

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KUM ZEMİNDE YATAY YÜKE MARUZ KALAN SERBEST BAŞLI  
KAZIKLARDA KAZIKLAR ARASI ETKİLEŞİM

DOKTORA TEZİ

Duygu FİDAN

EKİM 2025  
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KUM ZEMİNDE YATAY YÜKE MARUZ KALAN SERBEST BAŞLI**  
**KAZIKLARDA KAZIKLAR ARASI ETKİLEŞİM**

**İnş. Yük. Müh. Duygu FİDAN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 / 09 / 2025**

**Tezin Savunma Tarihi : 23 / 10 / 2025**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU**

**Trabzon 2025**

## ÖNSÖZ

“Kum Zeminde Yatay Yüke Maruz Kalan Serbest Başlı Kazıklarda Kazıklar Arası Etkileşim” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Doktora tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, yardım, bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan ve yolumu aydınlatan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’na sonsuz teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER ve Sayın Prof. Dr. Aykut AKGÜN ile jüri üyeliği görevini üstlenen değerli hocalarıma teşekkür ederim. Sayın Prof. Dr. Hakan ERSOY hocama da teşekkür ederim.

Tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta annem ve rahmetli babam olmak üzere sevgili aileme teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Duygu FİDAN

Trabzon 2025

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kum Zeminde Yatay Yüke Maruz Kalan Serbest Başlı Kazıklarda Kazıklar Arası Etkileşim” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/10/2025

Duygu FİDAN

## İÇİNDEKİLER

|                                                                  | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|------------------------------------------------------------------|------------------------|
| ÖNSÖZ .....                                                      | III                    |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                        | IV                     |
| İÇİNDEKİLER.....                                                 | V                      |
| ÖZET .....                                                       | VII                    |
| SUMMARY .....                                                    | VIII                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                            | IX                     |
| TABLolar DİZİNİ.....                                             | XVI                    |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                            | XVII                   |
| 1. GENEL BİLGİLER .....                                          | 1                      |
| 1.1. Mevcut Çalışmalar .....                                     | 2                      |
| 1.1.1. Analitik Yaklaşımlar .....                                | 2                      |
| 1.1.2. Deneysel Çalışmalar .....                                 | 19                     |
| 1.1.3. Sayısal Çalışmalar .....                                  | 26                     |
| 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....                           | 32                     |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                                       | 33                     |
| 2.1. Deney Düzeneği .....                                        | 33                     |
| 2.1.1. Deney Tankı.....                                          | 33                     |
| 2.1.2. Model Kazıklar .....                                      | 33                     |
| 2.1.3. Model Kazık Yatay Yükleme Düzeneği .....                  | 35                     |
| 2.1.4. LVDT (Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler)..... | 37                     |
| 2.1.5. Veri Toplayıcı-DATALOGGER Ünitesi .....                   | 37                     |
| 2.1.6. Kazık Sabitleme Plakası.....                              | 38                     |
| 2.1.7. Kompaksiyon Cihazı.....                                   | 39                     |
| 2.2. Kum Zemin.....                                              | 39                     |
| 2.2.1. Elek Analizi.....                                         | 41                     |
| 2.2.2. Piknometre Deneyi.....                                    | 42                     |
| 2.2.3. Rölatif Sıkılık Deneyleri .....                           | 42                     |
| 2.2.4. Kesme Kutusu Deneyi .....                                 | 44                     |
| 2.3. Deneyin Yapılışı.....                                       | 45                     |
| 2.4. Deney Programı.....                                         | 46                     |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....                                  | 47  |
| 2.5.1. Deneysel Çalışmaların Plaxis 3D Programı ile Analizleri..... | 47  |
| 2.6. Parçacık Görüntü Hız Ölçümü (PIV) .....                        | 51  |
| 3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                       | 52  |
| 3.1. Deneysel Bulgular .....                                        | 52  |
| 3.1.1. Tek Kazıklara Yapılan Deneyler.....                          | 52  |
| 3.1.2. Kazık Gruplarına Yapılan Deneyler .....                      | 56  |
| 3.2. Deney Çalışmalarının PIVlab Yazılımı ile Analiz .....          | 64  |
| 3.3. Deney Düzeneklerinin Sonlu Elemanlar Analizi.....              | 67  |
| 3.4. Parametrik Çalışma .....                                       | 72  |
| 4. SONUÇLAR.....                                                    | 135 |
| 5. ÖNERİLER.....                                                    | 138 |
| 6. KAYNAKLAR .....                                                  | 139 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                            |     |

## ÖZET

Doktora Tezi

### KUM ZEMİNDE YATAY YÜKE MARUZ KALAN SERBEST BAŞLI KAZIKLARDA KAZIKLAR ARASI ETKİLEŞİM

Duygu FİDAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU  
2025, 145 Sayfa

Kazıklar ve kazıklı temeller yapı yüklerini zemin veya kaya ortamının derin tabakalarına aktarmak için kullanılmaktadır. Kazıklar düşey ve eğik yüklendikleri gibi yatay yüklere de maruz kalmaktadır. Yatay yükler; deprem kuvvetleri, toprak basınçları, rüzgar yükleri, dalga kuvvetleri gibi nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Bu çalışmada, kum zeminde gömülü yatay yüke maruz serbest başlı kazıklar arası etkileşim deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, düşey olarak kum zemine gömülü tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazıklara yatay yükler uygulanmıştır. Deneylerde, tamamı kum zemine gömülü olan kazıklara yatay yükler zemin yüzeyinde etkilmiştir. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleşen deneylerde  $D=0.05$  m çapa sahip  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  oranlarında kazıklar kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, Plaxis 3D programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak malzeme modeli parametreleri optimize edilmiştir. Deney düzeneğinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin ve kazık malzeme modeli özellikleri ile büyük çaplı kazıkların etkileşimini araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak rölatif sıklığının serbest başlı düşey kazıklar arası etkileşim üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görüldü. Ayrıca, kazıklar arası etkileşimin kazık uzunluğunun artışıyla azaldığı belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Kazıklar arası etkileşim, Yatay yüklü kazıklar, Plaxis 3D

## SUMMARY

PhD. Thesis

### PILE-TO-PILE INTERACTION IN FREE-HEAD PILES SUBJECTED TO LATERAL LOADING IN SANDY SOIL

Duygu FİDAN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU  
2025, 145 Pages

Piles and pile foundations are used to transfer structural loads to deeper layers of soil or rock medium. Piles are subjected to laterally loads as well as vertical and oblique loads. Laterally loads can be caused by earthquake forces, earth pressures, wind loads, wave forces, etc. In this study, the interaction between free-head piles subjected to lateral load buried in sandy soil was investigated experimentally and numerically with finite element method. In experimental study, lateral loads were applied to a single pile and pile groups of 5D, 3D and D spacings and the piles were vertically embedded in the sandy soil. The laterally loads were applied to the piles buried in the sandy soil at the surface level. The piles with a diameter of  $D=0.05$  m and length-to-diameter ratios of  $L/D=10$  and  $L/D=20$  were used in experiments conducted on both loose and dense sands. The results obtained from the experiments were compared with the results obtained from the Plaxis 3D to optimize the material model parameters. Parametric studies were performed to investigate the interaction of large diameter piles with the soil and pile properties used in the finite element model of the experimental setup. As a result, it is seen that the soil relative density has a significant effect on the interaction between free-head vertical piles. Also, it was determined that the interaction between piles decreased with increasing pile length.

**Key Words:** Interaction between piles, Laterally loaded pile, Plaxis 3D

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|           |                                                                                                                                                                                                                    |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.  | Yatay yüklü düşey kazıklar, a) dayanma yapıları b) köprü ayakları c) iskeleler d) palplanjlı dayanma yapıları.....                                                                                                 | 2  |
| Şekil 2.  | Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık problemi a) elastik zemin üzerindeki kiriş, b) Winkler yaklaşımı, c) zemindeki yüklenen yatay yüklü kazık, d) yaylar üzerindeki yüklenen yatay yüklü kazık..... | 3  |
| Şekil 3.  | Kazıkta meydana gelen yatay yük ve moment etkisinde kazık davranışı. ....                                                                                                                                          | 5  |
| Şekil 4.  | Brinch-Hansen yöntemi .....                                                                                                                                                                                        | 6  |
| Şekil 5.  | $K_q$ ve $K_c$ katsayıları .....                                                                                                                                                                                   | 7  |
| Şekil 6.  | $n_h$ ile rölatif sıkılık arasındaki ilişki .....                                                                                                                                                                  | 8  |
| Şekil 7.  | Kısa kazıkların yatay yük etkisindeki deformasyon durumu a) serbest başlı b) ankastre başlı.....                                                                                                                   | 9  |
| Şekil 8.  | Uzun kazıkların yatay yük etkisindeki deformasyon durumu a) serbest başlı b) ankastre başlı.....                                                                                                                   | 9  |
| Şekil 9.  | Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı kısa kazıklarda zemin reaksiyonu ve eğilme momenti.....                                                                                                                      | 10 |
| Şekil 10. | Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı kısa kazıklarda son yatay taşıma gücü.....                                                                                                                                   | 11 |
| Şekil 11. | Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı uzun kazıklarda zemin reaksiyonu ve eğilme momenti.....                                                                                                                      | 12 |
| Şekil 12. | Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı uzun kazıklarda son yatay yük taşıma gücü .....                                                                                                                              | 13 |
| Şekil 13. | Bileşke p-y eğrileri a) zemin altındaki farklı x derinliklerindeki eğriler, b) eğrilerin p-y eksen takımında gösterilmesi, c) deplasmana uğramış kazık.....                                                        | 14 |
| Şekil 14. | Yüzen kazık durumundaki etkiyen gerilmeler sırasıyla kazık (a) ve zemin (b).....                                                                                                                                   | 15 |
| Şekil 15. | Elastik katsayıların $K_R$ 'ye bağlı değişimleri (serbest başlı bir kazık için) .....                                                                                                                              | 16 |
| Şekil 16. | Tabakalı zeminlerde, göçme anında zemin basınç dağılımı .....                                                                                                                                                      | 17 |
| Şekil 17. | Kum zemindeki yanal yüklü kazık için şekil faktörleri.....                                                                                                                                                         | 19 |
| Şekil 18. | Deneylerde kullanılan model kazıklar .....                                                                                                                                                                         | 34 |
| Şekil 19. | Yük taşıma plakası, metal başlıklar ve çelik halatla bağlantı .....                                                                                                                                                | 35 |
| Şekil 20. | Model kazık yatay yükleme düzeneği .....                                                                                                                                                                           | 36 |
| Şekil 21. | LVDT' lerin yatay olarak yerleştirildiği plaka .....                                                                                                                                                               | 37 |

|           |                                                                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 22. | Veri toplayıcı-DATALOGGER ünitesi.....                                                                                                       | 38 |
| Şekil 23. | Kazık sabitleme plakası .....                                                                                                                | 38 |
| Şekil 24. | Sıkıştırma işlemi için kullanılan kompaksiyon cihazı .....                                                                                   | 39 |
| Şekil 25. | Deneylerde kullanılan kumun yıkanması ve kurutulması .....                                                                                   | 40 |
| Şekil 26. | Deneylerde kullanılan kum.....                                                                                                               | 40 |
| Şekil 27. | Deneylerde kullanılan kumun granülometri eğrisi .....                                                                                        | 41 |
| Şekil 28. | Gevşek haldeki kum Zemin için kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi.....                                                                 | 42 |
| Şekil 29. | Sıkı haldeki kum zemin için kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi .....                                                                  | 43 |
| Şekil 30. | Gevşek ve sıkı kum zemindeki kesme kutusu deney sonuçları.....                                                                               | 44 |
| Şekil 31. | Kum zemin için a) geometrik model, b) sonlu elemanlar ağı.....                                                                               | 48 |
| Şekil 32. | Yatay yüke maruz $L=0.5$ m olan kazığın davranışı (a) şematik görünüş .....                                                                  | 53 |
| Şekil 33. | Tek model kazık ( $L=0.5$ m) yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek ve sıkı kum) .....                                                    | 54 |
| Şekil 34. | Yatay yüke maruz $L=1$ m olan kazığın davranışı (a) şematik görünüş .....                                                                    | 54 |
| Şekil 35. | Tek model kazık ( $L=1$ m) yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek ve sıkı kum) .....                                                      | 55 |
| Şekil 36. | Tek kazık ile kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=0.5$ m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) ..... | 57 |
| Şekil 37. | Tek kazık ile kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=0.5$ m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum) .....   | 58 |
| Şekil 38. | Tek kazık ile kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=1$ m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) .....   | 59 |
| Şekil 39. | Tek kazık ile kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=1$ m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum) .....     | 60 |
| Şekil 40. | Kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=0.5$ m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) .....                      | 61 |
| Şekil 41. | Kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=0.5$ m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....                         | 61 |
| Şekil 42. | Kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=1$ m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) .....                        | 62 |
| Şekil 43. | Kazıklar arası mesafe $5D$ , $3D$ ve $D$ olan ( $L=1$ m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....                           | 62 |
| Şekil 44. | Grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi a) gevşek kum, b) sıkı kum .....                                                                 | 63 |
| Şekil 45. | $L=0.5$ m olan kazıkların deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri (gevşek ve sıkı kum zemin) .....                                          | 65 |
| Şekil 46. | $L=1$ m olan kazıkların deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri (gevşek ve sıkı kum zemin).....                                             | 66 |

|           |                                                                                                                              |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 47. | L=0.5 m olan tek kazık için deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.....                                             | 67 |
| Şekil 48. | L=0.5 m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe 5D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....               | 68 |
| Şekil 49. | L=0.5 m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe 3D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....               | 69 |
| Şekil 50. | L=0.5 m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 69 |
| Şekil 51. | L=1 m olan tek kazık için deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.....                                               | 70 |
| Şekil 52. | L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe 5D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.....         | 71 |
| Şekil 53. | L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe 3D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.....         | 71 |
| Şekil 54. | L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması .....         | 72 |
| Şekil 55. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) .....                           | 74 |
| Şekil 56. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....                           | 75 |
| Şekil 57. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....                             | 76 |
| Şekil 58. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....                            | 76 |
| Şekil 59. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 77 |
| Şekil 60. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 78 |
| Şekil 61. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 79 |
| Şekil 62. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 79 |
| Şekil 63. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 80 |
| Şekil 64. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 81 |
| Şekil 65. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 82 |
| Şekil 66. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 82 |
| Şekil 67. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....   | 83 |

|           |                                                                                                                               |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 68. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....   | 84 |
| Şekil 69. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....     | 85 |
| Şekil 70. | D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....    | 85 |
| Şekil 71. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) .....                           | 86 |
| Şekil 72. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....                           | 87 |
| Şekil 73. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....                             | 88 |
| Şekil 74. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....                            | 88 |
| Şekil 75. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 89 |
| Şekil 76. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 90 |
| Şekil 77. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 91 |
| Şekil 78. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 91 |
| Şekil 79. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 92 |
| Şekil 80. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 93 |
| Şekil 81. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 94 |
| Şekil 82. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 94 |
| Şekil 83. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....   | 95 |
| Şekil 84. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....  | 96 |
| Şekil 85. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....    | 97 |
| Şekil 86. | D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....    | 97 |
| Şekil 87. | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) .....                            | 98 |

|            |                                                                                                                              |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 88.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....                           | 99  |
| Şekil 89.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....                             | 100 |
| Şekil 90.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....                            | 100 |
| Şekil 91.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 101 |
| Şekil 92.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 102 |
| Şekil 93.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 103 |
| Şekil 94.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 103 |
| Şekil 95.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 104 |
| Şekil 96.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 105 |
| Şekil 97.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 106 |
| Şekil 98.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 106 |
| Şekil 99.  | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....   | 107 |
| Şekil 100. | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....  | 108 |
| Şekil 101. | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....    | 109 |
| Şekil 102. | D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....   | 109 |
| Şekil 103. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) .....                           | 110 |
| Şekil 104. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....                           | 111 |
| Şekil 105. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....                             | 112 |
| Şekil 106. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) .....                            | 112 |
| Şekil 107. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 113 |

|            |                                                                                                                              |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 108. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 114 |
| Şekil 109. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 115 |
| Şekil 110. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 115 |
| Şekil 111. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....  | 116 |
| Şekil 112. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)..... | 117 |
| Şekil 113. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....   | 118 |
| Şekil 114. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....   | 118 |
| Şekil 115. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin).....   | 119 |
| Şekil 116. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin).....  | 120 |
| Şekil 117. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) .....    | 121 |
| Şekil 118. | D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin).....    | 121 |
| Şekil 119. | D=0.3 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum).....        | 122 |
| Şekil 120. | D=0.3 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....          | 122 |
| Şekil 121. | D=0.3 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum).....        | 123 |
| Şekil 122. | D=0.3 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....          | 123 |
| Şekil 123. | D=0.65 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) .....      | 124 |
| Şekil 124. | D=0.65 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....         | 124 |
| Şekil 125. | D=0.65 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum) .....      | 125 |
| Şekil 126. | D=0.65 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....         | 125 |
| Şekil 127. | D=0.8 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum).....        | 126 |

|            |                                                                                                                       |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 128. | D=0.8 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....   | 126 |
| Şekil 129. | D=0.8 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)..... | 127 |
| Şekil 130. | D=0.8 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....   | 127 |
| Şekil 131. | D=1.2 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)..... | 128 |
| Şekil 132. | D=1.2 m, (L/D=10), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....   | 128 |
| Şekil 133. | D=1.2 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)..... | 129 |
| Şekil 134. | D=1.2 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum).....   | 129 |
| Şekil 135. | D=0.3 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin).....                                          | 130 |
| Şekil 136. | D=0.3 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin) .....                                           | 131 |
| Şekil 137. | D=0.65 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin).....                                         | 131 |
| Şekil 138. | D=0.65 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin) .....                                          | 132 |
| Şekil 139. | D=0.8 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin).....                                          | 132 |
| Şekil 140. | D=0.8 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin) .....                                           | 133 |
| Şekil 141. | D=1.2 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin) .....                                         | 133 |
| Şekil 142. | D=1.2 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin) .....                                           | 134 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                    | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 1. Kohezyonsuz zeminlerde $n_h$ değerler .....               | 4                      |
| Tablo 2. A ve B katsayıları .....                                  | 6                      |
| Tablo 3. Yerinde dökme betonarme kazıkların minimum donatısı ..... | 34                     |
| Tablo 4. Model kazık özellikleri .....                             | 34                     |
| Tablo 5. Elek analizi sonuçları.....                               | 41                     |
| Tablo 6. Rölatif sıkılık deney sonuçları .....                     | 44                     |
| Tablo 7. Deneyisel çalışmalara ait deney programı .....            | 46                     |
| Tablo 8. Kum zemine ait Hardening Soil malzeme parametreleri.....  | 49                     |
| Tablo 9. Kazık elemana ait Concrete malzeme parametreleri .....    | 49                     |
| Tablo 10. Tek kazıklara ait sınır yükler .....                     | 56                     |
| Tablo 11. Parametrik çalışmasının programı .....                   | 73                     |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                               |                                                                         |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $\psi$                        | : Dilatasyon açısı                                                      |
| $\phi$                        | : İçsel sürtünme açısı                                                  |
| $\tau$                        | : Kayma mukavemeti                                                      |
| $\beta$                       | : Kazık grup verimi                                                     |
| $\gamma'$                     | : Zemin efektif birim ağırlığı                                          |
| $\gamma_{kmax}$               | : Maksimum kuru birim hacim ağırlığı                                    |
| $\gamma_{kmin}$               | : Minimum kuru birim hacim ağırlığı                                     |
| $\gamma_s$                    | : Tane birim hacim ağırlığı                                             |
| $\sigma_n$                    | : Normal gerilme                                                        |
| $\sigma'_{vu}$                | : Düşey efektif gerilme                                                 |
| $D_{10}$                      | : Efektif tane çapı                                                     |
| $D_{30}$                      | : Granülometri eğrisinde %30'a karşılık gelen tane çapı                 |
| $D_{60}$                      | : Granülometri eğrisinde %60'a karşılık gelen tane çapı                 |
| $D_r$                         | : Rölatif sıkılık                                                       |
| $e_{max}$                     | : Zeminin en gevşek boşluk oranı                                        |
| $e_{min}$                     | : Zeminin en sıkı boşluk oranı                                          |
| $E_p$                         | : Kazığın elastisite modülü                                             |
| $I_{ph} , I_{pM}$             | : Yatay yük ve moment için kazık deplasmanına ait elastik katsayılar    |
| $I_{\theta h} , I_{\theta M}$ | : Yatay yük ve moment için kazık dönmesine ait elastik katsayılar       |
| $I_p$                         | : Atalet momenti                                                        |
| $K_p$                         | : Pasif toprak basınç katsayısı                                         |
| $M_{max}$                     | : Maksimum eğilme momenti                                               |
| $M_u$                         | : Kazık son moment taşıma gücü                                          |
| $P_{ult}$                     | : Nihai yanal zemin direnci                                             |
| $Q_u$                         | : Kazık son yatay taşıma gücü                                           |
| $x_o$                         | : Maksimum eğilme momentinin meydana geldiği zeminin altındaki derinlik |
| $F_b , F_c$                   | : İki tabakalı zemin durumunda yanal direnç faktörleri                  |
| $K_b , K_c$                   | : Yanal zemin basınç katsayıları                                        |
| $K_q , K_c$                   | : Yatay direnç katsayıları                                              |

|            |                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------|
| $k_h$      | : Yatay yatak katsayısı                                     |
| $n_h$      | : Yatay yatak katsayısı sabiti                              |
| $p_{xu}$   | : $x$ derinliğindeki nihai yanal direnci                    |
| $r_b, r_c$ | : Moment azaltma faktörleri                                 |
| $s_b, s_c$ | : Şekil faktörleri                                          |
| B, D       | : Kazık çapı                                                |
| c          | : Kohezyon                                                  |
| D          | : Gömülü kazık (duvar) uzunluğu                             |
| e          | : Yatay yük uygulama noktasının zemin yüzeyinden yüksekliği |
| e          | : Boşluk oranı                                              |
| E          | : Kazık malzemesinin elastisite modülü                      |
| H          | : Yatay kuvvet                                              |
| I          | : Kazık kesitinin atalet momenti                            |
| L          | : Kazık gömülü uzunluğu                                     |
| M          | : Moment                                                    |
| p          | : Birim kazık boyundaki zemin gerilmesi                     |
| P          | : Kazık üzerindeki eksenel yük                              |
| Q          | : Yatay yük                                                 |
| R          | : Kohezyonlu zeminler için fiktif rijitlik boyu             |
| S          | : Kazıklar arası mesafe                                     |
| s          | : Dönme                                                     |
| T          | : Granüler zeminler için fiktif rijitlik boyu               |
| V          | : Kesme kuvveti                                             |
| v          | : Poisson oranı                                             |
| x          | : Kazık boyunca herhangi bir derinlik                       |
| x          | : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik                        |
| y          | : Kazık deplasmanı                                          |
| LVDT       | : Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörü               |
| USCS       | : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi                |
| PIV        | : Parçacık görüntü hızı                                     |

## 1. GENEL BİLGİLER

Dünyada ve ülkemizde nüfusun artmasıyla yeni yapı alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. İnşaat mühendisliğinde çoğu yapıların derin temellerin bir çeşidi olan kazıklar üzerinde oturduğu görülmektedir.

Kazıklar ve kazıklı temeller; zeminin derin tabakalarına yapı yüklerini aktarmak için kullanılmaktadır. Kazıklar, düşey ve eğik yüklenmiş oldukları gibi yatay yüklere de maruz kalmaktadır. Yatay yük etkisindeki düşey kazıkların davranışı kazığın uzun (flexible) ya da kısa (rijit) olmasına bağlı olarak değişmektedir. Kazık başlığının serbest veya ankastre başlı olması da kazığın davranışında oldukça etkilidir.

Yatay yüklü kazıklar yüklendiğinde, kazık kısa (rijit) ise kazık ötelenmekte ve dönmektedir. Kazık uzun ve esnek ise uygulanan yük sonucunda kazık eğilmektedir (Salgado, 2007).

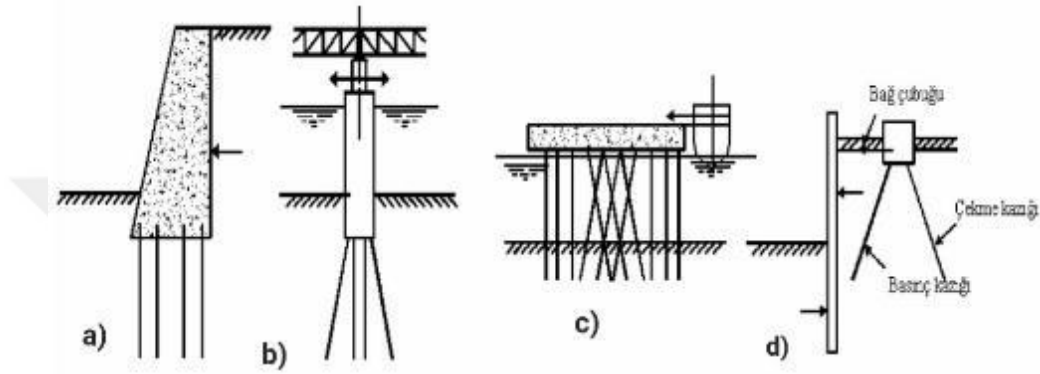
Yatay yükler;

- Deprem kuvvetleri,
- Rüzgâr yükleri,
- Zemin basınçları,
- Gemi çarpma kuvvetleri,
- Dalga kuvvetleri,
- Gemi bağlama kuvvetleri,
- Köprülerde araçların fren ve ilerleme hareketleri,
- Kolonlardaki düşey eksantrik yükler,
- Elektrik direklerindeki kablo kuvvetleri,
- Akarsu akıntılarının köprü ayaklarında oluşturduğu yatay kuvvetler gibi nedenlerden kaynaklanabilmektedir.

Yanal yükler taşıyan kule, vinç köprü ayakları, liman yapıları ve rüzgâr enerjisi değirmenleri gibi yüksek yapıların temellerinde yatay yüklü kazıklar kullanılmaktadır. Köprü, deniz içinde inşa edilen deniz fenerleri, limanlar ve viyadük gibi yapılar yatay yüklere maruz kalmaktadır. Yatay yüklü kazıkların davranışlarını etkileyen parametrelerin incelenmesi önemlidir. Deprem, dalga yükü ve rüzgâr gibi yatay yüke maruz kalan deniz ve kıyı yapılarında ortaya çıkan yatay yükü taşıyan yatay yüklü kazıklar dikkat çekmektedir.

Bu nedenle, temel sistemlerinin ekonomik ve güvenilir yatay yüklü kazık tasarımı yapılması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kazığa etkiyen yanal yük bileşeninin büyülüğüne göre, kazıklar zeminde düşey veya eğimli olarak inşa edilmektedir. Üst yapı bileşeninin küçük olduğu durumlar için yükler düşey kazıklarla güvenli taşınmaktadır. Yatay yüklü düşey kazıkların kullanıldığı yerler Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Yatay yüklü düşey kazıklar, a) dayanma yapıları b) köprü ayakları c) iskeleler d) palplanjlı dayanma yapıları (Tomlinson, 1994)

## 1.1. Mevcut Çalışmalar

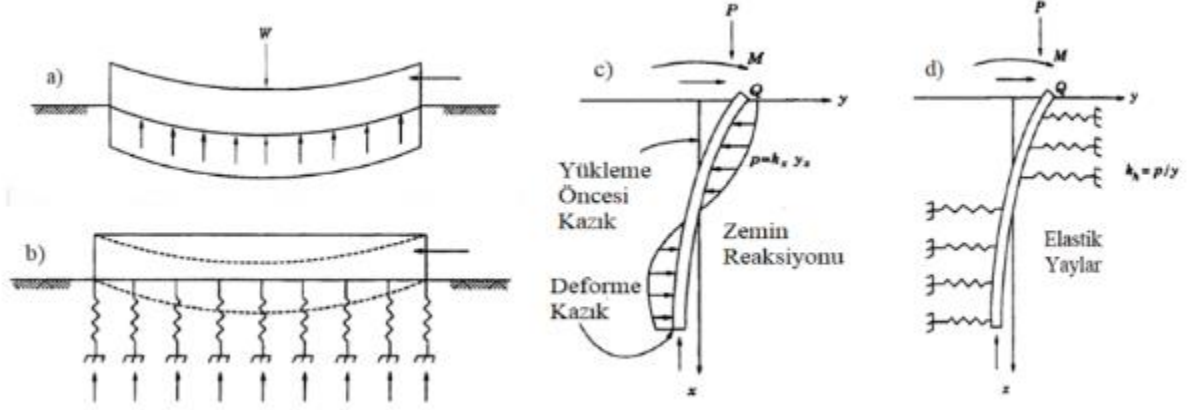
Bu bölümde; kum zemin içerisinde yer alan yatay yüke maruz kalan kazıkların kazıklar arası etkileşimlerin araştırılması için deneysel ve sayısal çalışmalar ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır.

### 1.1.1. Analitik Yaklaşımlar

Yanal yüklü kazıkların analizi için mevcut yöntemler; sınır durum yöntemi, temel zemini reaksiyon yöntemi, p-y yöntemi, elastik analiz yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemidir (Fan ve Long, 2005). Yaygın olarak kullanılan sınır durum yöntemleri, Brinch-Hansen (1961) ve Broms (1964a,b) tarafından önerilmiştir. Temel zemini reaksiyon yöntemi ve p-y yöntemi elastik zemine oturan kiriş kabulüne dayanmaktadır.

- Yatak Katsayısı Yöntemi

Zemin içinde bulunan yatay yüklü kazık, elastik zemine oturan kiriş gibi çözümlenmektedir. Kirişin üzerinde oturan zemin, Winkler (1867) modelindeki yaylarla temsil edilmektedir. Şekil 2’de bu modellenme gösterilmektedir.



Şekil 2. Yatak katsayısı yaklaşımına göre yatay yüklü kazık problemi a) elastik zemin üzerindeki kiriş, b) Winkler yaklaşımı, c) zemindeki yüklenen yatay yüklü kazık, d) yaylar üzerindeki yüklenen yatay yüklü kazık (Prakash ve Sharma, 1990)

Yayların rijitlikleri, yatay yatak katsayısı olarak tanımlanmakta ve  $k_h$  ile gösterilmektedir. Yatak katsayısı, birim kazık boyundaki zemin gerilmesi ( $p$ ) ve kazık deplasmanı ( $y$ ) arasındaki oran;

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (1)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu denklem, elastik zemin üzerine oturan kiriş hesabında kullanılarak,

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (2)$$

bu denklemin dördüncü dereceden diferansiyel denklem çözümü ile yapılabilmektedir. Bu denklemde,  $E_p$  kazığın elastisite modülü ve  $I_p$  atalet momentidir.

Yatay yatak katsayısı değerini; deplasman, derinlik, kazık çapı, yükleme hızı, yükleme tipi, zeminin yüklenme geçmişi gibi etmenler etkilemektedir (Prakash ve Sharma, 1990).

Kohezyonsuz zeminlerde yatay yatak katsayısı  $k_h$ , derinlikle doğrusal olarak değişmekte ve aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır (Mohan, 1988).

$$k_h = n_h x \quad (3)$$

$$p = n_h x y \quad (4)$$

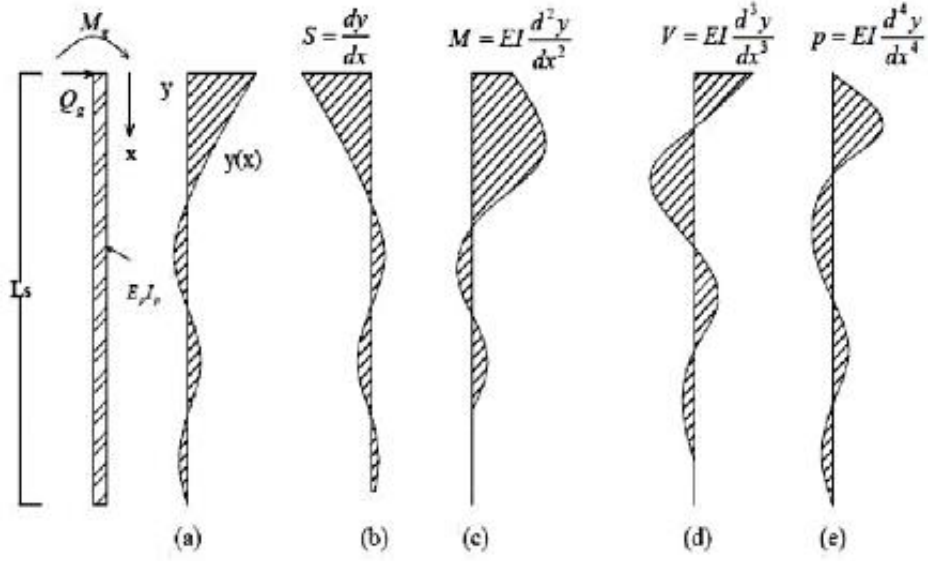
Bu denklemlerde,  $n_h$ , yatay yatak katsayısı sabiti ve  $x$ , zemin yüzeyinden itibaren derinliktir.

Kohezyonsuz zeminlerde  $n_h$  değerleri Tablo 1’de verilmektedir (Das, 1990).

Tablo 1. Kohezyonsuz zeminlerde  $n_h$  değerleri (Das, 1990).

| Kumda sıklık                                        | Gevşek    | Orta Sıkı | Sıkı        |
|-----------------------------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| $n_h$ kuru ve nemli zeminde<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 1800-2200 | 5500-7000 | 15000-18000 |
| $n_h$ su altında<br>(kN/m <sup>3</sup> )            | 1000-1400 | 3500-4500 | 9000-12000  |

Kohezyonsuz zeminlerde,  $Q_g$  yatay yükü ve  $M_g$  momenti etkisindeki serbest başlı bir kazıkta; kazık deplasmanı ( $y$ ), deplasmanların kazık boyunca değişimi ( $S = dy/dx$ ), kesme kuvveti ( $V$ ), moment ( $M$ ), zemin reaksiyonlarının kazık boyunca değişimi ( $p$ ) Şekil 3’te gösterilmektedir (Reese ve Van Impe, 2001).



Şekil 3. Kazıkta meydana gelen yatay yük ve moment etkisinde kazık davranışı (Reese ve Van Impe, 2001).

Granüler zeminlerde ve normal konsolide killerde geçerli olan yatak katsayısının derinlikle değişmesi Matlock ve Reese (1960) tarafından araştırılmıştır. Derinlik arttıkça meydana gelen zemin basınçları kazığın hareketine izin vermez ve belirli bir derinlikten sonra kazığın yanal yöndeki hareketi sıfır olur. Matlock ve Reese (1962) çalışmasında kazık boyu  $L$  yerine  $T$  terimi hesaplarda kullanılmıştır.  $T$ , zeminin rijitliği ile kazığın eğilme rijitliği arasındaki ilişkiyi ifade eden uzunluktur. Bu yöntemde, yatay kuvvetten (A) ve momentten (B) kaynaklanan yatay deformasyonlar incelenerek süperpozisyon kuralı kullanılmaktadır.

Denklem (5) ve (6) incelenerek yatay kuvvet ve moment değerlerinin etkileri süperpozisyon kuralı ile incelenmektedir. Denklemde,  $y$  deformasyon,  $s$  dönme,  $p$  zemin reaksiyonu,  $V$  kesme kuvveti ve  $M$  moment değerini göstermektedir. Denklemlerdeki eşitliklerdeki A ve B katsayıları Tablo 2’de verilmiştir (Reese ve Matlock (1956)).

$$y = y_A + y_B = A_y \left( \frac{P_t T^3}{E_p I_p} \right) + B_y \left( \frac{M_t T^2}{E_p I_p} \right) \quad (5)$$

$$S = S_A + S_B = A_s \left( \frac{P_t T^2}{E_p I_p} \right) + B_s \left( \frac{M_t T}{E_p I_p} \right) \quad (6)$$

$$p = p_A + p_B = A_p \left( \frac{P_t}{T} \right) + B_p \left( \frac{M_t}{T^2} \right) \quad (7)$$

$$V = V_A + V_B = A_v(P_t) + B_v\left(\frac{M_t}{T}\right) \quad (8)$$

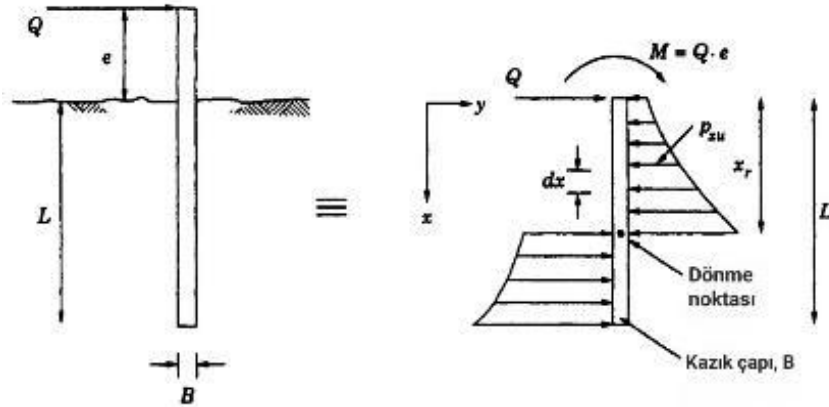
$$M = M_A + M_B = A_m(P_t T) + B_m(M_t) \quad (9)$$

Tablo 2. A ve B katsayıları (Reese ve Matlock, 1956)

| Z(M) | A <sub>v</sub> | B <sub>v</sub> | A <sub>s</sub> | B <sub>s</sub> | A <sub>m</sub> | B <sub>m</sub> | A <sub>v</sub> | B <sub>v</sub> | A <sub>p</sub> | B <sub>p</sub> |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0,0  | 2,435          | 1,623          | -1,623         | -1,75          | 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              |
| 0,2  | 2,112          | 1,293          | -1,603         | -1,55          | 0,198          | 0,999          | 0,956          | -0,028         | -0,422         | -0,259         |
| 0,4  | 1,796          | 1,003          | -1,545         | -1,351         | 0,379          | 0,987          | 0,84           | -0,095         | -0,718         | -0,401         |
| 0,6  | 1,496          | 0,752          | -1,454         | -1,156         | 0,532          | 0,96           | 0,677          | -0,181         | -0,897         | -0,451         |
| 0,8  | 1,216          | 0,540          | -1,335         | -0,968         | 0,649          | 0,914          | 0,489          | -0,27          | -0,973         | -0,432         |
| 1,0  | 0,962          | 0,364          | -1,197         | -0,792         | 0,727          | 0,852          | 0,295          | -0,35          | -0,962         | -0,364         |
| 1,2  | 0,738          | 0,223          | -1,047         | -0,629         | 0,767          | 0,775          | 0,109          | -0,414         | -0,885         | -0,268         |
| 1,4  | 0,544          | 0,112          | -0,893         | -0,482         | 0,772          | 0,688          | -0,056         | -0,456         | -0,761         | -0,157         |
| 1,6  | 0,381          | 0,029          | -0,741         | -0,354         | 0,746          | 0,594          | -0,193         | -0,477         | -0,609         | -0,047         |
| 1,8  | 0,247          | -0,030         | -0,596         | -0,245         | 0,696          | 0,498          | -0,298         | -0,476         | -0,445         | 0,054          |
| 2,0  | 0,142          | -0,070         | -0,464         | -0,155         | 0,628          | 0,404          | -0,371         | -0,456         | -0,283         | 0,14           |
| 3,0  | -0,075         | -0,089         | 0,04           | 0,057          | 0,225          | 0,059          | -0,349         | -0,213         | 0,226          | 0,268          |
| 4,0  | -0,050         | -0,028         | 0,052          | 0,049          | 0              | -0,042         | -0,106         | 0,017          | 0,201          | 0,112          |
| ≥5,0 | -0,009         | 0,000          | 0,025          | 0,011          | -0,033         | -0,026         | 0,013          | 0,029          | 0,046          | -0,002         |

- Brinch-Hansen (1961) Yöntemi

Toprak basıncı teorisine dayanan Brinch-Hansen (1961), hem tabakalı zeminlerde hem de  $c$ ,  $\phi$  zeminlerde uygulanabilmektedir. Sadece kısa rijit kazıklar için uygun olan bu yöntemde, dönme noktasının belirlenmesi için deneme-yanılma çözümleri gerekmektedir. Şekil 4'te kazığa, yatay yükü  $Q$  ve momenti  $M$  etkimektedir.

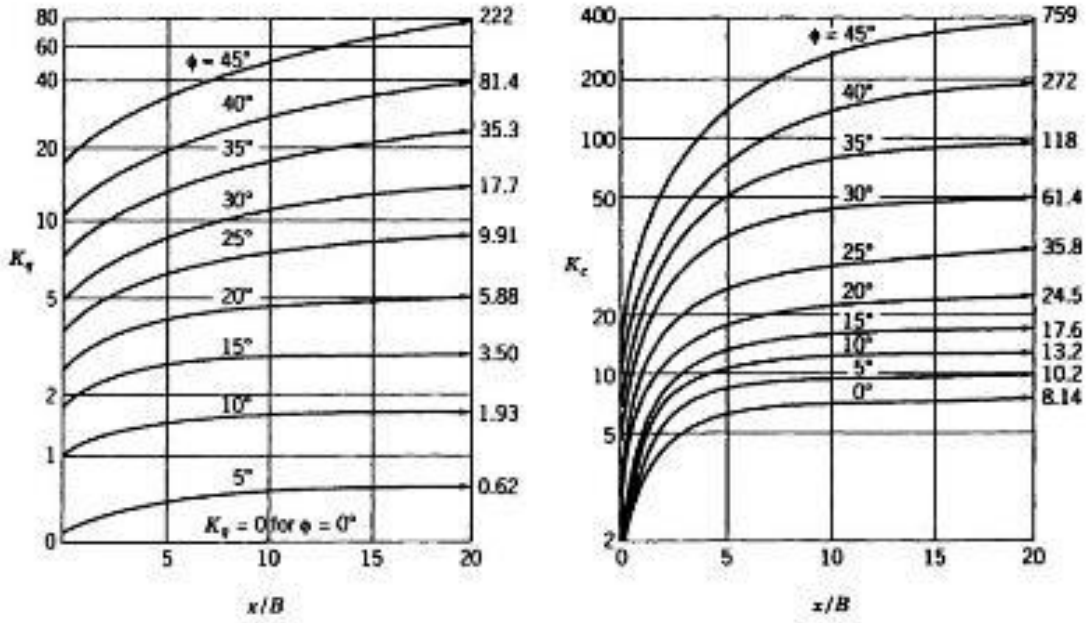


Şekil 4. Brinch-Hansen yöntemi (Prakash ve Sharma, 1990)

$x$  derinliğindeki nihai yanal direnci  $p_{xu}$  denklemi,

$$p_{xu} = \sigma'_{vu} K_q + c K_c \quad (10)$$

biçimindedir. Bu denklemdeki  $\sigma'_{vu}$  düşey efektif gerilme,  $c$  kohezyon,  $B$  kazık çapıdır. Şekil 5'te  $K_q$  ve  $K_c$  yatay direnç katsayıları  $\phi$  ve  $x/B$ 'ye bağlı olarak verilmektedir.



Şekil 5.  $K_q$  ve  $K_c$  katsayıları (Brinch-Hansen, 1961)

- Broms (1964) Yöntemi

Broms (1964a,b) yöntemi, toprak basıncı teorisine dayanmaktadır. Broms (1964) yöntemi, göçme anındaki yanal zemin basınçlarının pasif Rankine zemin basıncının üç katına eşit olduğunu kabul etmiştir. Bu yöntem, hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde kısa ve uzun kazıklar için uygulanmaktadır. Serbest ve ankastre başlı kazıkların analizleri bu yöntemde ayrı ayrı dikkate alınmaktadır.

Bir kazığın kısa veya uzun olduğu göreceli rijitlik boylarına göre;

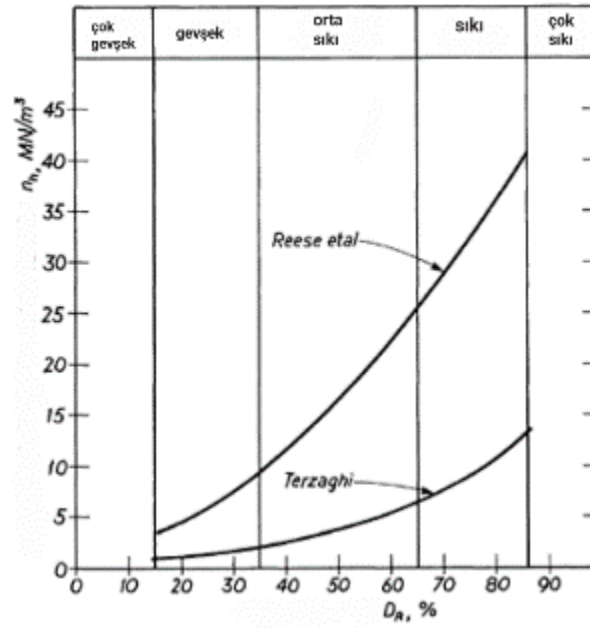
Kohezyonsuz zeminler ve normal konsolide killi zeminler için;

$$T = \left( \frac{EI}{n_h} \right)^{1/5} \quad (11)$$

Kohezyonlu (aşırı konsolide killeri) zeminler için;

$$R = \left( \frac{EI}{k_h B} \right)^{1/4} \quad (12)$$

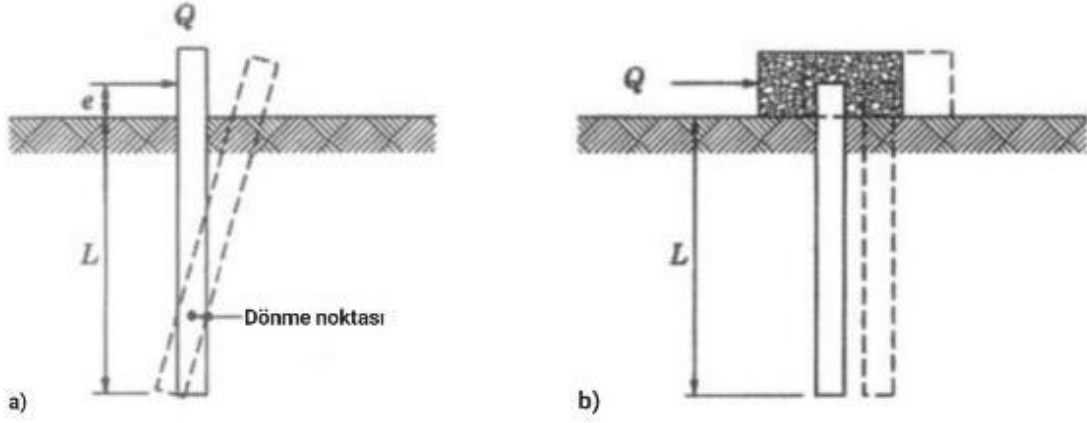
belirlenmektedir. T ve R görelî rijitlik boyu, E kazığın elastisite modülü, I kazık kesitinin atalet momenti, B kazık çapı,  $k_h$  derinlikle artan yatay yatak katsayısı,  $n_h$  yatay yatak katsayısı sabitidir.  $n_h$  ile rölatif sıkılık arasındaki ilişki Şekil 6’da verilmektedir.



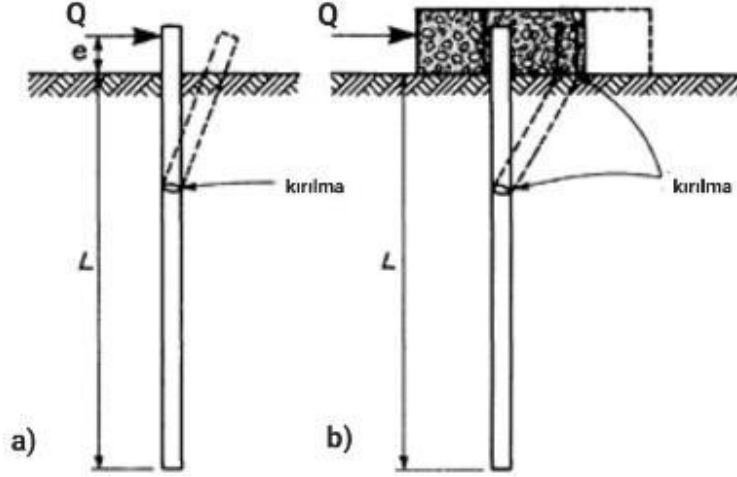
Şekil 6.  $n_h$  ile rölatif sıkılık arasındaki ilişki (Tomlinson, M. J., 1994)

Kısa kazıklar,  $L/T \leq 2$  veya  $L/R \leq 2$  koşulunu sağlamalıdır. Uzun kazıklarda da  $L/T \geq 4$  veya  $L/R \geq 3.5$  koşulu sağlanmalıdır. L, kazığın gömülü uzunluğudur (Prakash ve Sharma, 1990).

Serbest veya ankastre başlı kısa ve uzun kazıkların deformasyon şekilleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmektedir.



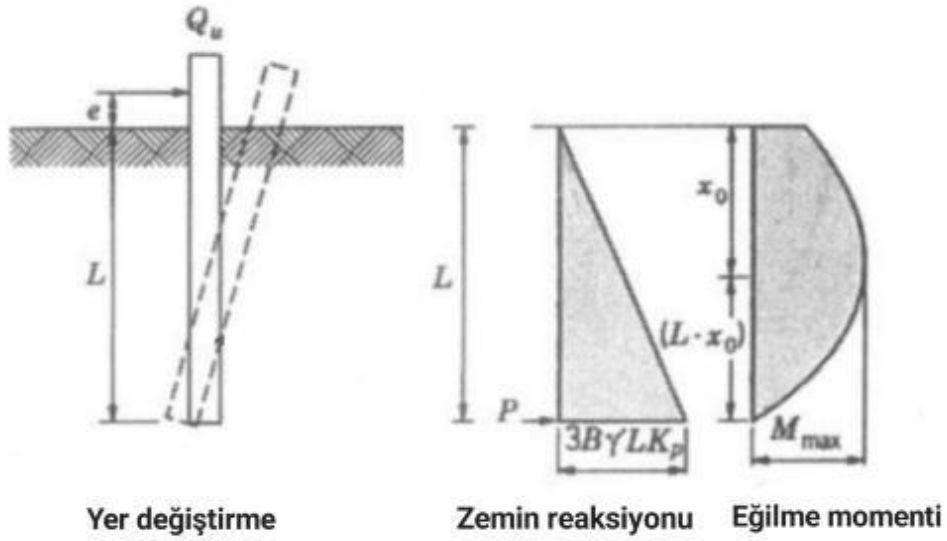
Şekil 7. Kısa kazıkların yatay yük etkisindeki deformasyon durumu a) serbest başlı b) ankastre başlı (Prakash ve Sharma, 1990)



Şekil 8. Uzun kazıkların yatay yük etkisindeki deformasyon durumu a) serbest başlı b) ankastre başlı (Tomlinson, M. J., 1994)

Broms (1964b) yöntemine göre kohezyonsuz zeminlerde kısa ve uzun kazıklar için analiz ayrı ayrı incelenmektedir. Bu yöntemde serbest veya ankastre başlı kısa ve uzun kazıklar için farklı çözüm önerilmektedir.

Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı kısa kazıklarda oluşan zemin reaksiyonu ve eğilme momenti Şekil 9'da verilmektedir. Kohezyonsuz zeminlerdeki serbest başlı kısa kazıklarda, maksimum zemin gerilmesi kazık tabanına yakın bir noktada ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9. Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı kısa kazıklarda zemin reaksiyonu ve eğilme momenti (Broms (1964b))

Şekil 9'daki gibi durumda kazık ucuna göre moment alınır, kısa kazıkların taşıyabileceği maksimum yatay kuvvet,

$$Q_u = \frac{0.5\gamma' L^3 B K_p}{(e + L)} \quad (13)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Şekil 7'deki gibi maksimum moment ( $M_{max}$ ),  $x_o$  derinliğinde oluşmaktadır. Bu derinlikte kesme kuvveti sıfırdır.

$$Q_u = 1.5\gamma' B x_o^2 K_p \quad (14)$$

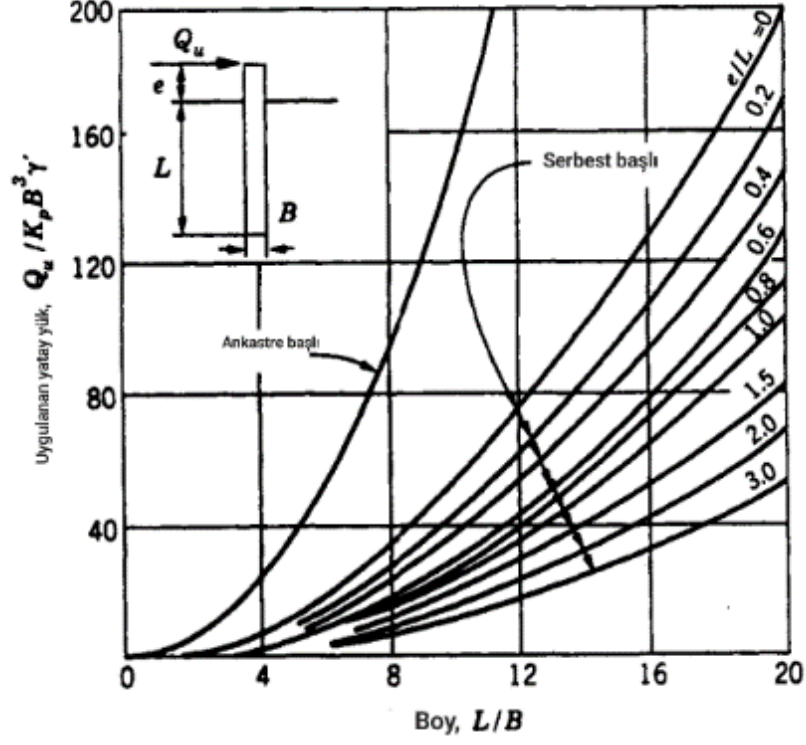
(13) denklemini kullanarak,  $x_o$  derinliği,

$$x_o = 0.82 \left( \frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5} \quad (15)$$

bulunmaktadır. Maksimum moment ise,

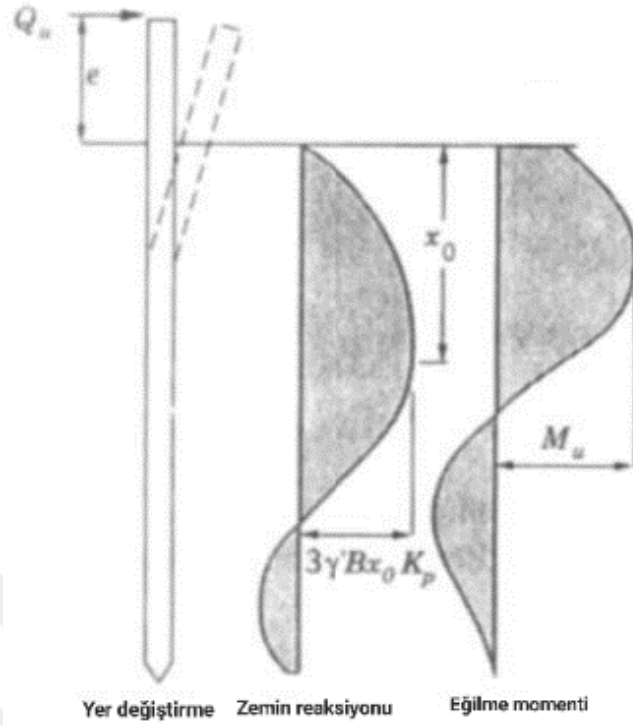
$$M_{max} = Q_u(e + 1.5x_o) \quad (16)$$

bulunmaktadır. Broms (1964b), kohezyonsuz zeminlerde kısa kazıkların yatay yük taşıma kapasiteleri için Şekil 10'daki grafiği hazırlamıştır.



