtilen faktörler üç boyutlu sonlu elemanlar modeline tanıtılmıştır. Seçilmiş optimizasyon çözümünde belirlenen girdiler için 68.6 mm deformasyon öngörülmüştür (Çizelge 4.4.). Optimizasyon çözüm sisteminin belirlediği bağımsız değişken parametrelerinin verileri kullanılarak gerçekleştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde 68.95 mm deformasyon sonucu elde edilmiştir. Şekil 4.28.'de üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması sunulmuştur. Ayrıca optimum sistem için gerçekleştirilen analizde her kolonun derinlik boyunca deformasyon değerleri gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile optimizasyon analizi sonuçları oldukça uyumlu olarak elde edildiğinden optimizasyon işlemi doğrulanmıştır.




Şekil 4.28. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

# 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

## 5.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, darbeli kırmataş kolon destekli radye temel parametrelerini yeni yöntemlerle optimize etmek için çok sayıda parametrik üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar simülasyonları ve optimizasyon analizleri başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen verilere dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

- DKTK destekli radye temel sistemlerinde maksimum oturmalar temelin merkezinde oluşmakta ve köşe noktalara doğru oturmalar azalmaktadır.

- Radye temel üstündeki gerilmeye bağlı olarak temel merkezi altında yer alan kolonlar diğer kolonlara göre daha fazla deforme olmaktadır.

- 81 farklı kombinasyona göre en düşük deformasyon değeri 59.97 mm ve en yüksek deformasyon değeri ise 76.78 mm'dir. Tüm kombinasyonlardan elde edilen oturma değerlerinin dikkate alınan rehberlere göre müsaade edilebilir sınırlar içerisindedir. Bu kapsamda 81 farklı kombinasyon kullanılarak elde edilen her modelin tasarımı güvenlidir.

- Deformasyonu azaltmada en fazla etkisi olan değişkenler sırasıyla kolon aralıkları (%20.11'e kadar), DKTK elastisite modülü (%17.17'ye kadar) ve radye temel kalınlığı (% 5.08'e kadar) şeklindedir.

- DKTK'ların baş bölgelerinde oluşan deformasyonlar DKTK elastisite modülü ile ters orantılıdır. DKTK orta bölgelerinde oluşan deformasyonlar incelendiğinde elastisite modülüne bağlı net bir eğilim gözlenmemiştir. Kolonların son bölgelerinde oluşan deformasyonlar, kolonların elastisite modülü ile orantılı ancak doğrusal olmayan bir ilişki içindedir. Rijitliği yüksek olmayan

kolonlarda deformasyonların dip bölgede sönümlenmesi nedeniyle belirtilen biçimde eğilimler oluşmuştur.

- Araştırılan tüm faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir.

- Sayısal olarak arzu edilebilirlik değerleri bakımından bu çalışmada dikkate alınan her iki optimizasyon yöntemi de başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi kullanılarak elde edilmiş arzu edilebilirlik grafiklerinin Tepki Yüzey Yöntemine göre daha yüksek değerlere ulaştığı ve daha geniş çözüm aralığı sağladığı belirlenmiştir. Yapay zeka destekli yeni Hedefe Ulaşma Yöntemi ile elde edilen çözümde maliyet deformasyon dengesi daha iyi kurulmuş ve daha düşük maliyetle kabul edilebilir bir deformasyon değerine ulaşılmıştır. Bu kapsamda yapay zeka destekli yeni kodlama ile oluşturulan yüksek dereceli fonksiyonun optimizasyon çalışmasına entegre edilmesi daha istenebilir sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır.

- Yeni yöntemler kullanarak çok-amaçlı olarak yürütülen optimizasyon çalışmasında belirtilen iki farklı optimizasyon yöntemi birbirleriyle karşılaştırılmış olup arzu edilebilirlik değeri en yüksek olan çözüm sistemi seçilmiştir. Böylece genel radye temel-darbeli kırmataş kolon grubu sistemleri için yeni yöntemlerle yüksek korelasyon değerlerindeki fonksiyonlar kullanılarak araştırmacılara ışık tutacak optimum tasarım parametrelerine ulaşılmıştır.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında, darbeli kırmataş kolon destekli radye temel sistemleri için maliyet-güvenlik dengesi sağlanarak yeni yöntemlerle optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir. Ulaşılan çözüm sistemi başarılı bir şekilde doğrulanmıştır.