Şekil 10. Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı kısa kazıklarda son yatay taşıma gücü (Broms (1964b))

Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı uzun kazıklarda oluşan zemin reaksiyonu ve eğilme momenti Şekil 11'de gösterilmektedir.



şekil 11. Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı uzun kazıklarda zemin reaksiyonu ve eğilme momenti (Broms (1964b))

Maksimum moment aşağıdaki gibi

$$x_o = 0.82 \left( \frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5} \quad (17)$$

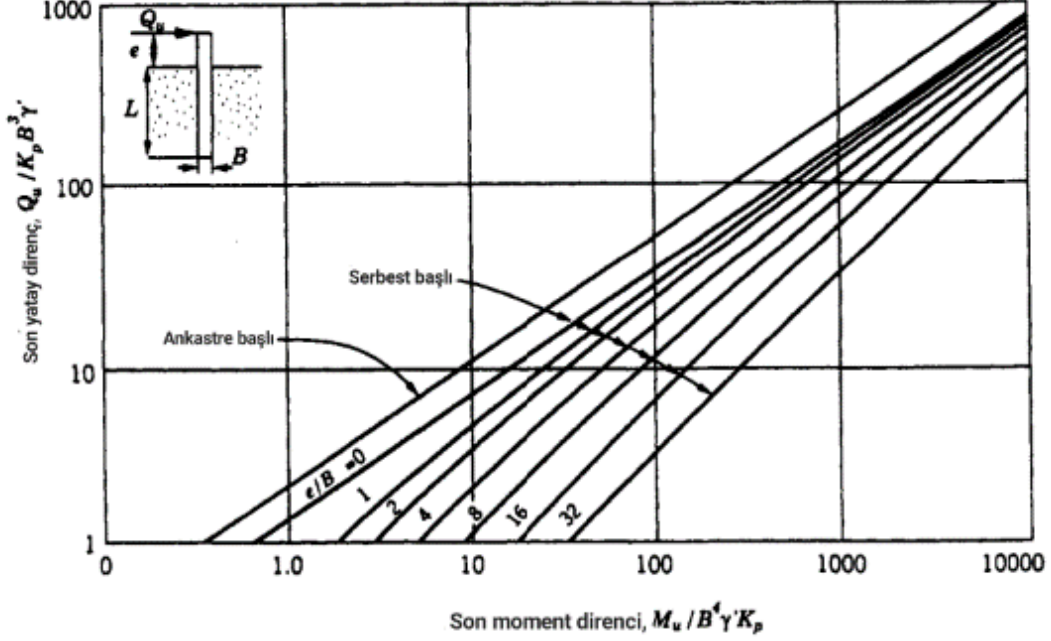
$$M_{max} = Q(e + 0.67x_o) \quad (18)$$

bulunmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı uzun kazıklar için son yatay taşıma gücü,

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \left( \frac{Q_u}{\gamma' B K_p} \right)^{0.5}} \quad (19)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

Broms (1964b), kohezyonsuz zeminlerde uzun kazıkların yatay yük taşıma gücünün hesabı için Şekil 12'deki grafiği hazırlamıştır.



Şekil 12. Kohezyonsuz zeminlerde, serbest başlı uzun kazıklarda son yatay yük taşıma gücü (Broms (1964b))

• p-y Analiz Yöntemi

p-y eğrileri ile zeminin elastik olmayan davranışı tanımlanabilir (Matlock (1970), Reese ark. (1974), Reese ve Welch (1975), Bhushan ark. (1979)).

Yatay yüklü bir kazığın dördüncü dereceden diferansiyel denklem

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (20)$$

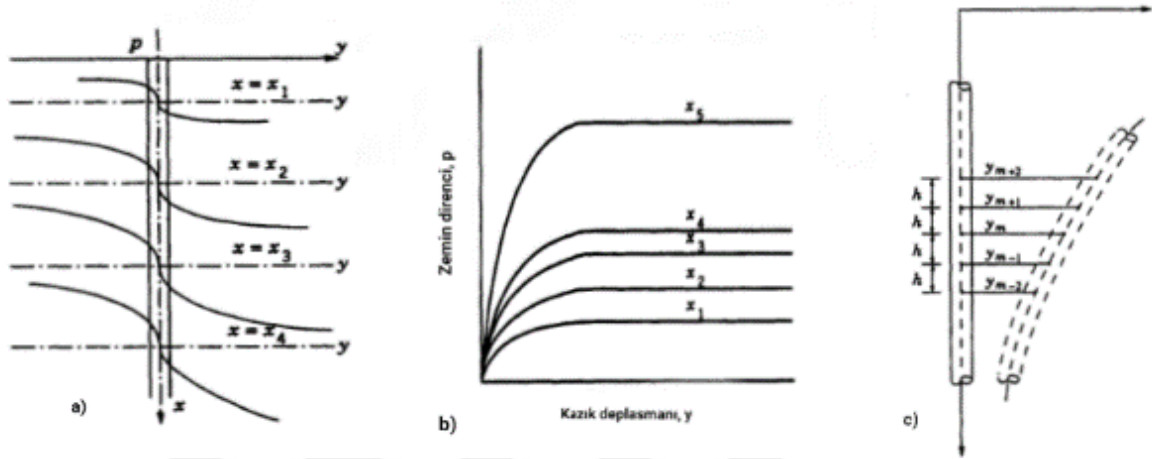
biçimde verilmiştir. Bu denklemde,  $E_p I_p$  kazığın eğilme rijitliği,  $P$  kazık üzerindeki aksenal yük,  $y$  ise  $x$  derinliğindeki kazık deplasmanıdır. Kazık üzerindeki zemin direnci ( $p$ ) yatay yatak katsayısına ( $k_h$ ) bağlı olarak

$$p = k_h y \quad (21)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Denklem (21) yatak katsayısı ( $k_h$ ),  $x$  ve  $y$  terimlerine bağlı tanımlanabilmektedir. Bu tanımlama Şekil 13'teki gibi tanımlanmış eğri grubu

yapılabilmektedir.  $p'$  nin değişimi  $y$  deplasmanına bağlıdır. Bu eğriler parabol seklindedir ve derinliğe, zeminin kayma mukavemetine, tekrarlı yüklere bağlı olmaktadır (Reese, 1977).

Farklı zemin türleri için  $p$ - $y$  eğrisi ile yük-deformasyon davranışları tanımlanmaktadır.

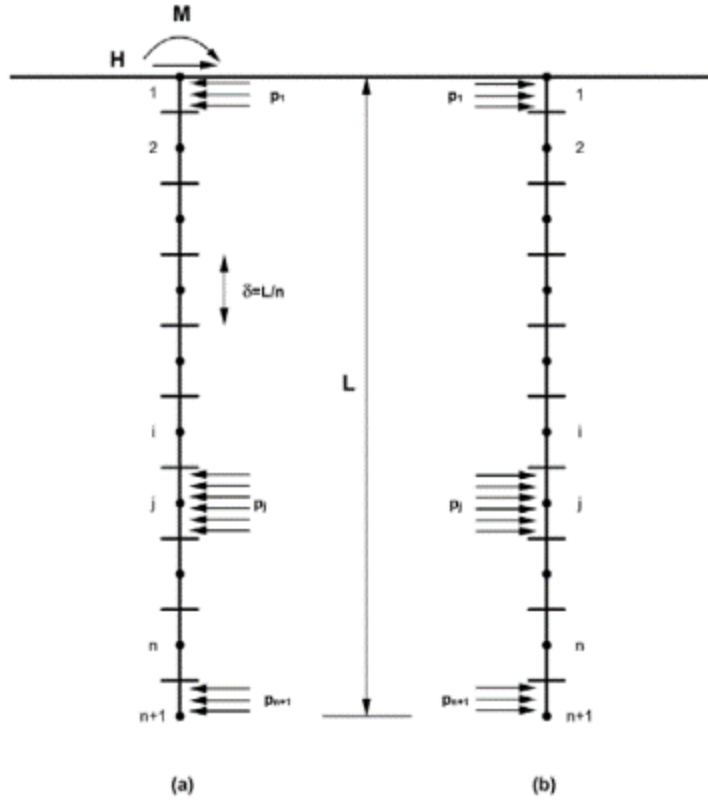


Şekil 13. Bileşke  $p$ - $y$  eğrileri a) zemin altındaki farklı  $x$  derinliklerindeki eğriler, b) eğrilerin  $p$ - $y$  eksen takımında gösterilmesi, c) deplasmana uğramış kazık (Prakash ve Sharma, 1990)

- Elastik Teori Yöntemi

Zemin ortamı homojen ve izotrop olan bu yöntemde zemin lineer elastik özellikte sürekli bir ortam olarak kabul edilmektedir (Kim vd. 2004).

Şekil 14'teki gibi kazık ve zemin üzerindeki etkili olan gerilmeler Poulos (1971) tarafından verilmiştir. Kazık ve zemin elemanlarının orta noktalarındaki deplasman elastik analizlerde eşitlenmektedir.



Şekil 14. Yüzen kazık durumundaki etkiyen gerilmeler sırasıyla kazık (a) ve zemin (b) (Poulos, 1971)

Poulos (1971) serbest başlı bir kazığın, zemin yüzeyinde oluşturacağı deplasman ve dönme miktarlarını,

$$\rho = (I_{\rho h}) \frac{H}{E_s L} + (I_{\rho M}) \frac{M}{E_s L^2} \quad (22)$$

$$\theta = (I_{\theta h}) \frac{H}{E_s L^2} + (I_{\theta M}) \frac{M}{E_s L^3} \quad (23)$$

sırasıyla tanımlamıştır. Denklemlerde yer alan;

H: Yatay kuvvet,

L: Kazık boyu,

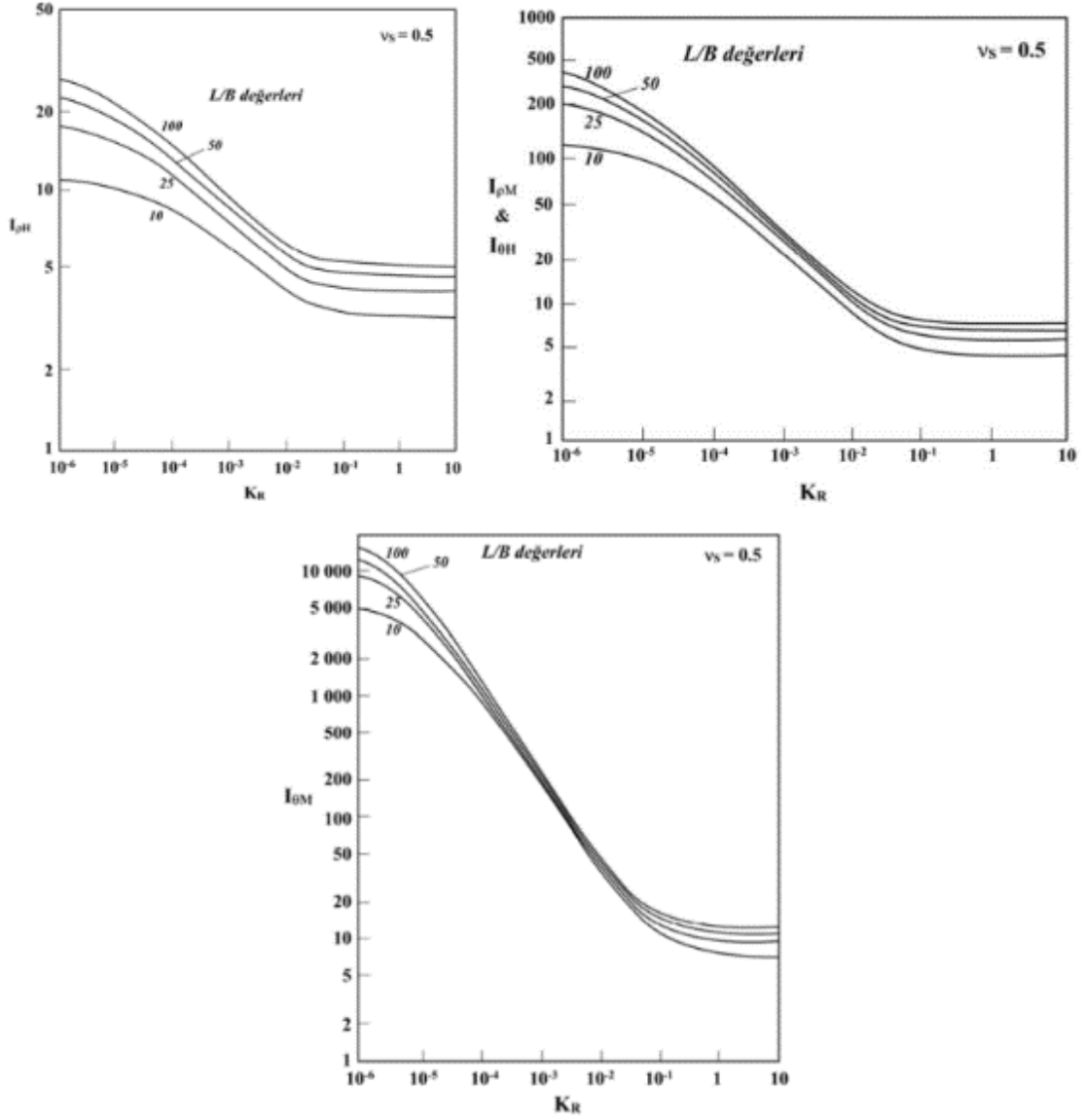
M: Zemin yüzeyinden uygulanan moment,

$I_{\rho h}$  ve  $I_{\rho M}$ : Yatay yük ve moment için kazık deplasmanına ait elastik katsayılar,

$I_{\theta h}$  ve  $I_{\theta M}$ : Yatay yük ve moment için kazık dönmesine ait elastik katsayılar,

$E_s$ : Elastisite modülüdür.

Poulos (1971) tarafından elastik katsayıların  $K_R$ 'ye bağlı değişimleri Şekil 15'te verilmektedir.



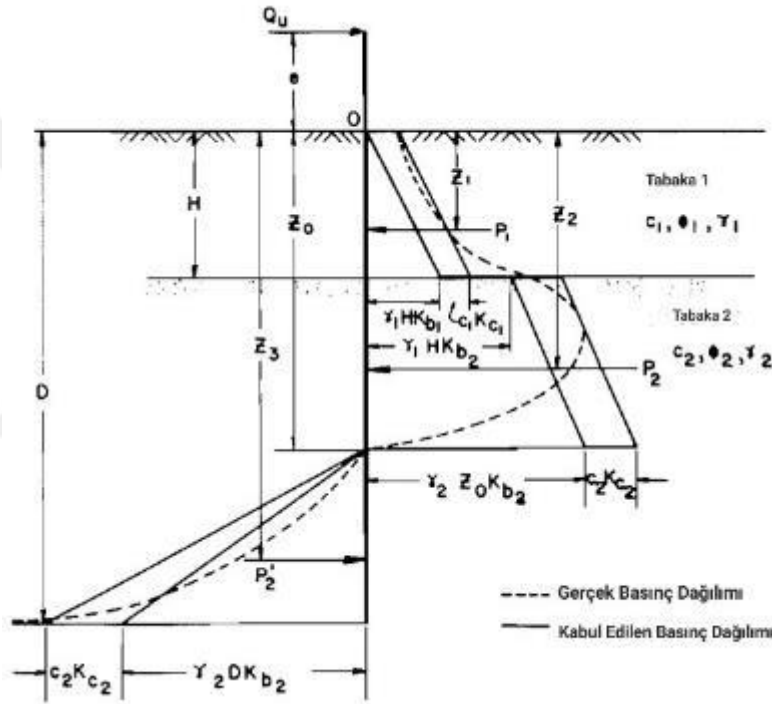
Şekil 15. Elastik katsayıların  $K_R$ 'ye bağlı değişimleri (serbest başlı bir kazık için)  
(Keleşoğlu, 2006)

Elastik teorisi kullanılarak, zemin modülünün derinlikle değiştiği zemine ait çözümler yapılabileceği gibi kazık gruplarının ve soketlenmiş kazıkların da çözümleri yapılabilmektedir.

- Meyerhof ve ark. (1981)

Meyerhof ve ark. (1981), yatay yüke maruz kalmış, iki tabakalı bir zemin kütlelerinin gömülü rijit düşey duvarların ve serbest başlı kazıkların nihai yanal yük taşıma kapasitesini ve yanal ötelenmesini incelemişlerdir. İki farklı durumu ele alan çalışmanın birinci grup çalışmalarında, rijit duvarın davranışı ve ikinci grup çalışmalarında ise rijit kazıkların davranışı belirlenmiştir.

Yanal yüke maruz kalmış tabakalı zeminlerdeki rijit bir duvar üzerinde oluşan zemin reaksiyonları Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Tabakalı zeminlerde, göçme anında zemin basınç dağılımı (Meyerhof ve ark. 1981)

Şekil 16 incelendiğinde, yükleme doğrultusunda kazık ön yüzünde dönme noktası üstünde pasif zemin basınçları, kazık arka yüzünde de aktif zemin basınçları oluşmaktadır. Basınç dağılımları lineer olarak artmaktadır. Tabaka değişiminin olduğu yerde süreksizlikler olduğu görülmüştür.

Tabakalı zeminde, serbest başlı rijit düşey bir kazığın yanal yük taşıma kapasitesi  $S_b$  ve  $S_c$  şekil faktörleri kullanılarak tahmin edilmektedir. Yanal yüklü rijit kazığın taşıma kapasitesi,

$$Q_u = (\gamma D^2 K_{b2} F_b r_b s_{bu} + c_2 D K_{c2} F_c r_c s_{cu}) B \quad (24)$$

biçiminde verilmektedir.

B: Kazık çapı,

D: Gömülü kazık (duvar) uzunluğu,

$r_b$  ve  $r_c$ : Moment azaltma faktörleri,

c: Kohezyon.

$$r_b = 1/(1 + 1.4e/D) \quad (25)$$

$$r_c = 1/(1 + 1.9e/D) \quad (26)$$

$s_b$  ve  $s_c$ : Şekil faktörleri (Şekil 17'den elde edilmektedir.),

$F_b$  ve  $F_c$ : İki tabakalı zemin durumunda yanal direnç faktörleri,

$K_b$  ve  $K_c$ : Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki yanal zemin basınç katsayıları

$$K_b = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) - \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (27)$$

$$K_c = 2 \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (28)$$

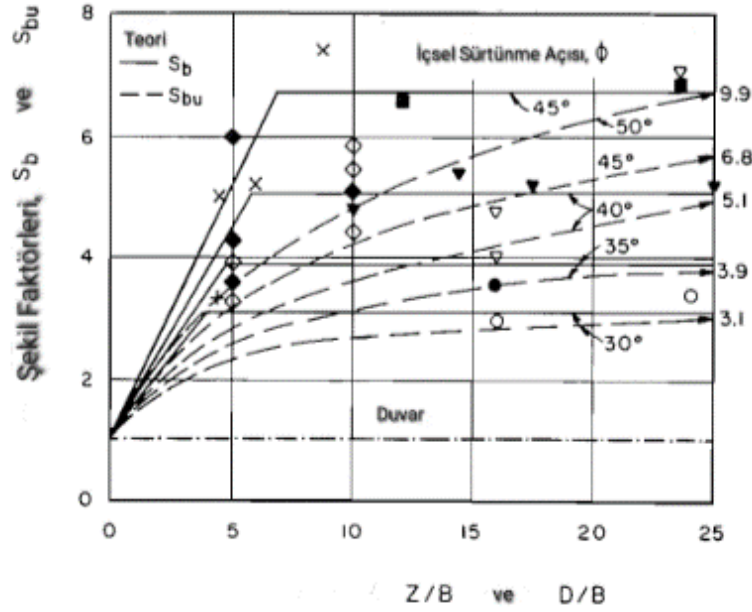
biçimindedir.

Şekil 17'de homojen ve tabakalı kum zeminler için yanal yüklü kısa kazıkların şekil fonksiyonu abağı verilmektedir.

Kum zemindeki rijit bir kazığın birim uzunluğuna etkiyen nihai yanal zemin direnci

$$P_{ult.} = \gamma z K_b s_{bu} B \quad (29)$$

bağıntısında verilmektedir.



Şekil 17. Kum zemindeki yanal yüklü kazık için şekil faktörleri (Meyerhof ve ark. 1981)

### 1.1.2. Deneysel Çalışmalar

Yatay yüke maruz kalan kazıkların davranışlarının incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemler, arazi yükleme deneyleri ve laboratuvar model deneyleridir. Arazi deneylerinde, zemin ortamı prototip boyutlarında ve yükleme doğal arazi şartlarında gerçekleştirildiği için fazlasıyla güvenilirdir. Laboratuvar model deneyleri, sınırlı zamanda deney düzeneğinin kurulabilmesi, maliyetinin arazi deneylerine göre düşük olması, deney sistemi ve model zemin şartlarının hassas kontrol edilebilmesi gibi avantajlarının bulunmasından dolayı arazi deneylerine alternatif olarak gerçekleştirilmektedir.

Bu bölümde, yatay yüke maruz kalan kazıkların davranışlarının araştırılmasında kullanılan literatürde yapılmış deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Brown vd. (1988) büyük ölçekli arazi yükleme deneyleri yaptıkları çalışmada, kum zemin içerisindeki kazık gruplarının çevrimsel yanal yük etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Çelik borular kullanılarak yapılan yükleme deneyleri tek kazık ve kazık grubu üzerinde yapılmıştır. Kazık grubu, aralarında üç kazık çapı mesafe bulunan 3×3 diziliminden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada, grup içerisinde bulunan her bir kazık donatılandırılarak grup yanal yük taşıma kapasitesi ve her bir kazığın uzunluğu boyunca eğilme momenti dağılımları incelenmiştir. Kazık grubundaki kazıkların taşıma gücü kaybının gölgeleme etkisinden dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Gölgeleme etkisi, grup

içerisindeki kazıkların birbirine olan etkisiyle kesişim bölgesindeki zeminde yanal yükleme etkisinde oluşan gerilme bölgelerinin çakışmasıyla kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin azalmasıdır. Kazık grubundaki ilk sıradaki kazıklar grup yükünün büyük bir kısmını üstlenerek tekil kazığa benzer şekilde davranış sergilemiştir. Grup etkisinden kaynaklanan zemin direncindeki kaybı ifade etmek için p-multiplier yaklaşımı kullanılmıştır.

Meyerhof vd. (1988) yaptıkları çalışmada, gevşek kum zemin ile yumuşak kil zemin içerisinde flexible model kazıklar ve küçük kazık gruplarında yanal yükleme deneyleri yapılmıştır. Farklı malzemelerden imal edilen model kazıklar, farklı gömülü uzunluk değerleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Model kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri ve kazık başındaki yanal deplasmanlarında kazık eğilme rijitliği ve kazık gömülü uzunluğunun etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, flexible kazıkların kazık eğilme rijitliği ve kazık gömülü uzunluğunun azalmasıyla birlikte yanal yük taşıma kapasitelerinin azaldığı ve kazık başındaki yanal deplasman değerlerinin de arttığı gözlenmiştir.

Abduljawad vd. (1990), kum zeminde yanal yüklenmiş kazıkların küçük ölçekli model deneyler yaparak araştırmıştır. Doygun kum zemin içinde olan model kazıklara farklı yükleme koşullarında (statik ve çevrimsel yükleme) deneyler yapılmıştır. Her iki yükleme durumu için kazık uzunluğu boyunca farklı derinliklerde deneysel yük-ötelenme eğrileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçların numerik sonuçlar ile uyum olduğu görülmüştür.

Abendroth ve Greimann (1990), kum zeminde (gevşek ve sıkı) farklı kazık başı sınır koşullarında sürtünme ve uç kazıklarının yatay ve kombine yükleme etkisi altındaki davranışlarını araştırmıştır. Kazıklar elektrik dirençli strain gaugeler ile donatılmış, dikey ve yatay kazık hareketleri deplasman dönüştürücüleri ile ölçülmüştür. Zemin reaksiyonu ve deplasman ilişkileri değiştirilmiş Ramberg-Osgood ifadeleri biçiminde geliştirilmiştir. Çevre sürtünmesi-düşey deplasman (f-z), uç taşıma gücü-oturma (q-z) ve yanal zemin reaksiyonu-yanal deplasman (p-y eğrileri) tanımlayan karakteristik zemin parametreleri zeminin non-linear davranışını Winkler yaylarıyla idealize sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır.

Sastry ve Meyerhof (1990) tarafından homojen kum ve kil zemin içerisine itilerek yerleştirilen ve tamamen donatılmış olan flexible kazıkların eğik yükleme etkisi altındaki davranışı araştırılmıştır. Gerekli olan eğik yük değeri uygun büyüklükteki yatay ve düşey yükler aynı anda uygulanarak sağlanmıştır. Deney sonuçları, eşdeğer rijit kazıkların efektif

gömülü uzunluk kavramına dayanan teorik yöntemdeki sonuçlar ve bazı vaka analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yalçın ve Meyerhof (1990) yaptıkları çalışmada, rijit model kazıklar ile küçük kazık gruplarının farklı tabaka kalınlığındaki gevşek ve sıkı durumda homojen ve iki tabakalı kum zemindeki performansı araştırılmıştır. Düşey, eğik ve yatay yüklere maruz kalan kazıkların davranışları model deneyler yapılarak incelenmiştir. Model rijit kazıklar kum zemin içerisine hem çakma yoluyla hem de gömülü halde yerleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, tabakalı zeminde gömülü durumdaki kazıkların çakma kazıkların taşıma kapasitesi değerlerinin %40-%80'i arasında taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

McVay ve ark. (1995), yanal yüklü tek kazık ve kazık grupları 3×3 karede, 3D ve 5D aralıklarda santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir. Orta sıkı ( $D_r=55\%$ ) ve gevşek ( $D_r=33\%$ ) kumlu zeminde yapılan tüm deneyler serbest başlı kazıklar için yapılmıştır. Deney sonuçları, kazık grubunun yanal direncinin tekil kazığın yanal direncine oranının zemin yoğunluğundan bağımsız olduğunu göstermiştir. Kazık gruplarında grup verimliliği 3D aralığında 0.74 iken 5D aralığında 0.94 olduğu hesaplanmıştır.

Ruesta vd. (1997) yaptıkları çalışmada, kum zemin içerisinde bulunan tek kazık ve 16 kazıktan oluşan 4×4 dizilimindeki kazık grubunun yanal yük etkisindeki davranışlarını arazi yükleme deneyleri yapılarak araştırılmıştır. Kazık grubundaki kazıklar arasında üç kazık çapı mesafe bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda, deneysel p-y eğrileri elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, kazık grubunda öndeki sıra kazıkların uygulanan yanal yükün büyük bir kısmını taşımıştır. Öndeki sıra kazıklar, tek kazığın davranışına benzer şekilde olduğu görülmüştür. Ayrıca, dış kazıklar muhtemelen bir gölge etkisi ve kazık çakma nedeniyle bir sıra içindeki iç kazıklardan daha fazla yük taşıdıkları belirtilmiştir. Kazık grubundaki kazık sıraları p-multipliers katsayıları ön sıra için, 0.8, ikinci sıra için, 0.7 ve arka sıra için 0.3'tü.

El Naggar ve Wei (1999) çalışmasında kohezyonsuz zemindeki konik kazıkların yanal yük altındaki etkisini belirlemek için, büyük ölçekli çelik kazıklarda on sekiz yanal yükleme deneyi gerçekleştirmiştir. Deney kasası içerisindeki kum zeminin farklı çevre basıncı değerlerinde olması için deney kasası hava kesesi ile kaplanmıştır. Elektrik dirençli strain gaugeler ile donatılan model kazıklar, kazık uzunluğu boyunca kazık dış yüzeyindeki yatay yöndeki kazık hareketini ölçülmüştür. Yapılan deney sonuçlarına göre, zemindeki çevre basıncının artmasıyla kazığın yanal yük taşıma kapasitesi arttığı ve kazık başındaki yanal ötelenmelerin azaldığı tespit edilmiştir.

Prasad ve Chari (1999), çalışmada kum zeminde rijit model kazıklarda laboratuvar model deneyleri yapmıştır. Bu deneylerdeki veriler kullanılarak zemin basınç dağılımı tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda, kohezyonsuz zeminlerde rijit kazıklar için zemin basıncı dağılımını ve nihai yanal kapasiteyi tahmin etmek için bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemi doğrulamak için yayınlanmış olan literatürden arazi ve laboratuvar verileri kullanılmıştır.

Patra ve Pise (2001), çalışmasında kum zemin içerisindeki  $1 \times 1$ ,  $2 \times 1$ ,  $3 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 2$  konfigürasyonlu model kazık gruplarının yanal yük etkisindeki davranışları model deneyleriyle araştırılmıştır. Kazık çapı  $d$ , olan kazıklar arası  $3.0d$ ,  $4.5d$  ve  $6.0d$  mesafedeki kazıkların farklı konfigürasyonda oluşturulan model kazık gruplarında deneyler yapılmıştır. Kazık grubundaki kazık aralığı ve sayısı ile yük-deplasman davranışı, yanal yük taşıma kapasitesi ve grup verimliliği niteliksel ve niceliksel olarak incelenmiştir. Tek kazık ve kazık gruplarının yanal yük taşıma kapasitelerini tahmin etmek için analitik yöntemler önerilmiştir. Deneysel çalışmalarından kazık gruplarının yanal yük taşıma kapasitesinin kazık gruplarındaki kazıklar arası mesafeye, kazık-zemin ara yüzeyindeki sürtünme açısına, zeminin sıkılığına ve kazık grubundaki kazıkların  $L/d$  oranına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kazık gruplarındaki kazıklar arası mesafe  $6d$  ve fazla olduğu durumda kazık grubunda yer alan kazıklar tek kazıktaki yanal yük taşıma kapasitesine sahip olmaktadır.

Kim ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada, Nak-Dong nehir kumuna gömülü kazıkların yanal yükler altındaki davranışını model deneyler yaparak incelemişlerdir. Bu çalışmada, kazıkların yanal dayanımları, kazık başı sınır şartlarına ve kazıkların yerleştirilme biçimine göre araştırılmıştır. Yanal yüklü kazıklar için  $p$ - $y$  eğrileri önerilerinde bulunulmuştur. Önerilen  $p$ - $y$  eğri modeli, literatürdeki olan  $p$ - $y$  eğri modelleriyle karşılaştırıldığında hem şekil hem de değer yönünden önemli derece farklılıkların olduğu bulunmaktadır. Sonuç olarak, kazık başının tutulu olması durumundaki kazık zemin etkileşiminin, serbest başlı kazıklardaki duruma oranı zemin yüzeyi yakınlarında en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Çakma kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin gömülü kazıklardan daha fazla olduğu görülmüştür.

Ilyas ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada, normal ve aşırı konsolide kilde yanal yüklenen kazık gruplarının davranışları santrifüj model testi yapılarak araştırılmıştır. Tek kazık,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$  kazıktan oluşan kazık aralıkları merkezden merkeze  $3D$  ve  $5D$  olarak deneyler yapılmıştır. Kazıklar, zemin seviyesi üzerinden alüminyum kazık başlığıyla bağlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, kazık gruplarındaki kazık sayısı arttıkça kazık başına

düşen ortalama yanal yükün azaldığı görülmüştür. Hem normal hem de aşırı konsolide kilde, 3D aralığında kazık grupları için grup verimliliği kazık sayısı arttıkça azalır. Ancak 5D aralığında grup etkileşim etkisi önemsiz hale geldiği belirtilmiştir. Gölgeleme etkisi, en çok öndeki sıra kazıklar için önemlidir, sonraki kazık sıralarında daha az önemlidir.

Rollins ve ark. (2005), yanal yüke maruz kalan kazık grubunun davranışını anlayabilmek için bir seri tam ölçekli deneyler yapmışlardır. Kil tabakası üzerinde gevşek ve sıkı kum tabakalarının oluşturduğu zeminde 3×3 kazık grubunda deneyler gerçekleştirilmiştir. Kazık grubundaki kazıklar arasındaki mesafe kazık çapının 3.30 katıdır. Deney sonuçlarına göre, kazıkların taşıdığı yanal yük miktarı kazık grubunda bulundukları kazık sırasına bağlı olduğu belirtilmiştir. Kazık grubundaki ön sırada yer alan kazıklar arka sıradaki kazıklara göre çok daha fazla yanal yük taşıma kapasitesine sahiptir. Grup etkisi LPILE ya da GROUP gibi yanal yük analiz programında p-multiplier kullanmak için yeterli hesaplanmaktadır. Kazıklar arası mesafe arttıkça p-multiplier katsayısının değerleri artmaktadır.

Zhang ve ark. (2008), kum zeminde (gevşek kum ve sıkı kum) kazık gruplarının dinamik yük altındaki davranışını araştırmak için santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde 20 mm çaplı, 1 mm et kalınlığına sahip alüminyum kazıklar kullanılmıştır. İki farklı kazık düzeninde gerçekleştirilen deneylerde birincisinde tüm kazıkları düşeyde, ikincisinde ise sadece dıştaki kazıklar 10° açı ile zemine yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, eğik kazıklara sahip grup kazık temelde kesit tesirleri ve atalet kuvvetleri arasındaki korelasyon düşey kazıklara göre daha düşük değerlerde kaldığı görülmüştür.

Salini ve ark. (2009), kazıkların yanal yük altındaki davranışını çelik ve alüminyum kısa kazıklar kullanılarak yapılan laboratuvar deneyleriyle araştırmıştır. Deneyler, kuru nehir kumunda gerçekleştirilmiştir. Kazıkların yanal yük kapasitesi uzunluk, kazık çapı, kazık aralığı, kazık pürüzlülüğü, kum yoğunluğundaki artışla artmıştır. Yanal yük taşıma kapasitesi, alüminyuma kıyasla çelik için daha fazla olduğu görülmüştür. Kazığın yanal yük taşıma kapasitesi, aynı uzunluk için çapın artmasıyla artmaktadır. Kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesi tek kazığa göre fazladır.

Chandrasekaran ve ark. (2010), yumuşak kile gömülü kazık gruplarına (1×2, 2×2, 1×4, 3×3) statik yanal yük deneyleri yapmışlardır. Deneyler, 15, 30, 40 olan L/D oranlarına sahip, 3D-9D kazık aralığında yerleştirilen tüm kazık gruplarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kazık aralığı, kazık sayısı, gömme derinliği ve yerleşim düzeninin kazık grup etkileşimi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarla grup verimliliği, kritik aralık ve p çarpanları elde

edilmiştir. GROUP programında elde edilenlerle deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. 3×3 kazık grubunun 3D kazık aralığındaki yanal yük taşıma kapasitesi, tek kazığa göre %40 daha azdır. 3D kazık aralığı ve 30 L/D oranına sahip kazık verimliliği, 1×2 kazık grubunda %14, 3×3 kazık grubunda %43 azalmıştır. 1×2 kazık grubundaki L/D 15 için kritik mesafe 5D, 3×3 kazık grubundaki L/D 30 için ise 8D bulunmuştur.

Kim ve Yoon (2011), yanal yüklü kazık grubu etkileşimini araştırmak için kapsamlı laboratuvar model kazık deneyleri yapılmıştır. Gevşek ve orta sıkı kum zeminde yapılan deneyler, kazıklar arası mesafeler kazık çapının değiştirildiği durumlarda 6 farklı kazık grubunda yapılmıştır. Yük, zemin yüzeyinden 30 mm kazık başına etkiyen yatay yük ile uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, orta sıkı, gevşek kum zemine yerleştirilen kazık gruplarında kazıklar arası mesafenin kazık çapının 6 katı olduğu durumda grup etkisi ortadan kalkmıştır. Kazık grubu etkileşimi incelendiğinde tüm sıra kazıklar için, tek kazık davranışına göre yanal yük taşıma kapasitesi azalmıştır.

Lee ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada tabakalı zemine yerleştirilmiş iki model kazık üzerinde yanal yüklü kazık davranışı araştırılmıştır. Zemin sıklığı %52, %92 olan ve 6 cm çapında 90 ve 56 cm boylarında iki farklı kazık üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, zemin yüzeyi ve kazık tabanındaki zemin şartlarının taşıma kapasitesindeki etkisinin önemli olduğu görülmüştür. Tabakalı zemin koşullarındaki dönme noktası derinliğinin, homojen zemin koşulundaki dönme noktası derinliğinden farkı belirgin değildir. Tabakalı bir zeminde, en üst ve en alt zemin tabakaları taşıma gücünde oldukça etkilidir.

Uncuoğlu ve Laman (2013), kum zemindeki (gevşek ve sıkı) rijit kısa kazıkların zemin yüzeyinden belirli bir yükseklikte uygulanan deneysel çalışmalarda, kazık boyu, kazık çapı, kazık enkesit şekli ve kazık malzemesinin yanal yük etkisindeki davranışları incelenmiştir. Kazık için, çelik, alüminyum ve derlin kullanılmıştır. 3 farklı çapa sahip her bir kazık çapında boy değiştirilerek L/D oranı 3, 4, 5 için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, zemin sıklığı yanal yük taşıma kapasitesinde önemli bir etkidedir. Kazık boyunun uzaması her iki rölatif sıklıkta da etkili olduğu görülmektedir.

Kaur ve ark. (2018), çalışmasında üst ve orta tabakalarında sırasıyla orta ve sıkı kum bulunan iki tabakalı kuma gömülü serbest başlı esnek (flexible) kazıklar üzerinde deneyler yapmışlardır. Çalışmada yer alan parametreler yüzey pürüzlülüğü, kum tabaka kalınlığı ve kazığa etki eden yükün türüdür. Tek kazık, 2×1 ve 3×1 gruplar halinde kazıklarda deneyler yapılmıştır. Çelik boruların kazık olarak kullanıldığı deneylerin sonucunda, kazıkların yanal

yük taşıma kapasitesi, orta sıklıktaki kum içeren üst tabakanın kalınlığı arttıkça azaldığı görülmüştür. Serbest başlı tek kazık ve grup kazıklarının yanal kapasitesi, birleşik yük altında azalmıştır.

Vakili ve ark. (2020), çalışmada kazık aralığı, farklı yerleşim düzenleri ve yeni bir parametre olarak yanal yük açısı değişimi gibi çeşitli parametrelerin kazıkların yanal tepkisi, grup verimliliği ve gruptaki p-çarpanı faktörü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Zemin, modifiye edilmiş Mohr-Coulomb yapısal modeli kullanılarak elastik-mükemmel plastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Ayrıca, Abaqus 3D modeli, kuma gömülü yanal yüklü kazıkların laboratuvar testlerinden elde edilen yük-yer değiştirme sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır.

Munaga ve ark. (2021), tabakalı zeminde yanal yükler altında tek kazıkların ve kazık gruplarının davranışını laboratuvar model testleri ile araştırmıştır. Tek kazık ve 2x2 kazık grubunun tepkisi, kazık grupları için farklı en/boy oranları ve 3D, 5D ve 7D kazık aralıkları için kazık başındaki sapma açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tabakalı zemine yerleştirilen kazık gruplarının verimliliği, dikkate alınan tüm aralıklar ve en-boy oranları için uniform kuma yerleştirilen kazık gruplarına kıyasla daha düşüktür. Tabakalı zemine yerleştirilen kazık gruplarında, 7D aralık ve 12 en-boy oranı durumunda %100 verimlilik elde edilmiştir.

Khati ve ark. (2021), çalışmasında, eğimli zemine yakın yanal yüklü kazık gruplarının davranışını incelemek üzere deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışmada, belirli bir eğim için üç farklı rölatif sıklık ve belirli bir rölatif sıklık için üç farklı eğim dikkate alınmıştır. Düz zemin durumuyla karşılaştırıldığında, eğime yakın kazık grubu için kazık tepkisinde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Eğime yakın kazık grubu için kazık sapması ve maksimum momentler önemli ölçüde artmıştır. Eğim tepesinden kenar uzaklığı arttıkça, kazık tepkisi düz zemin durumuna yaklaşmıştır.

Vakili ve ark. (2021), çalışmasında çeşitli parametrelerin bir kazık grubundaki kazıkların ve p-çarpanının yanal tepkisi üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yanal yüklü kazıkların küçük ölçekli testleri gerçekleştirilmiş ve deneysel yük-deplasman eğrilerine dayalı olarak üç boyutlu bir sonlu eleman modeli yapılmıştır. Zemin, modifiye edilmiş Mohr-Coulomb yapısal modeli kullanılarak elastik-mükemmel plastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Sonuçlar,  $S/D = 3$  (S: aralık, D: kazık çapı) değerinde tek yönlü yatay yükler için hesaplanan  $P_m$  değerlerinin, AASHTO köprü tasarım şartnamesinde önerilen değerlere yakın olduğunu göstermiştir.

Wang ve ark. (2024), çalışmasında sayısal simülasyon kullanılarak bir köprü kazık temelini doğrusal olmayan statik analiz modeli oluşturularak doğruluğu deneylerle araştırılmıştır. Doğrulanmış analiz modelinde soğuk bölgelerdeki yanal yükler altındaki köprü kazık temellerinin hasar özellikleri ve mekanik davranışları incelenmiştir. Zemin donma-çözülme döngülerinin kazık-zemin sisteminin yanal performansı üzerindeki etkisinin, mevsimsel olarak donmuş bölgelerde, permafrost bölgelere kıyasla daha belirgin olduğunu göstermektedir. Zemin donma-çözülme döngülerinin sayısı arttıkça, kazık-zemin sisteminin yanal yük kapasitesinin başlangıçta azalma ve ardından stabilize olma eğilimi vardır. Çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar (FE) modeli, yarı statik test sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Reza ve ark. (2025), çalışmasında kuru kumlu şev bitişiğindeki kazık grubunun kaldırma kapasitesini ve verimlilik katsayısını araştırmıştır. Doğrusal kazık grubunun eğime göre yönünün ve kazık grubunun dizilişinin, zeminin rölatif sıklığının ve kazığın gömülü uzunluğunun, kuru kumlu şev bitişiğindeki kazık grubunun kaldırma taşıma kapasitesi ve verimlilik katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kuru kumlu şev yakınındaki kazık grubunun fiziksel modeli üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Gömülü kazığın uzunluğundaki artış, tepe eğiminde bulunan 3x3 kazık grubunun kapasitesindeki artıştan, 2x2 kazık grubuna göre daha fazla kaynaklanmaktadır. Zeminin rölatif sıklığı ve tek kazığın gömülü uzunluğu artmasıyla eğimin tepe eğimine yerleştirilmiş tek bir kazığın çekme yük kapasitesi üzerindeki etkisi azalmıştır.

### 1.1.3. Sayısal Çalışmalar

Zemin mekaniği ve temel mühendisliğinin problemlerinin sonlu elemanlar gibi sayısal analiz yöntemleriyle hesaplanması yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde, kum zemin içerisinde yer alan yatay yüke maruz kalan kazıkların araştırılması sayısal analiz yöntemleriyle incelenmiştir.

Muqtadir ve Desai (1986), kazık gruplarının analizi için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Kazık grubundaki problemler; kazık grubu başlığı, zemin ve kazıklar arası etkileşimleri kapsayan üç boyutlu bir problemidir. Bu çalışmada, zeminin doğrusal olmadığı ve arayüz etkilerinin dahil edilmesi kazık grubu davranışını etkilemektedir. Önerilen üç boyutlu sonlu eleman modeli, üç boyutlu kazık grubu davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Verruijt ve Koijman (1989) tarafından yapılan çalışmada, yatay yüklü kazıkların davranışı elastik bir süreklilikte katmanlı zeminlerde sayısal modellerle araştırılmıştır. Yarı üç boyutlu analizler yapılan çalışmada, modelleri iki tür için doğrulamışlardır. p-y yayları metodunun rijit kazıklarda deplasmanları çok büyük verdiğini açıklamışlardır.

Brown ve Shie (1990), yanal yüke maruz kalan kazık davranışını üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışma, kazık etrafındaki zeminde boşluk oluşumu ve plastik deformasyonlar da dahil olmak üzere problemin makul ölçüde gerçekçi bir modelini geliştirme girişimini temsil eder ve kazık aralığı, kazık başı sabitliği ve zemin rijitliği parametrelerinin kazığın yanal yük taşıma kapasitesine olan etkilerini araştırmak için bir temel oluşturmaktadır. Kazık-zemin ara yüzeyindeki rölatif kayma ve boşluk oluşumu kazıktan zemine gerilme dağılımını etkilemektedir. Zemin yüzeyinin zemindeki yenilme bölgelerinin oluşumu üzerindeki etkisi ve zemin direncinin derinliğe göre dağılımı ile problemin üç boyutlu doğası yansıtılmaktadır. Küçük deplasman değerlerinde zemin yüzeyine yakınında meydana geldiği ve deplasman ile yanal olarak daha derinlere yayıldığı görülmektedir.

Trochanis ve ark. (1991), üç boyutlu sonlu eleman modeli aracılığıyla kazıklı temellerin monotonik ve çevrimsel yüklere maruz kazıkların eksenel ve yanal yük taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Çalışmada, zeminin non-lineer davranış özelliği ve kazık-zemin ara yüzey etkileşiminin tek kazık ve kazık gruplarının davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kazık çiftlerini içeren analiz, zeminin ve kazık-zemin ara yüzünün doğrusal olmayan davranışının sonucunda özellikle eksenel yükleme altında kazıklar arası etkileşimin kazıklara bağlı elastik bir zeminle karşılaştırıldığında büyük ölçüde azaldığını göstermektedir. Kazık-zemin ara yüzeyindeki kayma, eksenel yükleme altında doğrusal olmayan davranışın ve enerji dağılımının tek kaynağıdır.

Wakai ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışma, yanal yüklemeye maruz kalan kum zemindeki her biri dokuz kazıktan oluşan serbest ya da sabit başlı kazık gruplarının model deneyine dayanmaktadır. Üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar modeliyle analiz edilen model deneylerde alüminyumdan yapılmış model kazıklar kullanılmıştır. Ayrıca, arazi deneyinde çelik kazık grubuna (3×3 kazıklar) yanal yükleme uygulanmıştır. Model kazık gruplarının davranışlar 3-D elektro-plastik FEM tarafından analiz edilmiştir. Kazık grubunda yanal yük taşıma kapasitesi, kazık grubundaki kazık sayısı ile tek kazığın yanal yük taşıma kapasitesiyle çarpımından elde edilen değerden daha küçüktür. Bu nedenle kazık grubu etkisi çok önemli olmaktadır. Analiz sonuçları deney sonuçlarıyla uyumlu ve üç

boyutlu elasto-plastik modelinin hem model deneyleri hem de arazi deneylerini doğru bir şekilde modelleyebildiği belirtilmektedir.

Ashour ve Norris (2000) tarafından yapılan çalışma, gerilme kaması (SW) modeliyle araştırılmaktadır. Çalışmada p-y eğrileri üzerinde zemin ve kazık özelliklerindeki değişikliklerin etkisinin hesaba katılması SW modelinin avantajı olarak görülmektedir. p-y eğrilerinde kazık eğilme rijitliği, kazık enine kesit şekli, kazık başı sabitliği ve kazık başı gömülmesi gibi durumlar parametreler olarak araştırılmaktadır. Rijit başlıklı kazık serbest başlı kazığa oranla zeminden daha fazla direnç almaktadır. Gevşek kum için her iki kazık başlığı durumunda yakın sonuçlara ulaşılmıştır. SW model analizi, yanal yüklü kazıkların tepkisini doğru analiz ettiği belirtilmektedir.

Yang ve Jeremic (2003), üç boyutlu sonlu elemanlar programı OpenSees kullanılarak analiz edilen çalışmada, kum zeminde yer alan yanal yüke maruz kazık gruplarının ( $3 \times 3$  ve  $4 \times 3$  dizilimindeki) kazık grubu içerisinde yer alan kazıkların birbirleriyle olan etkileşimi araştırılmıştır. Centrifuge deneylerinin sonuçlarının kullanılmasıyla üç boyutlu sonlu elemanlar doğrulanmıştır. Kazık grubundaki her bir kazık sırasının karşıladığı yük miktarı farklıdır. Ayrıca, kazık sırası içindeki kazığın karşıladığı yük miktarı da farklıdır. Kazık grubu içindeki kazıklar arası mesafe arttıkça kazık grubunun yanal yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Kazık zemin sıklığının yükün kazıklar arası paylaşımında önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Yang ve Jeremic (2005), çalışmada elasto-plastik zeminlerde tekil kazığın davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Üiform kum ve kil zeminlerdeki kazık davranışı, kil içerisindeki kum tabakası ve kum zemin içerisindeki kil tabakası olan durumlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, katmanlama etkileri iki yönlüdür ve sadece alt zemin tabakadaki üst zemin tabakasından etkilenmez üst zemin tabakası da alt zemin tabakasından etkilenmektedir. Kil-kum-kil modelinde, yumuşak kilin yanal direncinin %30 oranında arttığı görülmektedir. Kum-kil-kum modelinde, ortadaki kil tabakası üstte bulunan kum tabakası yanal direncinde azalmaya neden olmuştur. Kazık çapının (%1 oranından) küçük deplasmanlarda rölatif rijitliğin yanal dayanım oranına hakim olduğu, kazık çapının (%5 oranından) daha büyük deplasmanlarda ise kendisinin kontrol ettiği görülmektedir.

Karthigeyan ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, kumlu zeminlere yerleştirilen kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki düşey yüklerin etkisi, sonlu elemanlar analiziyle yapılmıştır. Kombine yükleme sırası, zemin parametrelerine, kazık başı

sabitliğine ve kazık narınlığına ( $L/B$ ) bağlı olmaktadır. Uzun kazıklarda düşey yüklerin etkisi daha az önemlidir. Düşey yükün kazığın yanal yük taşıma oranı kapasitesinde etkisi kumun içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısından etkilenmiştir.

Karthigeyan ve ark. (2007), üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle düşey kazıkların yanal yük taşıma kapasitesine düşey yüklemenin etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, hem kil hem de kumlu zeminlerde kazıkların yanal yükler atındaki tepkisi düşey yüklerin varlığından etkilenmektedir. Kumlu zeminde, düşey yükün artması %40'a kadar yanal yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Kombine yük altındaki kazıkların yanal yük taşıma kapasiteleri  $L/B$  oranına bağlıdır.

Maouche ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada Plaxis 2D programı kullanılarak yanal yüklü kazıkların davranışı modellenmiştir. Elastoplastik zemin modeli olan Mohr-Coulomb malzeme modeli ile kum zemin, lineer elastik malzeme modeli ile kazık malzemesi modellenmiştir. Çalışmada, kazıkta oluşan maksimum yanal ötelenmenin, kazık geometrisine ve non-lineerlik etkilerine bağlı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Kumlu ve killi zeminler üzerinde analizler yapılmıştır.

Terzi ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada farklı kum ortamlarında, düşey olarak yerleştirilmiş tekil bir kazığın yanal yükler altındaki davranışı çok yönlü olarak araştırılmıştır. Model kazığın kademeli yükler altında gösterdiği davranış deneysel olarak incelenmiştir. Kazık davranışı p-y ve yatak katsayısı yöntemleri kullanılarak tasarımcılar tarafından analiz edilmiştir. LPILE ve SAP2000 programları kullanılarak nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, p-y yönteminin yatak katsayısı yöntemine göre daha güvenilir analizler ortaya koyduğu anlaşılmıştır. Zemin sıkılığının kazık davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Zemin sıkılık derecesi arttıkça kazıkta oluşan yer değişimler azalmıştır.

Kim ve Jeong (2011), yanal yükler altında kil zeminde tek kazığın tepkisi Plaxis 3D programı kullanılarak analiz edilmiştir. Sahada yapılan yanal yük deneylerin sonuçları sonlu elemanlar modelini doğrulamak için kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, kazık esnek olarak tasarlandığında p-y eğrisinin başlangıç eğimi kazık çapı arttıkça doğrusal olarak artmıştır. Kazığın elastisite modülünün alt zemin reaksiyonun meydana geldiği başlangıç modülünde küçük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Plaxis 3D Foundation yazılımında yüzey tabanlı bir arayüz tekniğiyle modellenen çalışma sonucunda, arayüz özelliklerinin taban zemini reaksiyonun başlangıç modülü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Gürgüç (2013) tarafından yapılan çalışmada, iki doğrultuda 1000 kN yatay yük ile yüklenen 2x2 kazık grubunda farklı zemin ortamlarında, farklı kazık aralıkları ve kazık çaplarında Plaxis 3D Foundation programında analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, kazık grubunun yaptığı deplasmanların kazık aralığı ve/veya kazık çapları arttıkça azaldığı görülmüştür. Zemin rijitliği arttıkça da kazık grubunun yaptığı deplasmanlar azalmıştır. Kazık başlığının kalınlığı, kazık çapı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Altay ve Kayadelen (2017) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS paket programıyla kazık üzerinde moment yüklerinin etkisini göstermek için üç boyutlu bir model oluşturulmuştur. Farklı çaplarda ve uzunluklarda modellenen kazıklar üzerinde kayma gerilmeleri ve kazık üzerindeki belirli bir noktanın deformasyonları moment etkisi altında araştırılmıştır. Çalışmada yapılan nümerik analizlerin sonucunda, farklı çaplara sahip aynı boydaki kazıklarda momentin artmasıyla maksimum kayma gerilmesi ve maksimum yanal deformasyonlar artmıştır. Boyları farklı çapları aynı olan kazıklarda, moment etkisi altında maksimum kayma gerilmesi ve deformasyonlar incelendiğinde belirli bir deformasyonda kazık boyunun artmasıyla maksimum kayma gerilmeleri arttığı gözlemlenmiştir.

Panchaland ve ark. (2018), dinamik yüklere maruz kalan kazık gruplarının davranışını incelemiştir. 2D, 3D, 4D, 5D ve 6D olmak üzere çeşitli aralıklar için 2 kazık, 3 kazık ve 4 kazık gibi kazık gruplarının kombinasyonu dikkate alınmıştır (D kazık çapı). STAAD Pro adlı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucuna göre, eksenel kuvvet kazık boyu arttıkça arttığı görülmüştür. Tüm aralıklarda kesme kuvveti ve eğilme momenti kazık boyu arttıkça azalmıştır.

Zhengdao ve ark. (2019), kazıklı köprü temelinin yanal davranışı ve dik yamaçta kazıkları stabilize etmek için model test ve sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Model test boyunca kazıklardaki eğilme momentinin değişimi, kazıklar etrafındaki zemin basıncı, kazıkların ve zeminlerin yanal yer değiştirmesi izlenmiştir. Model testi, arka stabilize edici kazıkların köprü kazıklarına göre kazık boyunca çok daha büyük bir eğilme momentine ve kayma yüzeyinin üstündeki kazıklara etki eden kuvvete maruz kaldığını göstermektedir. Stabilize edici kazıkların yerini optimize etmek için sayısal analizler yapılmıştır.

Mısır ve Laman (2019), homojen ve tabakalı kum zeminlerde yanal yüklü tekil kısa kazığın model deneyler yapılarak yanal taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. 4 farklı tabakalı zeminlerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, zeminde oluşan yanal gerilme dağılımının rijitliği fazla olan tabakalarda olduğu gözlemlenmiştir. Model deneylerden elde edilen

sonuçları, iki ve üç boyutlu olarak PLAXIS programıyla analiz etmişlerdir. İki boyutlu analiz edildiğinde, yanal yönde şerit yük altındaki rijit bir duvar problemine dönüşmüş ve gerçek davranışa benzer sonuçlar olduğu tespit edilmiştir. Üç boyutlu analizlerde ise, sistemin yük performansının belirleyici olan dönme noktasının önünde oluşan pasif bölgedeki ve arkasında oluşan çekme bölgesindeki gerilmeleri net olarak gözlemlemişlerdir. Deneysel sonuçlar ve analizler uyumludur.

Mısır ve Laman (2020), liman yapısında tam ölçekli saha yükleme testleri ile çelik boru kazıklarının yanal yük altındaki performansları araştırılmıştır. Kazık davranışı Plaxis 3D sonlu elemanlar kullanılarak incelenmiştir. Sayısal modelden elde edilen sonuçların yükleme testinden alınan kazık yanal yük-deplasman davranışını başarılı olarak yansıttığı görülmüştür.

Çelik (2022), doymuş gevşek kumlu zemine yerleştirilmiş tekil bir kazık için p-y eğrileri hazırlamış ve bu eğrilere bağlı zemin tepkisinin kazık tasarım parametreleri üzerine etkilerini karşılaştırıp incelemiştir. Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemine dayanan PileLAT programı kullanılmıştır. Çalışmadaki bu eğriler, kazıkların farklı derinliklerinde API kumu, Reese kumu ve Sıvılaştırılmış kuma göre çizilen eğrilerle temsil edilmiştir. P-y eğrilerindeki bu davranış farkı, yanal yüklü kazıkta meydana gelen yer değiştirmeleri, eğilme momentlerini, kesme kuvvetlerini ve nihai yanal direnç değerlerini önemli bir şekilde etkilemiştir. Yanal sehimler, eğilme momentleri, kesme kuvveti ve yanal yük taşıma kapasitesi p-y eğrilerindeki farklılıklar dikkate alınarak tasarlanması gerekmektedir.

Ren ve ark. (2025), çalışmasında yatay yükleme altında kazık başlıklı 3×3 kazık grubu temelinin yer değiştirme ve yük paylaşımı davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Zemine gömülü kazık başlığı, kazık grubunun taşıma kapasitesini artırmış ve yatay yer değiştirmeyi azaltmıştır. Kazık başlığı, başlangıçta düşük yükleme aşamalarında toplam yanal yükün %62'sini taşımış, yüklerin daha yüksek olduğunda %50'ye düşmüş, kazık katkısı ise tersine %38'den %50'ye çıkmıştır.

Amjad ve ark. (2025), çalışmada, yanal yüklenen kazıkların hem tek tek izole kazıklar olarak hem de kazık grubunun davranışları incelenmiştir. Yanal yük analizi için FHWA'nın p-y eğrisi yaklaşımını uygulayan Allpile yazılımı kullanılmıştır. 3D-4D aralıklarda, kazıklar arası etkileşim, üst üste binen gerilme bölgeleri ve yük paylaşımı nedeniyle yanal talebi arttırmıştır. 7D-8D aralıklarda, her kazık bağımsız davranır ve grup etkisinin önemli olmadığı görülmüştür. Allpile, özellikle ön tasarımlar için faydalı olduğu görülmüştür.

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda tekil kazık ve kazık gruplarında tasarım yöntemlerinin güvenilirliği için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, farklı rölatif sıklılığa sahip kum zeminde farklı uzunluklarda ve farklı kazıklar arası mesafeye sahip model kazıklara yatay yükler uygulanarak laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde kazık boyunun tamamı kum zemine gömülü olarak yerleştirilmiştir. Böylece kazıklar arası mesafe ve zemin sıklılığının kazıklardaki etkileşiminin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi sağlanmıştır. Laboratuvar deneyleri, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis 3D programıyla modellenerek karşılaştırılmış ve simülasyonun başarısını arttırmak için model parametreleri optimize edilmiştir. Yatay yüke maruz serbest başlı büyük çaplı kazıklardaki kazıklar arası etkileşimi incelemek için optimize edilmiş malzeme model parametreleri kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Böylece kum zeminde yatay yüklü serbest başlı kazıklardaki kazıklar arası mesafenin etkileşiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Deneyssel çalışmalar, yatay yüke maruz kalan kazık gruplarındaki kazıklar arası etkileşimin incelenmesini içermektedir. Model kazıklar kısa ve uzun olarak imal edilmiştir. Deneyler, model kazık uzunluğunun tümü kum zemine gömülüdür. Kum zemin, gevşek ve sıkı olmak üzere iki farklı rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Yatay yükleme deneyleri, kazık aralıkları kazık çapı (D) kazık merkezinden diğer kazığın merkezine D, 3D ve 5D kazık aralıkları kullanılarak hazırlanmıştır. Kum zemindeki düşey tek kazığa ve kazık gruplarına (kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D) zemin yüzeyi seviyesinde yatay yükler uygulanmıştır.

Bu bölümde, deney düzeneği, yükleme sistemi, deneylerde kullanılan kum zemin, model kazık özellikleri, deney programı, sonlu elemanlar yöntemi ve parçacık görüntüleme hız yöntemine (PIVlab) yer verilmiştir.

### 2.1. Deney Düzeneği

#### 2.1.1. Deney Tankı

Deneyssel çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında, iç ölçüleri 2 m × 0.995 m × 1.84 m (uzunluk × genişlik × yükseklik) olan dikdörtgen kesitli tank içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deney tankının iskeleti çelik profillerden imal edilmiştir. Deneyler sırasında, kum zemini deney tankına daha kolay yerleştirebilmek ve istenilen rölatif sıklıkları sağlayabilmek için deney tankının iç yüzeyleri beşer cm aralıklarla çizilerek hazırlanmıştır.

#### 2.1.2. Model Kazıklar

Deneylerde kullanılan model kazıklar kazık uzunluğu (L) 0.50 m ve 1 m, kazık çapı (D) 0.05 m olarak belirlenmiştir. Kazıkları imal etmek için alüminyum borulardan kalıplar hazırlanmıştır. Şekil 18’de gösterilen model kazıklar, beton ve çelik çubuklar (3 mm) kullanılarak hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan kazıkların donatı oranı %2.86’dır.

Tablo 3’te yerinde dökme betonarme kazıkların minimum donatıları verilmiştir.

Tablo 3. Yerinde dökme betonarme kazıkların minimum donatısı (EN 1536, 1999)

| Kazık kesit alanı, A                       | Boyuna donatı alanı, A <sub>s</sub> |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| $A \leq 0.5 \text{ m}^2$                   | $A_s \geq 0.5 \% A_c$               |
| $0.5 \text{ m}^2 < A \leq 1.0 \text{ m}^2$ | $A_s \geq 0.0025 \text{ m}^2$       |
| $A > 1.0 \text{ m}^2$                      | $A_s \geq 0.25 \% A_c$              |

TS3168'e göre yerinde dökme betonarme kazıklarda boyuna donatı en az 5 adet 14 mm çaplı demir olmalıdır. Donatı alanı, kazık kesit alanının % 0.8'inden küçük olmamalıdır. Boyuna donatı aralıkları betonun kolayca kesite yerleşmesine engellemeyecek şekilde olmalıdır. Enine donatı aralıkları en çok 150 ~ 200 mm olmakta ve spiral şeklinde konulmalıdır (Toğrul ve ark., 2003).

Tablo 4'te deneysel çalışmalarda kullanılan model kazıklara ait çap (D), uzunluk (L), birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ), poisson oranı ve elastisite modülü (E) değerleri verilmektedir.

Tablo 4. Model kazık özellikleri

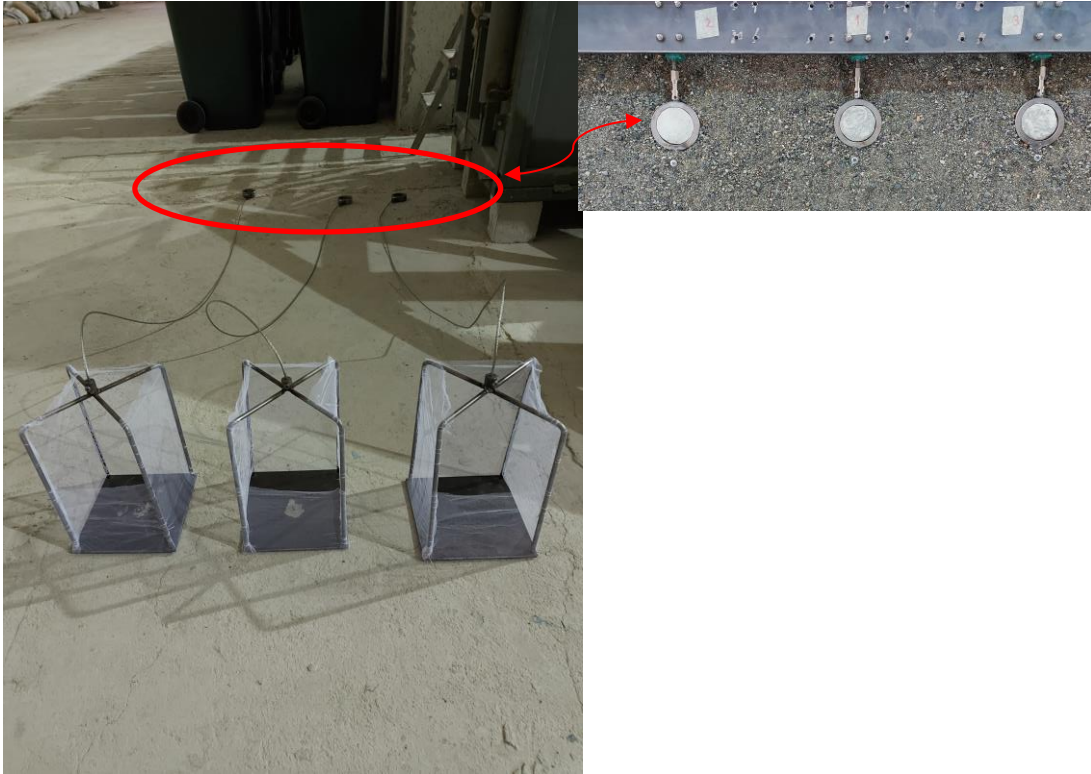
| Malzeme   | D (m) | L (m) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\nu$ | E (kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|-------|-------|-------------------------------|-------|------------------------|
| Betonarme | 0.05  | 0.50  | 20                            | 0.15  | $13 \times 10^6$       |
| Betonarme | 0.05  | 1     | 20                            | 0.15  | $13 \times 10^6$       |



Şekil 18. Deneylerde kullanılan model kazıklar

### 2.1.3. Model Kazık Yatay Yükleme Düzenegi

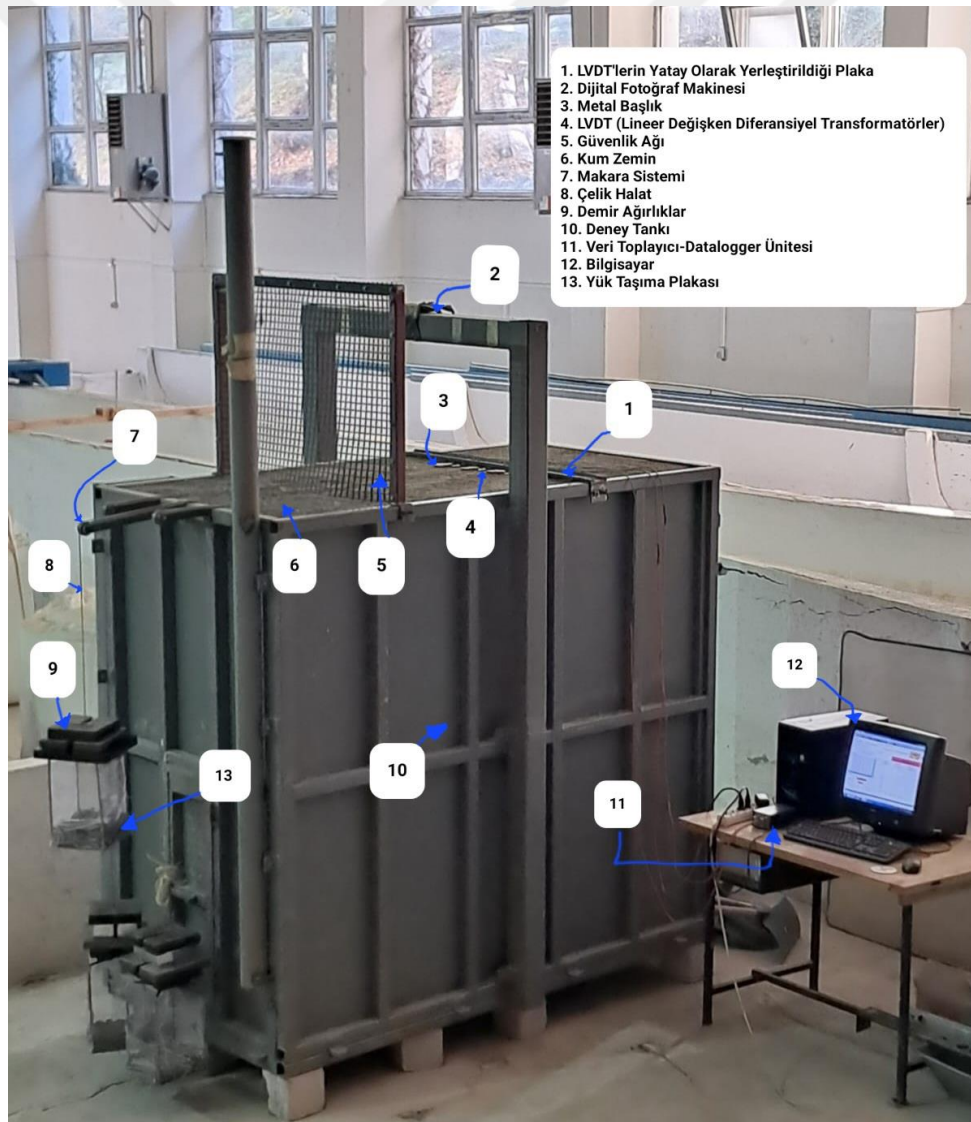
Deneylerde kullanılması için, çelik halatların bir ucu iç çapı 5 cm olan metal başlığa diğer ucu yük taşıma plakasına vidalar yardımıyla tutturulup takılmıştır (Şekil 19). Teker şeklindeki makaraların kullanıldığı makara sistemi deney tankının yatay yükleme yapılacak olan kenarında monte edilecek yerleri belirlenip deney sırasında istenilen mesafeler için takılıp sökülecek şekilde hazırlanmıştır. Makara sisteminden geçirilen çelik halatlar kazıkların yatay yüklenmesi için hazırlanmıştır. Deneylerde kazık sabitleme plakası kullanılarak model kazıkların dik olarak deney tankına yerleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Yerleştirilen model kazıkların dik olduğu su terazisi ile kontrol edilmiştir. Kazık sabitleme plakası model kazık deney tankına yerleştirildikten sonra çıkarılacaktır. Kazık sabitleme plakası; kazık çapı (D) kazık merkezinden diğer kazığın merkezine D, 3D ve 5D kazık aralıklarında hazırlanmıştır. LVDT'lerin yatay olarak yerleştirilmesi için kullanılan plakada istenilen aralıklarda yerleri belirlenmiştir. Her bir deney için LVDT'ler plakaya takılıp sökülür şeklinde hazırlanmıştır. Ayrıca bu plaka deney tankında işaretlenen yere takılıp çıkarılır şeklindedir. LVDT'lerin bilgisayar ile bağlantısı yapılarak deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 19. Yük taşıma plakası, metal başlıklar ve çelik halatla bağlantı

Model kazıklar için yapılan yatay yükleme deneyinin yapılması sırasında kullanılan yükler için demir ağırlıklar kullanılmıştır. Bu yükler, yük taşıma plakasına yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Deney yapılışı sırasında güvenlik açısından deney tankının belirlenen yerine güvenlik ağı monte edilmiştir. Deneylerde kumun istenilen rölatif sıklıkta sıkıştırılması için kompaksiyon cihazı kullanılmıştır. Deneylerde kumun deney tankına yerleştirilip boşaltılması sırasında ahşap merdiven kullanılmıştır. Deney sırasında fotoğraflar, fotoğraf makinesi ve telefon kamerası kullanılarak çekilmiştir.

Deneyler, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Model kazık yatay yükleme düzeneği Şekil 20’de görüldüğü gibi hazırlanmıştır.



Şekil 20. Model kazık yatay yükleme düzeneği

#### 2.1.4. LVDT (Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler)

Deneyler sırasında kazıklarda meydana gelen yatay hareketleri ölçmek için 3 adet LVDT kullanılmıştır. Deneyler için, farklı uzunluklara sahip LVDT'ler kullanılmıştır. Şekil 21'de LVDT'lerin yatay olarak yerleştirildiği plaka gösterilmiştir. Kazıklara yatay yük-deplasman değerlerinin ölçülmesi için kazık başlarında LVDT'ler kullanılmıştır.



Şekil 21. LVDT'lerin yatay olarak yerleştirildiği plaka

#### 2.1.5. Veri Toplayıcı-DATALOGGER Ünitesi

Deneylerde kullanılan datalogger ünitesi 4 kanal girişlidir (Şekil 22). Kazık hareketini belirlemek için 3 adet LVDT kullanılmıştır. Kazık hareketlerini belirlemek için yerleştirilen LVDT'lerden elde edilen veriler veri toplayıcı-DATALOGGER ünitesi aracılığıyla bilgisayar ortamına alınmıştır. Deneyler sırasında, deplasman verileri bilgisayar ortamında GeoGram yazılımı yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülmüştür.



Şekil 22. Veri toplayıcı-DATALOGGER ünitesi

#### 2.1.6. Kazık Sabitleme Plakası

Deneylerde deney tankına yerleştirilecek olan model kazıkların dik olarak yerleştirilmesi için kullanılan kazık sabitleme plakası Şekil 23'te verilmiştir. Model kazıkların dik olduğu su terazisi ile kontrol edilmiştir. Model kazıkların dik olarak yerleştirilmesi sonrasında deney tankındaki kum belirli seviyeye gelince kazık sabitleme plakası çıkarılıp deney tankına kum yerleştirilme işlemine devam edilmiştir.



Şekil 23. Kazık sabitleme plakası

### 2.1.7. Kompaksiyon Cihazı

Kum zemin, sıkı haldeki rölatif sıkılığında deney tankına yerleştirilmesi için kompaksiyon cihazı kullanılmıştır (Şekil 24). Deney tankı 5'er cm'lik tabakalar halinde yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Her bir kum tabakası yerleştirildikten sonra, BOSCH GBH 240 marka elektrikli kompaksiyon cihazıyla belirlenen tabaka kalınlığı elde edilene kadar sıkıştırılmıştır. Kompaksiyon cihazının uç kısmına 145 mm × 165 mm boyutlarında 30 mm kalınlığına sahip plaka monte edilmiştir. Bu plakalar farklı uzunluklarda iki adet kullanılmıştır.



Şekil 24. Sıkıştırma işlemi için kullanılan kompaksiyon cihazı

### 2.2. Kum Zemin

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler için kum malzeme kullanılmıştır. KTÜ Hidrolik Laboratuvarı'nda, kum malzeme 0.297 mm elek açıklığına sahip (elek no 50) elekten yıkanarak, elenmiş ve kurutulmuştur (Şekil 25). Kuruyan kum, kovalara konulmuştur (Şekil 26). Kurutulan kum zeminin, fiziksel ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır.



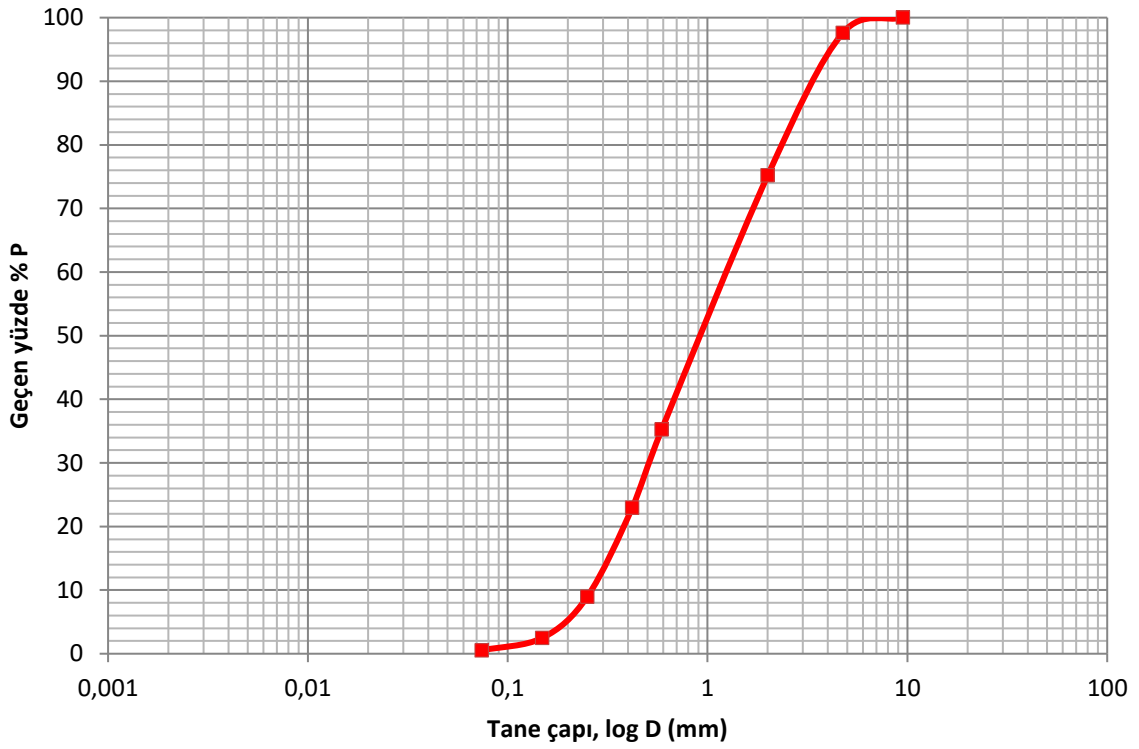
Şekil 25. Deneylerde kullanılan kumun yıkanması ve kurutulması



Şekil 26. Deneylerde kullanılan kum

### 2.2.1. Elek Analizi

Deneyleerde kullanılan kum zeminin zemin sınıfını belirlemek için, KTÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarına göre elde edilen granülometri eğrisi Şekil 27'de verilmektedir. Kum zeminin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre kötü derecelenmiş kum, SP olarak tanımlanmıştır. Elek analizi deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 27. Deneyleerde kullanılan kumun granülometri eğrisi

Tablo 5. Elek analizi sonuçları

| Granülometri Parametreleri   | Birim | Değer |
|------------------------------|-------|-------|
| Efektif çap, $D_{10}$        | mm    | 0.27  |
| $D_{30}$                     | mm    | 0.52  |
| $D_{60}$                     | mm    | 1.30  |
| Üniformluk katsayısı, $C_u$  | -     | 4.81  |
| Derecelenme katsayısı, $C_c$ | -     | 0.77  |
| Zemin Sınıfı                 | -     | SP    |

### 2.2.2. Piknometre Deneyi

Kum için piknometre deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda kumun dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s = 26.5 \text{ kN/m}^3$  olarak elde edilmiştir.

### 2.2.3. Rölatif Sıkılık Deneyleri

Deneyisel çalışmalar, hem gevşek hem de sıkı halde olmak üzere iki farklı rölatif sıkılıkta gerçekleştirilmiştir. Tane bir zeminin rölatif sıkılığını belirlenmek için, o zemine ait minimum ve maksimum boşluk oranlarının bilinmesi gerekmektedir. 400 mm  $\times$  400 mm  $\times$  100 mm boyutlarında çelik bir kap içerisinde rölatif sıkılık deneyleri yapılmıştır (Ateş, 2019). Rölatif sıkılık deneyleri KTÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Gevşek haldeki kum zeminin kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi için çelik kap içerisine hiçbir sıkıştırma yapmadan en yakın mesafe ayarlanarak kum zemin yerleştirilmiştir. Çelik kap içerisindeki kum miktarı hesaplanıp çelik kap hacmine bölünerek gevşek haldeki kuru birim hacim ağırlığı belirlenmektedir (Şekil 28).



Şekil 28. Gevşek haldeki kum Zemin için kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Sıkı haldeki kumun kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için çelik kap içerisine 5 tabakada kum serilerek yerleştirilmiştir. Her bir tabakadaki kum kompaksiyon cihazıyla sabit bir enerji ile sıkıştırılmıştır. Son tabaka serilip sıkıştırıldıktan sonra çelik kap içerisindeki kum zemin düzeltilmiştir. Yüzeyin düzgünlüğü için çelik kaptaki kum zemin su terazisi ile kontrol edilmiştir. Çelik kaptaki sıkı kum zemin miktarı hesaplanarak çelik kap hacmine bölünerek sıkı haldeki kuru birim hacim ağırlığı belirlenmektedir (Şekil 29).

Rölatif sıkılık deney sonuçları Tablo 6’da verilmektedir.



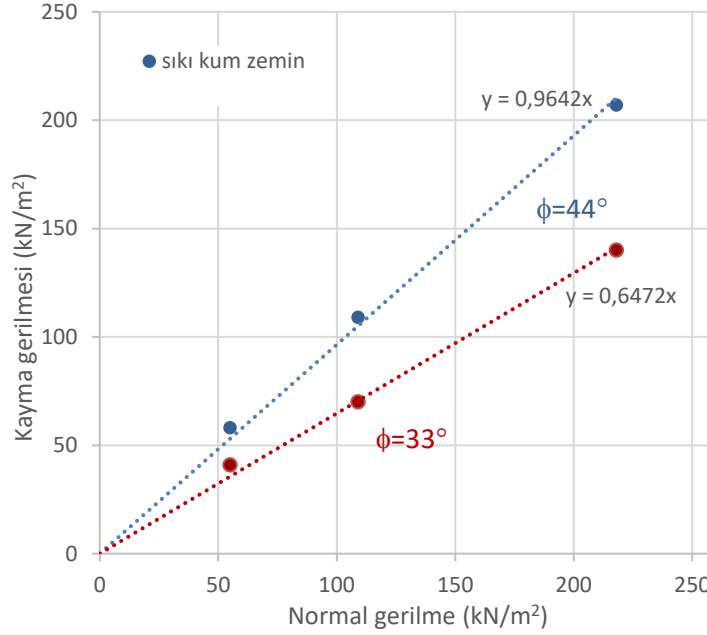
Şekil 29. Sıkı haldeki kum zemin için kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Tablo 6. Rölatif sıkılık deney sonuçları

| Özellik                                                    | Birim             | Değer |
|------------------------------------------------------------|-------------------|-------|
| Tane birim hacim ağırlığı, $\gamma_s$                      | kN/m <sup>3</sup> | 26.5  |
| Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{kmax}$        | kN/m <sup>3</sup> | 16.82 |
| Minimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{kmin}$         | kN/m <sup>3</sup> | 14.48 |
| Kuru birim hacim ağırlık, ( $D_r=0.35$ ), $\gamma_{k\%35}$ | kN/m <sup>3</sup> | 15.20 |
| Kuru birim hacim ağırlık, ( $D_r=0.70$ ), $\gamma_{k\%70}$ | kN/m <sup>3</sup> | 16.04 |
| Maksimum boşluk oranı, $e_{max}$                           | -                 | 0.83  |
| Minimum boşluk oranı, $e_{min}$                            | -                 | 0.57  |

#### 2.2.4. Kesme Kutusu Deneyi

Kum numunelere 60 mm × 60 mm boyutlarındaki kare kesitli kesme kutusunda gevşek ve sıkı halde yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Hem gevşek hem de sıkı durumdaki numuneler 55 kPa, 109 kPa, 218 kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında yatay yönde kesmeye tabi tutulmuştur. Şekil 30'da deney kumunun gevşek haldeki kayma mukavemeti açısı  $\phi = 33^\circ$ , sıkı haldeki kayma mukavemeti açısı  $\phi = 44^\circ$  olarak elde edilmiş grafik verilmiştir.



Şekil 30. Gevşek ve sıkı kum zemindeki kesme kutusu deney sonuçları

### 2.3. Deneyin Yapılışı

Kum zemin, hem gevşek ( $D_r=0.35$ ) hem de sıkı ( $D_r=0.70$ ) durumda, deney tankı içerisine 5 cm'lik tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Deney tankının iç yüzeyleri 5 cm aralıklı yatay çizgiler ile ölçeklendirilmiştir. Her bir tabaka için gerekli olan kum ağırlığı hesaplanarak tartılıp hazırlanmıştır.

Gevşek kum halindeki, 5 cm' lik tabaka için gerekli kum ağırlığı kumun sıkışmasının önlenmesi için en yakın mesafeden deney tankına boşaltılmış ve deney tankına zemin yüzeyine baskı yapılmaksızın düzeltilmiştir. Deney tankı yüzeylerinde bulunan yatay çizgilerle tabaka sınırları kontrol edilmiştir. Sıkı kum durumunda ise gevşek durumdaki işlemlere ilave olarak zemin tabakası kompaksiyon cihazıyla kontrollü bir şekilde sıkıştırılmıştır. Deney tankının yüzeylerindeki yatay çizgilerle tabaka yüksekliği seviyesine gelmesi sağlanmıştır. Hem gevşek hem de sıkı durumda yerleştirilen kumun her bir tabaka kalınlığı deney tankının yüzeylerinde bulunan yatay çizgilere göre kontrol edilmiştir. Deney tankına kum yerleştirilme işlemi sırasında deney tankının belirli yerlerine küçük kaplar konulmuştur. Deney bitiminde deney tankı boşaltılırken kaplardaki kum miktarı tartılıp kumun birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Bu işlemler sonucunda deney tankına yerleştirilen kumun istenen rölatif sıklıktaki birim hacim ağırlığını sağladığı görülmüştür.

Kazık ucunun oturacağı zemin yüzeyi seviyesinde oluncaya kadar kum deney tankına yukarıda belirtilene göre doldurulmuştur. Bu seviyeye gelindiğinde deney tankında zemin yüzeyinin düzlüğü her iki doğrultuda da su terazisi ile kontrol edilmiştir. Kazık sabitleme plakası deney tankında daha önce belirlenen yere yerleştirilmiştir. Tek model kazık veya kazık gruplarına ait kazıklar için model kazığın zemin içerisinde yerleştirilmesinin ardından su terazisi ile model kazığın dikliği kontrol edilmiştir. Model kazığın yerleştirilmesinin ardından deney tankına yerleştirilen kum zeminin özellikle kazık çevresinde yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Kum zeminin deney tankına yerleştirilme işlemine devam edilmiştir. Deney tankı yüzeyine yakın yerde kazık sabitleme plakası deney tankından çıkarılmıştır. Kazığın tamamı gömülüdür. Deney tankı üst yüzeyinin tamamı doluncaya kadar kum zemin yerleştirilmiştir. Deney tankının üzerinde belirtilen yerlere makara sistemleri monte edilmiştir. LVDT'lerin yatay olarak yerleştirildiği plaka ve güvenlik ağı deney tankında belirlenen yerlerine takılmıştır. Model kazıklara metal başlıklar takılmıştır. Metal başlıkların ucuna çelik halatlar takılıp vidalanmıştır. Çelik halatların diğer ucu da yük taşıma plakasına vidalar yardımıyla tutturulup takılmıştır. Deneyler sırasında

yatay yükleme yapılacağı sırada çelik halat makara üzerinden geçirilmiştir. Deney sırasında model kazıklara yük taşıma plakasına yerleştirilen demir ağırlıklarla yatay yüklemeler yapılmıştır. Kazık grubundaki ortadaki kazık ölçüm kazığı, yandaki kazıklar ise etkileşim kazığıdır. Kazıklarda aynı deplasman sağlanması için ortadaki kazığa yandaki kazıklardan farklı yatay yük yüklenmiştir. Kazık grupları için yapılan yatay yüklemeler her bir kazık için aynı anda yapılmıştır. Yatay yükleme deneylerinde yatay hareketler LVDT'ler yardımıyla ölçülmüştür. Deney bitiminde LVDT'lerden alınan veriler veri toplayıcı- DATALOGGER ünitesi cihazına aktarılmıştır. Deplasman verileri bilgisayar ortamında GeoGram yazılımı yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Her deney sonucunda var olan veriler kullanılarak kazık başı yanal yük- yanal ötelenme ilişkileri elde edilmiştir. Her bir deney sonrasında deney tankının içindeki kum boşaltılıp yapılacak deney için yukarıdaki işlemler tekrarlanarak deney tankının içine kum yerleştirilerek deneyler yapılmıştır.

#### 2.4. Deney Programı

Deneysel çalışmalar, kum zemin içerisinde kazık uzunluklarının tamamı kum zeminde gömülü olan yatay yüklere maruz kalan kazıklarla yapılmıştır. Tablo 7'de deney programına yer verilmiştir.

Tablo 7. Deneysel çalışmalara ait deney programı

| Kazık çapı<br>(m, D) | Kazık<br>sayısı | Kazıklar<br>arası mesafe | Kazık boyu<br>(m, L) | Rölatif Sıklık<br>(D <sub>r</sub> ) |
|----------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 0.05                 | 1               | -                        | 0.5                  | %35                                 |
| 0.05                 | 1               | -                        | 0.5                  | %70                                 |
| 0.05                 | 1               | -                        | 1                    | %35                                 |
| 0.05                 | 1               | -                        | 1                    | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | 5D                       | 0.5                  | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | 3D                       | 0.5                  | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | D                        | 0.5                  | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | 5D                       | 0.5                  | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | 3D                       | 0.5                  | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | D                        | 0.5                  | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | 5D                       | 1                    | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | 3D                       | 1                    | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | D                        | 1                    | %35                                 |
| 0.05                 | 3               | 5D                       | 1                    | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | 3D                       | 1                    | %70                                 |
| 0.05                 | 3               | D                        | 1                    | %70                                 |

## 2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yapılan model deney sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Plaxis 3D programı kullanılarak yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara benzer olarak, deney tankı, yükleme koşulları, kazık özellikleri ve malzeme özellikleri Plaxis 3D programı ile modellenmiş olup deneye bağlı kalınmıştır.

### 2.5.1. Deneysel Çalışmaların Plaxis 3D Programı ile Analizleri

Çeşitli geoteknik uygulamalarında, deformasyon ve stabilite analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan Plaxis 3D, üç boyutlu bir sonlu elemanlar programıdır.

Ön işlemci olan Input (Girdi) problem geometrisini tanımlamak, zemin ve yapısal elemanları modellemek, bu elemanların malzeme özelliklerini atamak, yükleme tipi ve sonlu elemanlar ağını oluşturmak üzere tasarlanmıştır.

Ön işlemci olan Output (Çıktı) üç boyutlu görünümde veya istenilen doğrultularda alınan kesitlerde, hesap sonuçlarını incelemek için olanak sağlamaktadır.

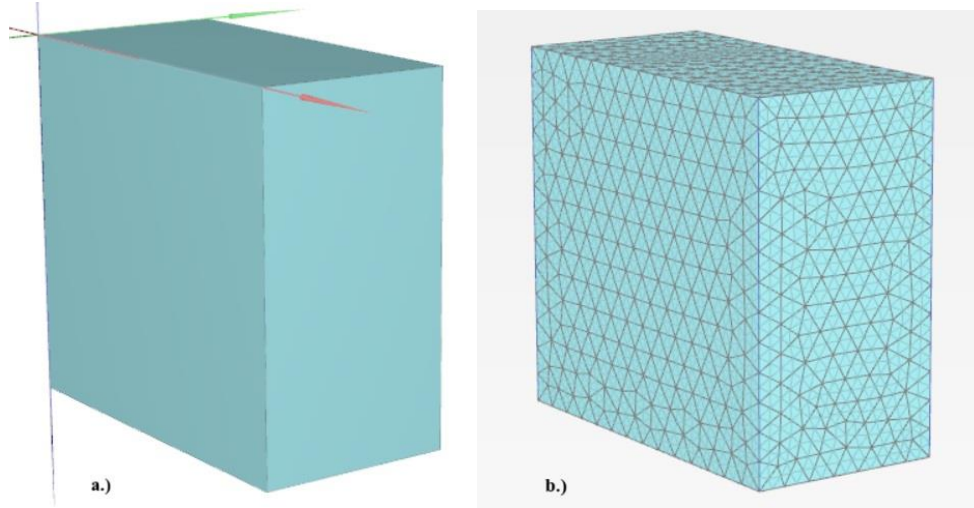
Sıkı ve gevşek zemin koşullarında, kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin kazık gruplarındaki kazıklar arasındaki etkileşimin araştırılması için, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılmıştır.

Kum zemin içerisine yerleştirilen model kazık grubunda;

- Kazıklar arası mesafe,
- Zeminin rölatif sıkılığı,
- Kazıkların L/D oranı,
- Yatay yük durumunun

taşıma güçleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, Plaxis 3D programı ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan deney tankının geometrik modeli üç boyutlu olarak Plaxis 3D programında oluşturulmuştur. Kuvvet değerleri kiloNewton (kN), uzunluk değerleri için metre (m) birimleri, aktif birim sistemi olarak seçilmiştir. Kum zemin için geometrik modelin genişliği 0.995 m×2 m ve toplam zemin yüksekliği 1.84 m boyutlarında seçilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. Kum zemin için a) geometrik model, b) sonlu elemanlar ağı

Plaxis 3D programında, soil (zemin), structure (yapı), mesh (ağ), ve stage construction (inşaat aşaması) olmak üzere model dört farklı adımda tanımlanmıştır.

- Soil (Zemin) Sekmesi

Modele ilk önce zemin (soil) sekmesi ile başlanır. Yapılan analizlerde zemin cinsi deneysel çalışmalarla aynı seçilmiştir.

Plaxis programında kohezyonsuz zeminler için efektif kohezyon değeri analiz aşamasında programın hata vermemesi için kohezyon değerini küçük bir değer seçilebilir. Yıkılmış elenmiş ve idealize edilerek kum zemin için böyle bir değer girmek zorunda olmak, kum zeminde küçük bir çekme kuvveti oluştursa da tension cut-off seçeneği sıfır girerek bu etki göz ardı edilmektedir.

Zeminin kayma mukavemet açısı, klasik zemin mekaniği deneyleriyle elde edilmiştir. Kum zeminlerdeki dilatasyon davranışı hem zeminin sıklığına hem de kayma mukavemet açısına bağlı bir parametredir. Plaxis 3D programında dilatasyon açısı  $\psi = \phi - 30^\circ$  eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Poisson oranı, genellikle 0.2 ile 0.4 aralığında bir değer almaktadır (Plaxis 3D Reference Manuel). Hardening soil model, tüm uygulamalarda yumuşak zeminler ve daha sert zemin tipleri için genel davranışı gerçekçe yansıtmaktadır. Kum için Hardening Soil malzeme modeli seçilmiştir (Tablo 8). Deneysel çalışmada kazık betonarme olduğundan Plaxis 3D programında kazık malzeme modeli Concrete seçilerek uygun olarak değerler belirlenmiştir (Tablo 9).

Tablo 8. Kum zemine ait Hardening Soil malzeme parametreleri

|                                                    | <b>Gevşek Kum Zemin</b> | <b>Sıkı Kum Zemin</b> |
|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Malzeme Modeli                                     | Hardening Soil          | Hardening Soil        |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )       | 15.2                    | 16.04                 |
| $E_{50}^{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )         | 14000                   | 19000                 |
| $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 14000                   | 18500                 |
| $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )  | 42000                   | 57000                 |
| m                                                  | 0.8                     | 0.8                   |
| $c'_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )             | 0.7                     | 0.3                   |
| $\phi$ (°)                                         | 33                      | 44                    |
| $\psi$ (°)                                         | 3                       | 14                    |
| $v'_{\text{ur}}$                                   | 0.2                     | 0.2                   |
| $K_0^{\text{nc}}$                                  | 0.4554                  | 0.3053                |
| $R_f$                                              | 0.96                    | 0.91                  |

Tablo 9. Kazık elemana ait Concrete malzeme parametreleri

|                                              | <b>Kazık</b>       |
|----------------------------------------------|--------------------|
| Malzeme Modeli                               | Concrete           |
| Drenaj tipi                                  | Non-porous         |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 24                 |
| $E_{28}$ (kN/m <sup>2</sup> )                | 13×10 <sup>6</sup> |
| $\nu$                                        | 0.15               |
| $f_{c,28}$ (kN/m <sup>2</sup> )              | 21500              |
| $f_{c0n}$                                    | 1                  |
| $f_{cfn}$                                    | 1                  |
| $f_{cun}$                                    | 0.9                |
| $G_{c,28}$ (kN/m <sup>2</sup> )              | 13                 |
| $\phi_{\text{max}}$ (°)                      | 25                 |
| $\psi$                                       | 0                  |
| $\gamma_{fc}$                                | 1                  |
| $f_{t,28}$ (kN/m <sup>2</sup> )              | 21500              |
| $f_{tun}$                                    | 0.8                |
| $G_{t,28}$ (kN/m <sup>2</sup> )              | 13                 |
| $\gamma_{ft}$                                | 1                  |
| $\epsilon_{cp}^p$                            | -0.01              |

- Structure (Yapı) Sekmesi

Soil (zemin) sekmesinin ardından yapısal elemanlar ve yükleme tipinin belirlendiği sekme olan structure (yapı) sekmesine geçilir. Yapısal eleman olarak, gömülü kazık, ankraj, kiriş gibi arayüzler kullanılmaktadır. Yanal yüklü kazık davranışının modellendiği bu çalışmada, Polycurve, surface ve extrude yapılarak kazık yapılmıştır.

Yapısal elemanların tanımlanmasından sonra deneysel çalışmalara göre uygun yükleme tipinin seçilmesi gerekmektedir. Plaxis programında noktasal, çizgisel ve yayılı olarak yüklemeler bulunmaktadır. Analizler bu yükleme tiplerinde yük veya deplasman kontrollü olarak yapılabilmektedir.

Modelde yer alan yapısal elemanlara noktasal olarak yatay yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

- Mesh (Ağ) Sekmesi

Sonlu elemanlar analizi için, zemin ve yapısal elemanların tanımlanması, boyutların, malzeme özelliklerin girilmesi, yükleme tipinin belirlenerek zemin ortamının, sonlu sayıdaki elemanlara ayrılması işlemleri yapılmalıdır. Model hazırlandıktan sonra mesh (ağ) sekmesi seçilerek modelin üç boyutlu elemanlara bölünmesi gerçekleştirilmektedir.

Üç boyutlu problem, ağı görüntüleme seçeneği ile üç boyutlu halde modelin sonlu elemanlara bölünmüş hali görüntülenmektedir. Sonlu sayıdaki düğüm noktalarından kullanıcı tarafından düğüm noktaları seçilir. Sadece seçilen bu noktalara ait değerler grafik formunda elde edilmektedir.

Modelde seçilecek nokta ya da noktalar deneysel çalışmalardaki duruma benzer olarak, kazık başı üst noktası olarak belirlenmiştir.

- Stage Construction (İnşaat Aşaması) Sekmesi

Modelin analiz aşamasında, gerçek bir problemin inşası sırasında olduğu gibi aşama aşama analizler yapılmaktadır. Mevcut zemin koşulu için, başlangıç gerilme durumu ilk olarak seçilmektedir. Plaxis 3D programında, başlangıç gerilme durumu,  $K_0$  procedure seçeneği kullanılarak tanımlanmaktadır.  $K_0$  procedure seçeneği, zemin yüzeyinin yatay olduğu, tüm zemin tabakalarının birbirine paralel olduğu durumlar için kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında, başlangıç gerilme koşulu tanımlanmıştır. Analiz aşamalarının ilkinde zemin ve kazık aktif hale getirilmiştir. İkinci aşamada da zemin ve kazık aktif olarak yatay yüklerin uygulanması tanımlanmıştır. Başlangıç için  $K_0$  procedure, birinci ve ikinci aşama için plastic analiz seçeneği kullanılarak analiz edilmiştir.

## 2.6. Parçacık Görüntü Hız Ölçümü (PIV)

Geoteknik mühendisliğinde zemin deformasyonlarının dijital görüntü korelasyonu kullanılarak parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV) analizi deneylerde kullanılmaktadır (Sutton ve ark. 1983; Adrian 1991; Sutton ve ark. 2000). Son 20 yıldır parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV) yöntemi geoteknik mühendisliğinde fiziksel deneylerde yer değiştirmeleri belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Rui ve ark. 2016; Yan ve ark. 2018; Yang ve ark. 2020). Parçacık görüntü hız ölçümü (PIV), ilk olarak akış görselleştirmesi için geliştirilen bir hız ölçüm prosedürüdür (Harshani ve ark. 2016; Ma ve ark. 2020; Yan ve ark. 2022). Bu yöntem, kum, çakıl ve kuvars gibi granüler malzemelerin geoteknik deneylerde dijital görüntü dizilerinden yer değiştirme verilerini toplamak için geliştirilmiştir (Lueptow ve ark. 2000; Jain ve ark. 2002).

Çalışmada yatay yükler altındaki kazıkların yatay hareketliliğin incelenmesi için PIVlab yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında çekilen fotoğraflar parçacık görüntülü hız ölçüm yöntemi (PIV) ile analiz edilerek zeminde oluşan yer değiştirmeler gözlenmiştir. Analizleri yapabilmek için bir kamera deney tankının üzerinde bulunan demire sabitlenerek takılmıştır. Kazıklara yatay yüklemeler yapıldığı ilk andan itibaren belirli aralıklarla resimleri çekilmiştir. Daha sonra bu resimler MATLAB programında çalıştırılan PIVlab yazılımı ile analiz edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kazıklar genellikle grup halinde bulunurlar. Kazık grubundaki etkileşimin incelenmesi için öncelikle tek kazıklara ardından kazık gruplarına deneyler yapılmıştır. Bu bölümde kum zemin içerisine düşey yerleştirilen kazıkların yatay yükler altındaki kazıklar arası etkileşimi incelenmiştir. Deneysel çalışmaların ardından sonlu elemalar yöntemiyle deneysel çalışmalar modellenerek incelenmiştir. Deney düzeneğinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin ve kazık özellikleri ile büyük çaplı kazıkların etkileşimin araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmıştır.

#### 3.1. Deneysel Bulgular

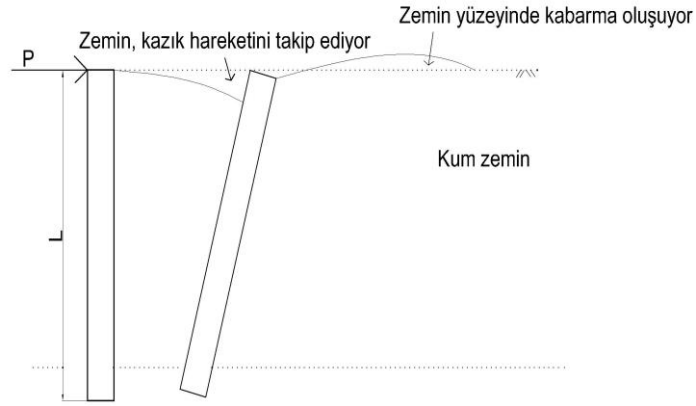
Hem tek kazıklara hem de kazık gruplarına yapılan deneylerde, farklı rölatif sıklıkta aynı çapa sahip, farklı uzunluktaki kazık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kazık gruplarına yapılan deneylerde, farklı kazıklar arası mesafe kullanılarak deneyler yapılmıştır. Tüm deneyler, kazık boylarının tamamının gömülü olduğu serbest başlı düşey kazık olarak kullanılmıştır.

Tek kazıklara ve kazık gruplarına yapılan deneyler zeminin yüzeyinden etkiyen yanal yükler altında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda laboratuvar deneylerinin sonuçları iki alt başlık altında sunulmuş ve irdelenmiştir.

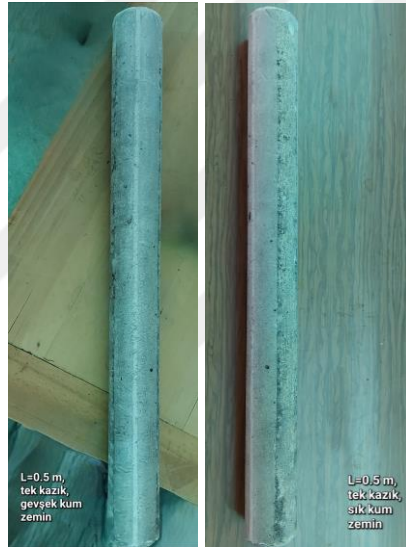
##### 3.1.1. Tek Kazıklara Yapılan Deneyler

Aynı çapa ( $D=0.05$  m) sahip tek kazıkların kazık uzunlukları  $L=0.5$  m ve  $L=1$  m olan hem gevşek hem de sıkı kum zeminde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde kazık serbest başlı olarak ve kazık boyunun tamamı kum zemine gömülü halde deneyler yapılmıştır.

$L=0.5$  m olan kazığın hem gevşek hem de sıkı durumunda, model kazıkta kırılma görülmemiş ve kısa kazık gibi davranış göstermiştir. Kazıklar geoteknik göçmeye uğramışlardır. Kazık baş kısmı, yer değiştirmenin yanı sıra aynı zamanda dönmeye de uğradığı, kazık alt uç kısmında da yer değiştirme ve dönme olduğu görülmüştür (Şekil 32).