Bu kapsamda, darbeli kırmataş kolon destekli radye temel sistemleri için araştırmacılara ve proje uygulayıcılarına yol gösterici veriler elde edilmiştir. Darbeli

kırmataş kolon destekli radye temel sistemleri tasarlanırken bu çalışmada sunulan optimum çözümlerin maliyet-güvenlik dengesi açısından yol gösterici bir nitelik taşıması nedeniyle, araştırmacılar ve proje uygulayıcıları tarafından gözetilmesi önerilmektedir.

## KAYNAKLAR


ABAQUS. Abaqus, 6.14 ed. USA: Dassault Systèmes. (2014).

ALAMANIS, N., (2017). Uncertainties and Optimization in Geotechnical Engineering. American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 38(1), 92-111.

ALGIN, H. M., and GUMUS, V., (2018). 3D FE Analysis on Settlement of Footing Supported with Rammed Aggregate Pier Group. International Journal of Geomechanics, 18(8), 04018095.

ALGIN, H. M., (2016). Optimised Design of Jet-Grouted Raft Using Response Surface Method. Computers and Geotechnics, 74, 56-73.

ALGIN, H. M., (2018). Optimised Design of Jet-Grouted Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(2), 494-508.

ALLGOOD, C., WEPPLER, L., LIEN, B., and FOX, N. S., (2003). Geopier® Intermediate Foundation Systems–Case Studies for Building Foundations over Soft Organic Soils and Peat. In Proceeding of the Nottingham Problematic Soils Conference.

ANDERSON, M. J., and WHITCOMB, P. J., (2016). RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments. Productivity Press.

ANDREWS, K., ENG, P., and MICHAEL POCKOSKI, P. E., (2009). Improvements in Global Stability, Bearing Capacity, and Settlement Control Using the Rammed Aggregate Pier® System. STA, 3, 240.

BAL, E. K., ONER, L., ve OZAYDIN, K., (2021). Performance Monitoring of Rammed Aggregate Piers®(RAPs). ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories, 6(1), 37-52.

BAL, E. K., ve ÖNER, L., (2015). Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) Elemanlarının Deformasyon Temelli Tasarımı.

BAL, E. K., ve TEYMUR, B., (2016). Farklı İmalat Yöntemleri ile Teşkil Edilmiş Taş Kolonların Performanslarının Yükleme Deneyleri ile Belirlenmesi: Vaka Analizi.

BASUDHAR, P. K., (2008, October). Application of Optimization and Other Evolutionary Techniques in Geotechnical Engineering. In the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (Iacmag) (pp. 1-6).

BEŞLER, O. F., (2013). A Soıl Improvement Case Study Usıng Rammed Stone Column Systems. Mıddle East Technıcal Unıversıty, Doctoral dissertation, Ankara.

BS-EN-1994-1 (2004). Eurocode 7-Geotechnical Design, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

CETİN, K. O., KURT Bal, E., and ONER, L., (2015). Performance-Based Assessment of Rammed Aggregate Piers.

CHEN, J. F., HAN, J., OZTOPRAK, S., and YANG, X. M., (2009). Behavior of Single Rammed Aggregate Piers Considering Installation Effects. Computers and Geotechnics, 36(7), 1191-1199.

ÇETİN, K. Ö., KURT BAL, E., ve ÖNER, L., (2017). Darbeli Kırmataş Kolonlar®(DKK) ile İyileştirilen Liman Sahasında Alan Yükleme Deneyi ile Oturma Davranışının Gözlemlenmesine İlişkin Vaka Analizi.

ÇETİN, K. Ö., ÖNER, L., ve ARDA, S., (2019). Beton Kolon ve Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) İmalatları Sonrası Zemindeki Sıkılaşmanın CPT Verileri ile Değerlendirilmesi.

DEMİR, H., (2007). Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 175s.

DEMİR, S., (2011). Darbeli Kırmataş Kolonların İmalatında Zemin Davranışının İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 9-59s.

DEMİR, S., (2013). Killi Kum Zeminler İçinde Oluşturulmuş Darbeli Taş Kolonların Davranışının Model Deneylerle İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 129s.

EKMEN, A. B., ALGIN, H. M., and ÖZEN, M., (2020). Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand. Transportation Geotechnics, 24, 100364.

FANG, W. H., (2012). Back-Analysis Improved Particle Swarm Optimization Algorithm on Mechanical Parameters of Divisional Geotechnical Engineering Material. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 182, Pp. 1647-1653). Trans Tech Publications Ltd.

FOX, N. S., and COWELL, M.J., (1998). Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual. Geopier Foundation Company, Blacksburg, Va.