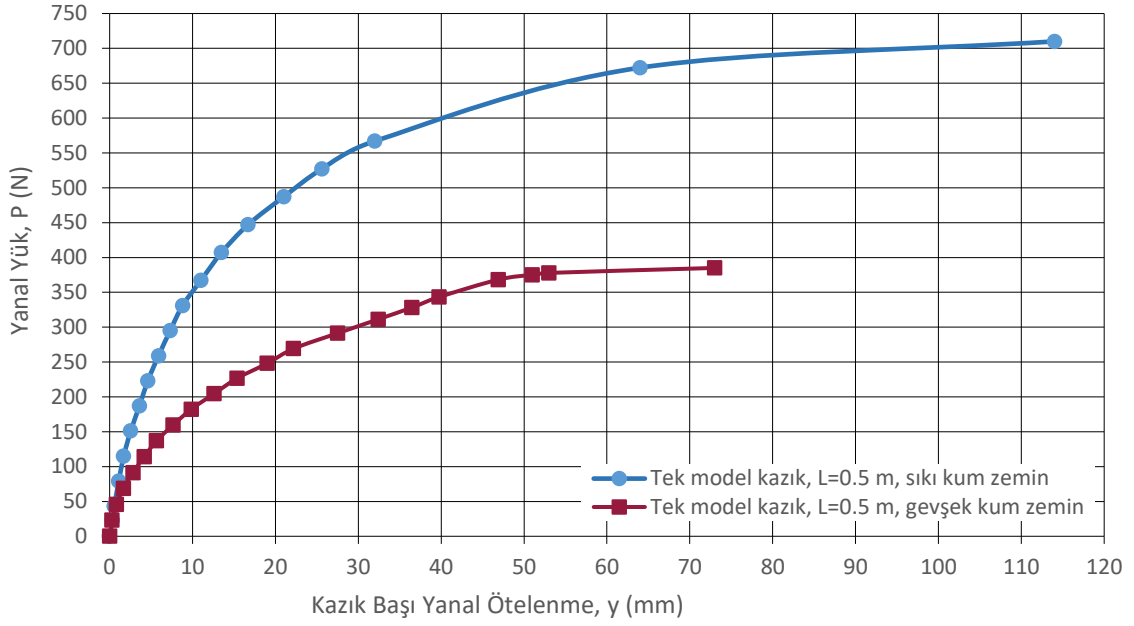


Şekil 32. Yatay yüke maruz  $L=0.5$  m olan kazığın davranışı (a) şematik görünüş



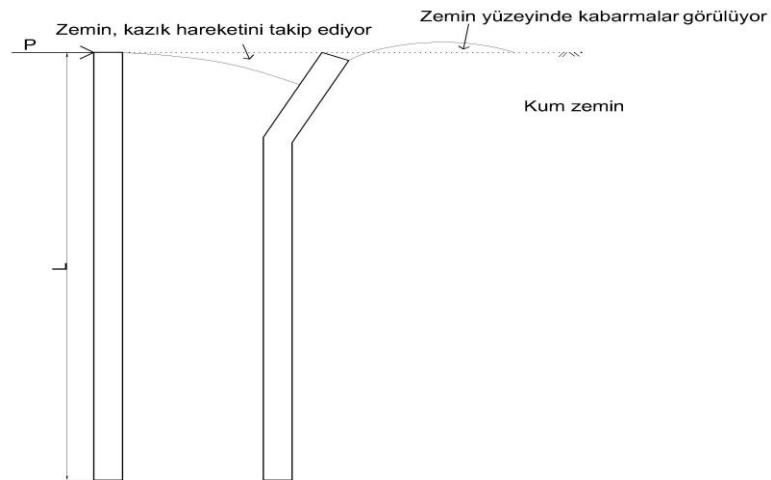
Şekil 32. Yatay yüke maruz  $L=0.5$  m olan kazığın davranışı (b) gevşek ve sıkı kum zemindeki kazığın deney sonrası fotoğrafları

Tek kazıklara ( $L=0.5$  m) yapılan deneyler sonucunda yanal yük taşıma kapasitesine karşılık, kazık başında meydana gelen deplasman değerleri incelendiğinde Şekil 33'teki grafik elde edilmiştir. Şekil 33'deki grafik incelendiğinde  $L=0.5$  m olan kazığın sıkı kum zemin durumunda, gevşek kum zemin durumundaki yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin yaklaşık iki katı olduğu görülmektedir.



Şekil 33. Tek model kazık (L=0.5 m) yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek ve sıkı kum)

L=1 m olan kazığın hem gevşek hem de sıkı durumunda, model kazık uzun kazık gibi davranış göstererek kazıkta kırılma meydana gelmiştir. L=1 m olan tek kazığın, gevşek kum zeminde kazığın kazık baş uç kısmından 39 cm aşağıda ve sıkı kum zeminde ise kazık başının uç kısmından 26 cm aşağıda kazığın kırılan kısmı ölçülmüştür. Kazıklar yapısal olarak göçmeye uğramışlardır. Kazık baş kısmı, yer değiştirmenin yanı sıra aynı zamanda dönmeye de uğradığı, kazık alt uç kısmında ise yer değiştirme ve dönme oluşmadığı görülmüştür (Şekil 34).

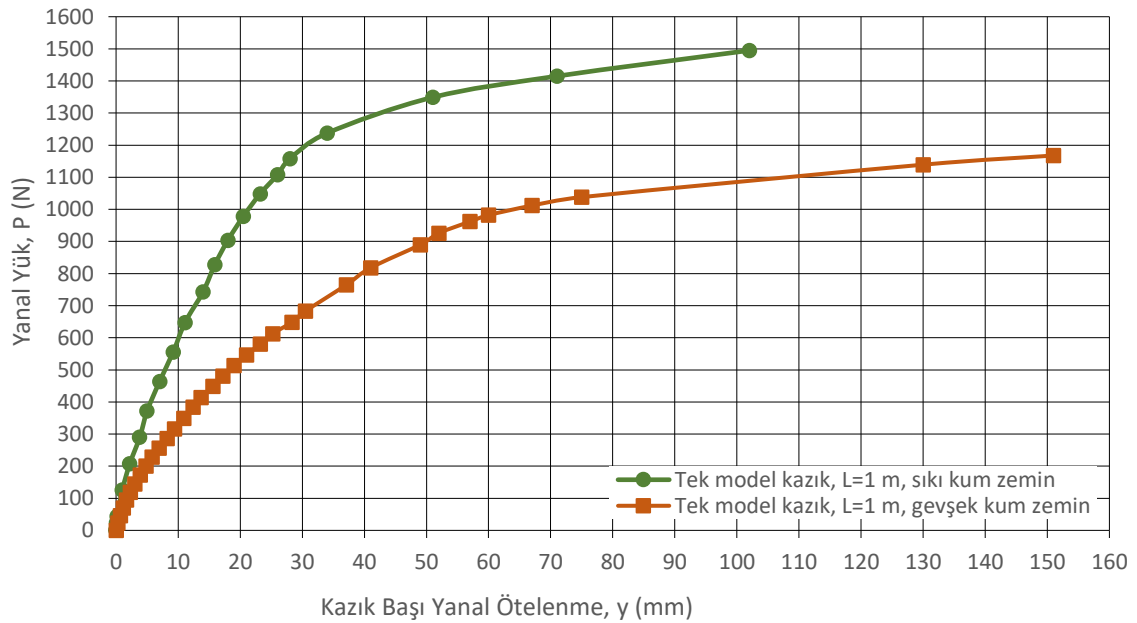


Şekil 34. Yatay yüke maruz L=1 m olan kazığın davranışı (a) şematik görünüş



Şekil 34. Yatay yüke maruz  $L=1$  m olan kazığın davranışı (b) gevşek ve sıkı kum zeminde kazığın deney sonrası fotoğrafları

Tek kazıklara ( $L=1$  m) yapılan deneyler sonucunda yanal yük taşıma kapasitesine karşılık, kazık başında meydana gelen deplasman değerleri incelendiğinde Şekil 35'teki grafik elde edilmiştir. Şekil 35'teki grafik incelendiğinde  $L=1$  m olan kazıkta yanal yük taşıma kapasitesi değerlerinin gevşek kum zemin durumundaki değerlerin bir buçuk katı kadar değerlerin sıkı kum zemin durumunda olduğu tespit edilmektedir.



Şekil 35. Tek model kazık ( $L=1$  m) yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek ve sıkı kum)

Şekil 33 ve Şekil 35'teki grafikler incelendiğinde hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki yanal yük-yanal ötelenme ilişkilerinin non-lineer bir davranış sergilediği görülmektedir. Sıkı kum zemin durumunda yanal yük-yanal ötelenme eğrilerinin daha dik olmasının bu davranışın belirgin bir şekilde olduğunu göstermektedir. Zemin sıkılığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi görülmektedir.

Broms (1964b) yönteminde tek kazık için kohezyonsuz zeminlerde serbest başlı kısa ve uzun kazıklarda sınır yükler belirlenmiştir. Broms yöntemi kullanılarak deneylerdeki tek kazığa ait sınır yükler Tablo 10'da verilmiştir. Deney çalışmalarındaki sınır yükleri yatay yük- deplasman grafiğinin log-log yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kısa kazıklarda Broms yöntemi (1964b) ile bulunan sınır yüklerin deneysel çalışmadan elde edilen sınır yüklerle uyumlu olduğu görülmüştür. Uzun kazıklarda ise Broms yöntemi (1964b) ile elde edilen sınır yüklerin, deneysel çalışmadaki değerlere göre yaklaşık %35-40 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 10. Tek kazıklara ait sınır yükler

|     | Broms (1964b)    |                | Deneysel Çalışma |                |
|-----|------------------|----------------|------------------|----------------|
|     | Sınır Yük        |                | Sınır Yük        |                |
| L/D | Gevşek kum zemin | Sıkı kum zemin | Gevşek kum zemin | Sıkı kum zemin |
| 10  | 354.0 N          | 612.0 N        | 350.0 N          | 550.0 N        |
| 20  | 644.0 N          | 908.0 N        | 1075.0 N         | 1400.0 N       |

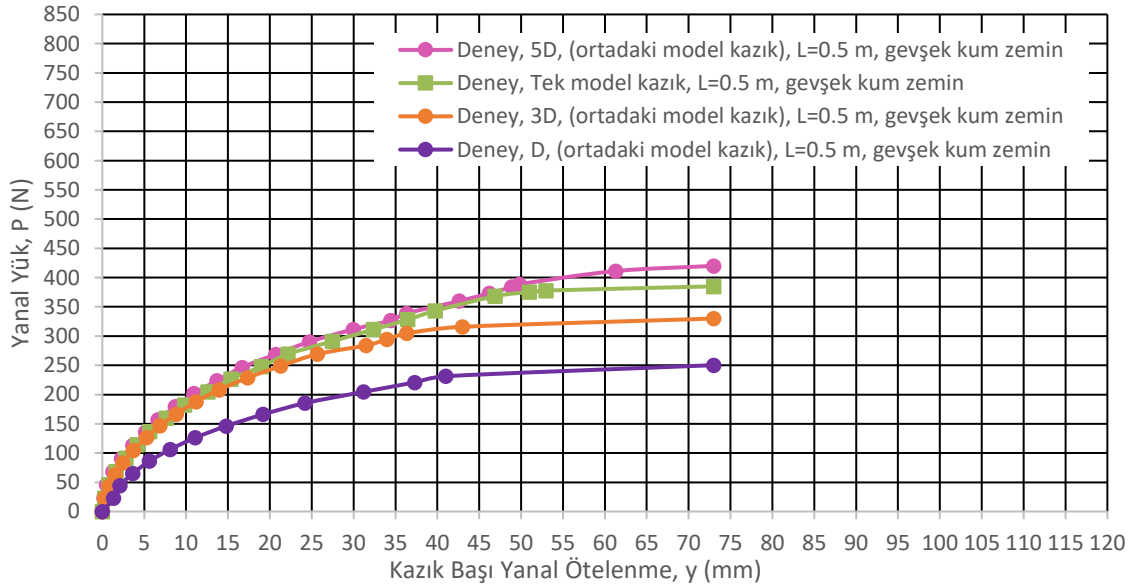
### 3.1.2. Kazık Gruplarına Yapılan Deneyler

Kazıklar genellikle grup şeklinde olup tek kazığın davranışına göre daha farklı yük deformasyon davranışı sergilemektedirler. Grup kazık davranışına zemin ve kazık özelliklerine ek olarak kazık grubunu oluşturan kazık sayısı, kazıklar arası uzaklıkları, kazık başlığının rijitliği ve zemin yüzeyi ile ilişkisi etkilidir.

1×3 model kazık grubunda yapılan deneylerin tamamı serbest başlı olarak yapılmıştır. Kazık çapı, D olan kazıkların kazık merkezinden diğer kazık merkezine mesafe 5D, 3D ve D olarak belirlenmiştir. D=0.05 m olan L/D=10 ve L/D=20 olan kazıklar deneylerde kullanılmıştır. Kazık gruplarında yapılan deneyler, farklı kazık uzunluğunda, farklı kazıklar arası mesafede ve farklı rölatif sıkılıkta gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm deneylerde serbest başlı düşey kazık ve kazık boyunun tamamının kum zemin içerisine gömülü olduğu ve kazıklara zemin yüzeyinden yatay yükler uygulanmıştır. 1×3 model kazık grubu

deneylerdeki (1 no'lu kazık) ortadaki model kazık dikkate alınarak grup içindeki kazıklar arasındaki etkileşimin incelenmesi için tek kazık ile karşılaştırma yapılmaktadır. Kazık gruplarındaki tüm deneylerde kazıklara aynı anda yatay yükleme yapılmıştır. Deneylerde yatay yüke maruz kalan kazıkların kazıklar arası etkileşimlerini incelemek için tek kazık ve kazık grubundaki 1 no'lu kazık (ortadaki model kazık) dikkate alınarak yanal yük-deplasman grafikleri çizilmiştir.

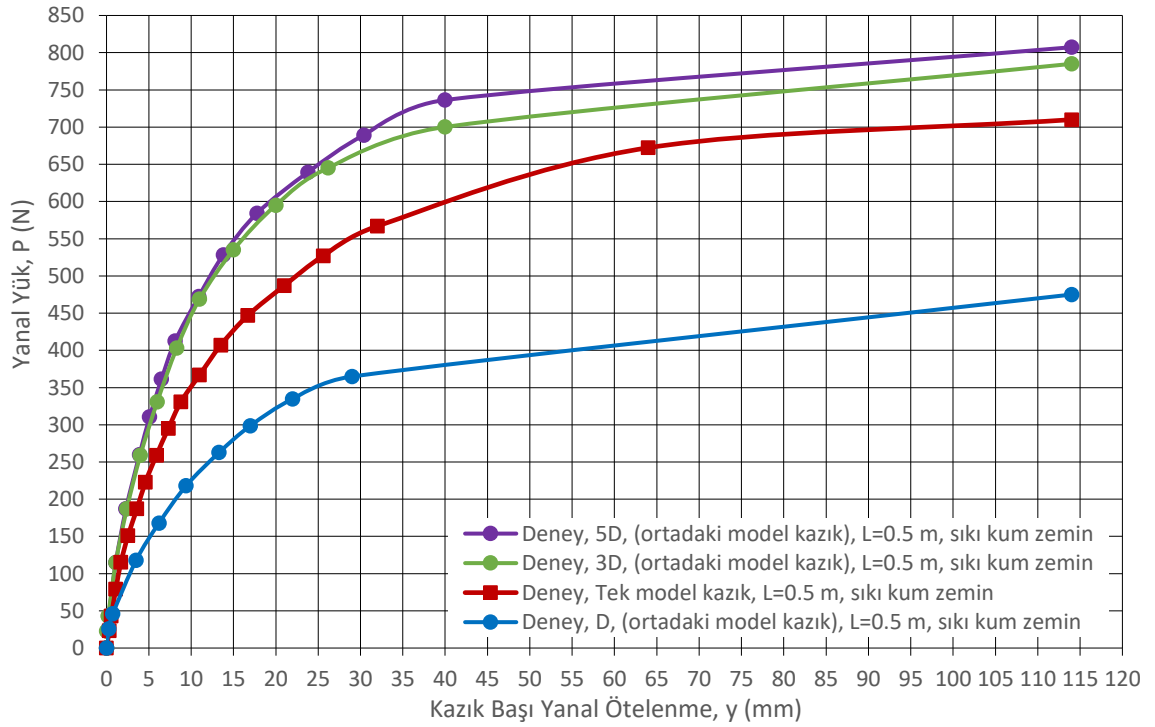
Şekil 36'da gevşek kum zemine ait  $L=0.5$  m olan tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D, D kazıkların yük-deplasman grafiği verilmiştir.  $L=0.5$  m olan kazıklardaki kazıklar arası mesafenin 5D olduğu durumdaki kazık grubundaki ortadaki ölçüm kazığı incelendiğinde yanal yük-deplasman eğrisinin tek kazık gibi olduğu görülmüştür. Gevşek kum zemin durumunda tek kazık ile  $L=0.5$  m olan kazıklardaki 5D mesafesindeki kazıkların karşılaştırılmasıyla etkileşimin olmadığı tespit edilmiştir. Zemin yüzeyindeki kabarmadan dolayı 5D mesafedeki ortadaki kazık deplasman değerlerinin artmasıyla tek kazıktan daha fazla yanal yüklere maruz kalmışlardır. Kazıklar arası 3D mesafede ortadaki ölçüm kazığının yanal yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, tek kazığa göre az da olsa etkileşimin olduğu tespit edilmiştir. Kazıklarla arası D mesafesinde  $L=0.5$  m olan kazıklardaki ortadaki ölçüm kazığının etkileşimde olduğu görülmüştür.



Şekil 36. Tek kazık ile kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=0.5$  m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

Şekil 37’de sıkı kum zemine ait  $L=0.5$  m olan tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D, D kazıkların yük-deplasman grafiği verilmiştir. Tek kazık ile  $L=0.5$  m olan kazıklardaki 5D mesafesinde karşılaştırma yapıldığında etkileşimin olduğu görülmüştür. Kazıklar arası mesafenin 3D olduğu ortadaki ölçüm kazığının incelenmesi sonucunda tek kazığa göre kazığın aynı deplasmanlarda daha fazla yatay yüklere maruz kaldığı belirlenmiştir. Ortadaki ölçüm kazığının tek kazığa göre etkileşiminin olduğu görülmüştür. Kazıklar arası D mesafede yapılan yatay yüklü deneyler sonucunda ortadaki ölçüm kazığının etkileşimde olduğu görülmüştür.

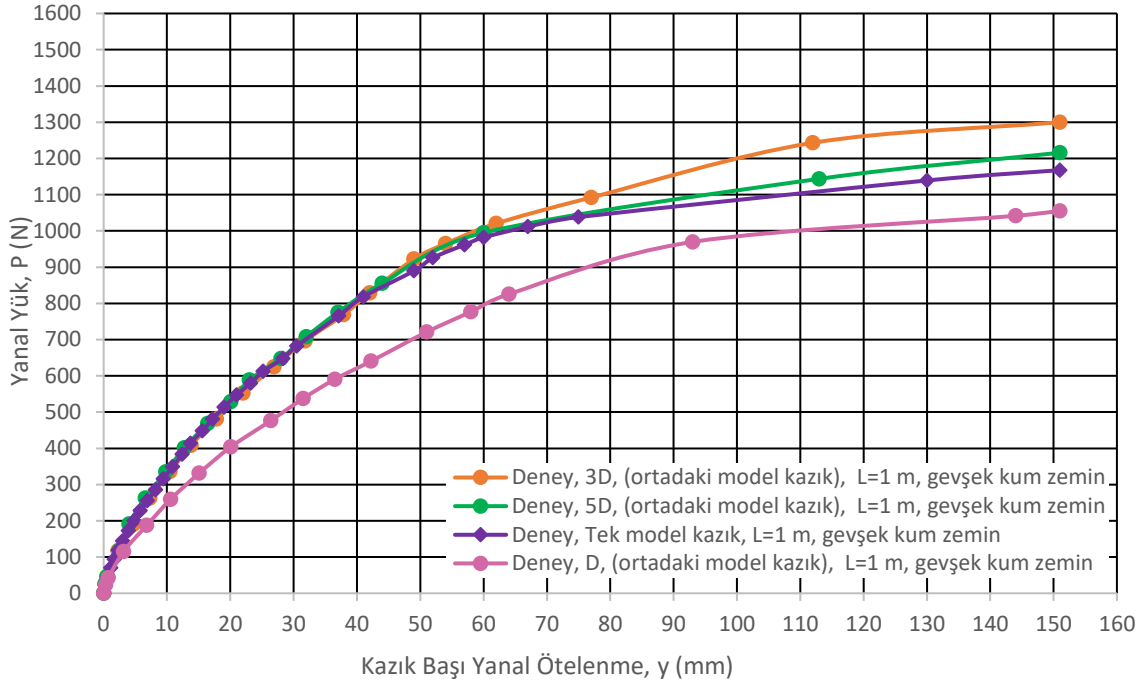
Hem gevşek kum hem de sıkı kum zeminde,  $L=0.5$  m olan tek kazık ve kazık grubunda kazıklar arası mesafenin 5D, 3D ve D olduğu durumdaki kazıklar geoteknik göçmeye uğramıştır. Bu kazıklar kısa kazık davranışı göstererek hem kazık baş uç kısmı hem de kazık alt uç kısmı, yer değiştirme yaparak dönmeye de uğramıştır.



Şekil 37. Tek kazık ile kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=0.5$  m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

Şekil 38’de gevşek kum zemine ait  $L=1$  m olan tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D, D kazıkların yük-deplasman grafiği verilmiştir. Kazıklar arası mesafe 5D olan ortadaki ölçüm kazığının tek kazığa göre etkileşiminin olmadığı görülmüştür.  $L=1$  m olan kazıklara

5D kazık mesafesinde yapılan yatay yüklü deneylerde kazıklar yapısal olarak göçmüştür. Kazıklar arası mesafe 3D olan  $L=1$  m olan kazıkların ortadaki ölçüm kazığının tek kazıkla karşılaştırıldığında yanal yük-deplasman değerlerinin benzer şekilde olduğu daha sonra zemin yüzeyindeki kabarmalardan dolayı aynı deplasman değerlerinde ölçüm kazığının daha fazla yatay yük değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.  $L=1$  m olan kazıklara kazıklar arası mesafenin  $D$  olduğu yatay yük deneylerindeki grafik incelendiğinde ortadaki kazığın yük-deplasman değerlerine bakılarak etkileşiminin olduğu görülmüştür

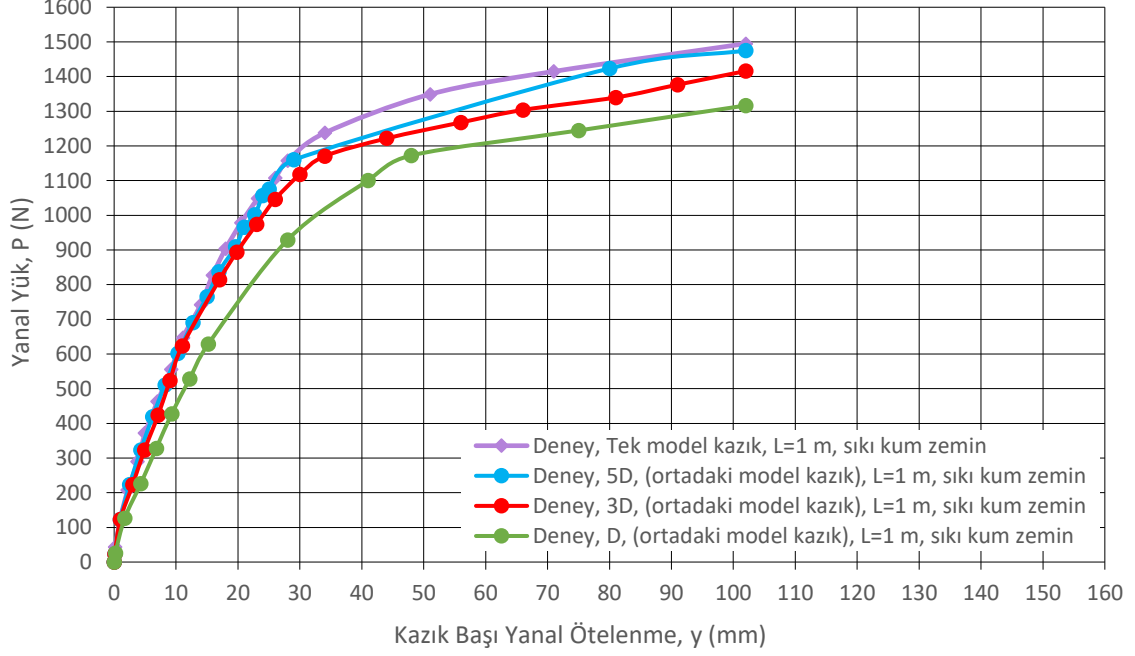


Şekil 38. Tek kazık ile kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=1$  m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

Şekil 39'da sıkı kum zemine ait  $L=1$  m olan tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D, D kazıkların yük-deplasman grafiği verilmiştir. Kazıklar arası mesafe 5D olan, ortadaki ölçüm kazığının tek kazığa göre etkileşiminin olmadığı görülmüştür.  $L=1$  m olan kazıklarda, kazıklar arası mesafe 3D olan kazığa yanal yük-deplasman değerlerine bakılarak kazıkların ortadaki ölçüm kazığının tek kazığa göre aynı yatay yüklerde daha az deplasman değerlerinin elde edildiği ve etkileşimin olduğu görülmüştür. Kazıklar arası mesafe D olan ortadaki kazıkta etkileşimin olduğu görülmektedir.

Hem gevşek kum hem de sıkı kum zeminde,  $L=1$  m olan tek kazık ve kazık grubunda kazıklar arası mesafenin 5D, 3D ve D olduğu durumdaki kazıklar yapısal göçmeye

uğramıştır. Bu kazıklar uzun kazık davranışı göstererek kazık baş uç kısmı yer değiştirme ve dönmeye uğramıştır. Kazık alt uç kısmında ise yer değiştirme ve dönmeye uğramamıştır.



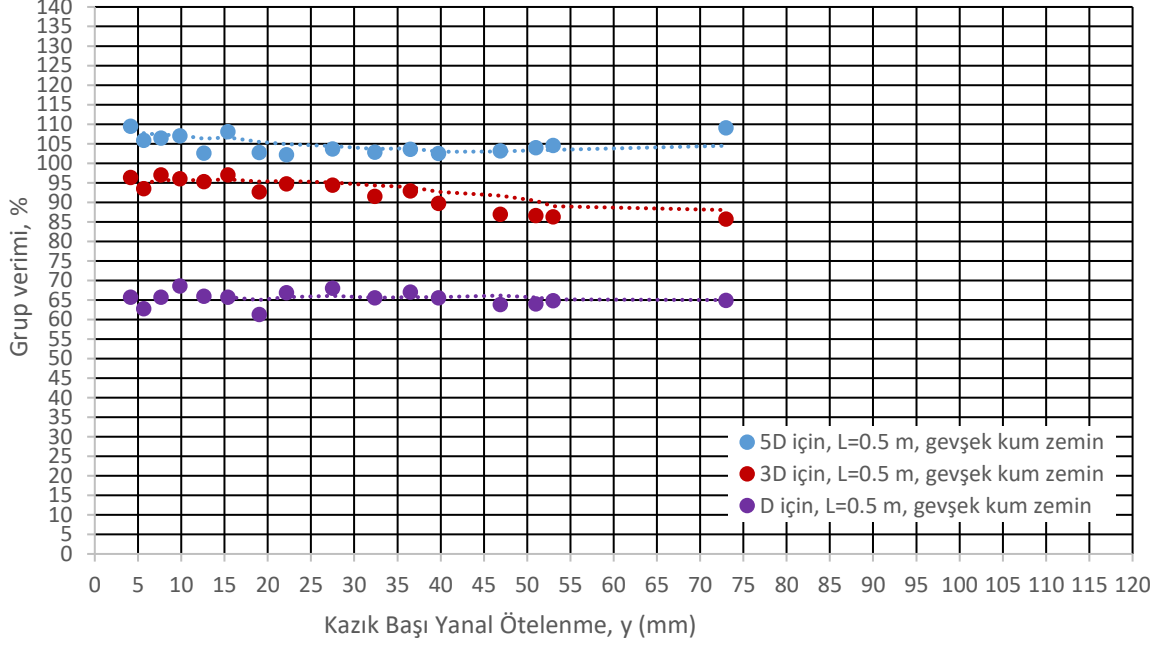
Şekil 39. Tek kazık ile kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan (L=1 m) kazık grubunun yanal yük-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

Kazık grupları için; grup verimi ( $\beta$ );

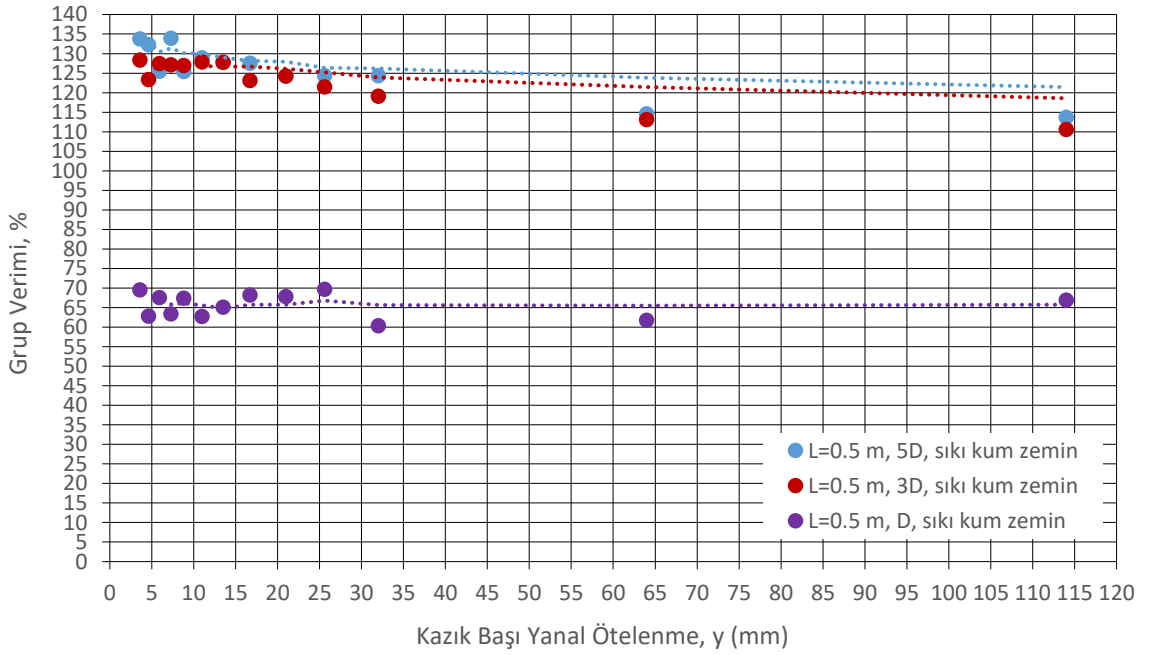
$$\beta = \frac{Q_{yatay, grup}}{Q_{yatay, tek}} \quad (30)$$

bu şekilde tanımlanmıştır. Kazık gruplarının tasarlanmasında kazıkların birbirini etkilemesinden dolayı verim düşmektedir. Teorik yaklaşımlarında grup veriminin 1'den küçük olacağı kabul edilmektedir. Bu yaklaşımlarda zeminin cinsinin ve özelliklerinin dikkate alınmadığı görülmüştür. Ayrıca tek kazık ve kazık gruplarında yük-deformasyon davranışının farklı olacağı incelenmelidir. Gevşek ve sıkı kum zemine ait  $L=0.5$  m ve  $L=1$  m kazıklar için, kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazıklardaki grup verimi-kazık başı yanal ötelenme grafikleri Şekil 40, 41, 42 ve 43'te verilmiştir.  $D=0.05$  m,  $L/D=10$  olan kazıklarda gevşek kum zemin durumunda kazıklar arası mesafenin 3D ve D kazıklarda, sıkı kum zeminde ise kazıklar arası mesafe D olan kazıkta grup verimi 1'den küçüktür. Aynı çapa sahip  $L/D=20$  olan kazıklarda gevşek kum zeminde kazıklar arası mesafenin D olduğu,

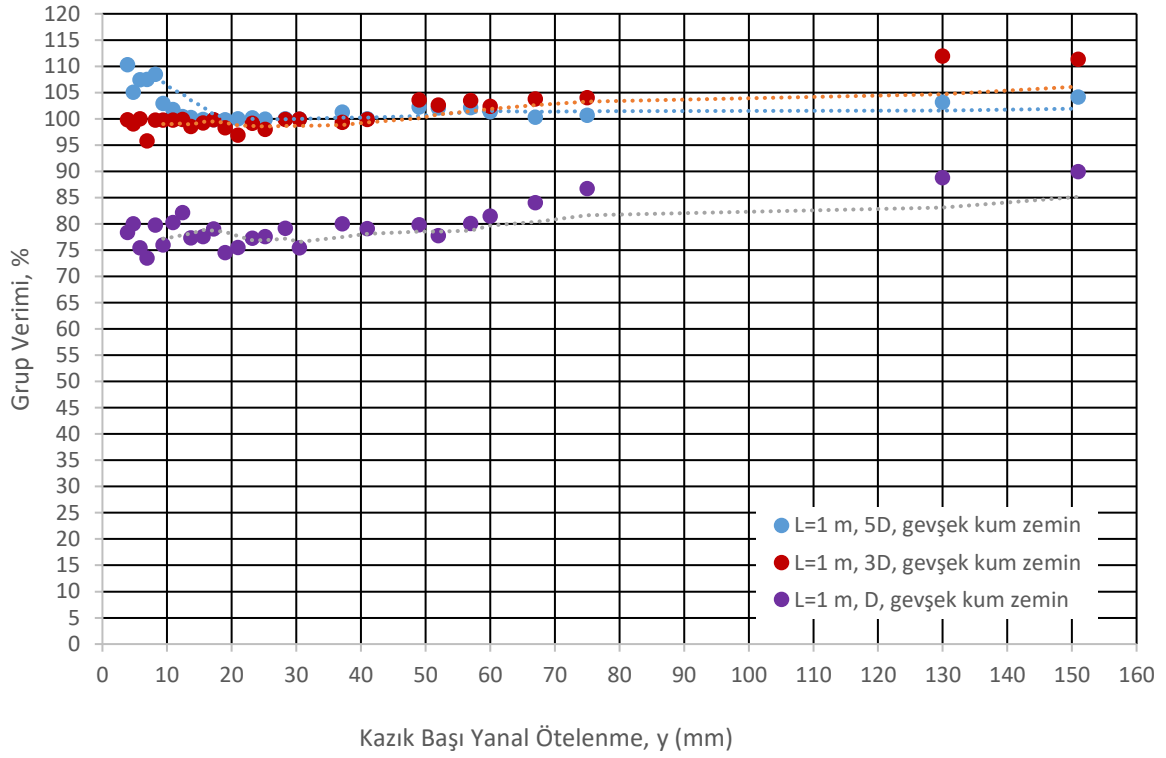
sıkı kum zeminde ise kazıklar arası mesafenin 5D, 3D ve D olan kazıklarda grup verimi 1'den küçüktür. Kazıklardaki grup verimi azaldıkça kazıklardaki etkileşim artmaktadır.



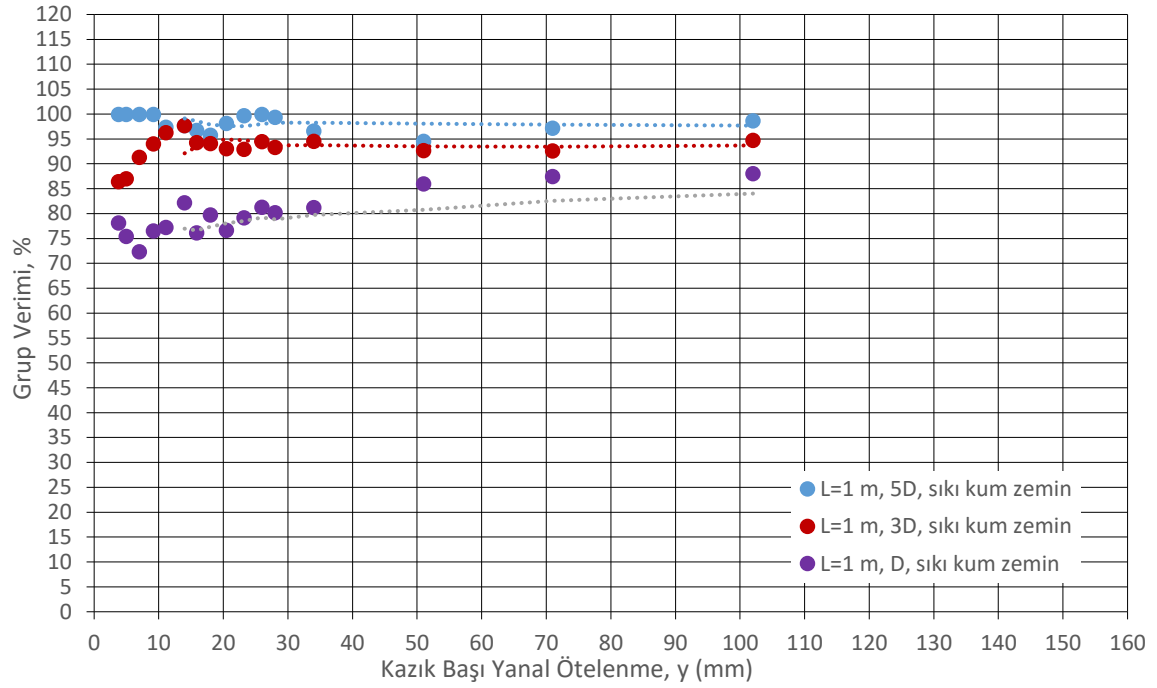
Şekil 40. Kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=0.5$  m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 41. Kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=0.5$  m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)



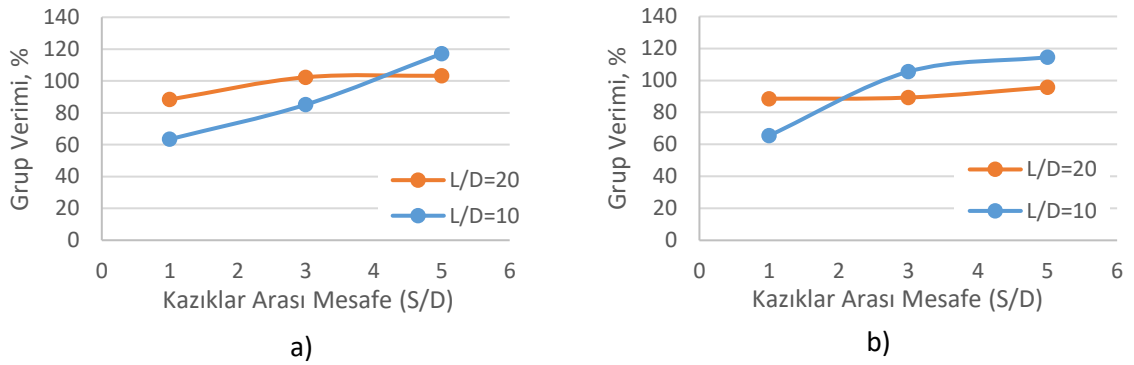
Şekil 42. Kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=1$  m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 43. Kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan ( $L=1$  m) kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

De Beer, düşey yüklü kazıkların yük-oturma ilişkisindeki iki doğrunun kesişme noktasının göçme yükü değerine karşılık geleceğini belirtmiştir (Fellenius, 1975). Bu yöntemde, yük-oturma grafiği logaritmik eksen takımlarında çizildiğinde, yukarıda belirtildiği gibi farklı eğimlere sahip iki doğru oluşur ve bu doğruların kesiştiği nokta sınır yükü tanımlar. Yatay yüklü kazıklarda sınır yük belirlerken düşey yük altındaki yöntemlerden yararlanılarak logaritmik olarak yatay yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Farklı eğimlere sahip iki doğrunun kesişmesi sağlanmıştır. Kesişen noktanın sınır yüküne karşılık geleceği ifade edilmiştir.

Yatay yüklü kazıklarda sınır yükler log-log grafiği kullanılarak grup verimi belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardaki grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri L/D oranlarında Şekil 44'te verilmiştir. Kazıklar arası mesafe, S olarak tanımlanmıştır. Gevşek ve sıkı kum zeminde L/D oranlarında kazıklar arası mesafe arttıkça grup verimi artmıştır. Kısa kazıklarda grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri incelendiğinde, hem gevşek kum zemin hem de sıkı kum zeminde kazıklar arası mesafe arttıkça grup verimi artmıştır. Uzun kazıklarda, gevşek kum zeminde kazıklar arası mesafe 3D ye kadar arttıkça grup verimi artmış ve sonrasında sabit kalmıştır. Sıkı kum zeminde ise grup verimi kazıklar arası mesafe değişiminden çok az etkilenmiştir. Kazık uzunluğunun artmasıyla grup veriminin etkisinin az olduğu görülmüştür.



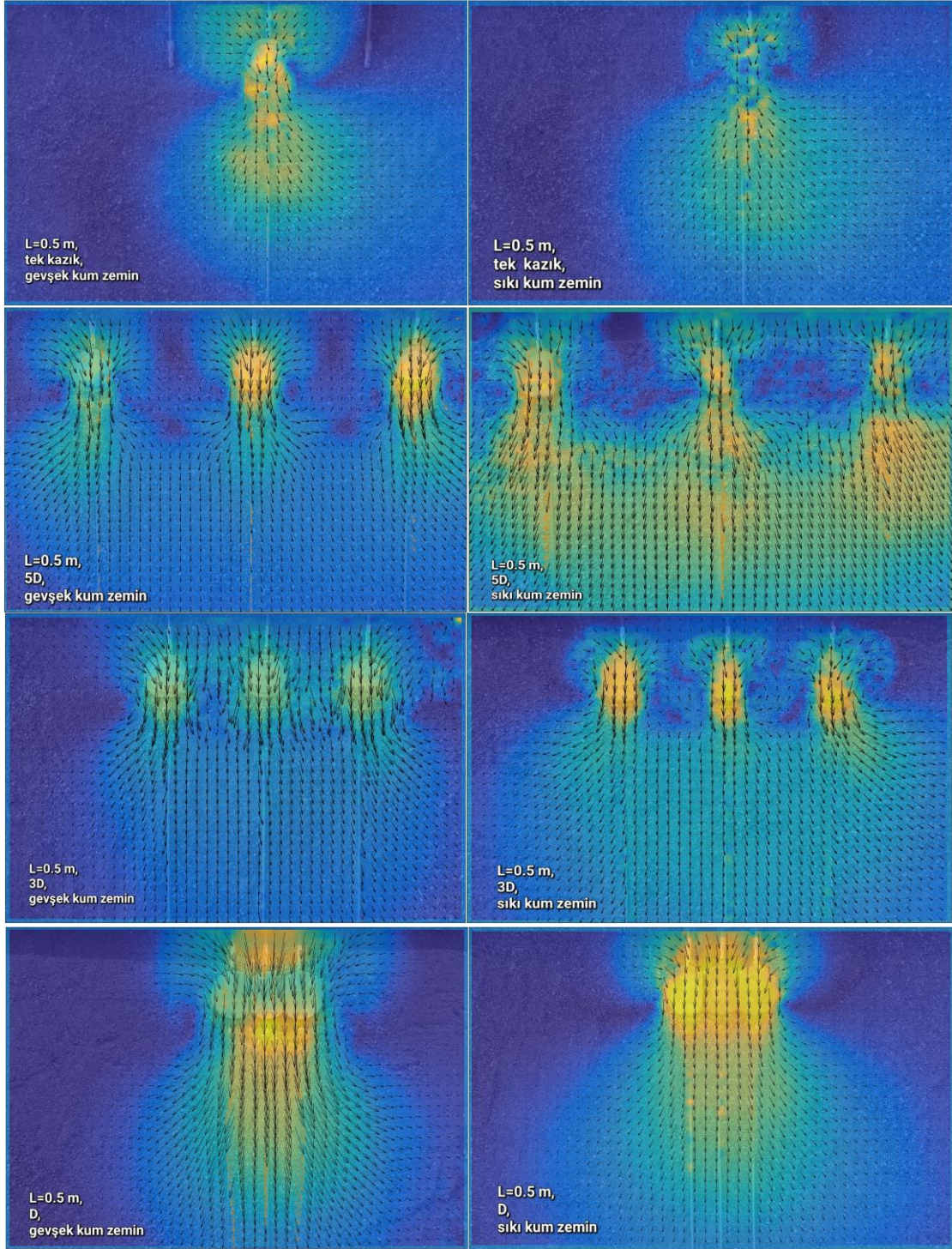
Şekil 44. Grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi a) gevşek kum, b) sıkı kum

### 3.2. Deney Çalışmalarının PIVlab Yazılımı ile Analiz

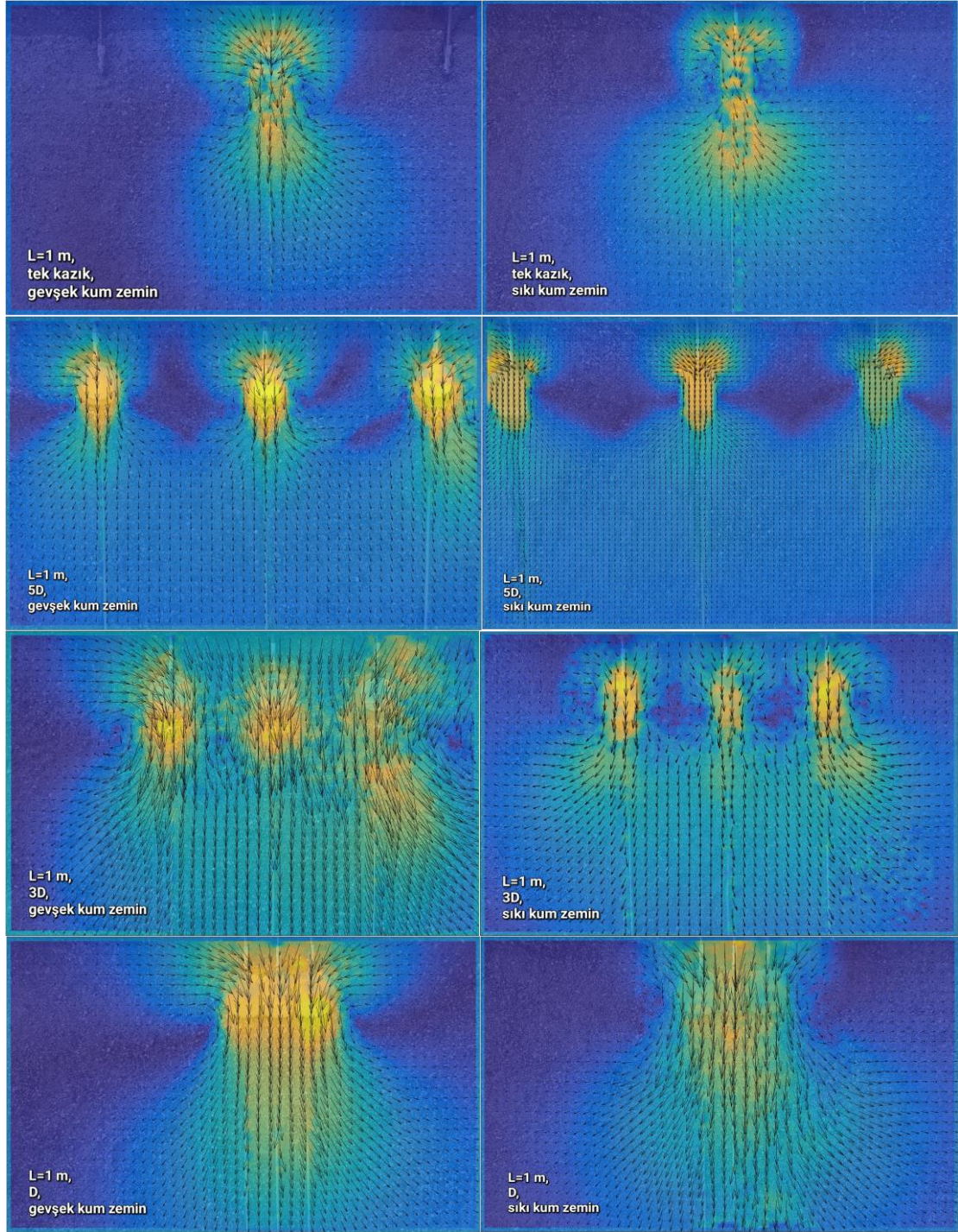
Deneyler süresince fotoğraflar çekilmiş ve çekilen fotoğraflar PIVlab ile analiz edilerek kazıkların yatay yüklenmesiyle kazık ve zeminin yer değişimleri gözlenmiştir. Kazık grubunda üç kazık ile yapılan deneylerde ortadaki ölçüm kazığı yandaki kazıklar ile etkileşim kazığıdır.

Şekil 45'te  $L=0.5$  m olan kazıkların hem gevşek kum hem de sıkı kum zemindeki deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri verilmiştir.  $L=0.5$  m olan tek kazığın gevşek ve sıkı kum zemin durumları incelendiğinde sıkı kum zeminde daha geniş alanda etkileşim olduğu tespit edilmiştir.  $L=0.5$  m olan kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıklarda gevşek kum zeminde etkileşimin olmadığı, zemin yüzeyindeki kabarmadan dolayı soluk sarı rengin olduğu görülmüştür. Sıkı kum zemin durumunda ise etkileşimin olduğu yoğun sarı renkten anlaşılmaktadır.  $L=0.5$  m olan kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıklarda gevşek kum zemin durumunda az da olsa etkileşimin olduğu belirlenmiştir. Sıkı kum zemin durumunda ise kazıklar arası mesafenin  $3D$  olduğu kazıklarda etkileşimin olduğu görülmektedir.  $L=0.5$  m olan kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıklarda hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda etkileşimin olduğu görülmüştür. Kazıklar arası mesafenin  $D$  olan kazıklarda etkileşimin olduğu belirgin bir şekilde ve yoğun sarı renkten anlaşılmaktadır.  $L=0.5$  m olan kazıklarda yatay yüklere maruz kalan kazıkların sıkı kum zemin durumundaki deneylerde kazıklarda etkileşimin olduğu görülmüştür. Sıkı kum zemin durumunda etki alanının gevşek kum zemin durumundan daha fazla alana yayıldığı belirlenmiştir.

Şekil 46'da  $L=1$  m olan kazıklarda da hem gevşek kum hem de sıkı kum zemindeki deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri verilmiştir.  $L=1$  m olan tek kazığın  $L=0.5$  m olan tek kazıklardaki gibi sıkı kum zeminde daha geniş alanda etkileşim alanına sahip olduğu görülmüştür.  $L=1$  m olan kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıklarda hem gevşek kum hem de sıkı kum zeminde etkileşimin olmadığı belirlenmiştir.  $L=1$  m olan kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıklarda sıkı kum zemin durumunda kazıklarda etkileşimin olduğu görülmektedir.  $L=1$  m olan kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıklarda hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda etkileşimin yoğun bir şekilde olduğu görülmüştür.



Şekil 45.  $L=0.5$  m olan kazıkların deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri (gevşek ve sıkı kum zemin)

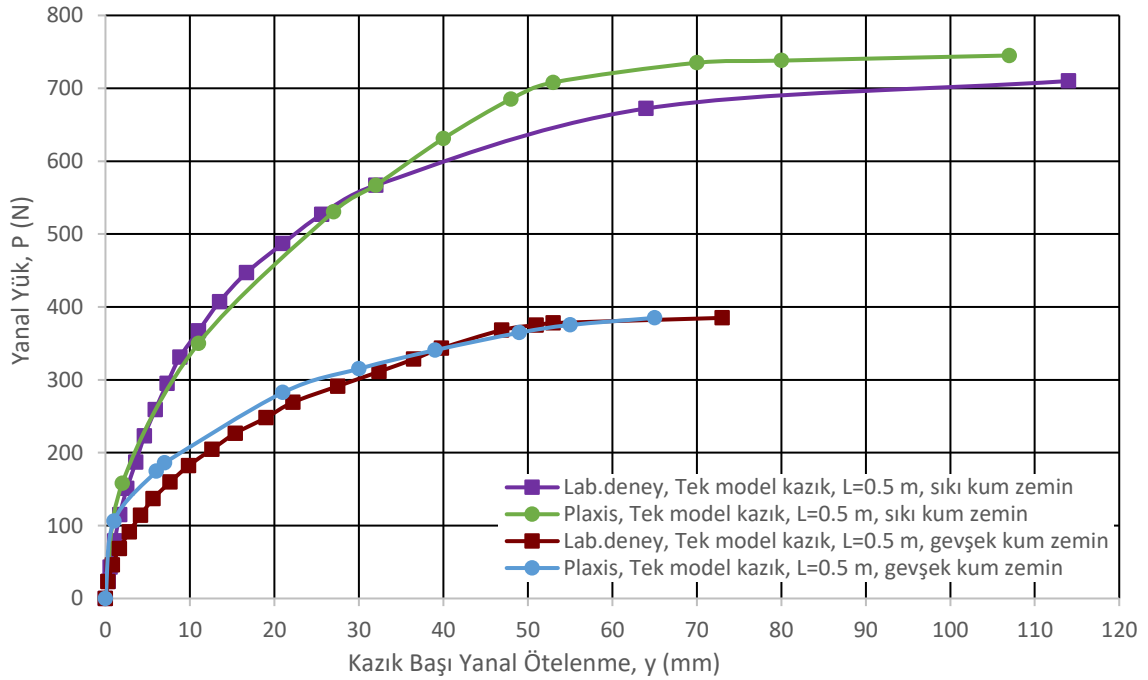


Şekil 46.  $L=1\text{ m}$  olan kazıkların deney fotoğraflarının PIVlab görüntüleri (gevşek ve sıkı kum zemin)

### 3.3. Deney Düzenekinin Sonlu Elemanlar Analizi

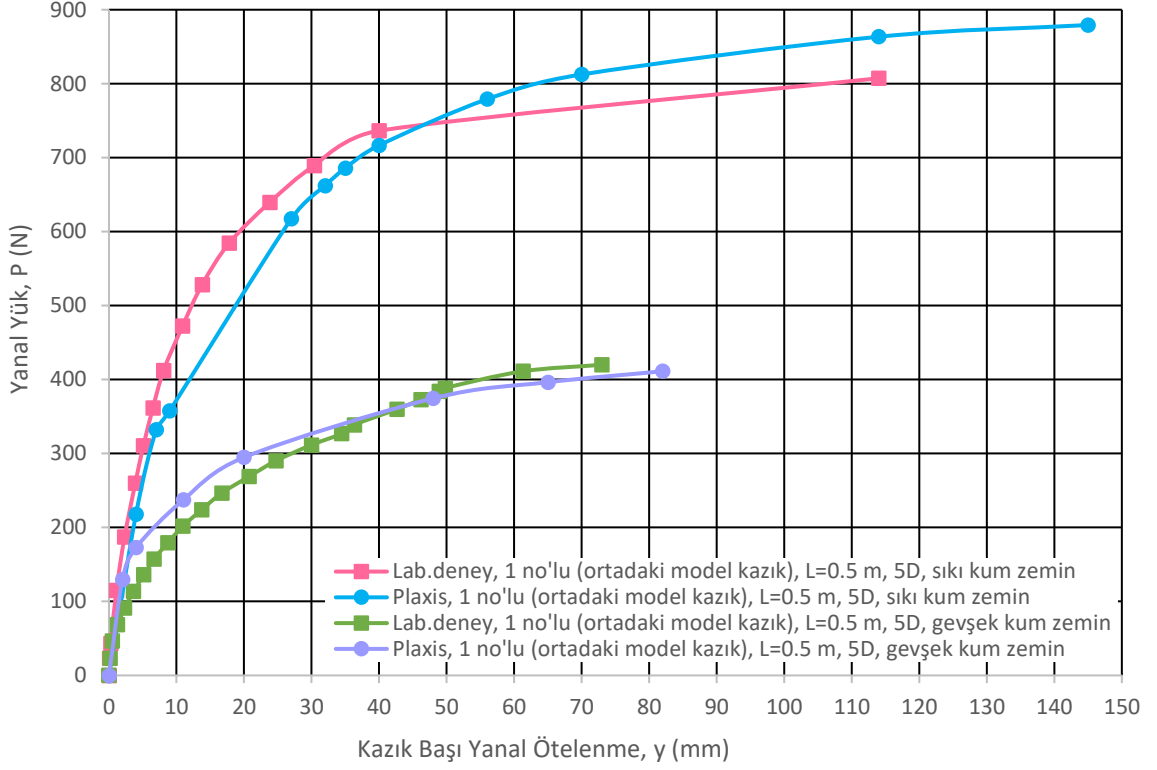
Bu bölümde, deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizler sırasında, model deney çalışmalarında olduğu gibi kazığın gömülü uzunluğu, kazık çapı, zemin özellikleri, kazık özelliklerinin yanal yüke maruz kalan kazıklar üzerindeki etkileşimi araştırılmıştır. Kazık grubundaki çalışmalarda, üç kazık kullanılmıştır. Ortadaki kazık ölçüm kazığı diğer yandaki kazıklar etkileşim kazığıdır. Kazıkların etkileşimi incelenmesi için çizilen grafiklerin tümünde ortadaki kazık kullanılarak grafikler hazırlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile üç boyutlu analizler karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu modelin, gerçek problemi yansıtmadaki başarısı açıkça görülmüştür. Kazık gömülü uzunluğu (L) 0.5 m ve 1 m olan aynı çapa sahip kazıklar hem deneylerde hem de sayısal analizlerde kullanılmıştır. Kazıkların tamamı gömülü, serbest başlı ve düşey kazıklar olarak çalışmalar yapılmıştır.

L=0.5 m olan kazıklarda gevşek kum zemin ve sıkı kum zemin içerisindeki hem deneysel hem de sayısal analiz çalışmalarından elde edilen yanal yük-deplasman ilişkileri Şekil 47'deki grafikte karşılaştırılmıştır. Kurulan üç boyutlu model ile, deney çalışmalarından elde edilen genel davranış arasında uyum görülmüştür.



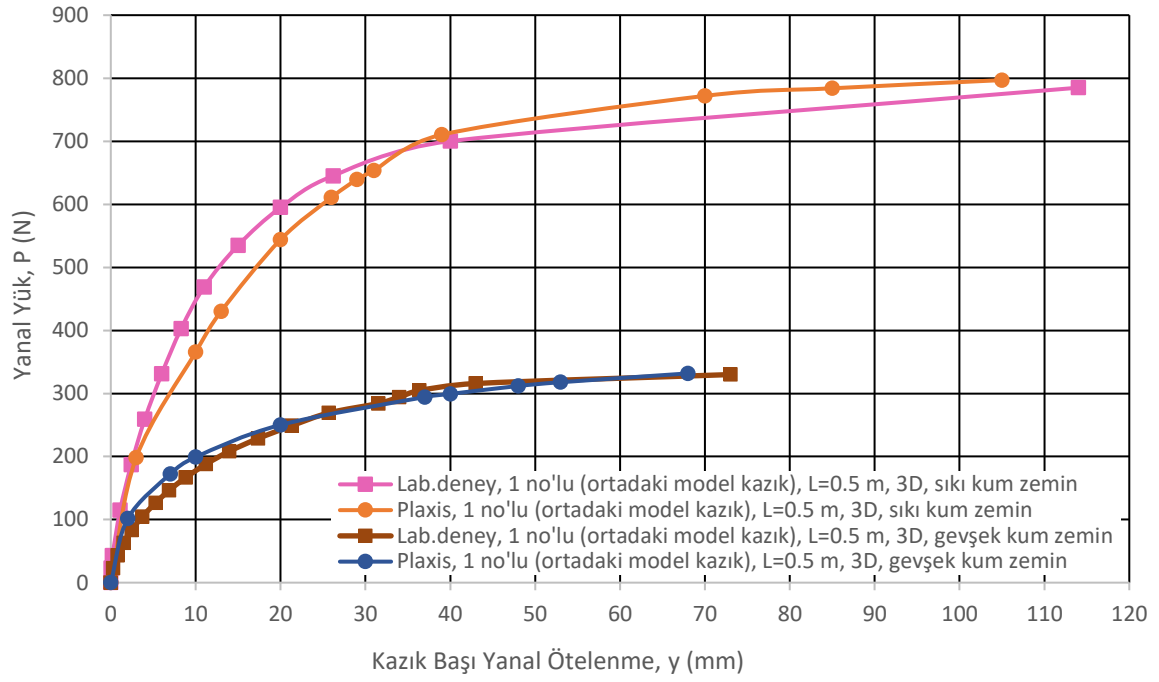
Şekil 47. L=0.5 m olan tek kazık için deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

$L=0.5$  m olan kazıklarda kazıklar arası mesafenin  $5D$  olduğu kazıkların hem gevşek hem de sıkı kum zemindeki deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait karşılaştırmalı grafik Şekil 48’de verilmektedir. Analiz sonuçlarının deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile uyumlu çıktığı görülmüştür.

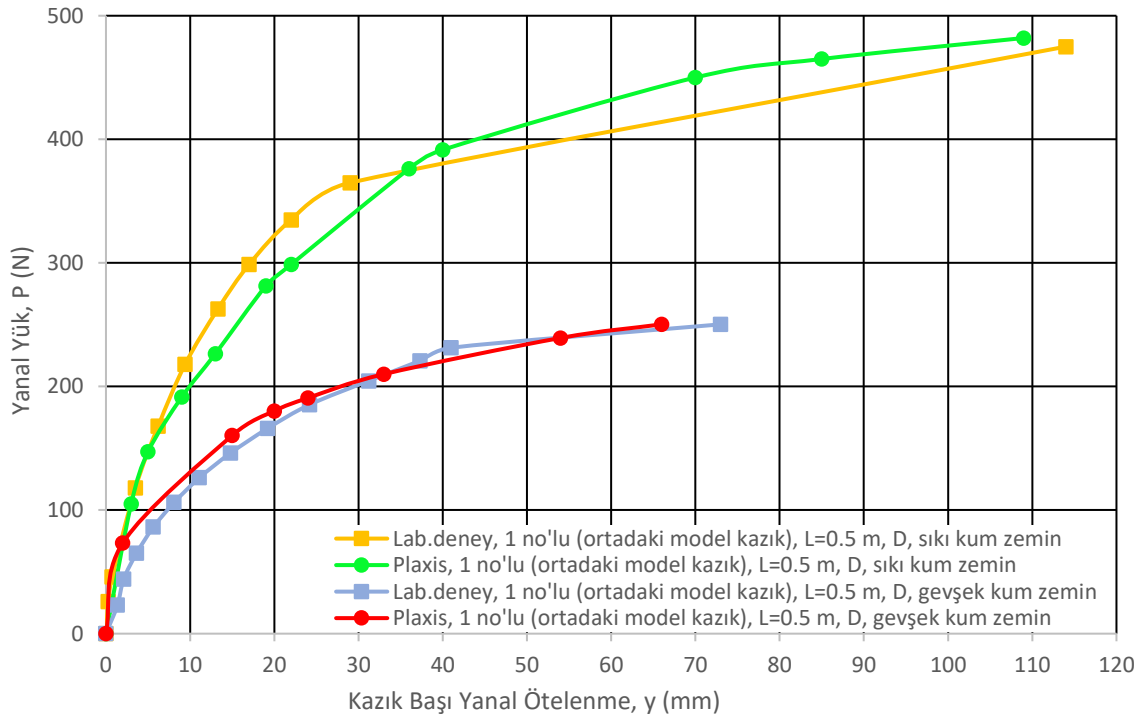


Şekil 48.  $L=0.5$  m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe  $5D$  olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

$L=0.5$  m olan kazıklardaki kazıklar arası mesafenin  $3D$  olduğu kazıkların hem gevşek hem de sıkı rölatif sıkılıktaki zemindeki deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait karşılaştırmalı grafik Şekil 49’da verilmektedir. Analizlerden elde edilen davranış eğrileri deneysel eğriler ile uyum içerisindedir. Kazıklar arası mesafenin  $D$  olduğu,  $L=0.5$  m olan kazıkların hem gevşek hem de sıkı rölatif sıkılıktaki zemindeki deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait grafik Şekil 50’de karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlardaki gibi sayısal analiz sonuçlarında da aynı deplasman değerinde gevşek kum zemindeki yanıl yük değerine göre sıkı kum zemin durumunda daha fazla yanıl yük değerinde olduğu görülmektedir.

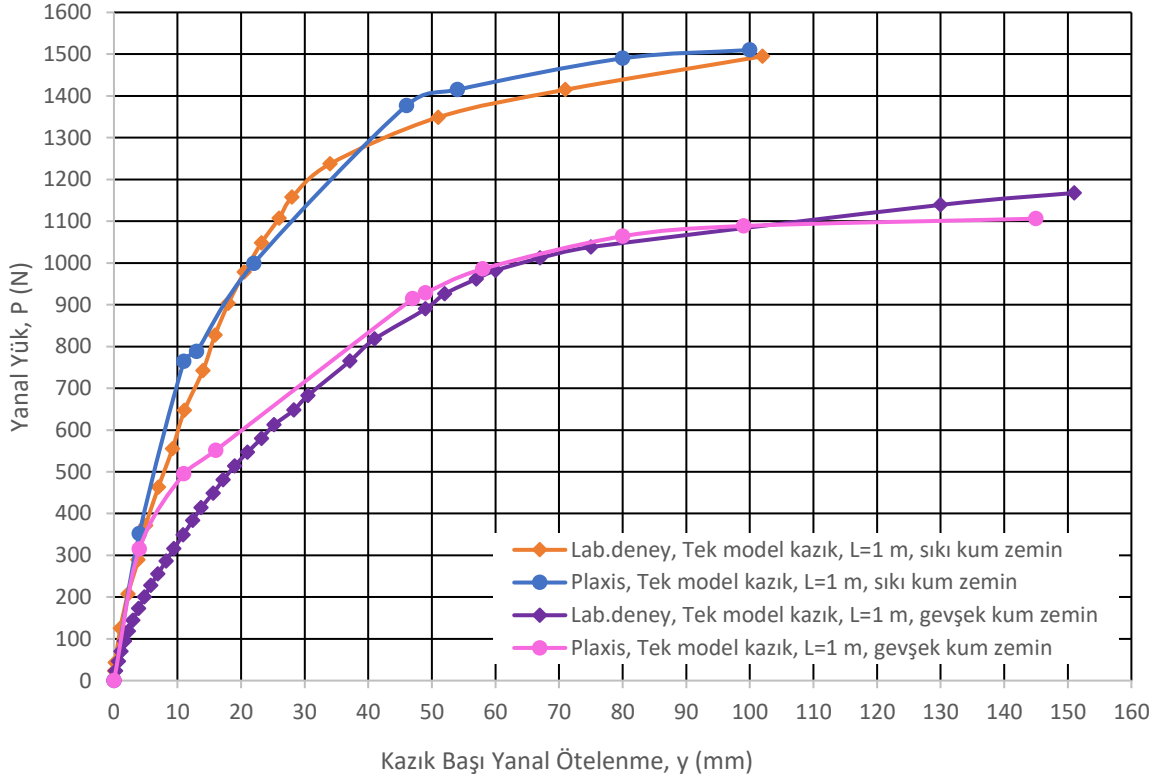


Şekil 49. L=0.5 m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe 3D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması



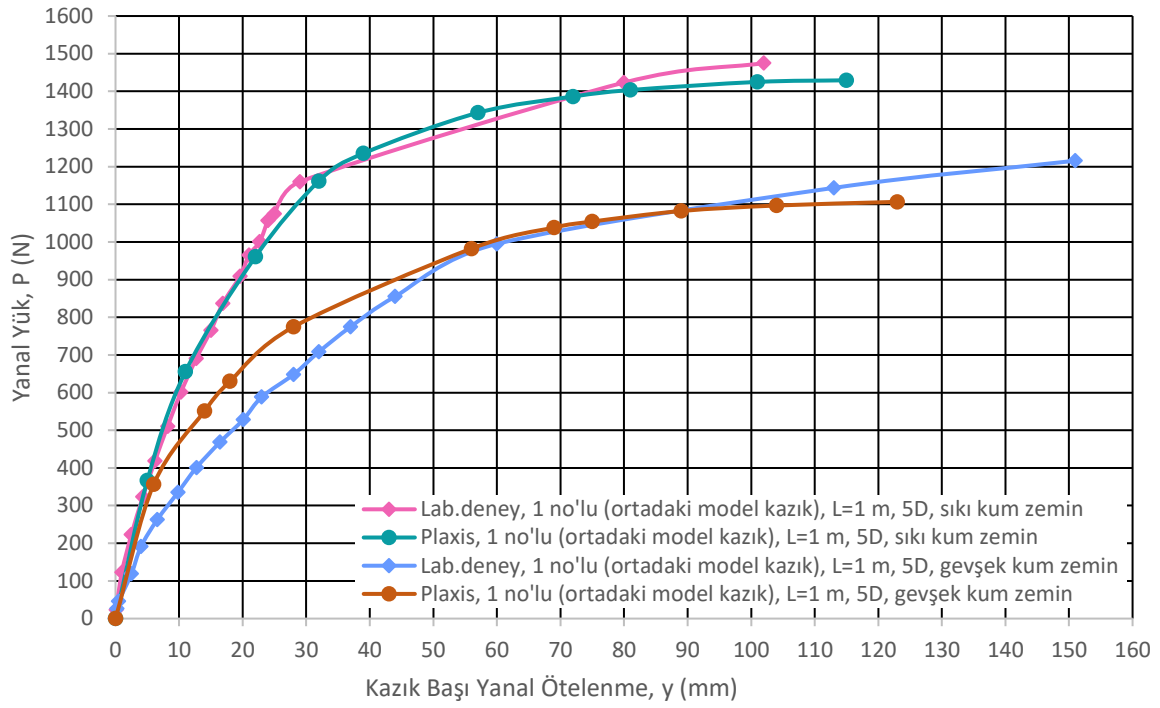
Şekil 50. L=0.5 m olan kazıkların, kazıklar arası mesafe D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

$L=1$  m olan tek kazıklarda hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 51’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

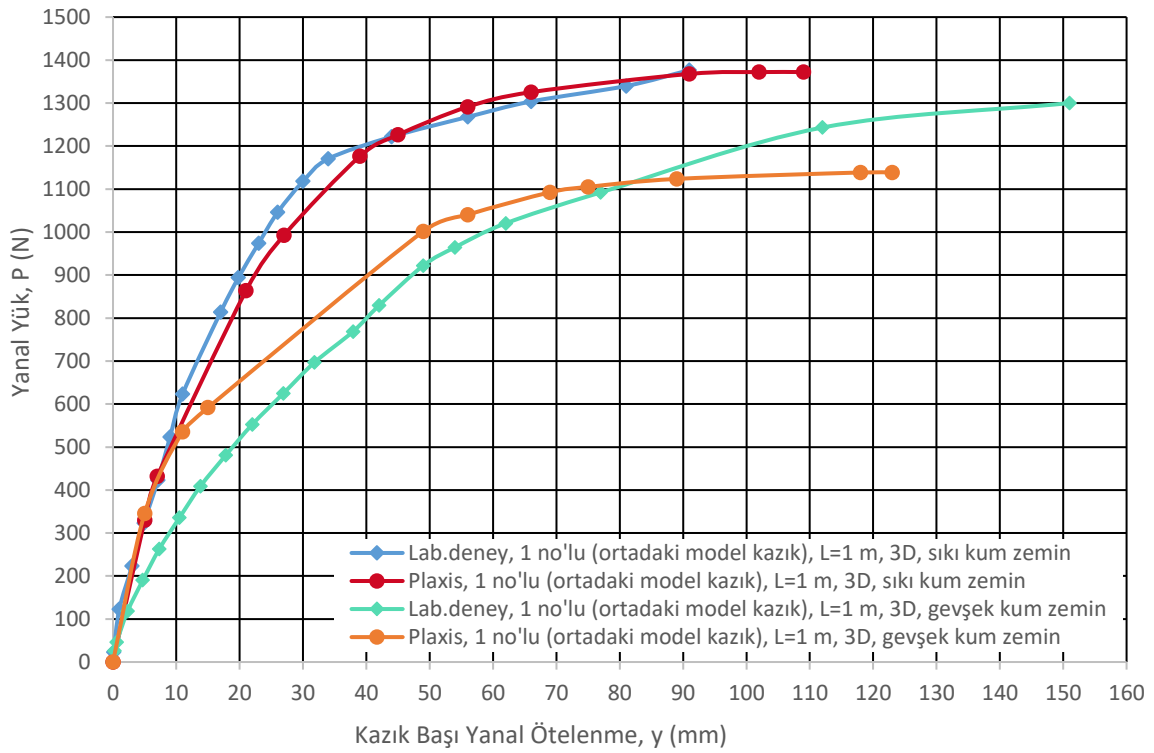


Şekil 51.  $L=1$  m olan tek kazık için deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

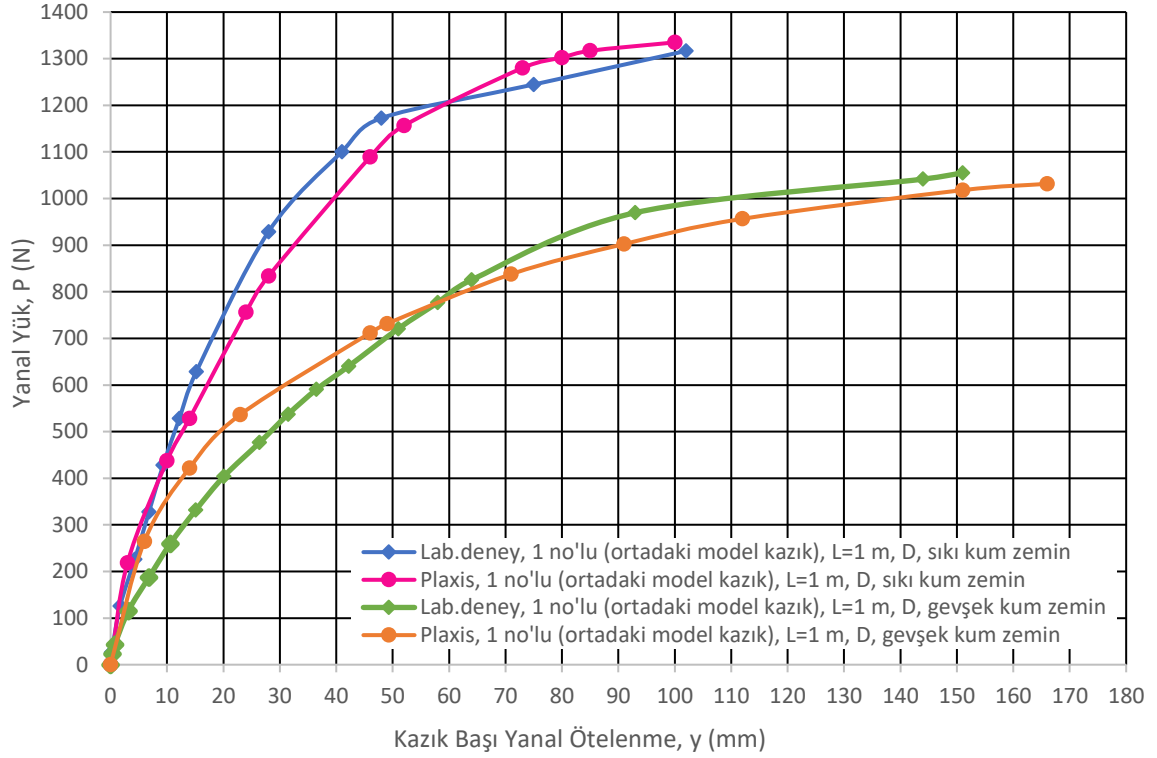
$L=1$  m olan kazıkların kazıklar arası mesafe  $5D$  olduğu, hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumunda deneysel ve sayısal analiz sonuçları Şekil 52’de karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde deney ve analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 53’te  $L=1$  m olan kazıkların kazıklar arası mesafe  $3D$  olduğu hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumundaki deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait grafiğe yer verilmiştir. Sayısal ve deney sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir.  $L=1$  m olan kazıkların kazıklar arası mesafe  $D$  olduğu hem gevşek hem de sıkı kum zemin durumundaki deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait Şekil 54’te grafiğe yer verilmiştir. Sayısal ve deney sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür.  $L=0.5$  m olan kazıklardaki gibi  $L=1$  m olan kazıklarda da aynı deplasman değerinde gevşek kum zemindeki yanal yük değerine göre sıkı kum zemin durumunda daha fazla yanal yük değerinde olduğu hem deney hem de sayısal analiz sonuçlarıyla görülmektedir.



Şekil 52. L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe 5D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 53. L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe 3D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 54. L=1 m uzunluğundaki kazıkların, kazıklar arası mesafe D olduğu deney ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

### 3.4. Parametrik Çalışma

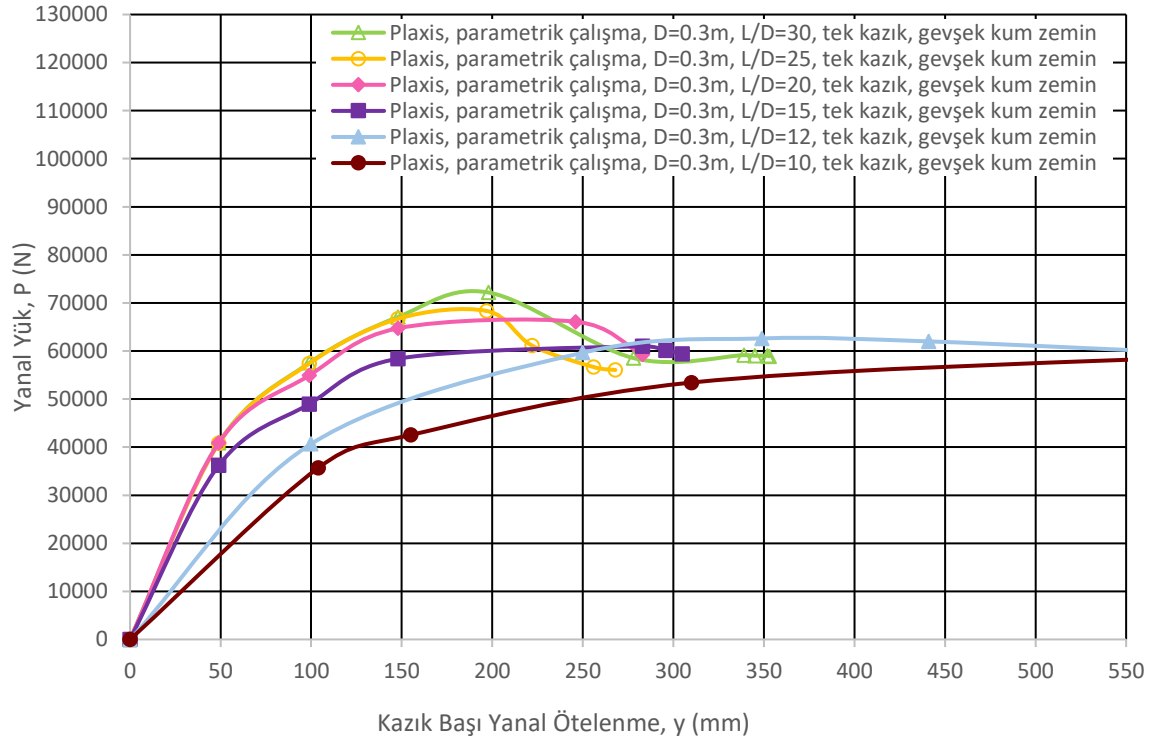
Deneyssel çalışmalarda büyük çaplı kazıklar arasındaki etkileşimi incelemek çok maliyetli ve teknik açıdan zor olduğundan yanal yüklü kazıkların serbest başlı kazık gruplarının davranışı sonlu elemanlar modelleri ile parametrik olarak araştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri, Plaxis 3D programı kullanılarak yapılmıştır. Deneyssel çalışmaların Plaxis 3D programıyla modellenmesinde kullanılan zemin ve kazık özellikleri parametrik çalışmalarında kullanılmıştır. Kazık çapları (D) 0.3 m, 0.65 m, 0.8 m ve 1.2 m olan kazıklara tek kazık ve L/D oranları 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 olan kazıklara yatay yükler uygulanarak yük-deplasman eğrileri incelenerek kazıklar arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin boyutları deney tankının boyutlarıyla orantılı olacak şekilde belirlenmiştir. Deneyssel çalışmalarda olduğu gibi parametrik çalışmalarda da üç kazık kullanıldığında ortadaki kazık ile yandaki kazıklara farklı yanal yükler yüklenmiştir. Parametrik çalışmalara ait Plaxis 3D programı Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Parametrik çalışmasının programı

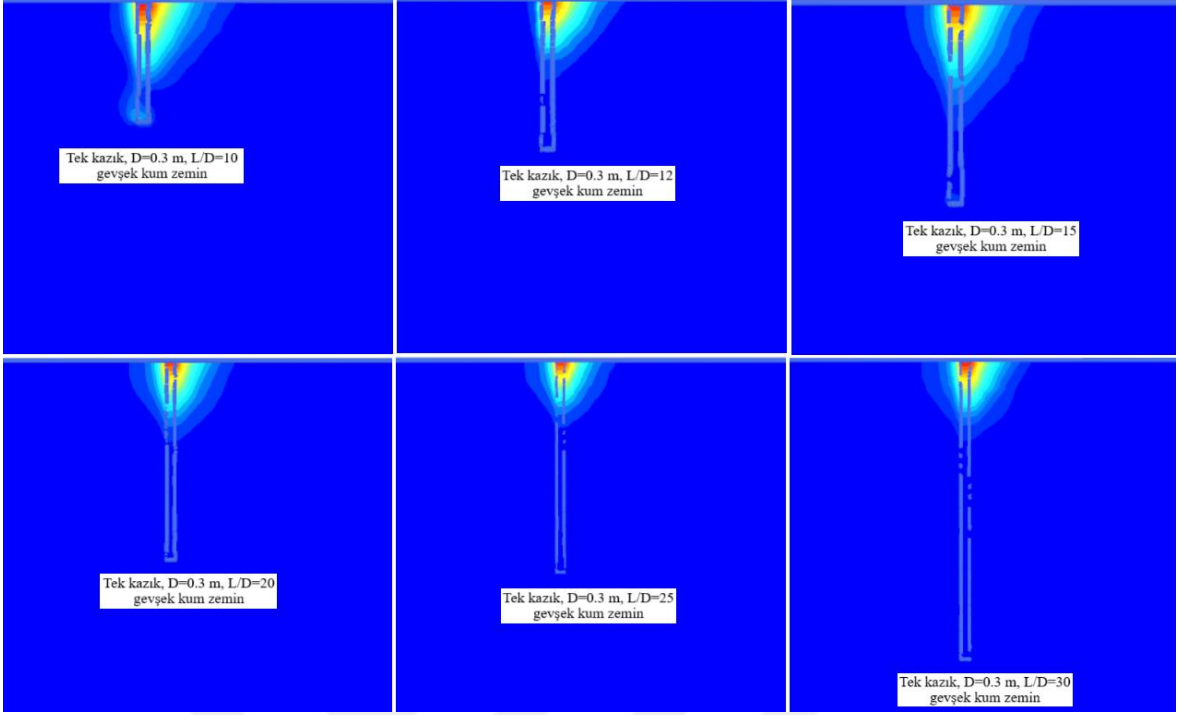
| Kazık çapı<br>(m, D) | Kazık<br>sayısı | Kazıklar<br>arası mesafe | Kazık boyu/kazık çapı<br>(L/D) |    |    |    |    |    | Rölatif<br>Sıkılık<br>( $D_r$ ) |
|----------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------|----|----|----|----|----|---------------------------------|
| 0.3                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.3                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.65                 | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.65                 | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.8                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.8                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 1.2                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 1.2                  | 1               | -                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.3                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.3                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.65                 | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.65                 | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.8                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.8                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 1.2                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 1.2                  | 3               | 5D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.3                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.3                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.65                 | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.65                 | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.8                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.8                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 1.2                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 1.2                  | 3               | 3D                       | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.3                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.3                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.65                 | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.65                 | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 0.8                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 0.8                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |
| 1.2                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %35                             |
| 1.2                  | 3               | D                        | 10                             | 12 | 15 | 20 | 25 | 30 | %70                             |

D=0.3 m olan L/D=10, L/D=12, L/D=15, L/D=20, L/D=25 ve L/D=30 olan tek kazık, kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan düşey kazıklara yatay yüklü deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerin tümü hem gevşek hem de sıkı kum zeminde, serbest başlı kazıkların uzunluğunun tamamının gömülü olduğu zemin yüzeyinden yatay yük uygulanarak yapılan çalışmalar Plaxis 3D programında yapılmıştır. 3 kazık kullanılarak yapılan deneylerde ortadaki ölçüm kazığı dikkate alınarak grafikler çizilmiştir. D=0.3 m olan kazıklardaki deneyler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 55, 57, 59, 61, 63, 65, 67 ve 69'da verilmiştir.

Şekil 55'te gevşek kum zemindeki  $D=0.3$  m olan  $L/D=10$  olduğu tek kazığın yük deplasman eğrisinin diğer  $L/D$  oranlarından daha aşağıda kaldığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olduğu tek kazıklarda yük-deplasman eğrilerinin benzer davranışta olduğu belirlenmiştir.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 56'da verilmiştir. Gevşek kum zemin  $L/D=10$  tek kazıkta kazık başı ve kazık alt uç kısmında dönme ve yer değiştirme olduğu ve kısa kazık gibi davranış gösterdiği görülmüştür.  $L/D=15$  olan tek kazıkta kazık başı yer değiştirme ve dönme oluşurken kazık alt uç kısmında da az bir hareket görülmüştür.  $L/D=12$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan tek kazıklarda kırılma, kazık baş uç kısmında dönme ve yer değiştirme görülürken kazık alt uç kısmında ise dönme ve yer değiştirme görülmemiştir.  $L/D=10$  olan tek kazık haricindeki kazıklar uzun kazık gibi davranmışlardır.  $L/D$  oranı arttıkça yatay yük değerleri de artmıştır.

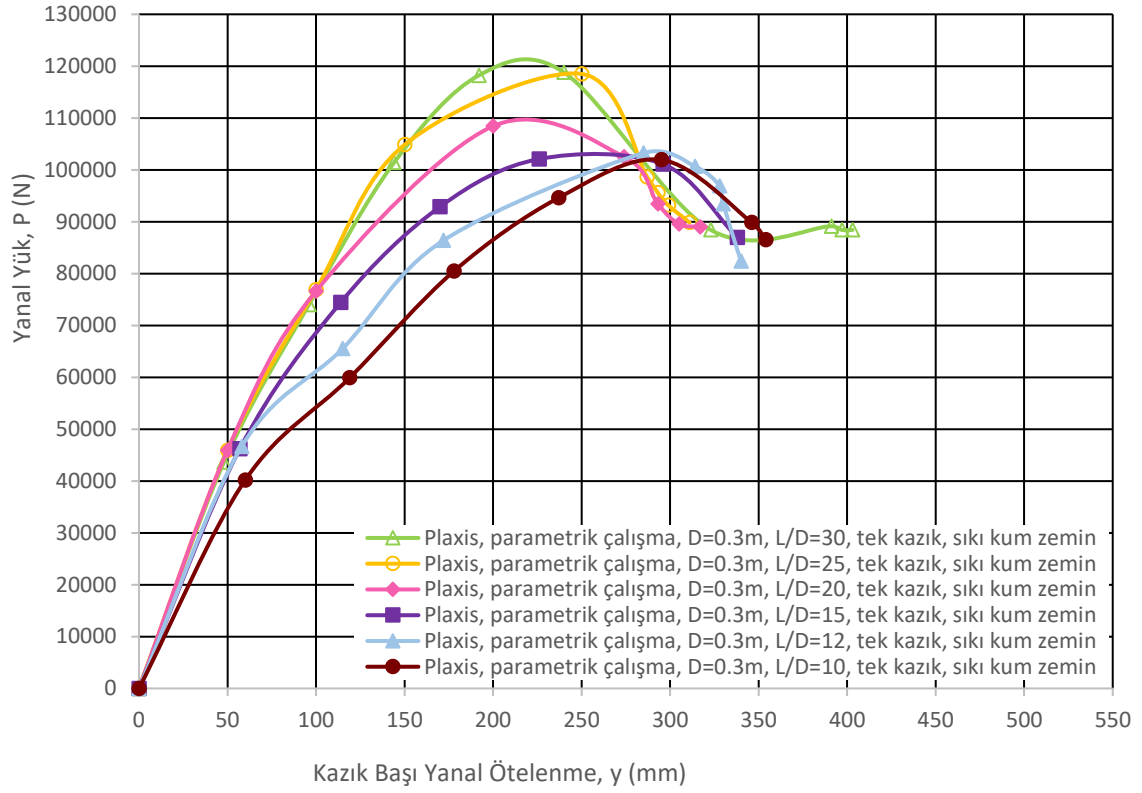


Şekil 55.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

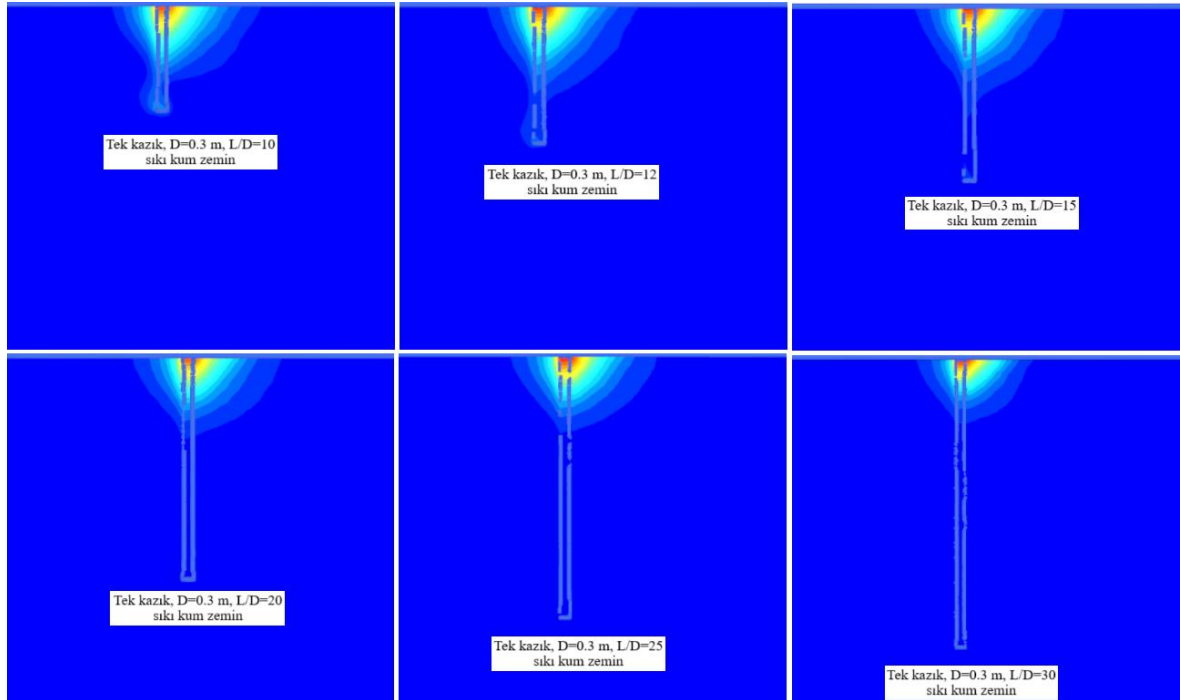


Şekil 56.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Şekil 57’de sıkı kum zeminde  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarına ait tek kazığın yük-deplasman grafiği verilmiştir. Tek kazığın  $L/D=10$  olan yanal yük değerlerindeki deplasman değerlerinin diğer oranlardaki değerlerden daha fazla olduğu görülmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan yanal yük-deplasman eğrilerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 58’de verilmiştir.  $L/D=10$  tek kazık kısa kazık gibi davranış göstermiştir.  $L/D=12$  olan tek kazıkta sıkı kum zeminde kısa kazık gibi davranış görülmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$  ve  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar sıkı kum zeminde  $D=0.3$  m tek kazıkta kazıklar kırılmış ve uzun kazık gibi davranmışlardır. Ayrıca kazık baş uç kısmında yer değiştirme ve dönme oluşurken kazık alt uç kısmında dönme ve yer değiştirme görülmemiştir. Şekil 56 ve 58’de Plaxis 3D analiz görüntüleri incelendiğinde, hem gevşek kum hem de sıkı kum zeminde  $L/D=10$  olduğu tek kazıklarda kısa kazık davranışı belirlenmiştir.  $L/D=15$  olan tek kazıkta kazık alt kısmında az bir hareketlilik tespit edilmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olduğu tek kazıklarda da uzun kazık davranışı tespit edilmiştir. Bu  $L/D$  oranlarında benzer deplasman değerlerine ulaşılmıştır.

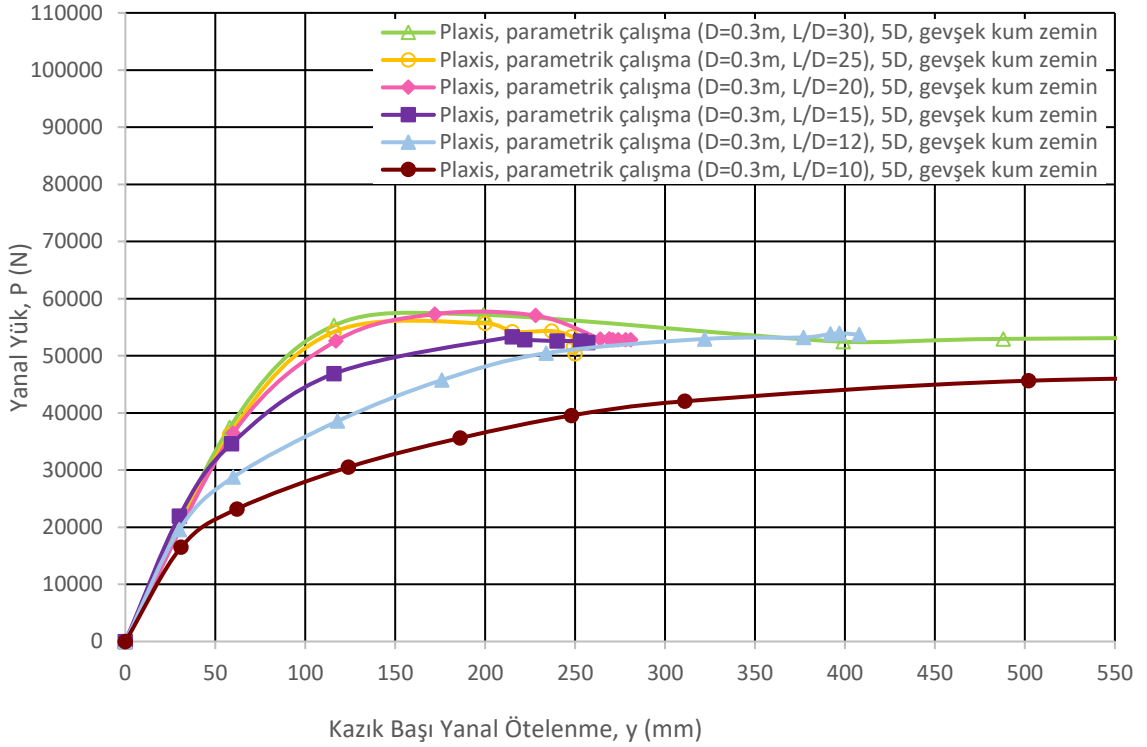


Şekil 57. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

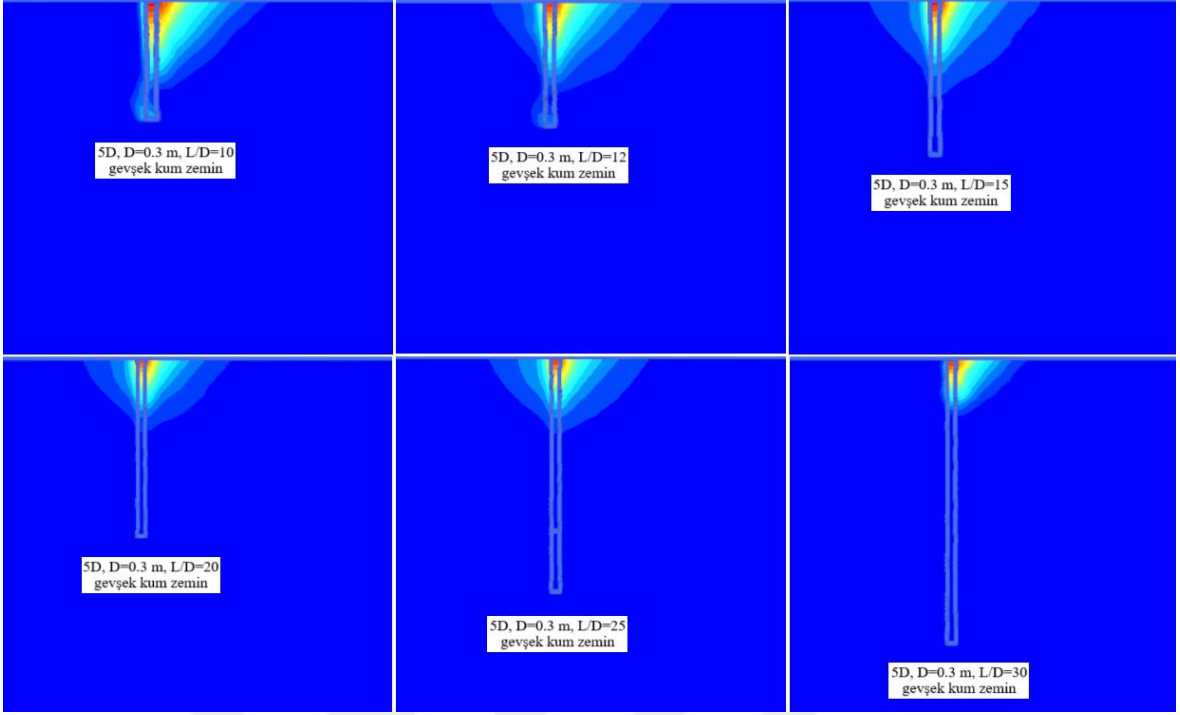


Şekil 58. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

Şekil 59’da  $D=0.3$  m olan kazıklar arası mesafe  $5D$  olduğu gevşek kum zemindeki kazıklarda  $L/D$  oranlarında yanal yük-deplasman grafiği verilmiştir.  $L/D=10$  olduğu durumdaki yanal yük değerlerine karşılık gelen kazık başı yanal ötelenme değerleri diğer oranlardaki değerlerden fazla olduğu belirlenmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrilerinin benzer olduğu görülmüştür. Plaxis 3D analiz görüntülerinin olduğu Şekil 60’da  $D=0.3$  m olan kazıklar arası mesafe  $5D$  olduğu kazıkların gevşek kum zemindeki görüntüleri verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan oranlarındaki kazıklar kısa kazık gibi davranış göstererek kazık baş uç ve kazık alt uç kısmında dönme ve yer değiştirme görülmektedir.  $L/D=10$  oranındaki yatay yük değerlerinin diğer oranlardan daha düşük olduğu belirlenmiştir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranlarındaki kazıklar uzun kazık gibi davranmışlardır.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranlarındaki kazıklar benzer deplasman değerlerinde olduğu görülmüştür.

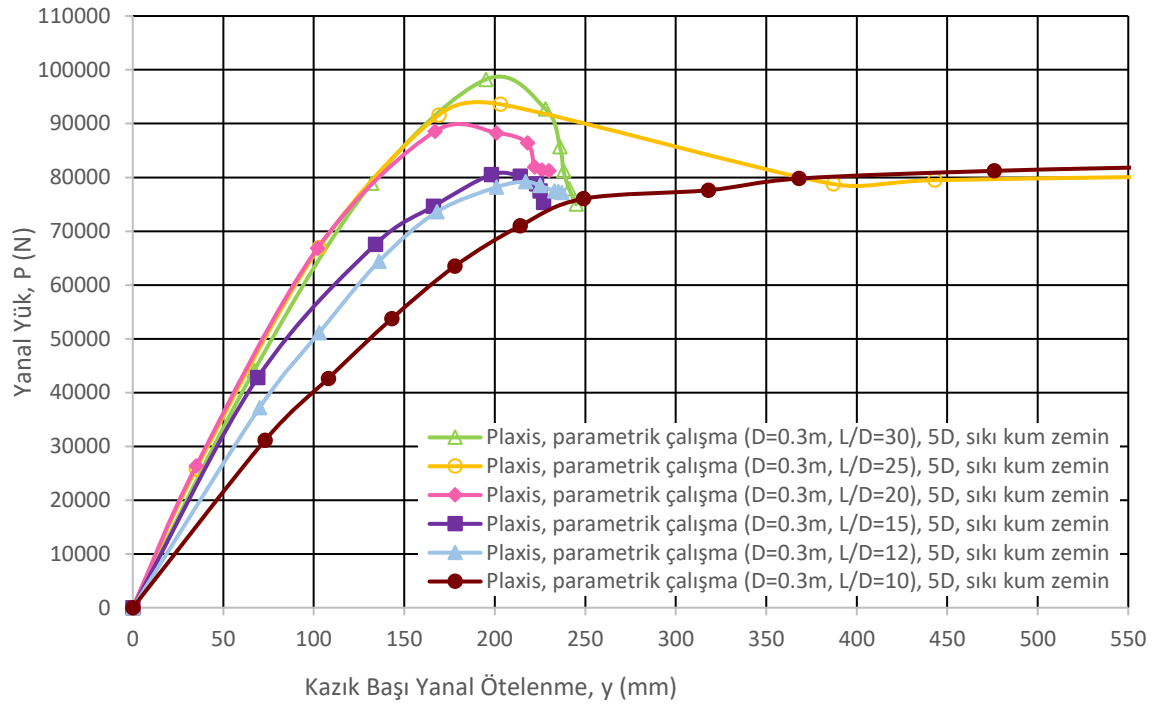


Şekil 59.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

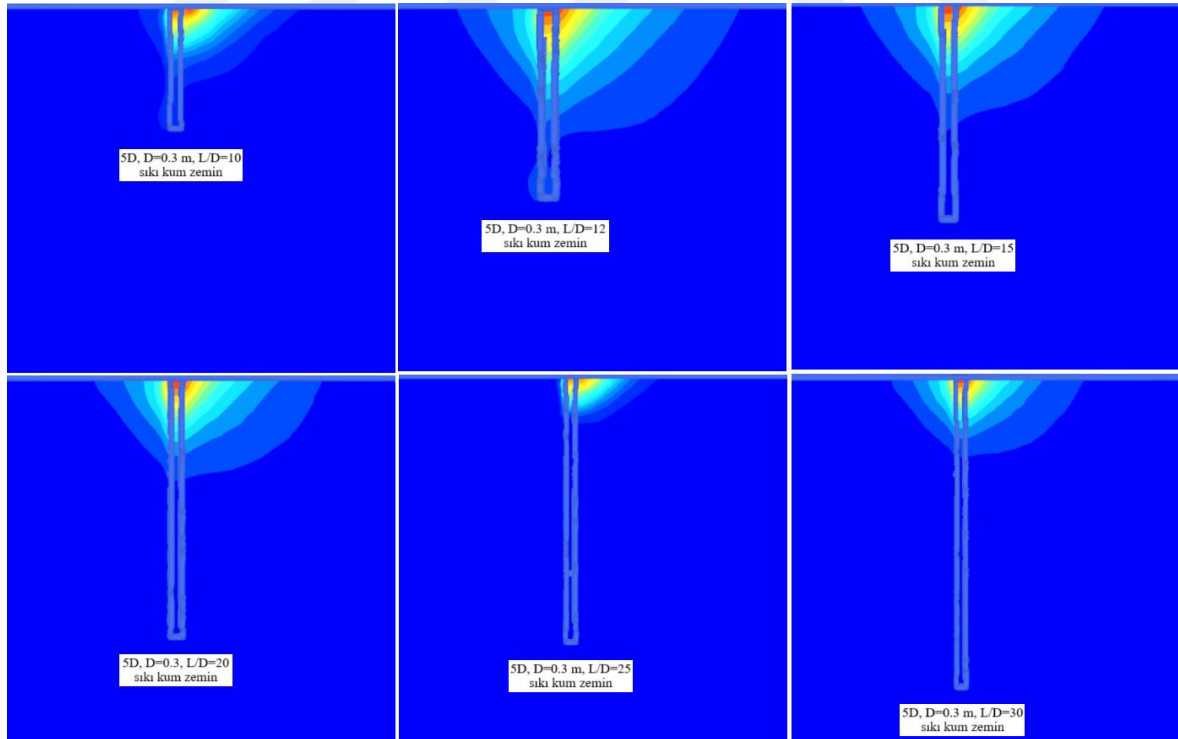


Şekil 60.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Şekil 61’de  $D=0.3$  m olan kazıklar arası mesafe  $5D$  olan sıkı kum zemin durumundaki kazıkların  $L/D$  oranlarındaki yanal yük-kazık başı yanal ötelenme eğrileri verilmiştir.  $L/D$  oranları büyüdükçe aynı deplasman değerlerinde daha fazla yanal yük değerleri elde edilmiştir.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan durumdaki yük deplasman eğrileri de benzerlik göstermektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan durumlarda yük-deplasman eğrilerinin benzerliği görülmektedir.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 62’de verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olduğu durumdaki kazıklarda kısa kazık davranışı görülmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olduğu oranlarda kazıklarda uzun kazık davranışları tespit edilmiştir. Şekil 60 ve 62’deki Plaxis 3D analiz görüntüleri incelendiğinde, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde kazıklar arası mesafe  $5D$  ve  $D=0.3$  m olan  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olduğu kazıklarda kısa kazık davranışı görülmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olduğu durumda kazıklar uzun kazık gibi davranmışlardır. Grafikler incelendiğinde,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranlarında benzer deplasman değerleri elde edilmiştir.