GEMBICKI, F. W., (1974). Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices. Ph. D. Thesis, Case Western Reserve Univ.

HAJIHASSANI, M., JAHED ARMAGHANI, D., and KALATEHJARI, R., (2018). Applications of Particle Swarm Optimization ın Geotechnical Engineering: A Comprehensive Review. Geotechnical and Geological Engineering, 36(2), 705-722.

HALABIAN, A. M., NAEEMIFAR, I., and HASHEMOLHOSSEINI, S. H., (2012). Numerical Analysis of Vertically Loaded Rammed Aggregate Piers and Pier Groups Under Dynamic Loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 38, 58-71.

HANDY, R.L., and WHITE, D.J., (2006). "Stress Zones Near Displacement Piers: I-Plastic and Liquefied Behavior", ASCE, 54th Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

HANDY, R.L. and WHITE, D.J., (2006). Stres Zones Near Displacement Piers: II-Radial Cracking and Wedding, ASCE, 54th Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

KANMAZ, H., (2014). Rijid Kolonların Farklı Zemin Ortamlarındaki Performansı, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 95s.

KASHANI, A. R., CHIONG, R., MIRJALILI, S., and GANDOMI, A. H., (2021). Particle Swarm Optimization Variants for Solving Geotechnical Problems: Review and Comparative Analysis. Archives of Computational Methods in Engineering, 28(3), 1871-1927.

KHAJEHZADEH, M., IRAJI, A., MAJDI, A., KEAWSAWASVONG, S., and NEHDI, M. L., (2022). Adaptive Salp Swarm Algorithm for Optimization of Geotechnical Structures. Applied Sciences, 12(13), 6749.

KURT, E., (2011). Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 152s.

KURUOGLU, O., HOROZ, A. and EROL, O., (2013). Settlements under Footings on Rammed Aggregate Piers. In Proc., 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, French Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 3455-3458.

KWONG, H. K., LIEN, B., and FOX, N. S., (2002). Stabilizing Landslides Using Rammed Aggregate Piers. In Proc., 5th Malaysian Road Conf., Kuala Lumpur, Malaysia.

LAFIFI, B., ROUAIGUIA, A., and BOUMAZZA, N., (2019). Optimization of Geotechnical parameters using Taguchi's design of experiment (DOE), RSM and desirability function. Innovative Infrastructure Solutions, 4(1), 1-12.

LAWTON, E. C. and FOX, N. S., (1994). "Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soil Stiffened with Short Aggregate Piers", Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Special Publication, Publication Number: 40, 2: 962–974.

LAWTON, E. C., FOX, N. S., and HANDY, R. L., (1994, October). Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers. In In-situ deep soil improvement (pp. 121-132). ASCE.

LOHAR, G., SHARMA, S., SAHA, A. K., and GHOSH, S., (2021). Optimization of Geotechnical Parameters Used ın Slope Stability Analysis By Metaheuristic Algorithms. In Applications of Internet of Things (pp. 223-231). Springer, Singapore.

MATLAB, (2017). Matlab, Version R2017a, MathWorks.

MOHAMED, S. A., (2019). Darbeli Kırmataş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerin Sismik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi. On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 90s.

MUNGAN, H., (2016). Zeminin Kırmataş Kolonları ile İyileştirilmesi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,89s.

NAMA, S., SAHA, A. K., and GHOSH, S., (2015). Parameters Optimization of Geotechnical Problem Using Different Optimization Algorithm. Geotechnical and Geological Engineering, 33(5), 1235-1253.

OSMAN, M. A., and HASHIM, S. H., (2016). Experimental Evaluation of Geopier Foundation. Journal of Building and Road Research, 14(1).

ÖNER, L., BAL, E. K., ve ÇETİN, K. Ö., (2016). Darbeli Kırmataş Kolonlardaki Grup Etkisinin 3-B Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Değerlendirilmesi.

PHAM, H. T., and WHITE, D. J., (2007). Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. II: Numerical analyses. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(12), 1512-1521.

PHAM HTV. Support Mechanism of Rammed Aggregate Piers. Phd Dissertation, Iowa State Univ., Ames, Iowa; 2005.

PUCKER, T., and GRABE, J., (2011). Structural Optimization in Geotechnical Engineering: Basics And Application. Acta Geotechnica, 6(1), 41-49.

RUSSO, G., and VIGGIANI, C., (1998). Factors Controlling Soil-Structure Interaction For Piled Rafts. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology, 4, 297-322.

SEITZ, K. F., and GRABE, J., (2016). Three-Dimensional Topology Optimization for Geotechnical Foundations in Granular Soil. Computers and Geotechnics, 80, 41-48.