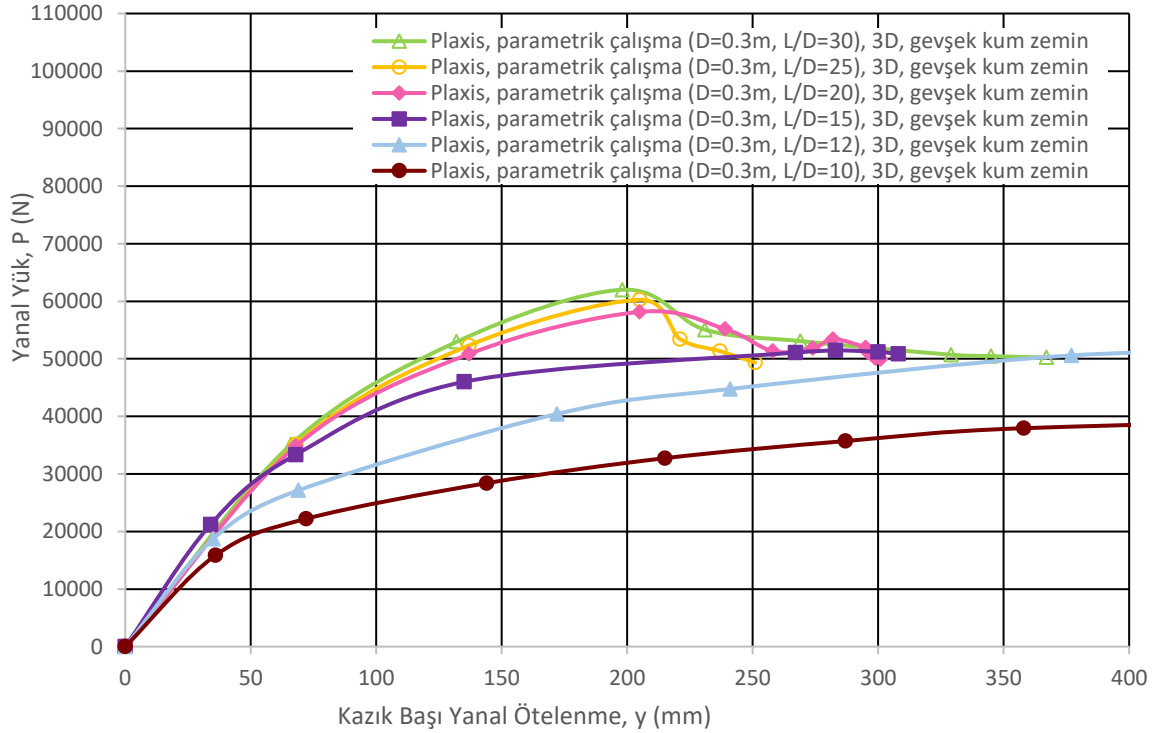


Şekil 61. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

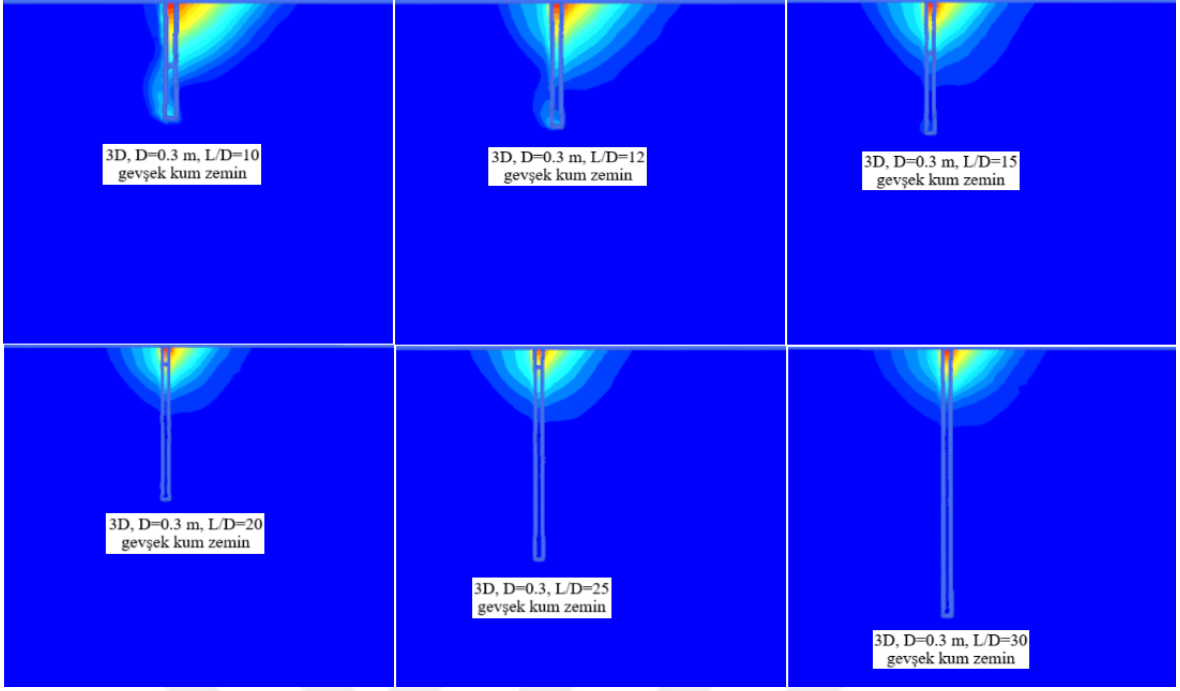


Şekil 62. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 63'te verilmektedir. Yanal yük- kazık başı yanal ötelenme eğrilerinin en altta  $L/D=10$  ve yukarı eğrilerin sırasıyla  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olduğu görülmektedir.  $L/D=10$  olan kazıklarda diğer oranlara göre aynı yanal yüklerde fazla yanal ötelenmenin olduğu belirlenmiştir.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 64'te gösterilmektedir.  $L/D=10$ ,  $L/D=12$  olan kazıkların kısa kazık gibi davrandığı görülmektedir.  $L/D=15$  olan kazıklarda ise kazık alt uç kısmında az bir hareket alanı olduğu görülmüştür.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı belirlenmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranlarındaki yatay yük-deplasman eğrileri yükselmiş ve aynı deplasman değerinden sonra azalmıştır.  $L/D=10$  oranında diğer oranlardan daha düşük yatay yük değerlerine ulaşılmıştır. Kazık uzunluğunun artmasıyla daha yüksek yatay yük değerlerine ulaşılmıştır.

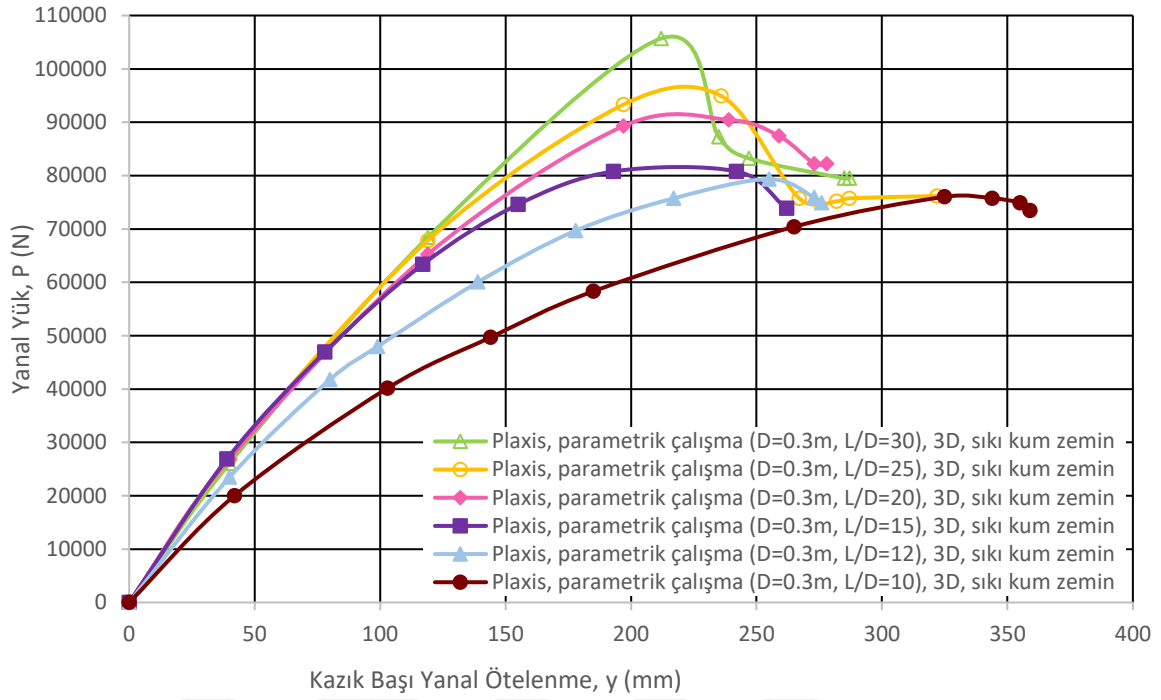


Şekil 63.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

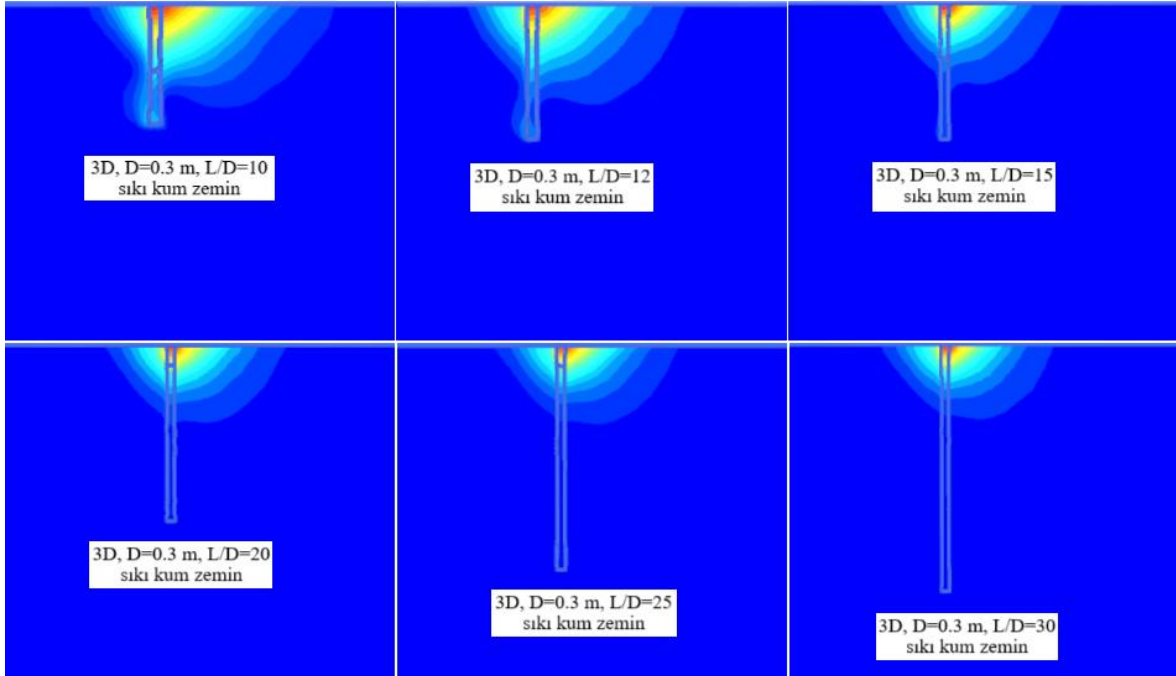


Şekil 64.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Şekil 65'te  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) verilmektedir. Grafik incelendiğinde  $L/D=10$  olan kazıkta deplasman değerine karşılık gelen yanal yük değerleri diğer oranlara göre daha düşüktür. Yanal yük-deplasman grafiği eğrileri aşağıdan yukarı doğru sırasıyla  $L/D=10$ ,  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranlarındadır. Kazık uzunluğu arttıkça aynı kazık başı yanal ötelenme değerlerinde daha fazla yanal yüke sahip olduğu görülmüştür.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda kazığın kırılması hemen hemen aynı deplasman değerlerinde olmuştur.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 66'da gösterilmektedir.  $L/D=10$ ,  $L/D=12$  olan kazıklar hem kazık başı hemde kazık alt uç kısmında dönmeye ve yer değiştirmeye uğrayarak kısa kazık davranışı görülmektedir.  $L/D=15$  olan kazıkta ise kısa kazık davranışı az da olsa olduğu tespit edilmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür. Şekil 64 ve 66'da Plaxis 3D analiz görüntüleri karşılaştırıldığında hem gevşek kum hem de sıkı kum zeminde  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda kısa kazık davranışının,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkların ise uzun kazık gibi davranışının olduğu tespit edilmiştir.

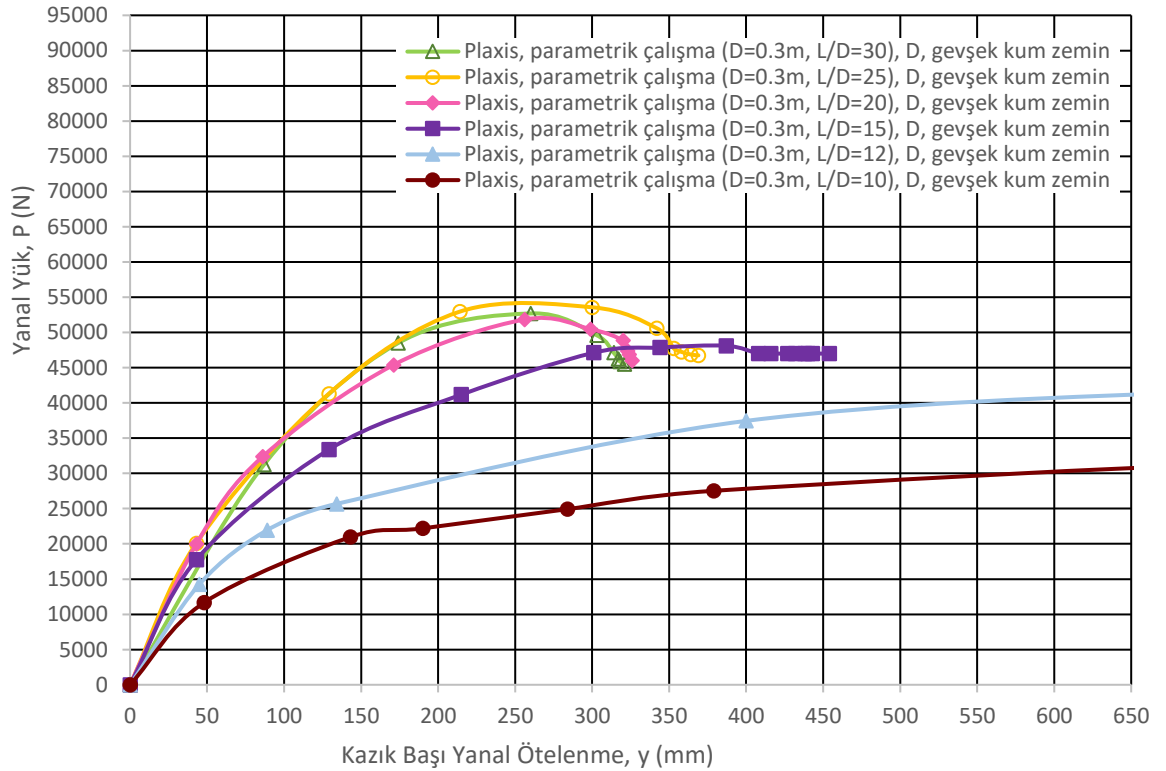


Şekil 65. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

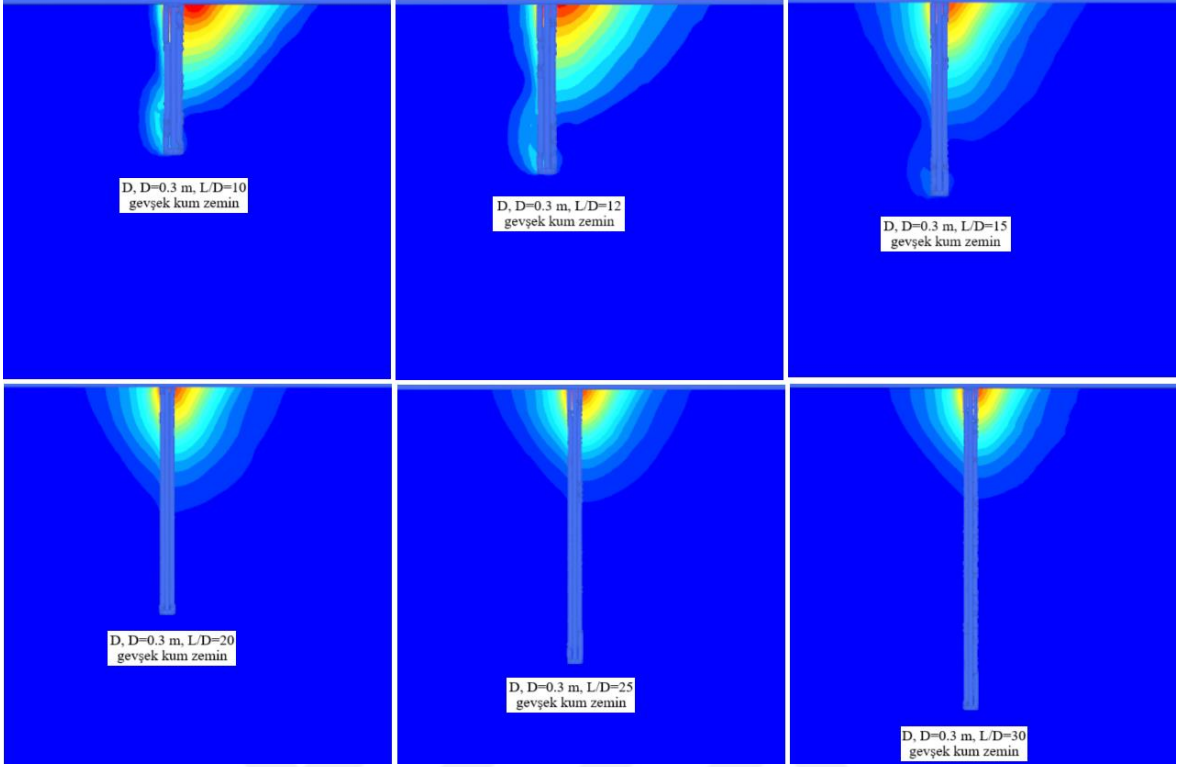


Şekil 66. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 67’de verilmektedir.  $L/D=10$  oranındaki kazığın diğer oranlardan daha aşağıda yanal yük-deplasman eğrisine sahip olduğu belirlenmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük- kazık başı yanal ötelenme eğrisinin benzer şekilde olduğu tespit edilmiştir.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan kazıklarda yük deplasman eğrileri arada diğer oranların arasında kalmıştır.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 68’de verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda belirgin bir şekilde kısa kazık davranışı olduğu görülmektedir.  $L/D=15$  olan kazıkta da kısa kazık davranışının bulunduğu belirlenmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkların davranışının uzun kazıklardaki gibi kazık baş kısmında dönme ve yer değişme, kazık alt kısmında ise hareketin olmadığı görülmüştür.

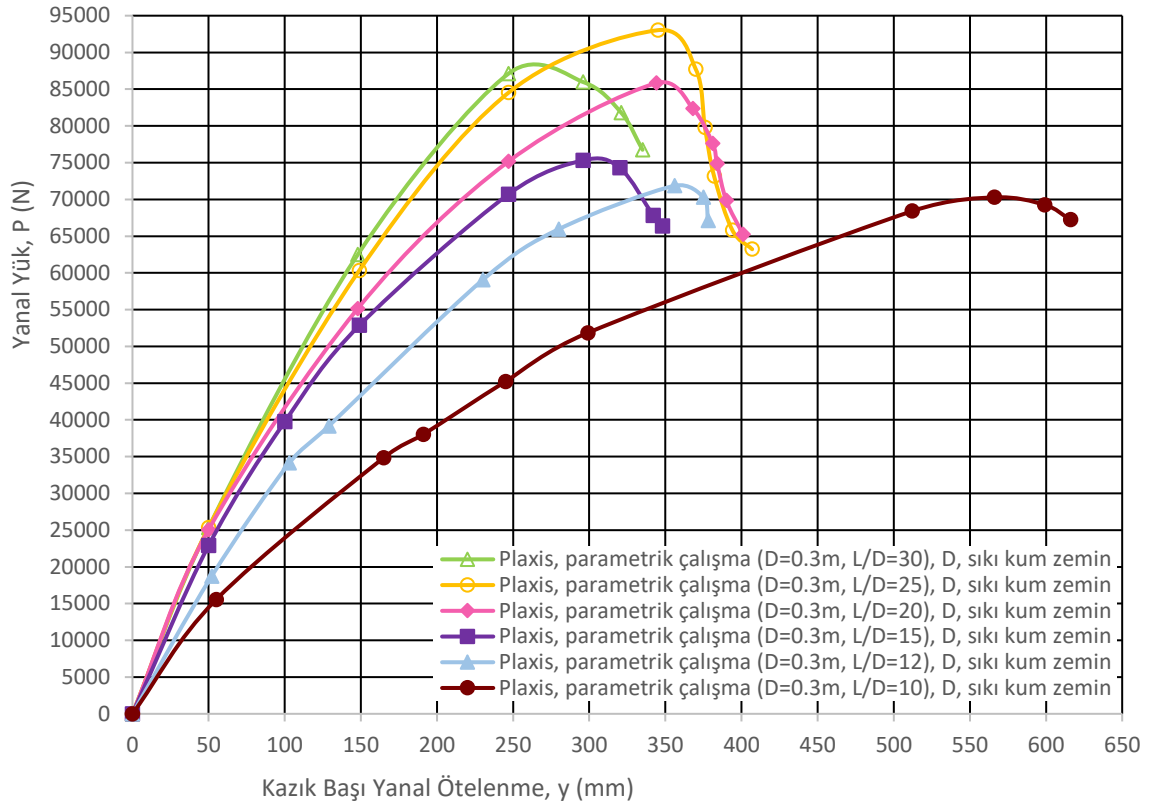


Şekil 67.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

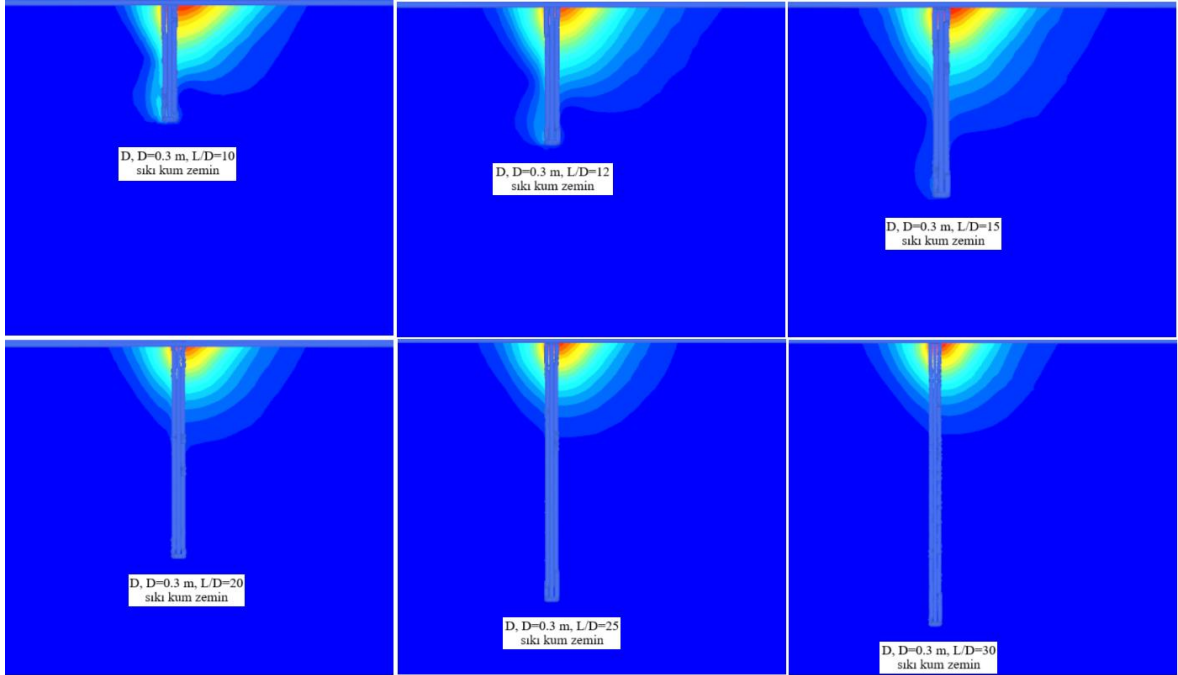


Şekil 68.  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanıl yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 69’da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta yük-deplasman grafiği eğrisinin diğer oranlardan farklı olduğu görülmektedir.  $L/D=20$  ve  $L/D=25$  olan kazıklarda hemen hemen aynı kazık başı yanıl ötelenme değeriinde kırılma olduğu görülmüştür. Sıkı kum zeminde,  $D=0.3$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 70’de verilmiştir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda çok belirgin olarak kısa kazık davranışın olduğu belirlenmiştir.  $L/D=15$  olan kazık kısa kazık gibi davranmıştır.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkları kazık başında uzun kazık gibi davranışın olduğu tespit edilmiş ve kazıkların alt ucunda hareket olmadığı görülmüştür. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde Şekil 68 ve 70’deki Plaxis 3D analiz görüntüleri karşılaştırıldığında  $L/D=10$ ,  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan kazıkların kısa kazık davranışının,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda da uzun kazık davranış olduğu görülmüştür.

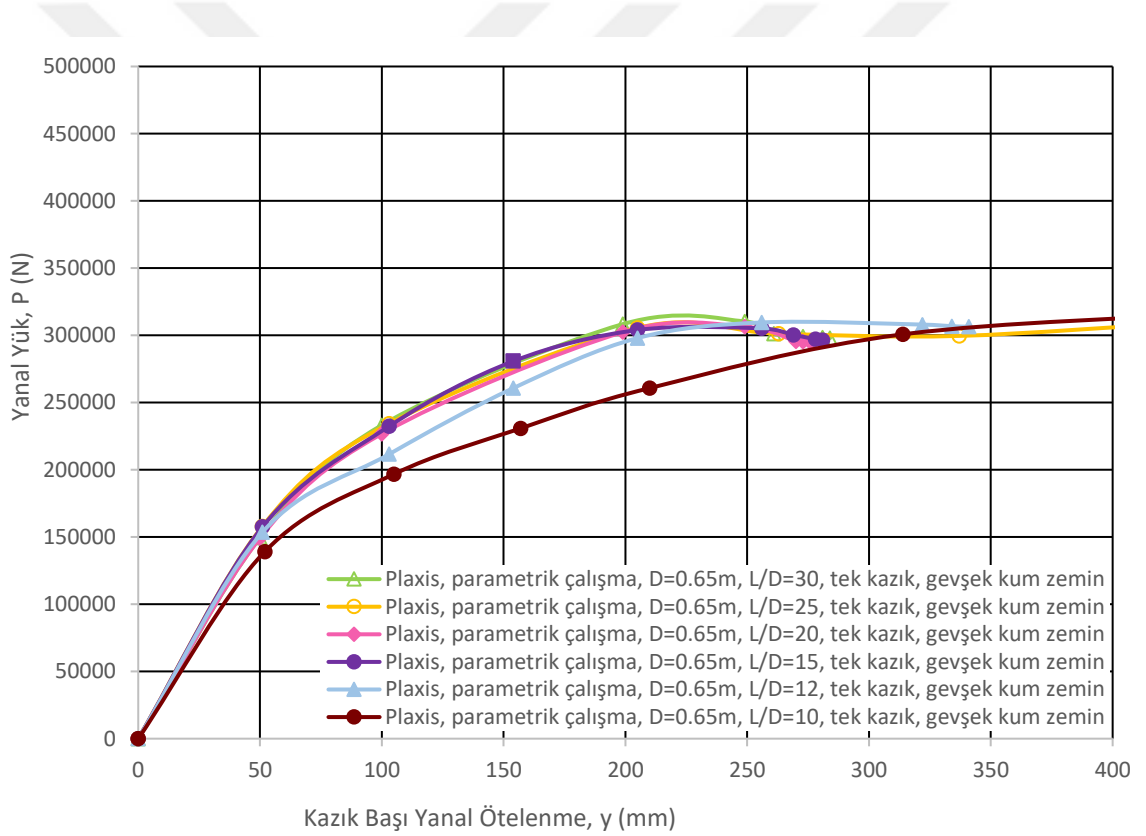


Şekil 69. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

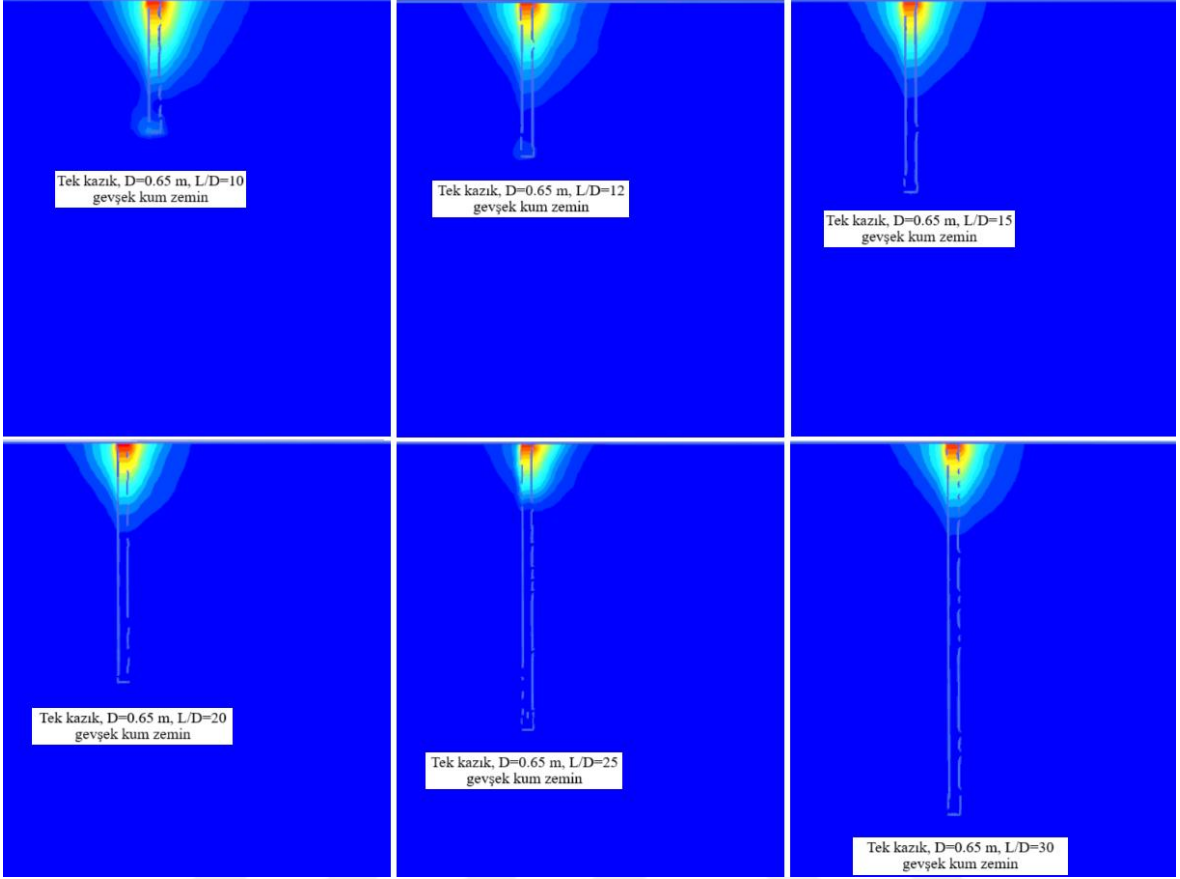


Şekil 70. D=0.3 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 71’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan tek kazık yük-deplasman eğrisinin diğer oranların en altında kaldığı görülmüştür.  $L/D=12$  olan tek kazık yük deplasman eğrisi arada kalmıştır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan tek kazıkların yanal yük-deplasman eğrilerinin aynı olduğu görülmüştür. Gevşek kum zemin durumunda,  $D=0.65$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 72’de verilmiştir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık gibi davranış göstererek hem dönme hem de yer değiştirme görülmektedir.  $L/D=12$  olan kazıkta kazık baş kısmında dönme ve yer değiştirme görülürken kazık alt uç kısmında hareketin az olduğu belirlenmiştir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı tespit edilmiştir.

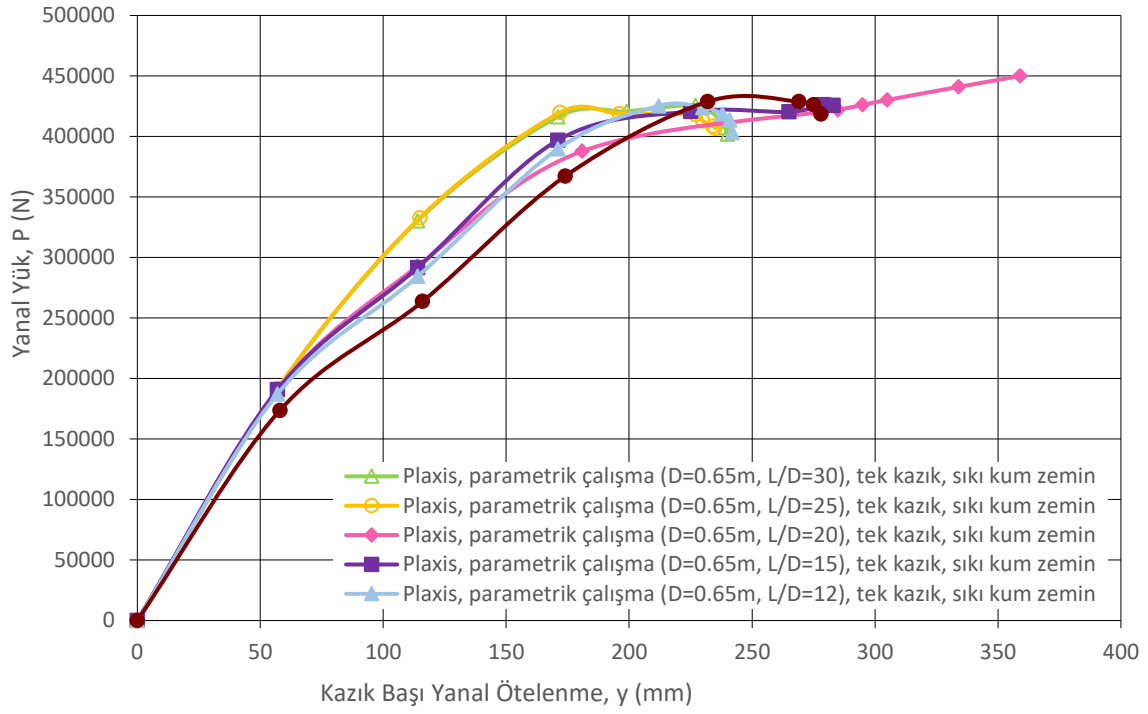


Şekil 71.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

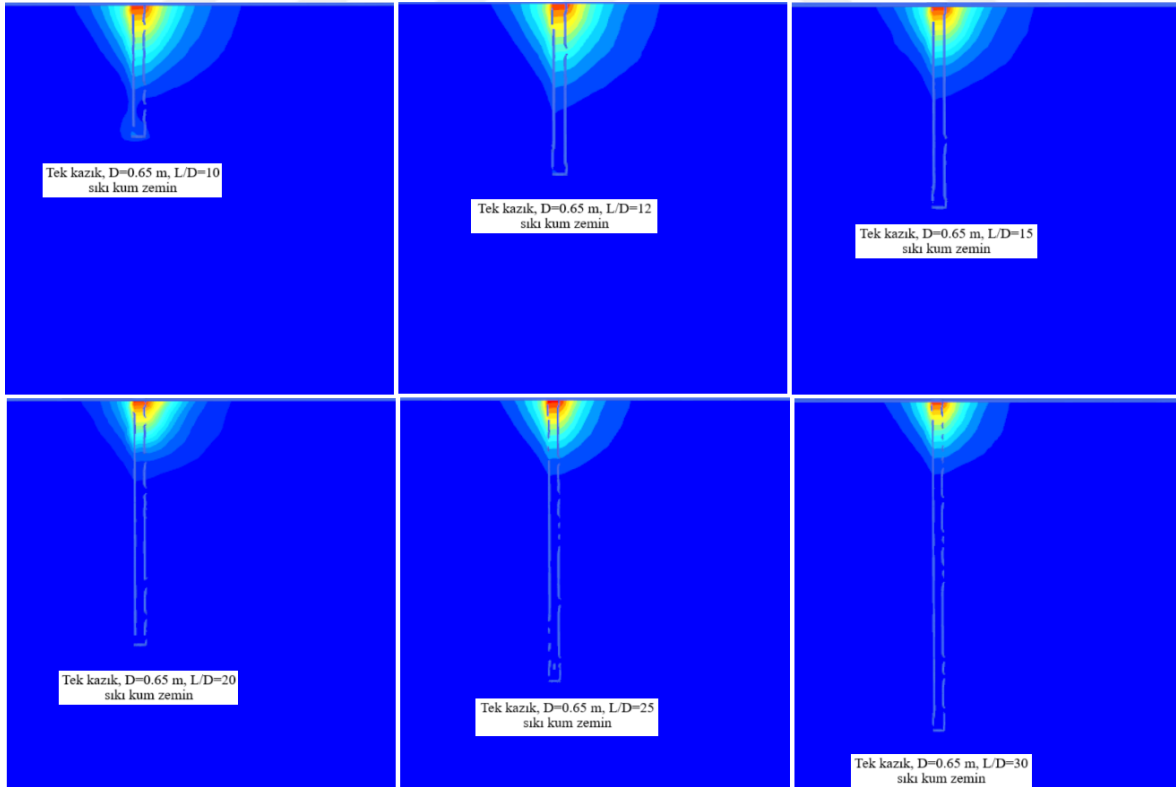


Şekil 72.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 73'te verilmektedir. Yük-deplasman grafiğindeki eğrilerin en alt kısmında  $L/D$  oranına sahip kazık yer almaktadır.  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük-kazık başı yanal ötelenme eğrisi üst üste çakışmıştır.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan grafiklerde de yük-deplasman eğrilerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. Sıkı kum zeminde,  $D=0.65$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 74'te verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta kısa kazık davranışı görülmektedir.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışlarının olduğu tespit edilmiştir. Şekil 72 ve 74'te verilen Plaxis 3D analiz görüntüleri incelendiğinde hem gevşek hem de sıkı kum zeminde  $L/D=10$  olan kazıkların kısa kazık davranışında olduğu görülmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı olduğu görülmüştür.

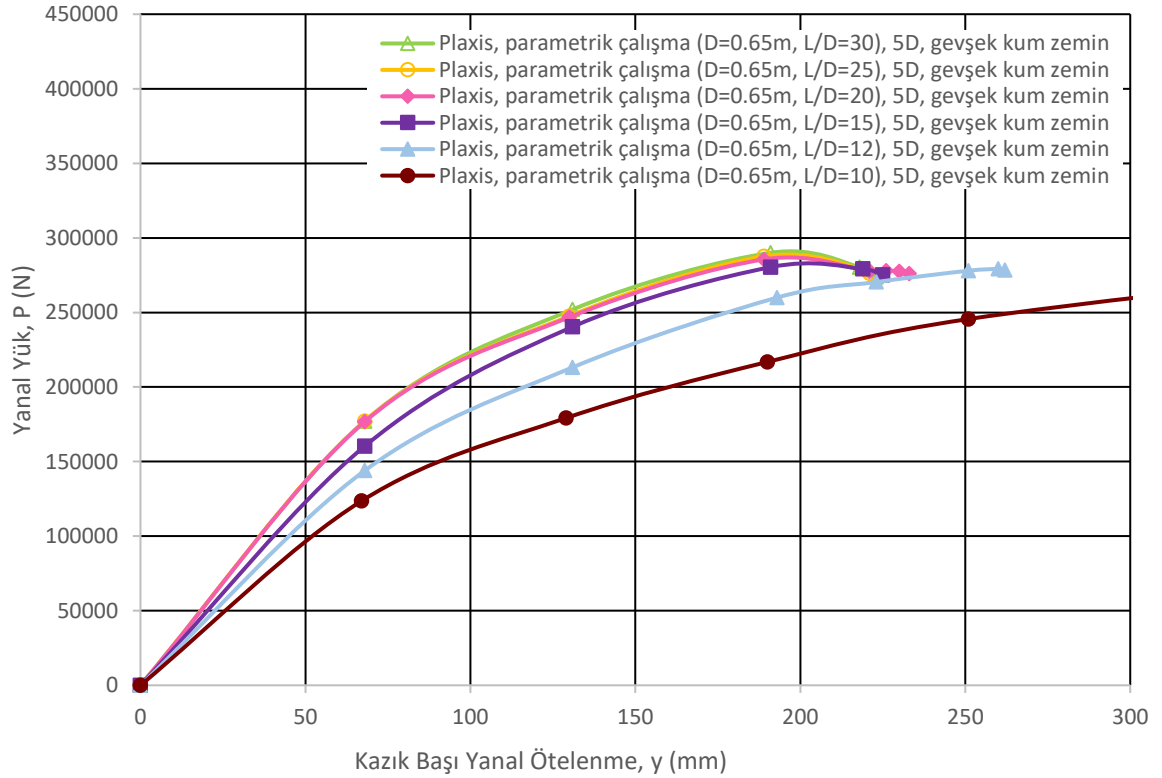


Şekil 73. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

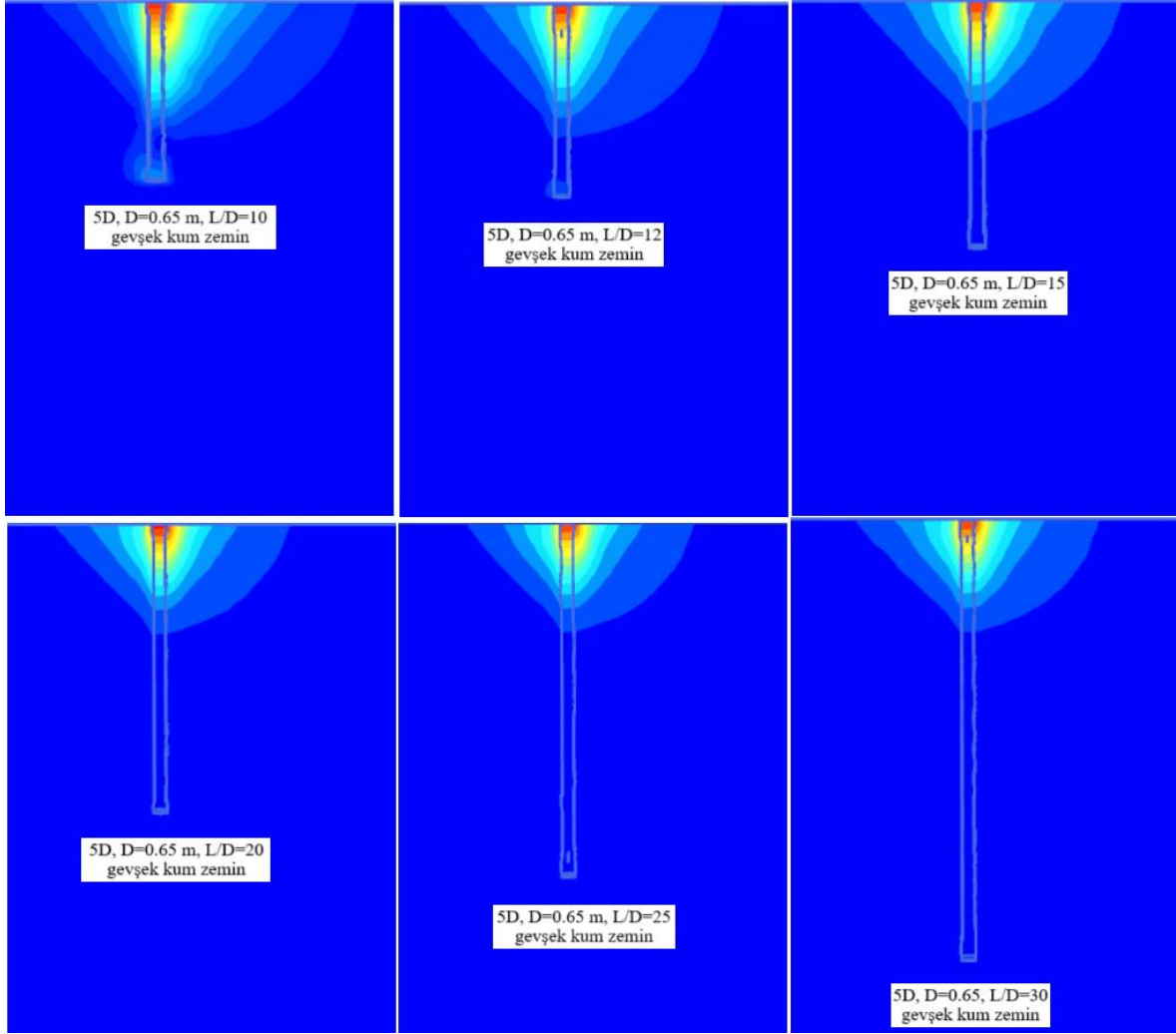


Şekil 74. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.65$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 75'te verilmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkların yatay yük- deplasman eğrilerinin hemen hemen üst üste geldiği,  $L/D=15$  olan kazığın yatay yük-deplasman eğrisinin de  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklardaki eğrilere yaklaştığı görülmektedir. Yanal yük-kazık başı yanal ötelenme eğrilerinin kazık uzunluğunun artmasıyla aynı deplasman değerlerinde daha fazla yanal yük değerlerine ulaştığı görülmüştür.  $L/D=12$  olan yanal yük-deplasman eğrisinin ne  $L/D=10$  ne de diğer kazıklar gibi olduğu yanal yük-deplasman eğrisinin ortada kaldığı görülmüştür. Gevşek kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 76'da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık davranışında bulunmaktadır.  $L/D=12$  olan kazıkta kazık başında yer değiştirme ve dönme hareketi görülürken kazık alt ucunda dönme olmadığı sadece hareket olduğu görülmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışların olduğu görülmektedir.

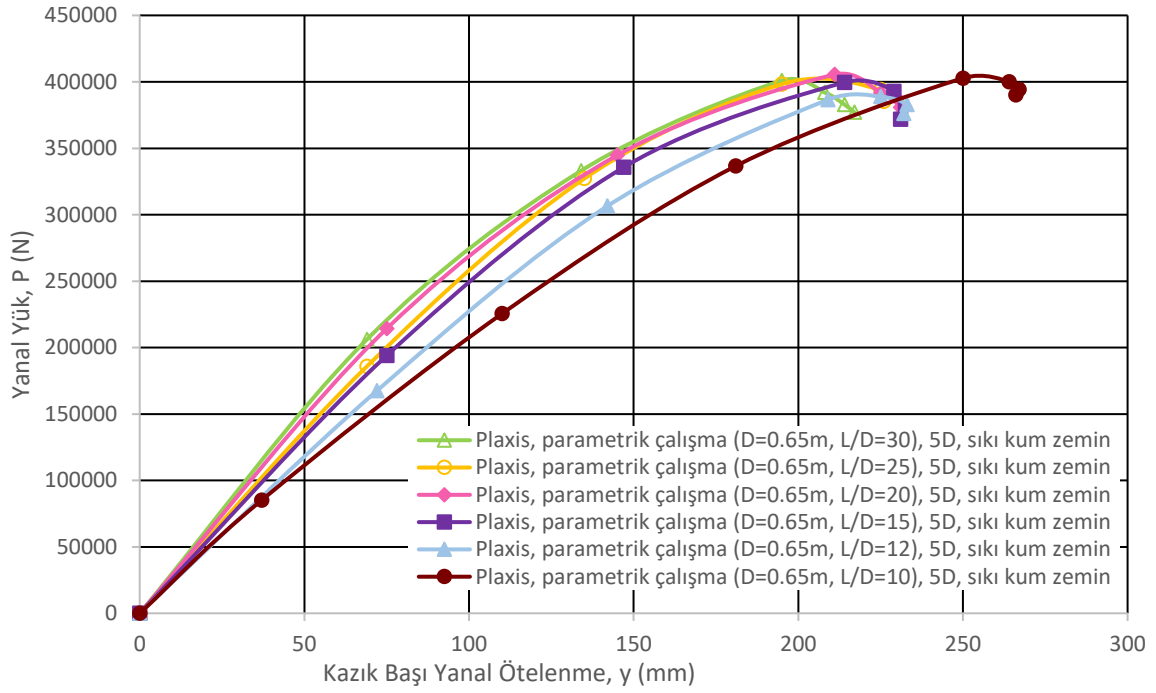


Şekil 75.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

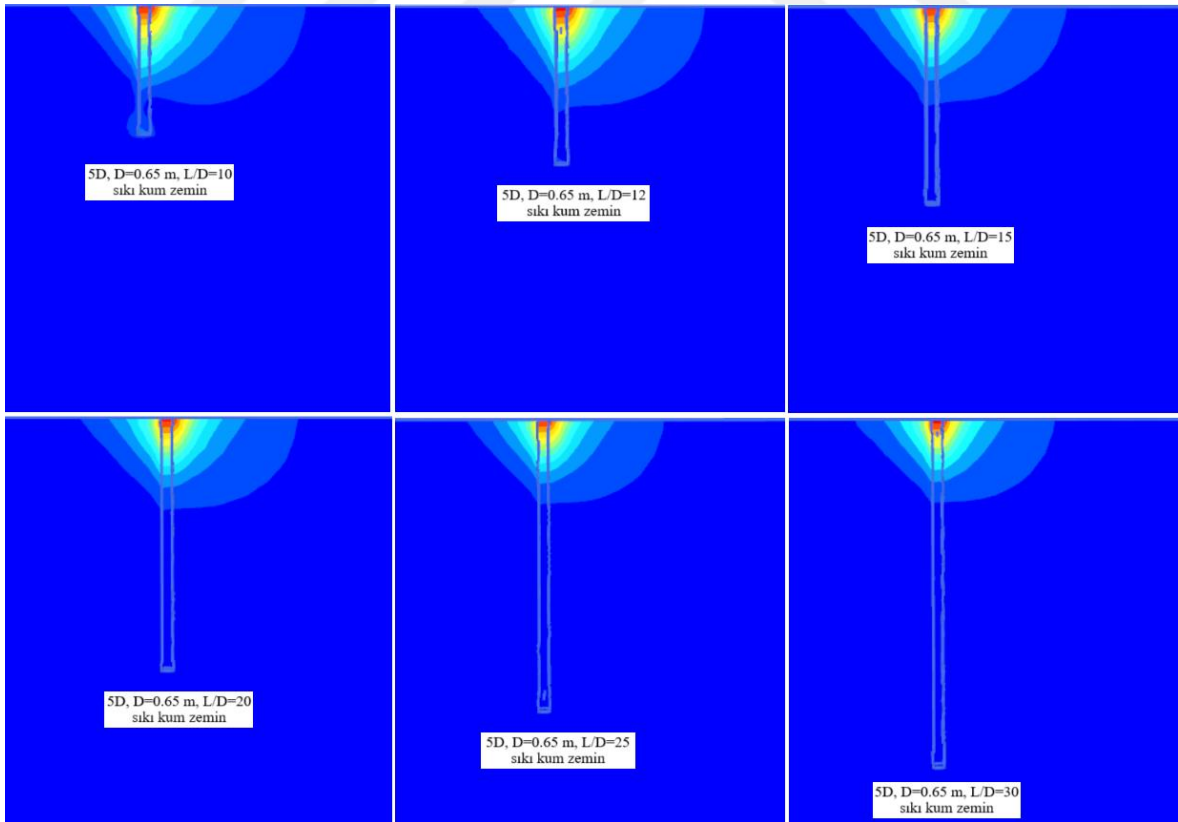


Şekil 76.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.65$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 77’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta diğer oranlardakilerle karşılaştırıldığında aynı yanal yük değerinde kazık başı yanal ötelenme değerinin daha büyük olduğu görülmüştür.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrileri benzerlik göstermiştir. Kazık uzunluğunun artmasıyla kazık başı yanal ötelenmelerde azalma görülmektedir. Sıkı kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 78’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta kısa kazık davranışlarının olduğu görülmüştür.  $L/D=12$  olan kazıkta kazık başı ucunda dönme ve yer değiştirme görülürken kazık alt ucunda çok az bir hareket olduğu görülmüştür.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışları görülmüştür.