SMITH, C. C., GILBERT, M., GONZÁLEZ-CASTEJÓN, J., and OUAKKA, S., (2020, February). Application of Computational Design Optimization in Geotechnical Engineering. In Geo-Congress 2020: Modeling, Geomaterials, and Site Characterization (pp. 510-517). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

STAT-EASE, Design-Expert (2016). Version 10, USA.

SULEIMAN, M. T., and WHITE, D. J., (2006). Load Transfer in Rammed Aggregate Piers. International Journal of Geomechanics, 6(6), 389-398.

THOMPSON, M. J., and SULEIMAN, M. T., (2010). Numerical Modeling of Rammed Aggregate Pier Construction. In GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (pp. 1460-1469).

THUM, T. S., YERRO, A., SAADE, A., YE, E., WISSMANN, K. J., and GREEN, R. A., (2021). Numerical Modelling of Rammed Aggregate Piers (RAP) in Liquefiable Soil. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 107088.

WHITE, D. J., and SULEIMAN, M. T., 2004. Design of Short Aggregate Piers to Support Highway Embankments. Transportation Research Record, 1868:1, 103-112.

WHITE, D. J., GAUL, A., HOEVELKAMP, K., Highway Applications for Rammed Aggregate Piers in İowa Soils. Final Rep. Iowa. No. DOT-TR-443, Ames, Iowa; 2003.

WHITE, D. J., PHAM, H. T., and HOEVELKAMP, K. K., (2007). Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(12), 1503-1511.

WHITE, D. J., PHAM, H. T., and WISSMANN, K. J., (2006, February). Numerical Simulation of Construction-Induced Stresses Around Rammed Aggregate Piers. In Proc., Int. Conf. On Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, NSC06, Bochum, Germany (pp. 257-264).

WISSMANN, K. J., and FOX, N. S., (2000). Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soil for Foundation Support, Darmstadt Technical University Colloquium, Darmstadt, Germany.

WISSMANN, K.J., FITZPATRICK, B.T., WHITE, D.J. and LIEN, B.H., (2000). Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements.

WISSMANN, K. J., FITZPATRICK, B. T., WHITE, D. J., and LIEN, B. H., (2002, March). Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements. In Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques (Vol. 8, Pp. 26-28).

WOLF, B., DONZALLAZ, J., JOST, C., HAYOZ, A., COMMEND, S., HENNEBERT, J., and KUONEN, P., (2020, September). Using CNNs to Optimize Numerical Simulations in Geotechnical Engineering. In IAPR

Workshop on Artificial Neural Networks in Pattern Recognition (pp. 247-256). Springer, Cham.

XU, C., and WANG, W., (2020, July). Research on Design and Optimization of Geotechnical Engineering Based on BIM (Building Information Model) Technology. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1578, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.

XUE, Y., GONG, H., KONG, F., YANG, W., QIU, D., and ZHOU, B., (2021). Stability Analysis and Optimization of Excavation Method of Double-Arch Tunnel with an Extra-Large Span Based on Numerical İnvestigation. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 15(1), 136-146.

YIN, Z. Y., and JIN, Y. F., (2019). Need of Optimization Theory in Geotechnical Engineering. In Practice of Optimisation Theory in Geotechnical Engineering (pp. 1-7). Springer, Singapore.

YIN, Z. Y., JIN, Y. F., SHEN, J. S., and HICHER, P. Y., (2018). Optimization Techniques for Identifying Soil Parameters in Geotechnical Engineering: Comparative Study and Enhancement. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 42(1), 70-94.

ZEVGOLIS, I. E., DELIVERIS, A. V., and KOUKOUZAS, N. C., (2018). Probabilistic Design Optimization and Simplified Geotechnical Risk Analysis for Large Open Pit Excavations. Computers and Geotechnics, 103, 153-164.

ZHANG, J., ZHANG, L. M., and TANG, W. H., (2011). Reliability-Based Optimization of Geotechnical Systems. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(12), 1211-1221.

ZHANG, Y., GALLIPOLI, D., and AUGARDE, C., (2009, October). Parallel Hybrid Particle Swarm Optimization and Applications in Geotechnical Engineering. In International Symposium on Intelligence Computation and Applications (pp. 466-475). Springer, Berlin, Heidelberg.

ZHAO, H., ZHAO, M., and ZHU, C., (2016). Reliability-Based Optimization of Geotechnical Engineering Using the Artificial Bee Colony Algorithm. KSCE Journal Of Civil Engineering, 20(5), 1728-1736.