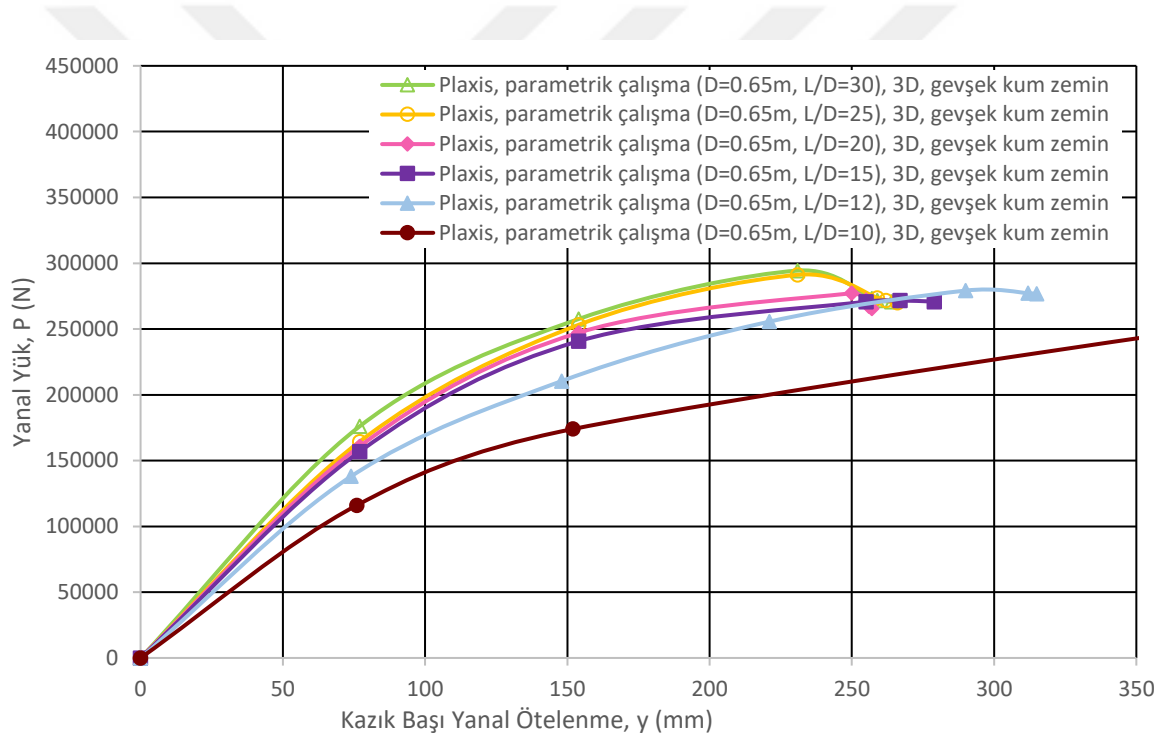


Şekil 77. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

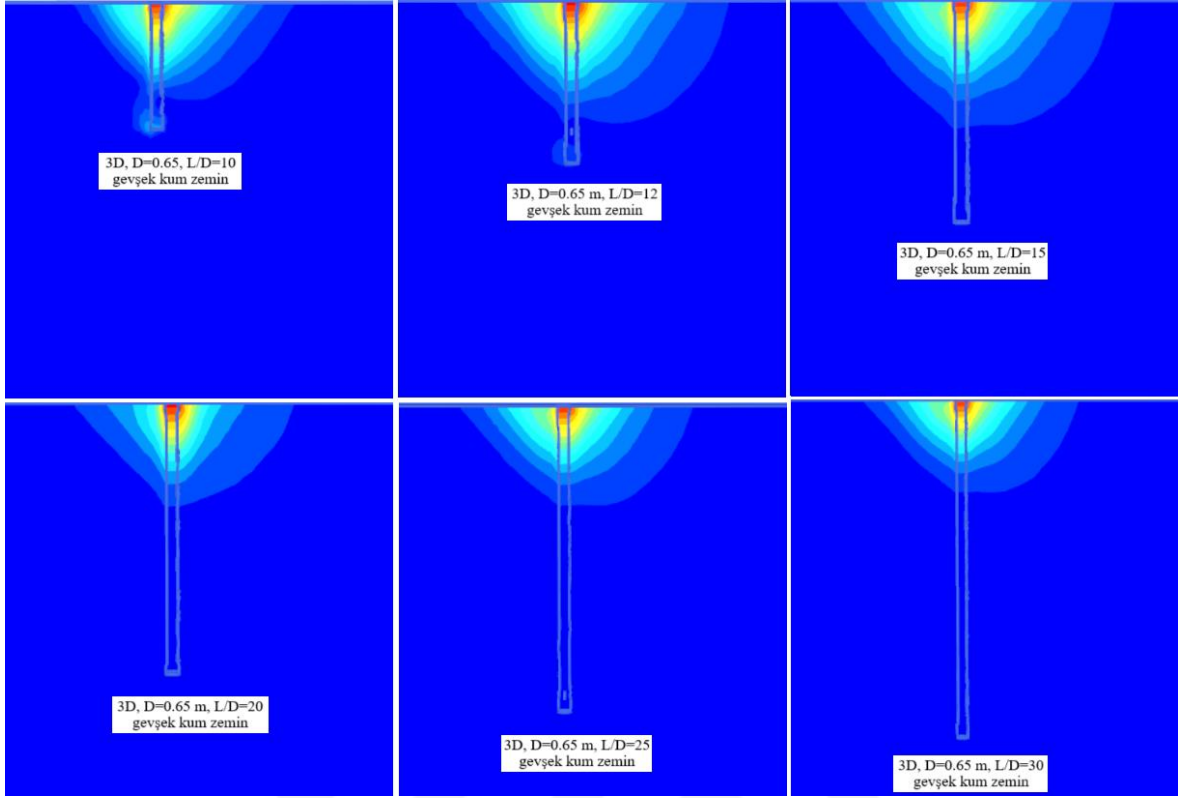


Şekil 78. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

Gevşek kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 79’da verilmektedir. Yanal yük-deplasman eğrilerinin  $L/D=15$  ve  $L/D=20$  olanların benzer,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarında benzer olduğu görülmüştür.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 80’de verilmiştir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık davranışındadır.  $L/D=12$  olan kazıkta kısa kazık gibi kazık başı uç kısmında az bir hareketin olduğu görülmüştür.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür. Şekil 80 ve Şekil 82’de Plaxis 3D analiz görüntülerinin karşılaştırıldığında  $L/D=10$  kısa kazık davranışındadır,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür.

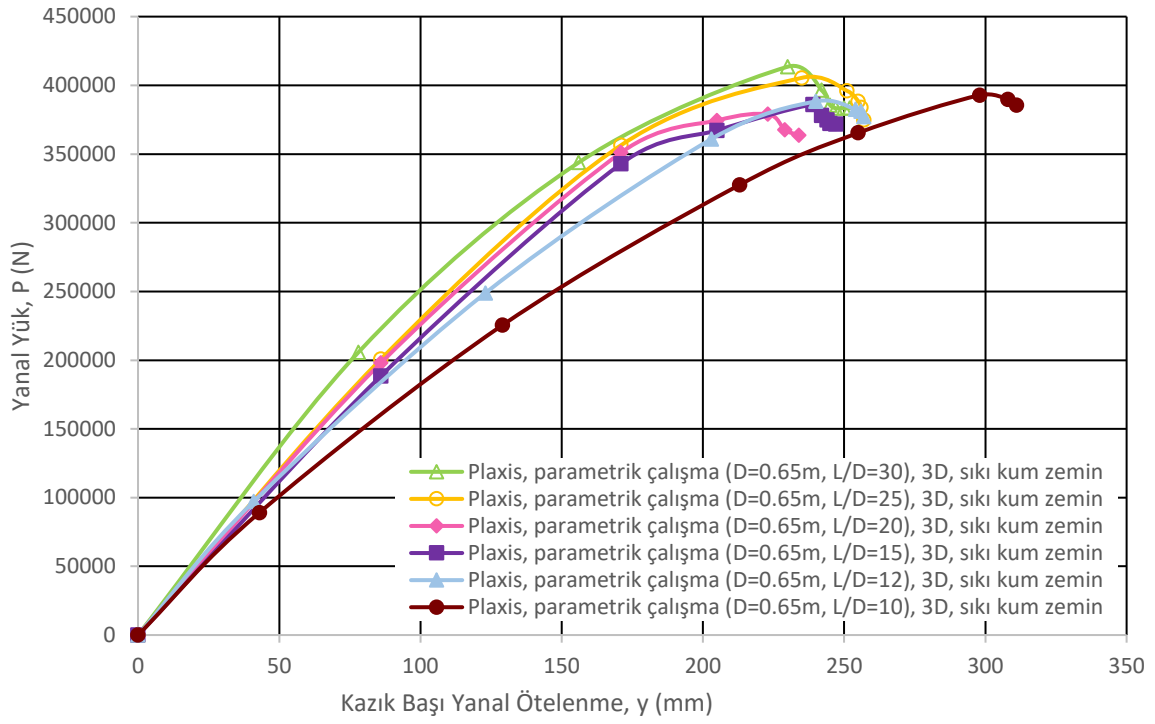


Şekil 79.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

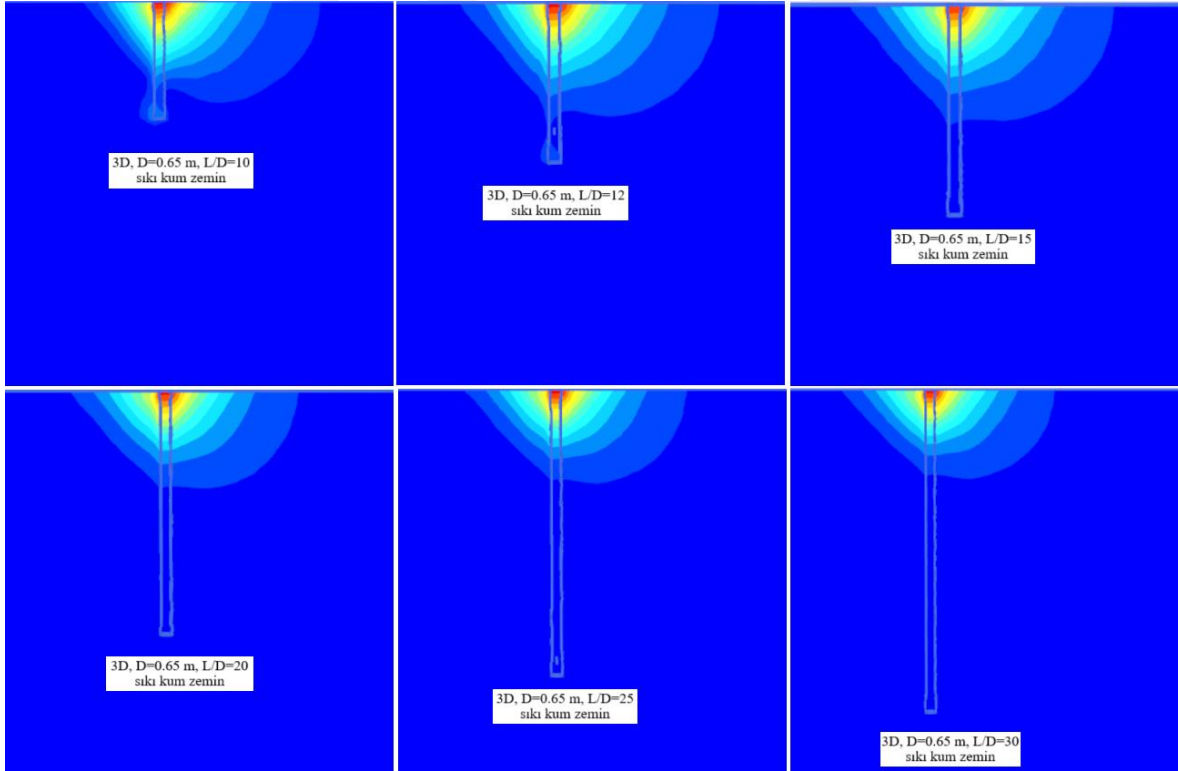


Şekil 80.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Sıkı kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 81’de verilmektedir. Yanal yük-deplasman eğrilerinin  $L/D=15$  ve  $L/D=20$  olan kazıkların benzer,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarında benzer olduğu görülmüştür.  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  oranındaki kazıklarda aynı deplasman değerinden sonra yatay yük değerlerinde azalma görülmüştür.  $L/D=10$  oranındaki kazığın yatay yük-deplasman eğrisi diğer orana sahip kazıklardan daha farklı bir grafiğe sahip olduğu görülmüştür.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 82’de verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda kısa kazık davranışı görülmüştür.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışları görülmüştür.

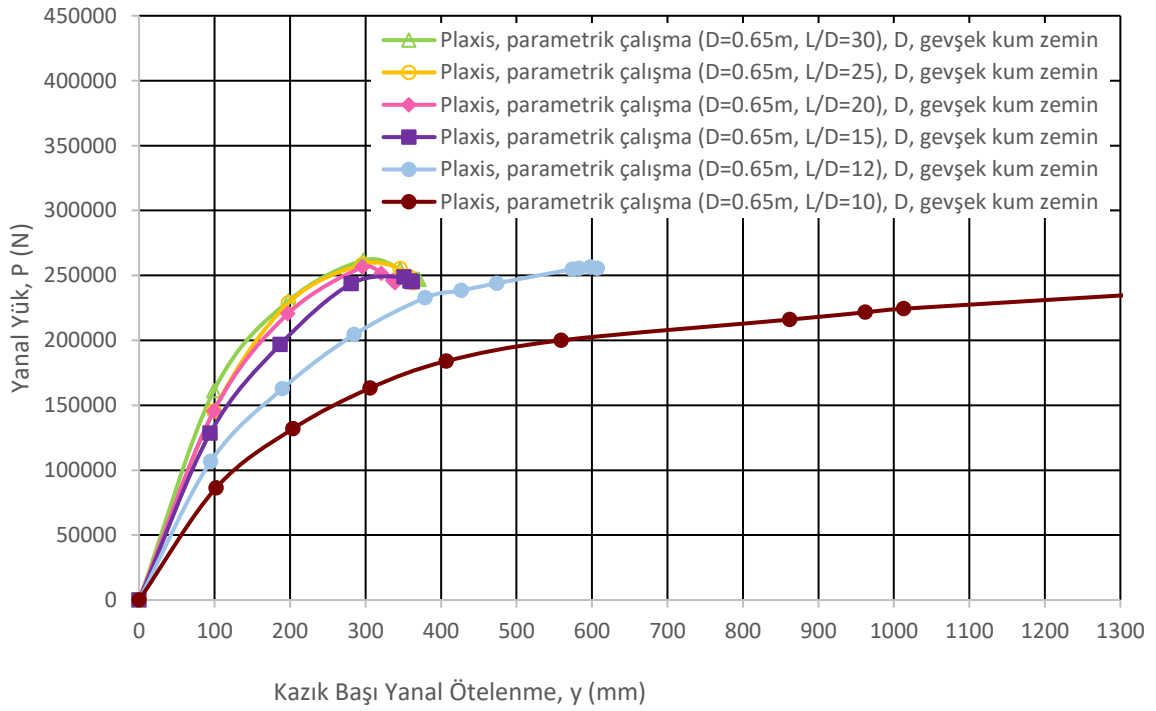


Şekil 81. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

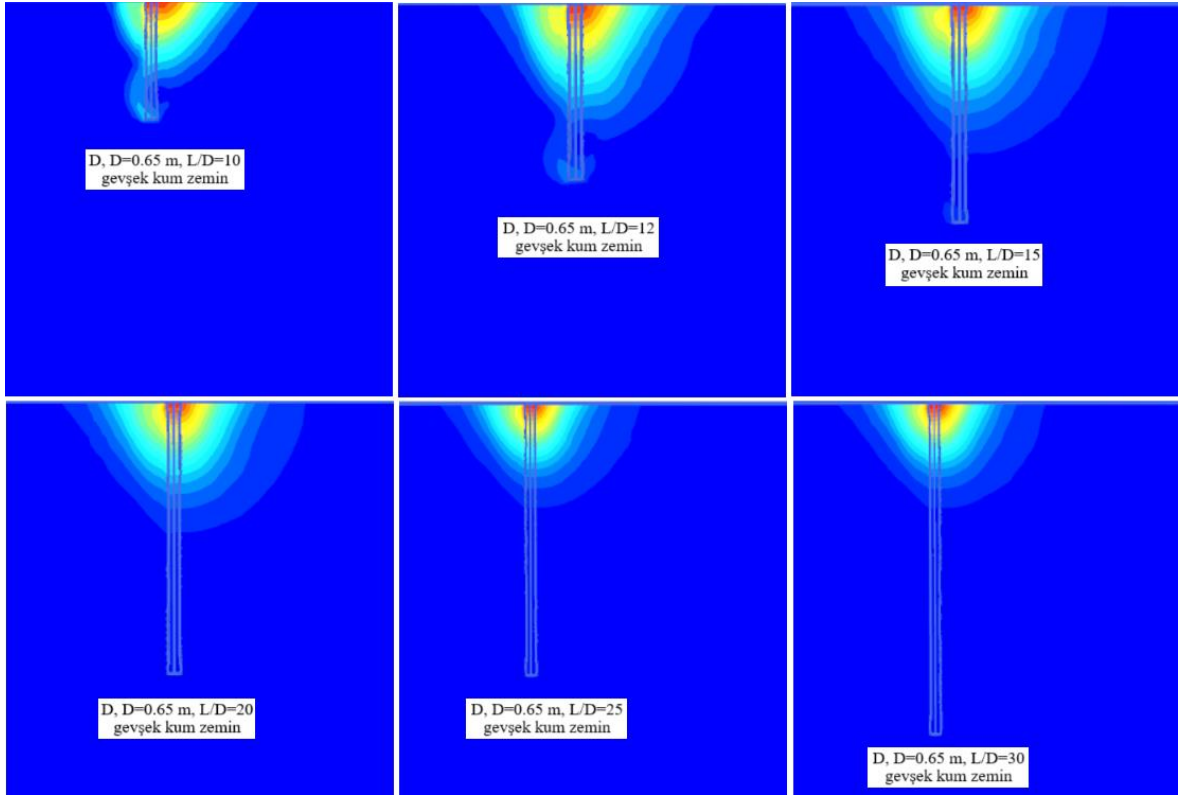


Şekil 82. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 83'te verilmektedir.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkların yatay yük-deplasman eğrilerinde benzerlik görülmüştür. Kazıkların uzunluklarının artmasıyla yatay yük değerlerinde artışın olduğu belirlenmiştir.  $L/D=10$  oranına sahip kazığın yatay yük-deplasman eğrisi diğer orana sahip kazıklardan daha aşağıda eğriye sahip olduğu belirlenmiştir. Gevşek kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 84'te verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklar kısa kazık davranışındadır.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışındadır.

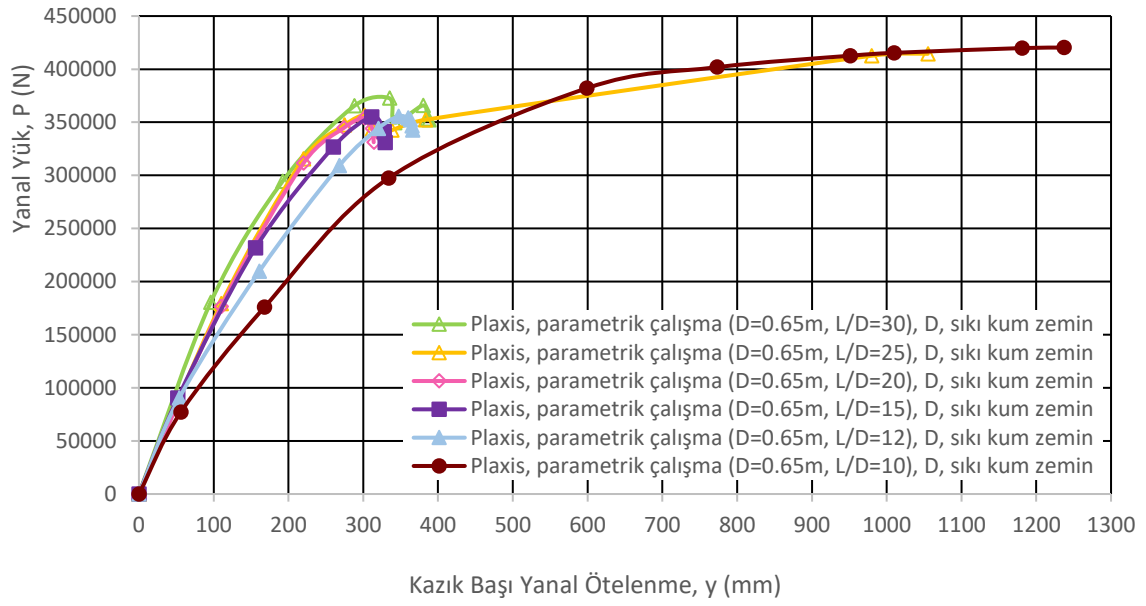


Şekil 83.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

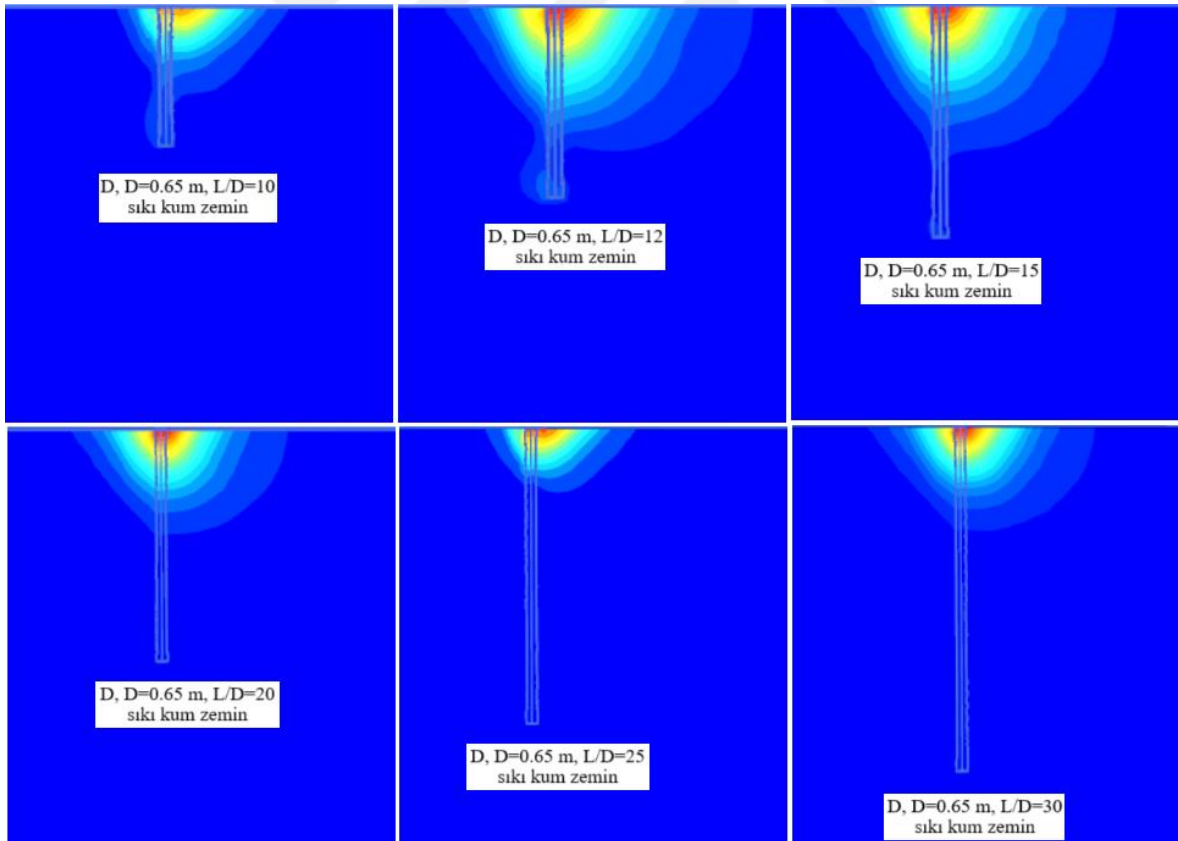


Şekil 84.  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 85'te verilmiştir.  $L/D=10$  oranına sahip kazıkların dışında olan diğer kazık oranlarında benzer yatay yük-deplasman eğrisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca sıkı kum zeminde, gevşek kum zemindeki yatay yüklerden daha fazla yatay yük değerleri elde edilmiştir. Sıkı kum zeminde,  $D=0.65$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 86'da verilmiştir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  kazıklar kısa kazık gibi hem kazık baş kısmında hem de kazık alt uç kısmında dönme ve yer değiştirme yapmışlardır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar yapısal göçmeye uğrayarak uzun kazık gibi davranış göstermiştir.

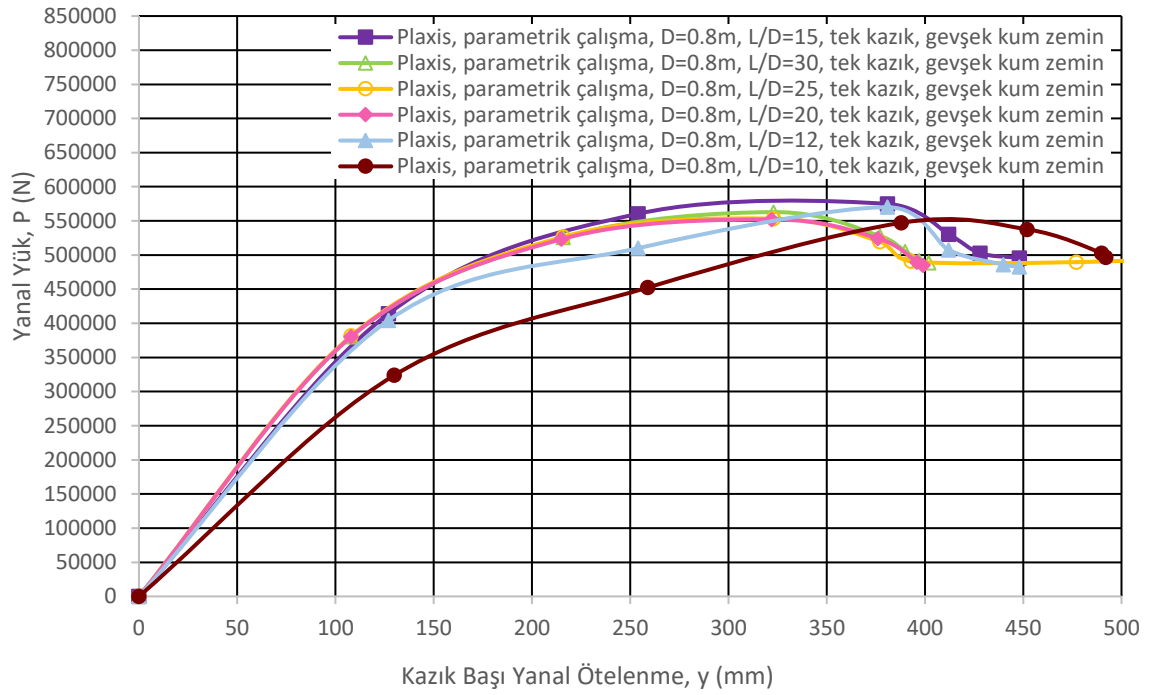


Şekil 85. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

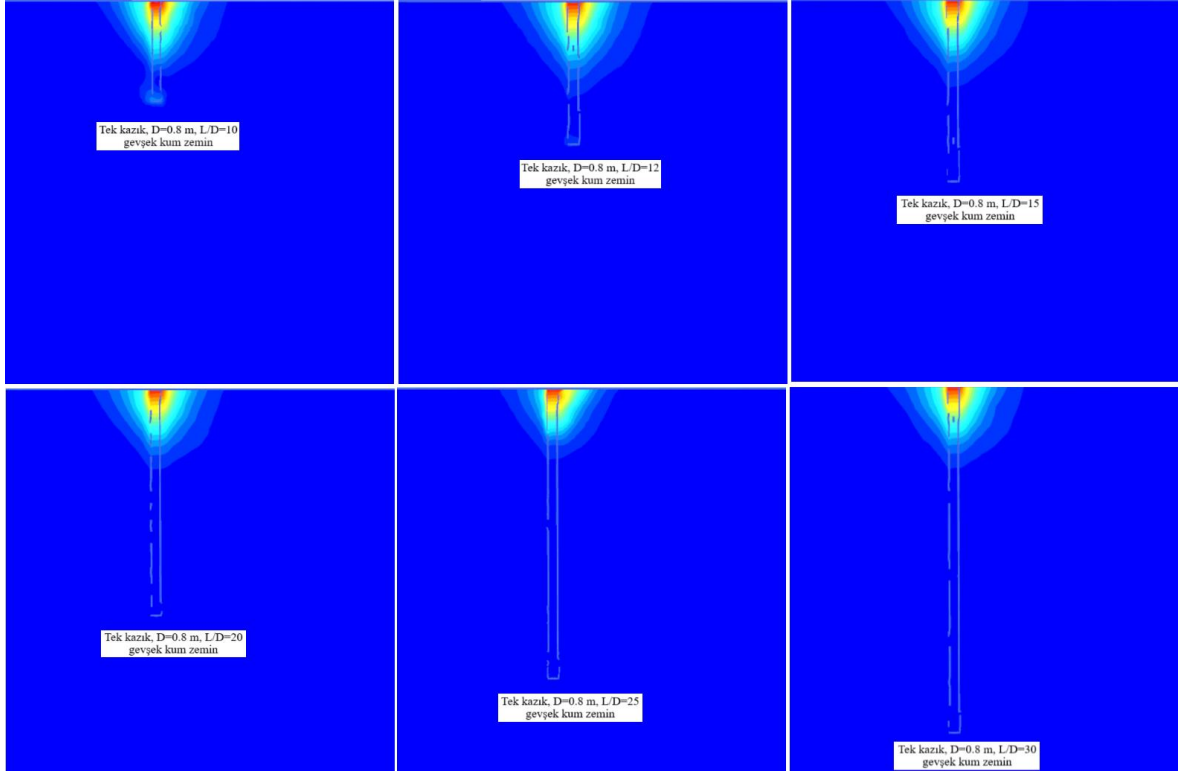


Şekil 86. D=0.65 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 87’de verilmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan oranlardaki kazıkların yanal yük-yatay deplasman değerleri benzer bir şekilde olduğu görülmüştür.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 88’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kısa kazık davranışındadır.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar kazıkların kırıldığı ve uzun kazık davranışı olduğu görülmüştür.

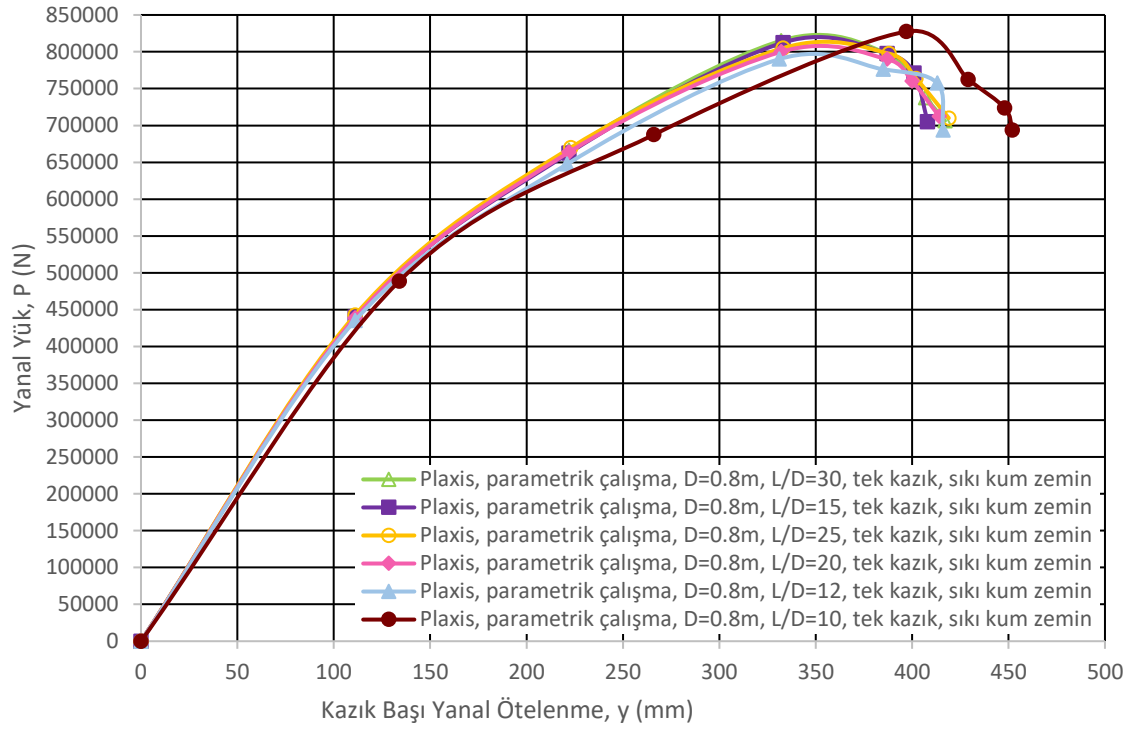


Şekil 87.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

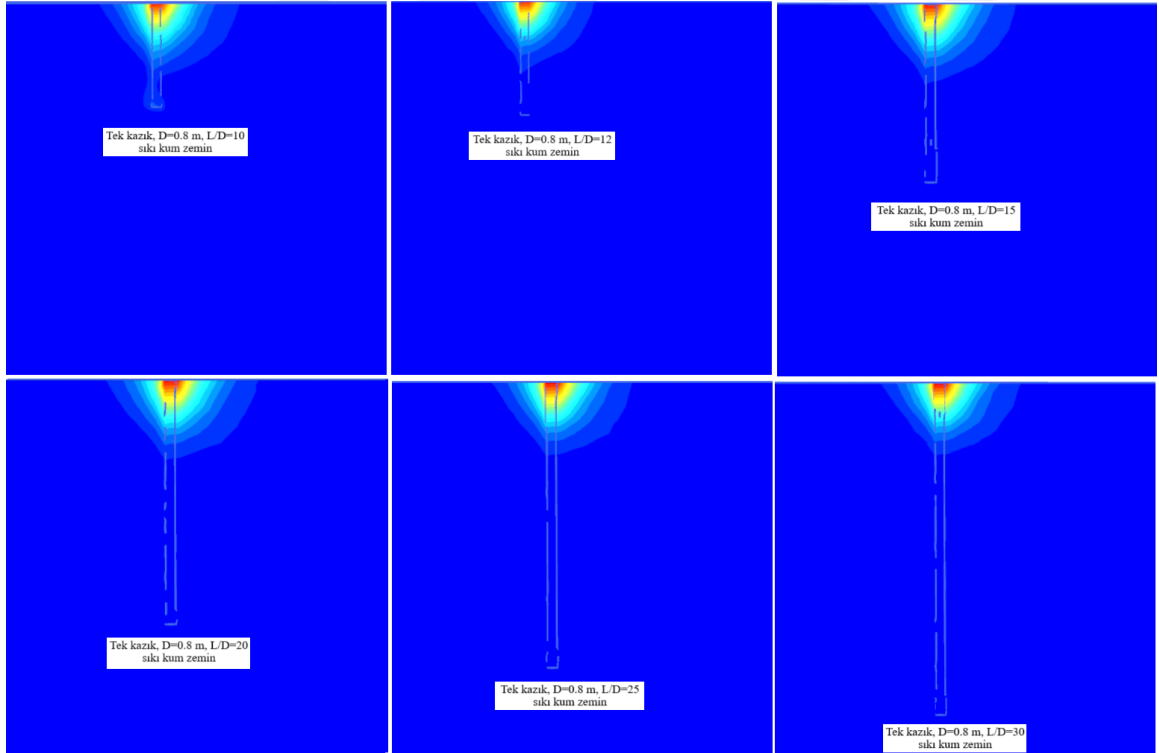


Şekil 88.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Sıkı kum zeminde,  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanıl yük-deplasman grafiği Şekil 89’da verilmektedir.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıkların yanıl yük-deplasman eğrileri benzerlik göstermiştir.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 90’da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık davranışındadır.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışındadır. Şekil 87 ve 89’da yanıl yük-deplasman grafiği karşılaştırıldığında gevşek kum zeminde yanıl yük değerlerinin sıkı kum zeminden daha düşük değerlerde olduğu görölmüştür. Şekil 88 ve 90’da Plaxis 3D analiz görüntüleri karşılaştırıldığında hem gevşek hem de sıkı kum zeminde  $L/D=10$  olan kazıkların kısa kazık davranışında olduğu,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görölmüştür.

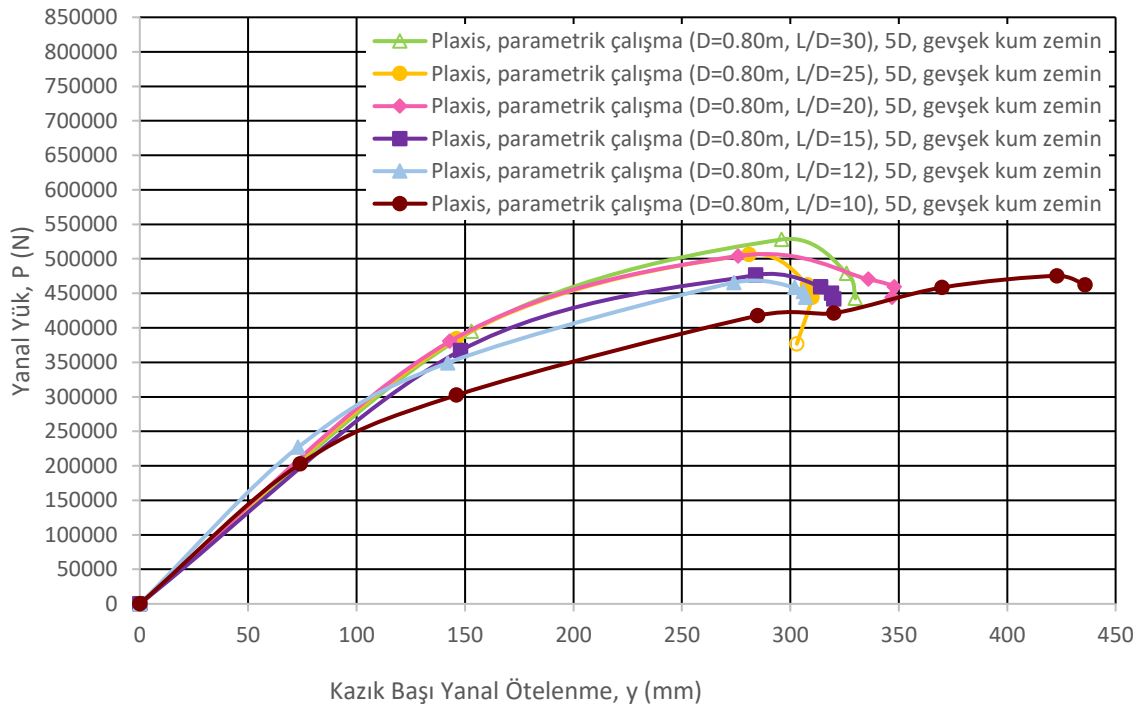


Şekil 89. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

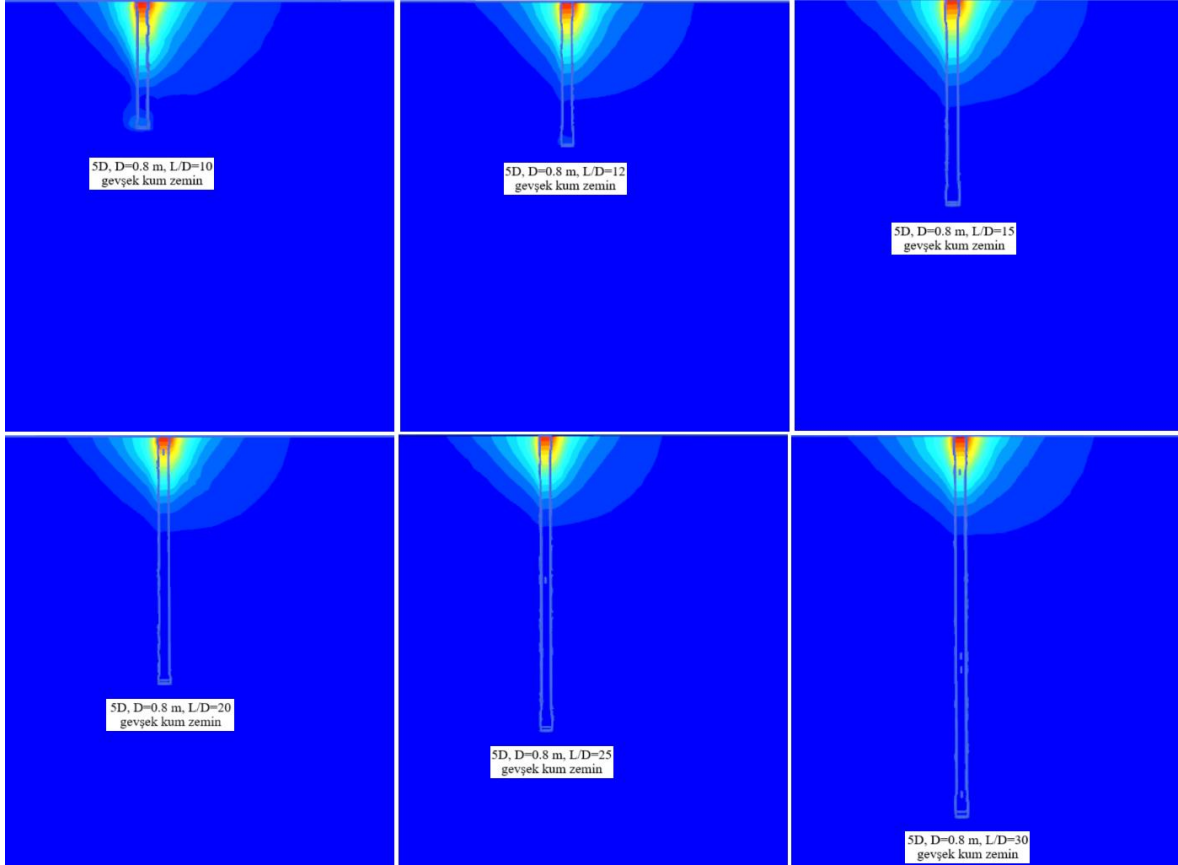


Şekil 90. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 91’de verilmektedir.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$ , yanal yük-deplasman grafiğinde eğriler benzerlik göstermiştir.  $L/D=20$  ve  $L/D=25$  olan kazıklarda grafikteki yanal yük-deplasman grafiği eğrisi benzerdir.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 92’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık davranışındadır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür.

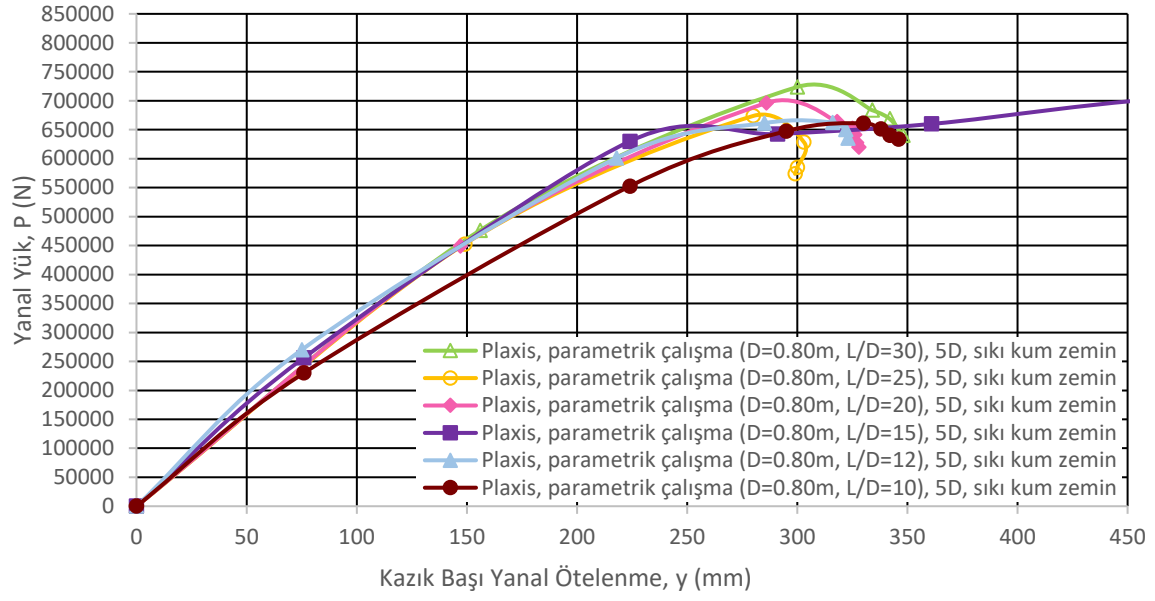


Şekil 91.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

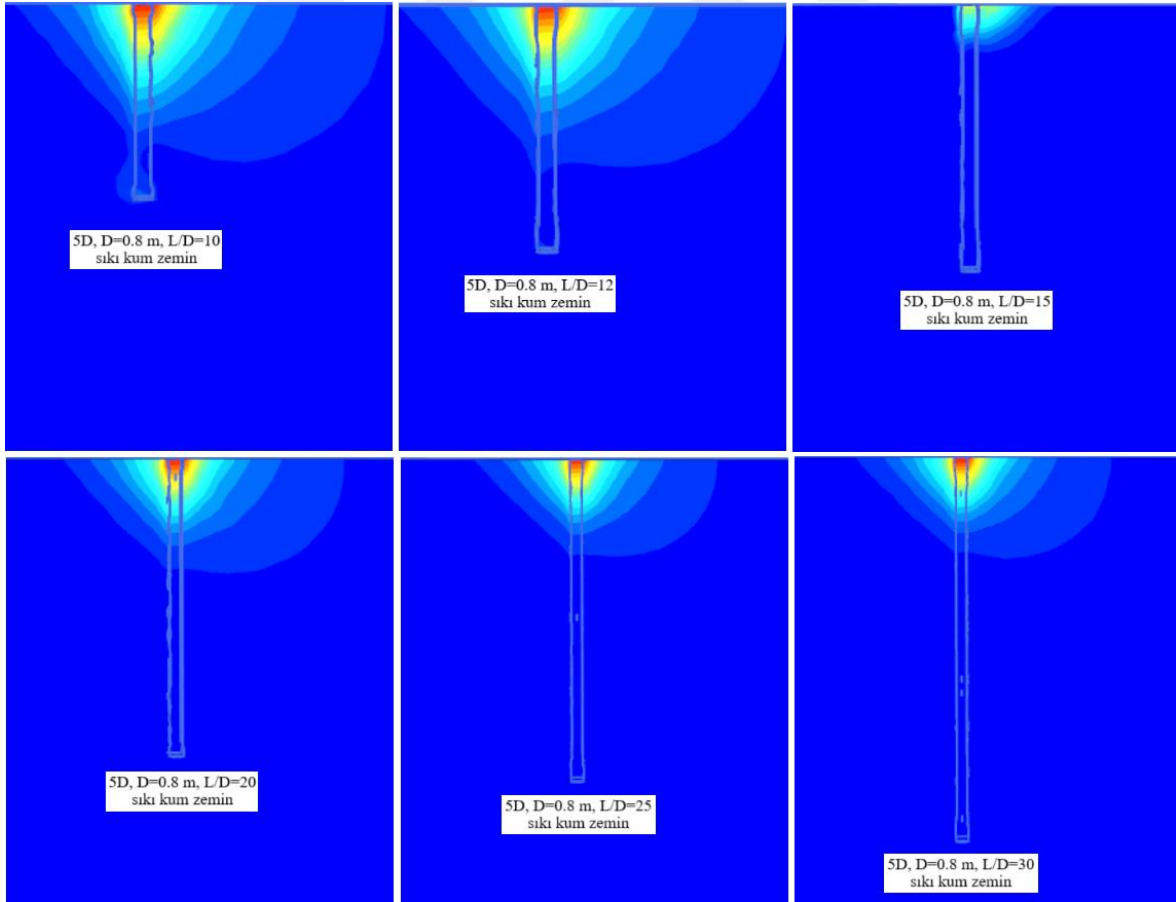


Şekil 92.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.8$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 93'te verilmiştir. Sıkı kum zeminde,  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 94'te verilmiştir.  $L/D=10$  olan kazıkta kısa kazık davranışı ve  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür.

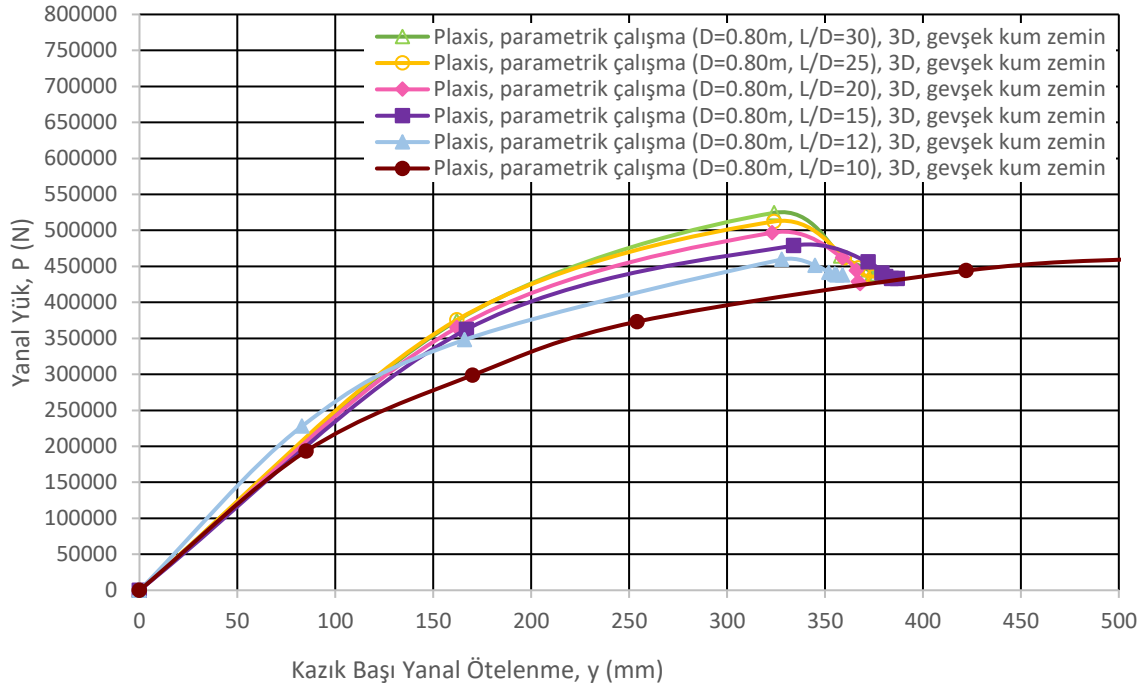


Şekil 93. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

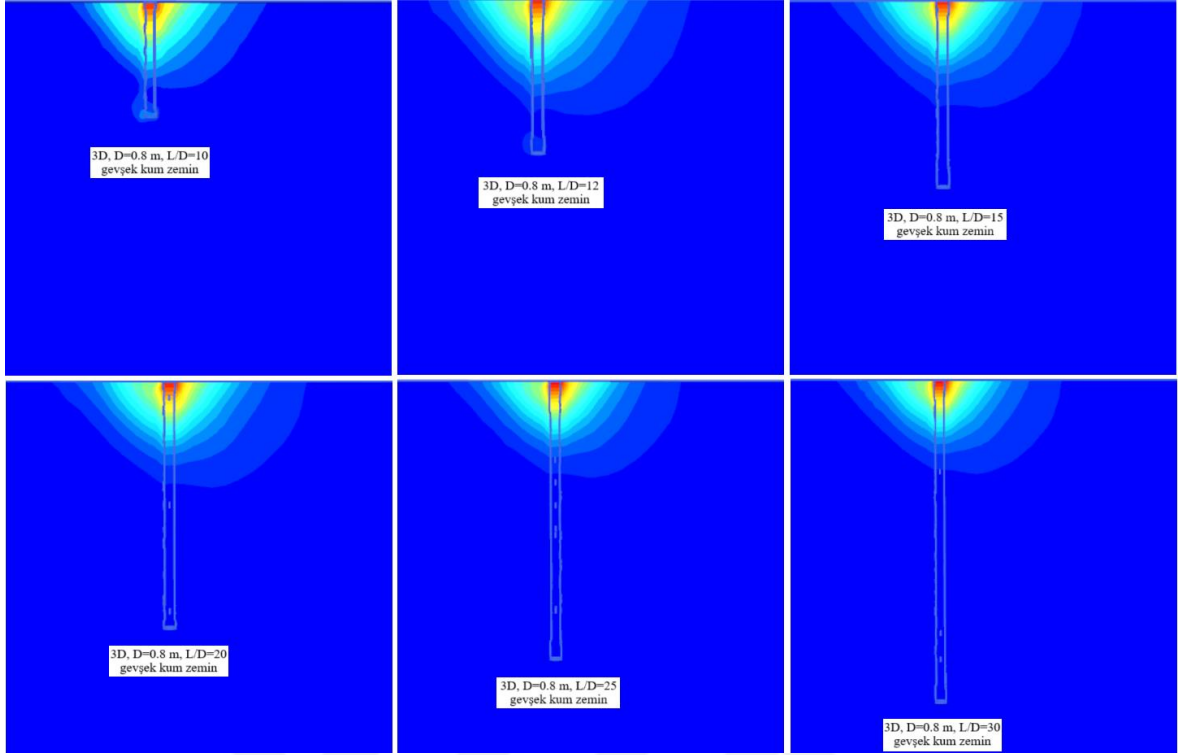


Şekil 94. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

Gevşek kum zeminde,  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 95'te verilmiştir. Kazık uzunluğu arttıkça aynı deplasman değerinde yanal yük değerleri de artmıştır.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar aynı deplasman değerlerinde göçme görülmüştür.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 96'da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta kısa kazık davranışındadır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda kırılma görülmüş ve uzun kazık davranışında olduğu belirlenmiştir. Bu orandaki uzun kazıklarda kazık alt uç kısmında dönme ve yer değiştirme olmadığı tespit edilmiştir.

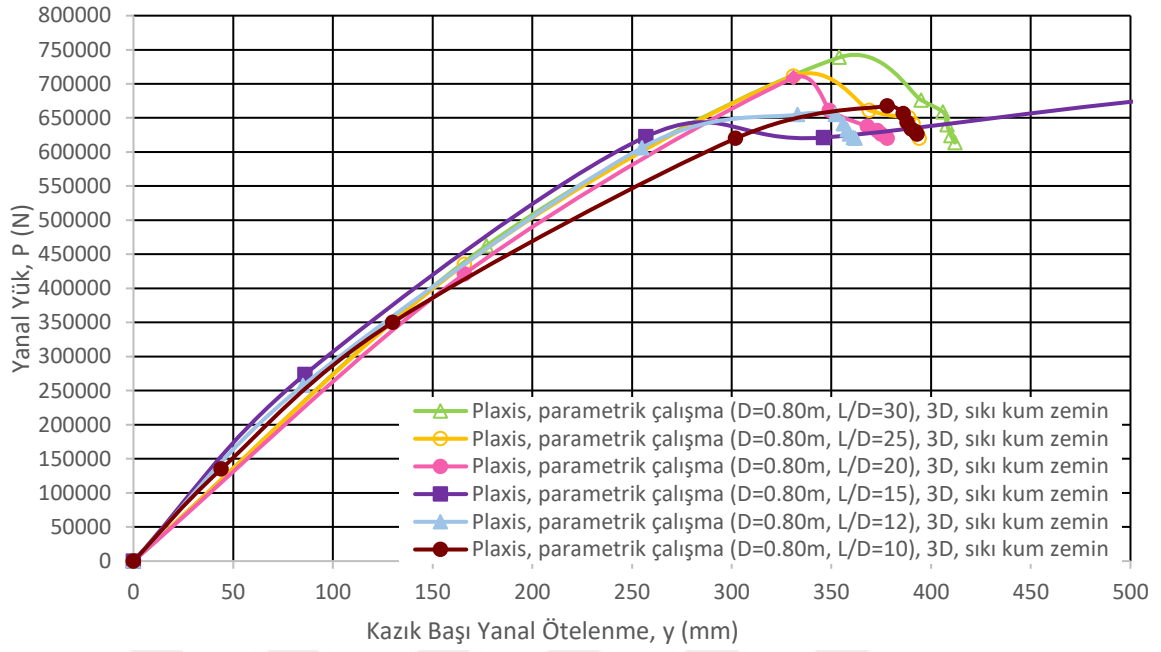


Şekil 95.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

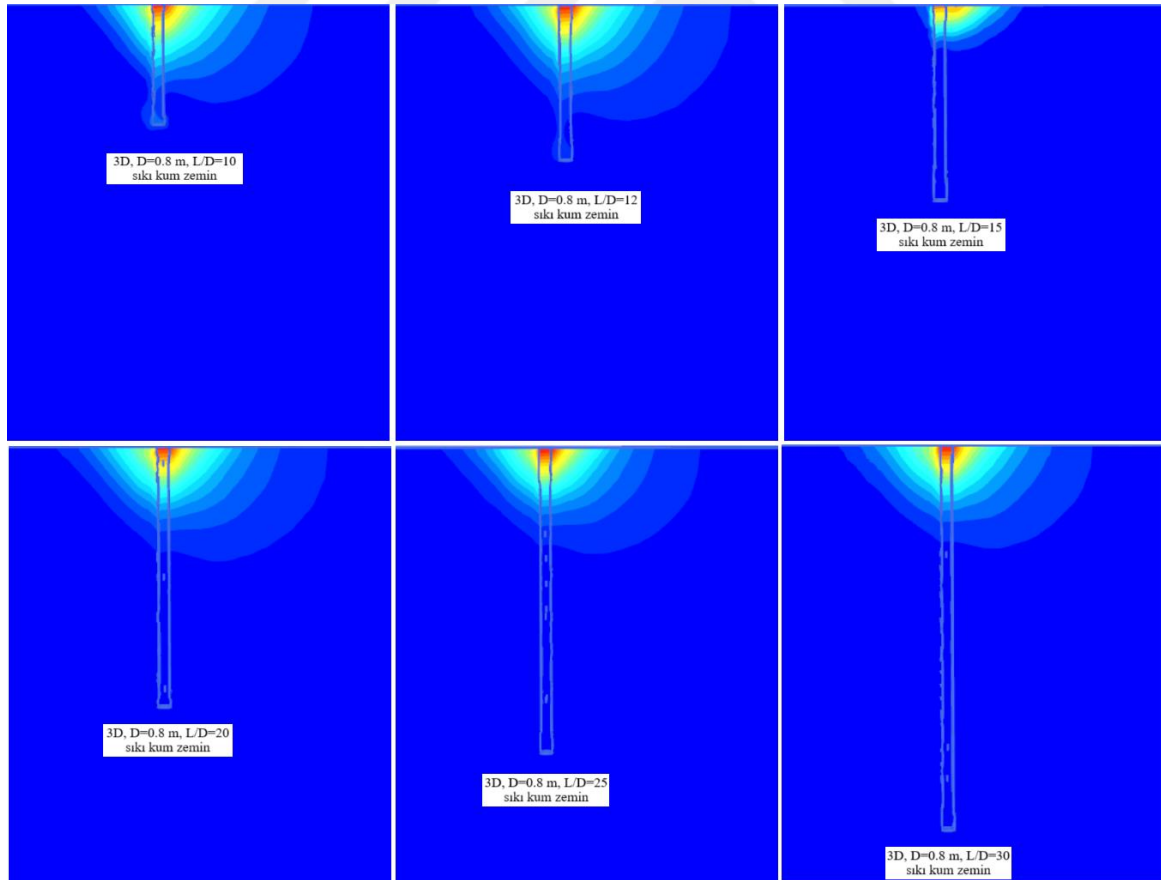


Şekil 96.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 97’de verilmiştir. Sıkı kum zeminde,  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 98’de verilmiştir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık gibi kazık başında ve kazık alt uç kısmında yer değiştirme ve dönme hareketi yapmaktadır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık gibi davranışların olduğu görülmektedir.

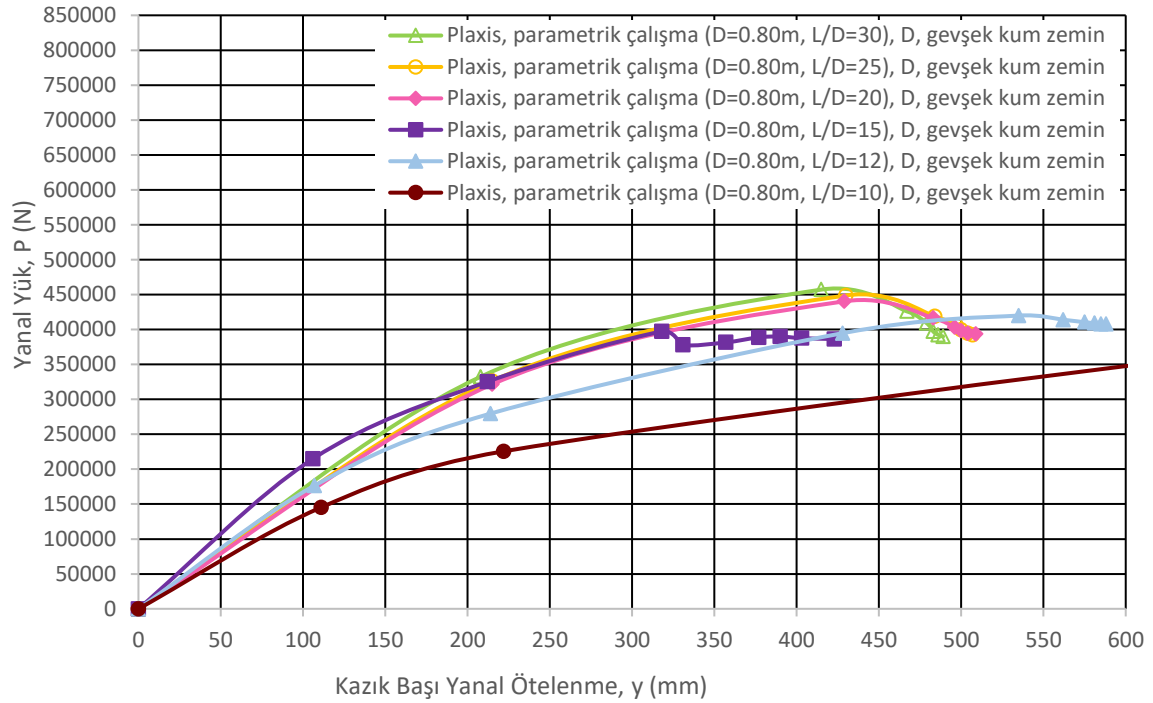


Şekil 97. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

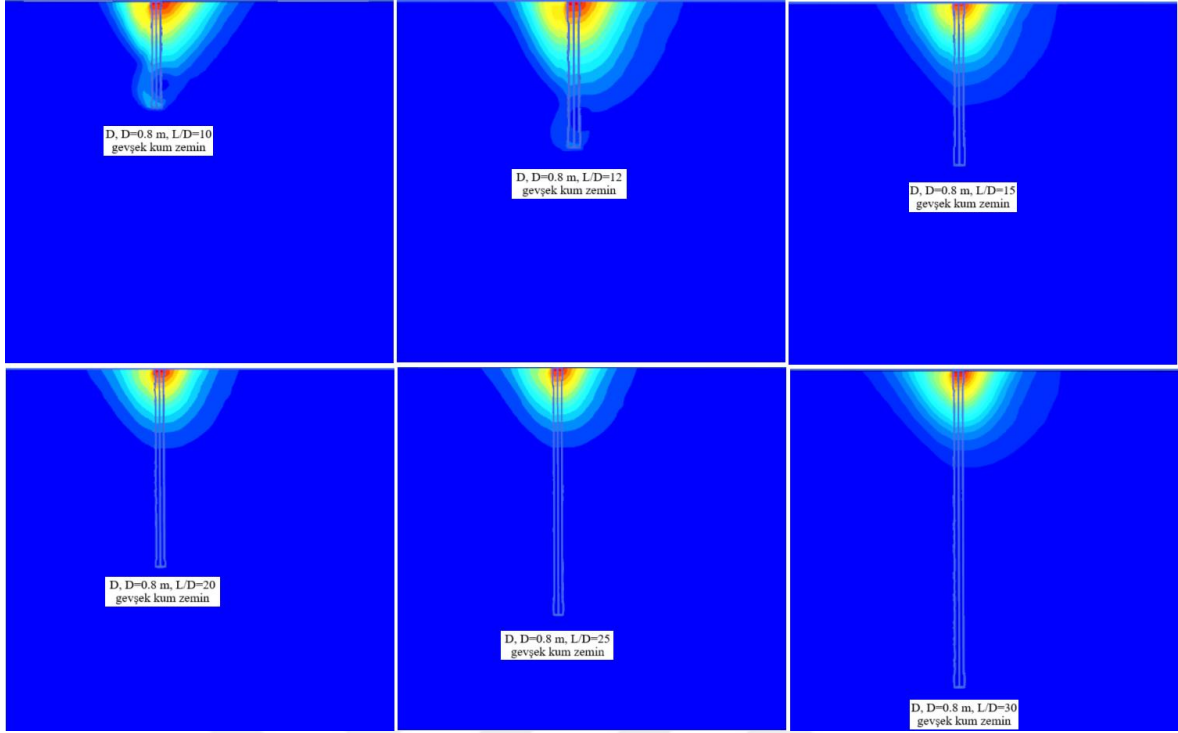


Şekil 98. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 99'da verilmiştir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrileri benzerlik göstermiştir.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 100'de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazık gibi davranmıştır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık gibi davranmıştır. hem gevşek hem de sıkı kazıklarda Plaxis 3D analiz görüntüleri incelendiğinde  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda kısa kazık davranışında ve  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışında olduğu görülmüştür.

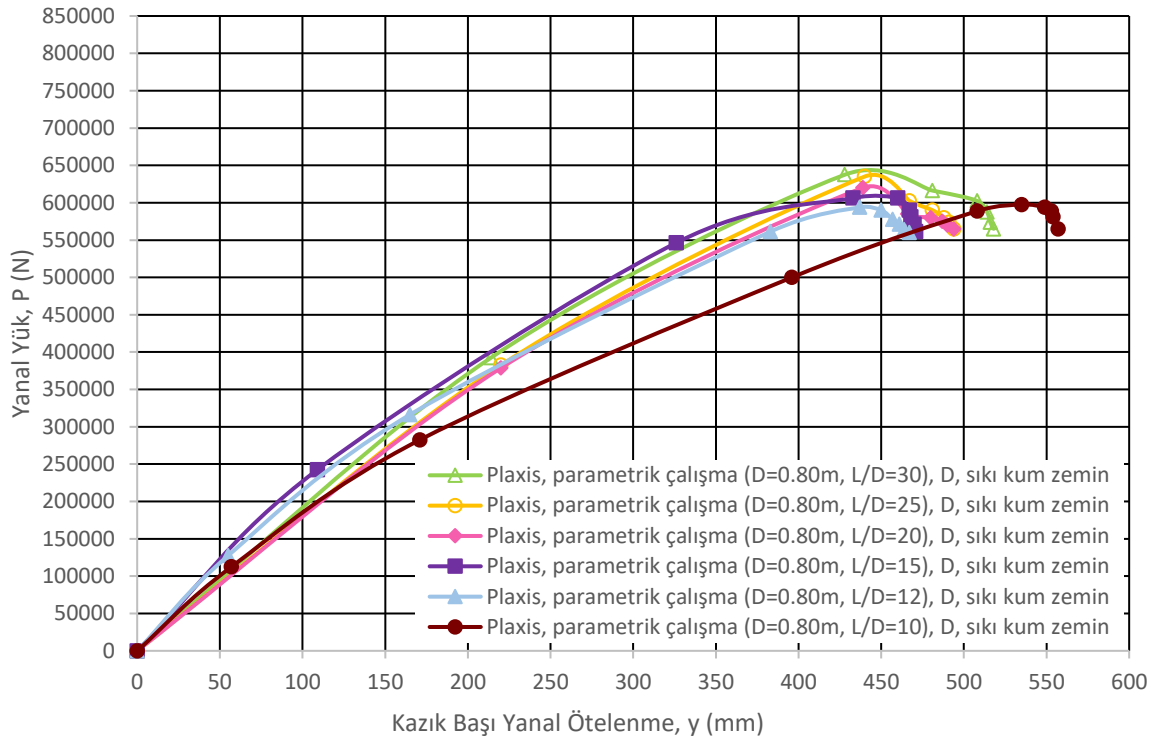


Şekil 99.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

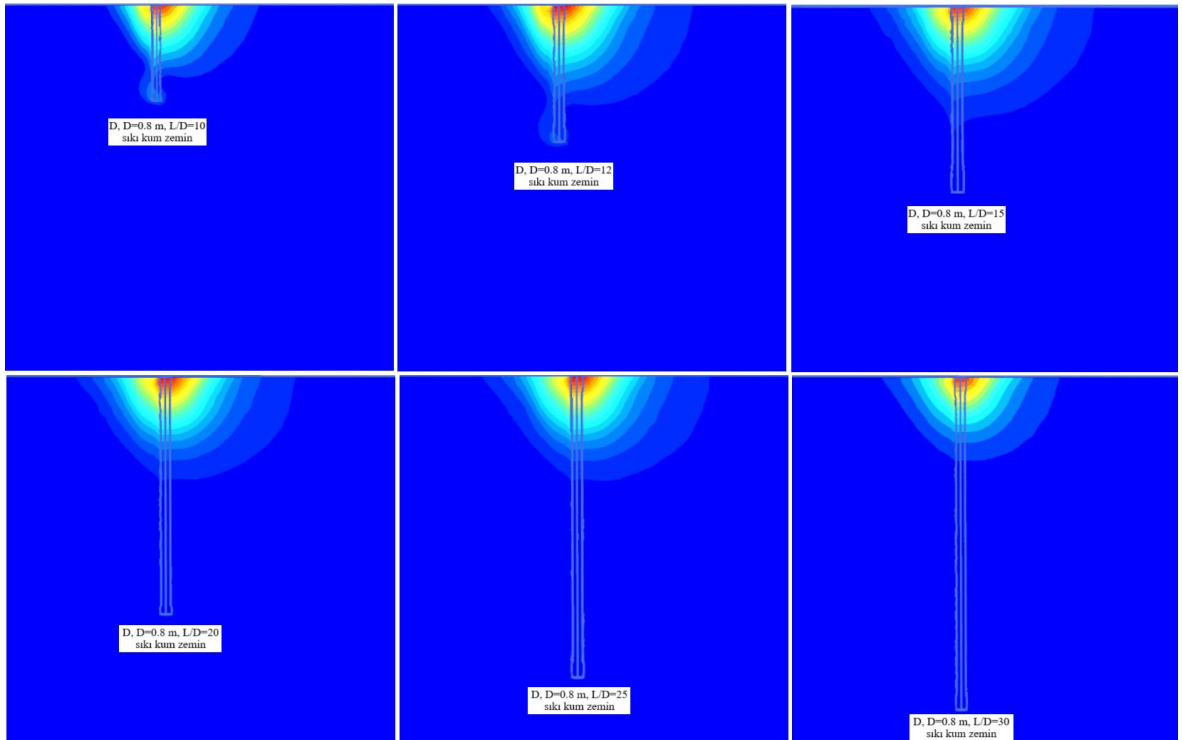


Şekil 100.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 101’de verilmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yük deplasman değerleri benzer deplasman değerinde göçmenin yaşandığı görülmüştür.  $D=0.8$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 102’de verilmektedir.  $L/D=10$  ve  $L/D=12$  olan kazıklarda kısa kazık davranışındadır.  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazıktır.

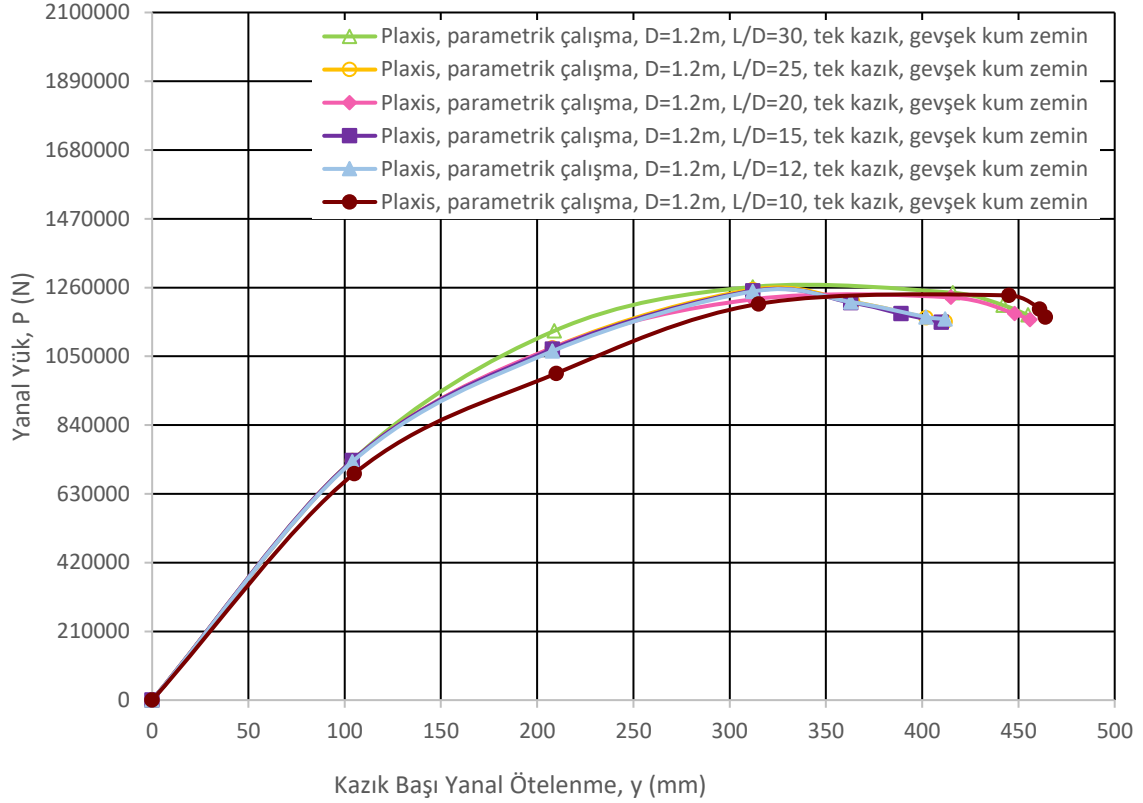


Şekil 101. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

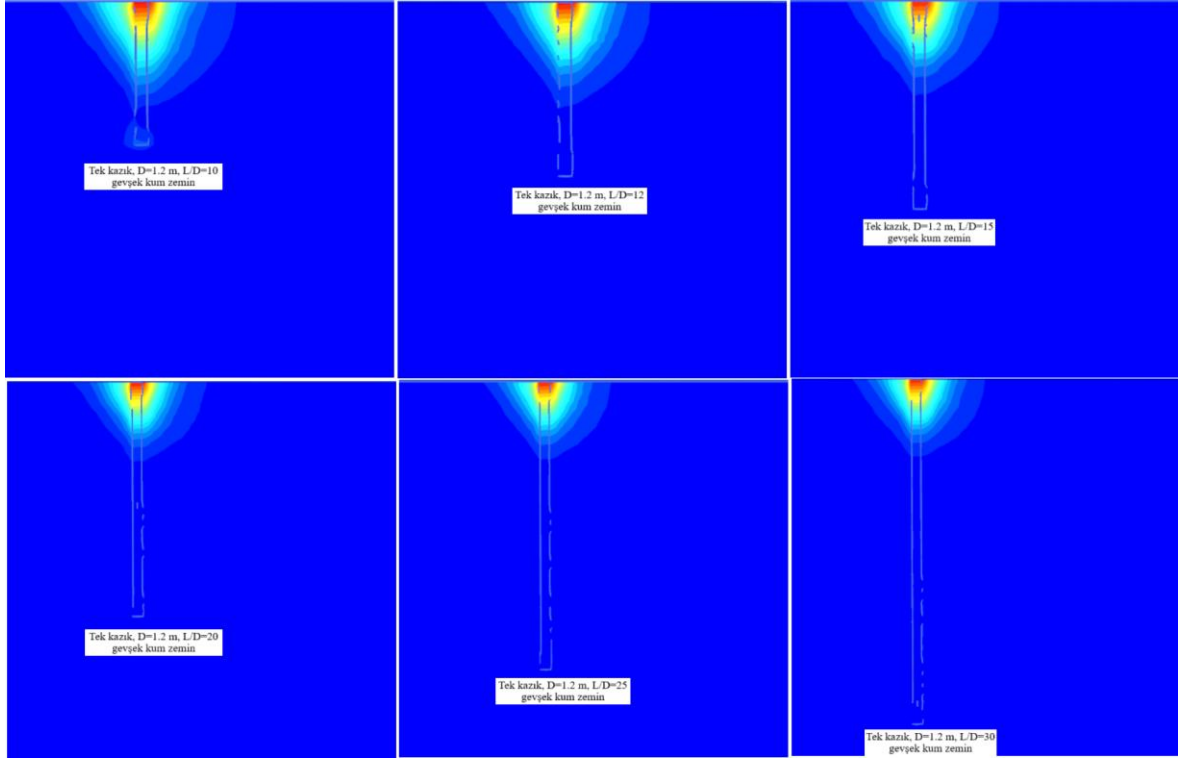


Şekil 102. D=0.8 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 103'te verilmiştir. L/D=12 ve L/D=15 olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrisi benzer şekildedir. Gevşek kum zeminde, D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 104'te verilmiştir. L/D=10 olan kazık kısa kazık, diğer oranlardaki kazıklar uzun kazıktır.

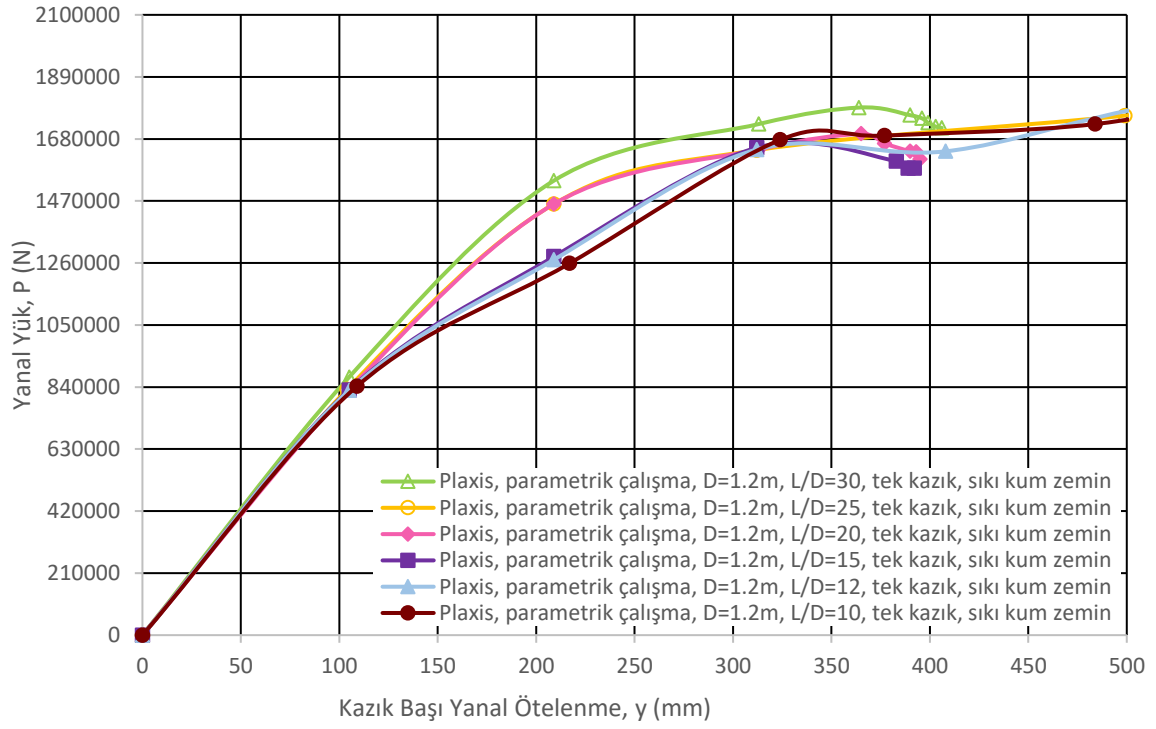


Şekil 103. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

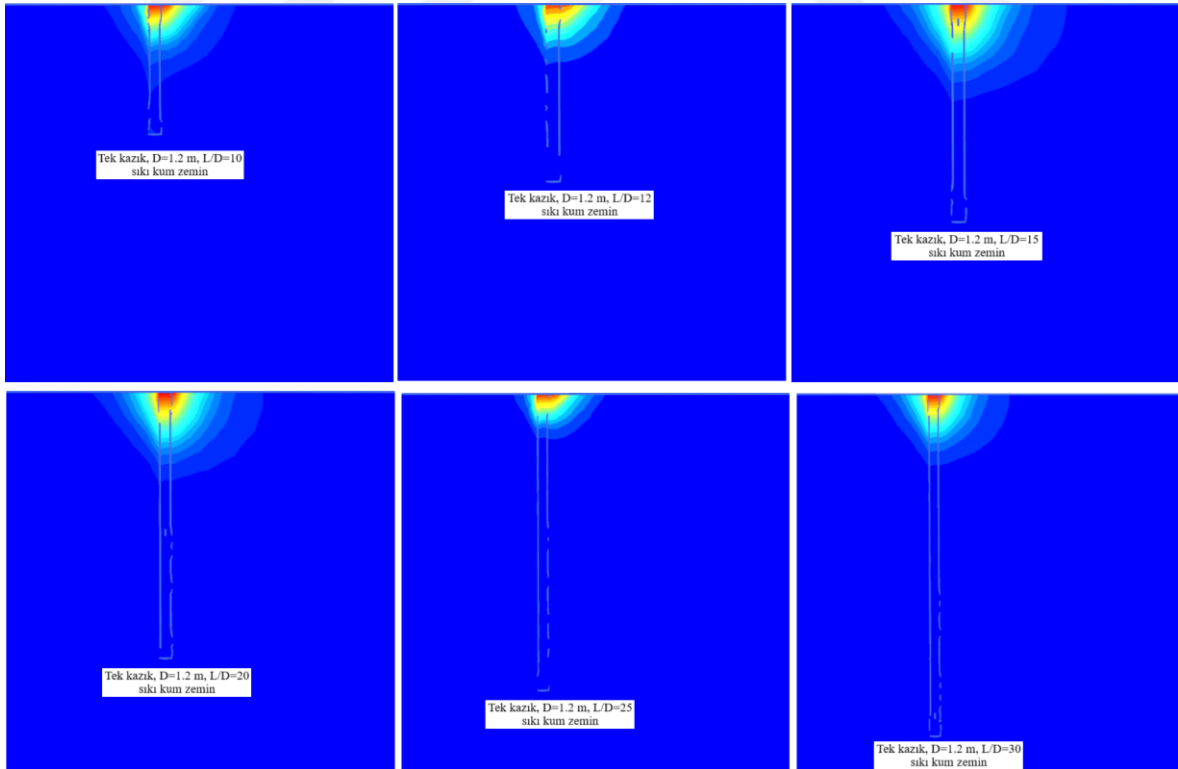


Şekil 104.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Sıkı kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 105'te verilmiştir.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan kazıklarda yük deplasman grafikleri benzer şekilde olup daha sonra göçme yaşandıktan sonra  $L/D=12$  olan kazıklarda eğri değişiklik göstermiştir.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 106'da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazık kısa kazıktır.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar uzun kazık davranışı görülmüştür.

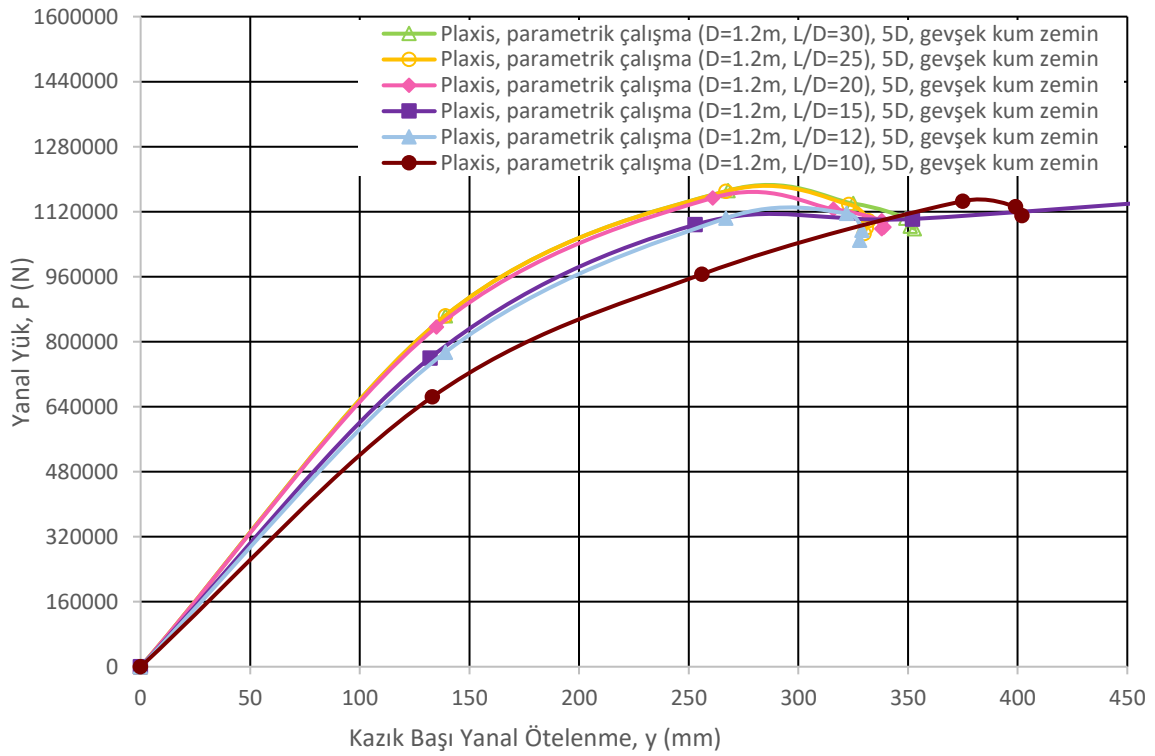


Şekil 105. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

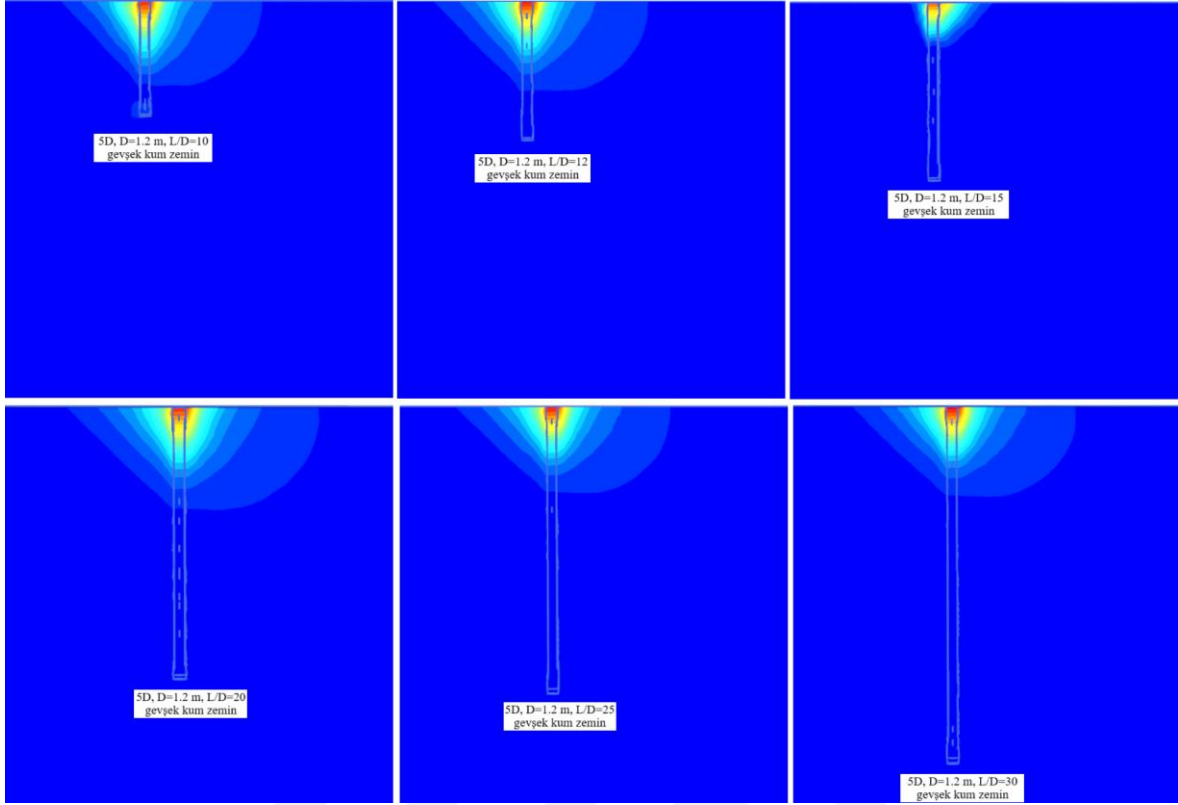


Şekil 106. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki tek kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

Gevşek kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 107’de verilmiştir.  $L/D=12$  ve  $L/D=15$  olan kazıklarda yatay yük-deplasman eğrilerinde ve  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yatay yük-deplasman eğrilerinde benzerlik görülmüştür.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin) Şekil 108’de verilmektedir. Kısa kazık davranışının görüldüğü  $L/D=10$  olan kazıklarda hem kazık baş uç kısmı hem de kazık alt uç kısmı hem dönme hem de yer değiştirme yaptığı görülmüştür.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmüştür.

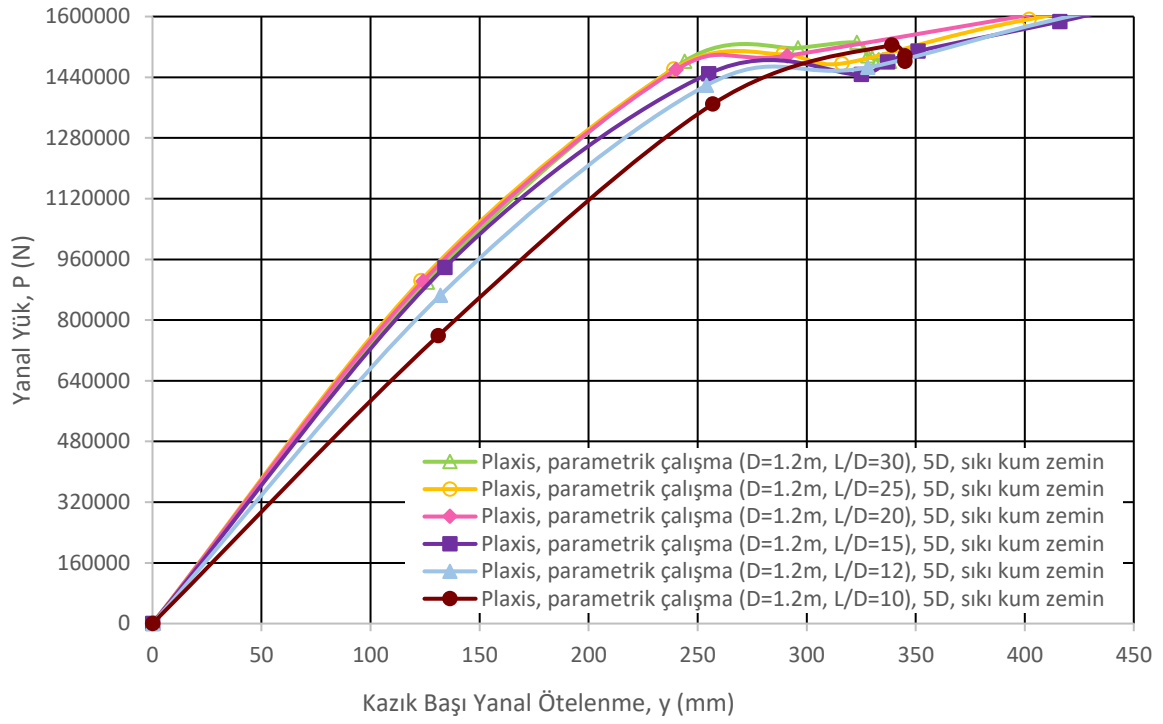


Şekil 107.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

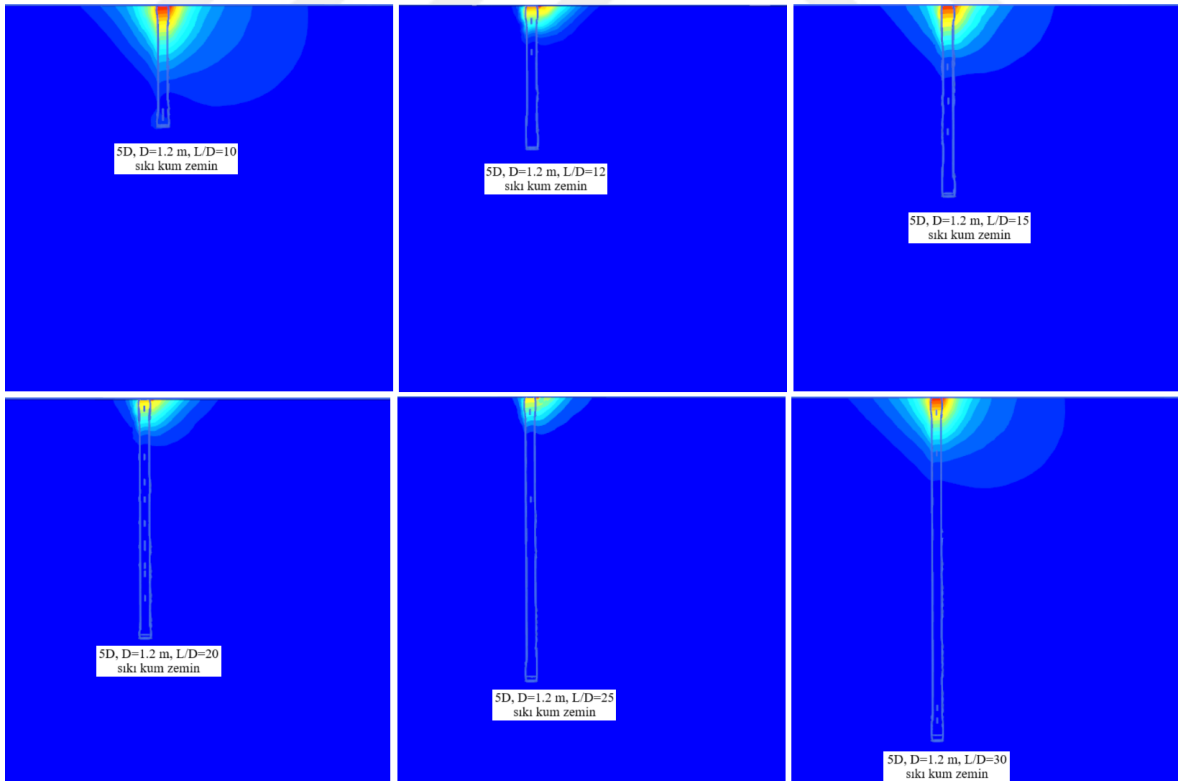


Şekil 108.  $D=1.2 \text{ m}$  olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Sıkı kum zeminde,  $D=1.2 \text{ m}$  olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 109’da verilmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda göçmenin benzer deplasman değerlerinde olduğu görülmektedir.  $D=1.2 \text{ m}$  olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $5D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 110’da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıklar kısa kazık ve diğer orandaki kazıklar uzun kazık davranışındadır.

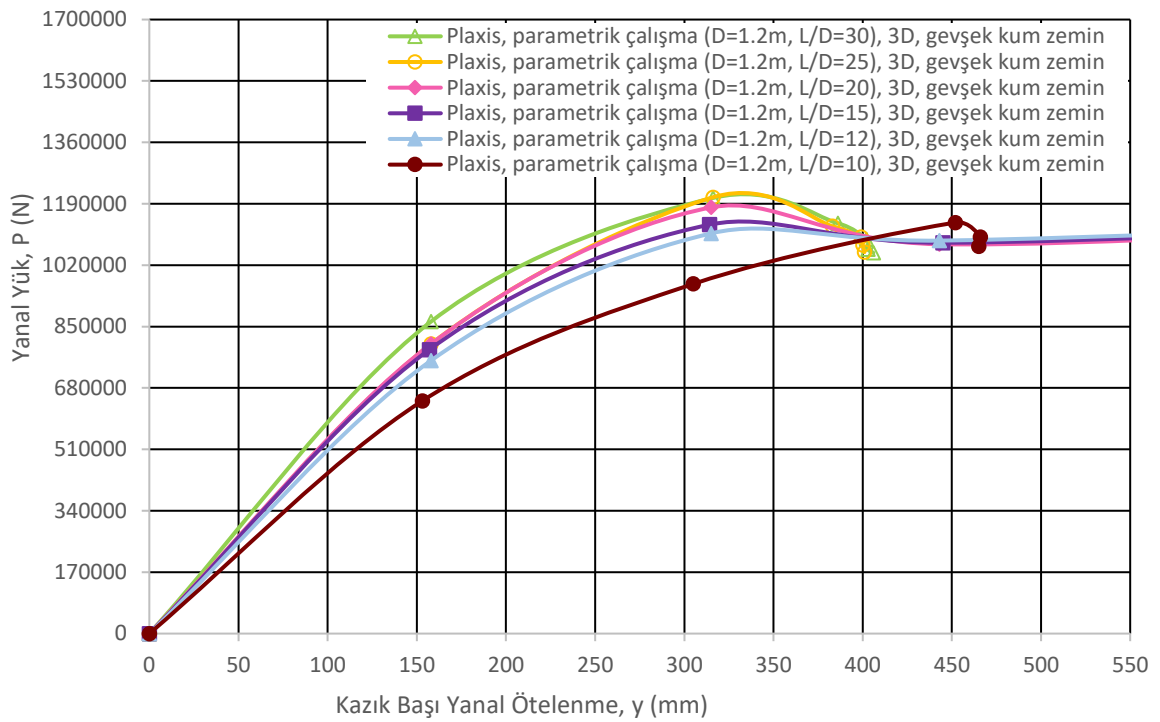


Şekil 109. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

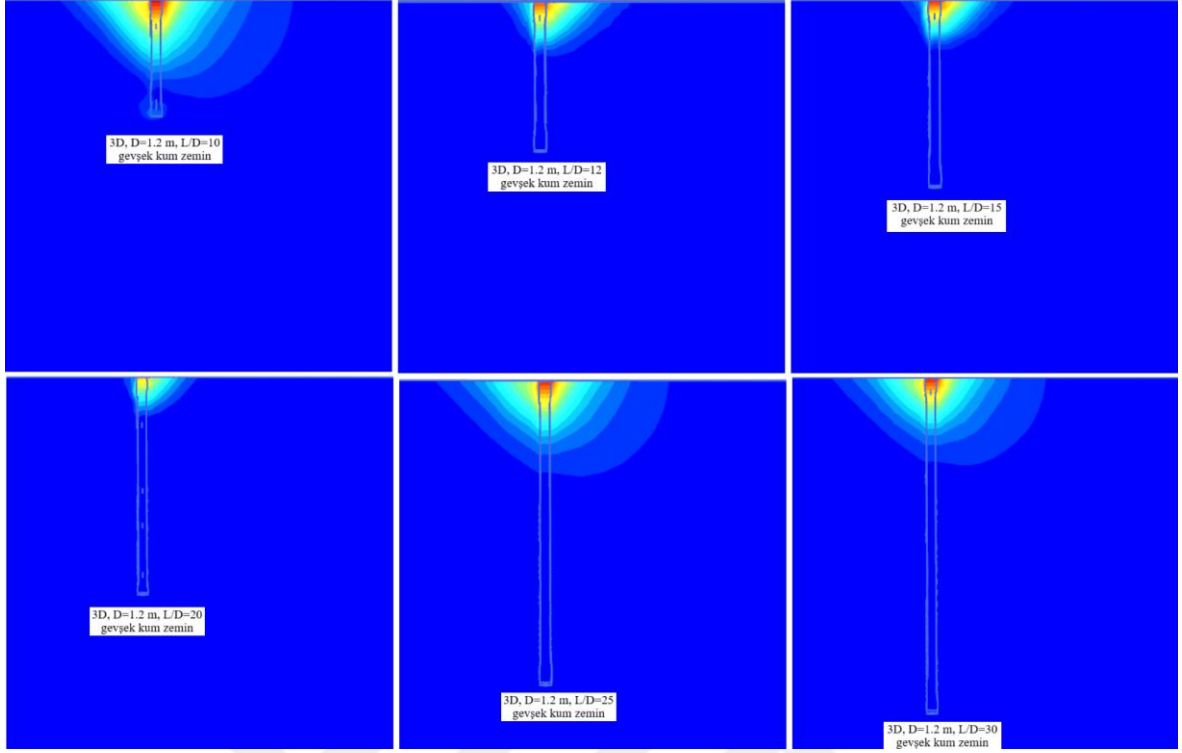


Şekil 110. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 5D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 111'de verilmektedir.  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrileri yaklaşık aynı kazık başı ötelenme değerinde göçme meydana gelmiştir. Gevşek kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 112'de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıklarda kısa kazık davranışının olduğu görülmektedir.  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmektedir.

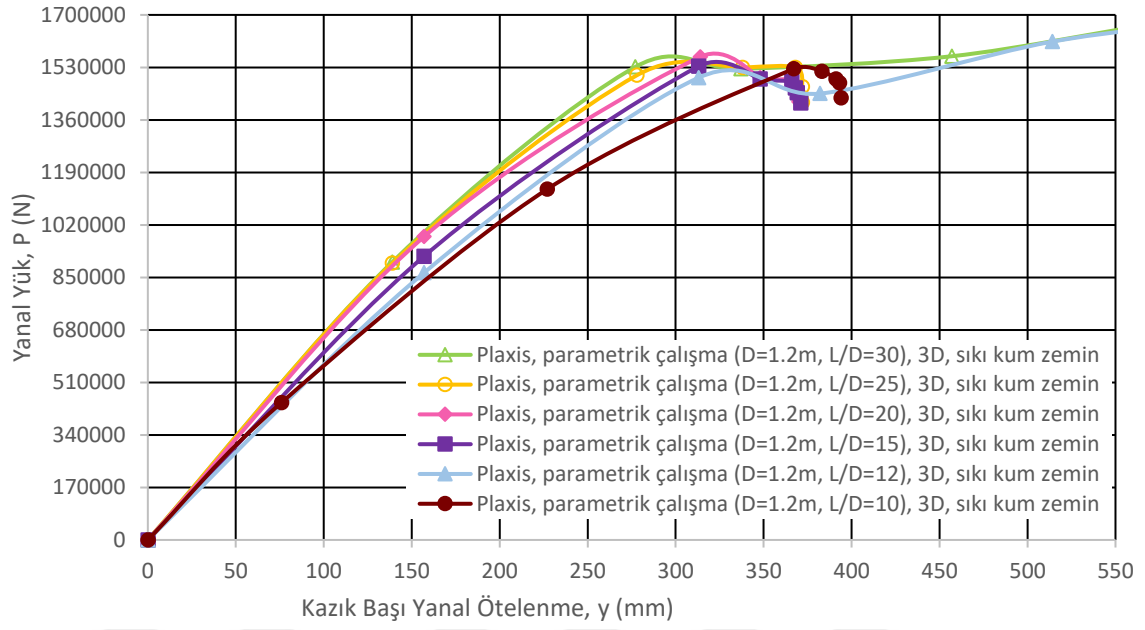


Şekil 111.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

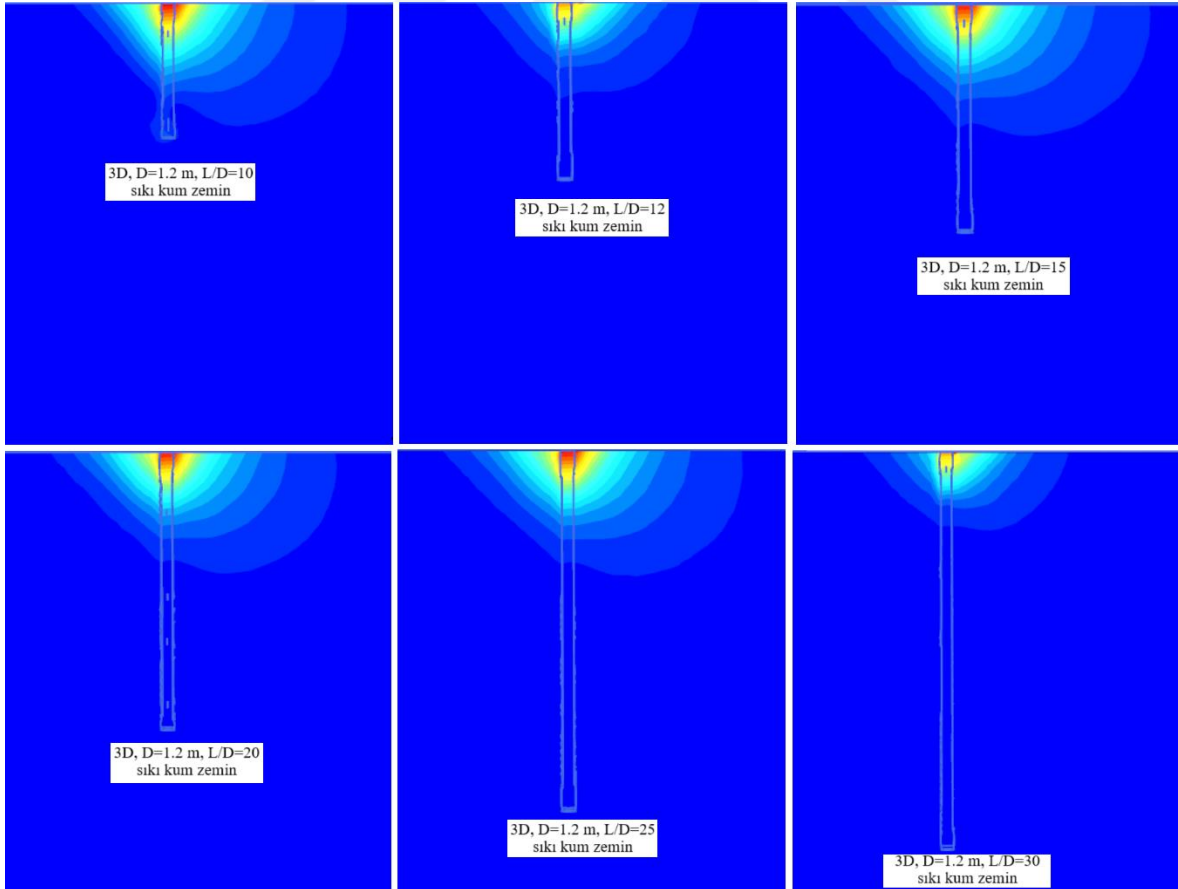


Şekil 112.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

Sıkı kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği Şekil 113'te verilmiştir.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $3D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin) Şekil 114'te verilmiştir.  $L/D=10$  kazıklarda kısa kazık davranışı görülmektedir.

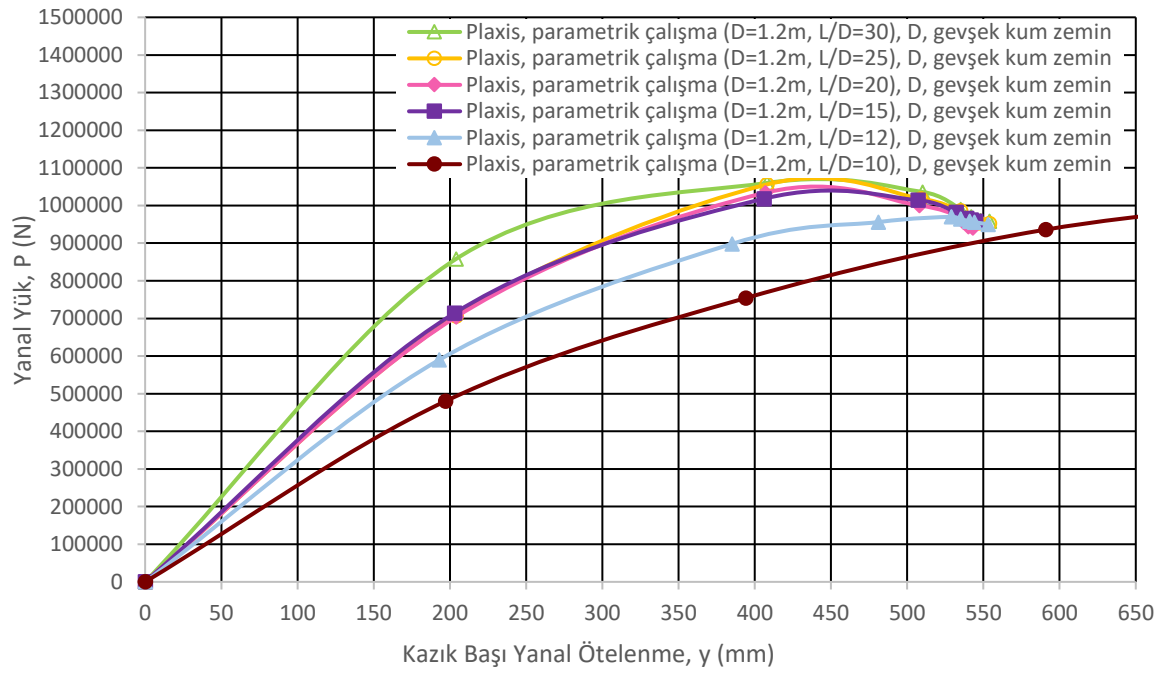


Şekil 113. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

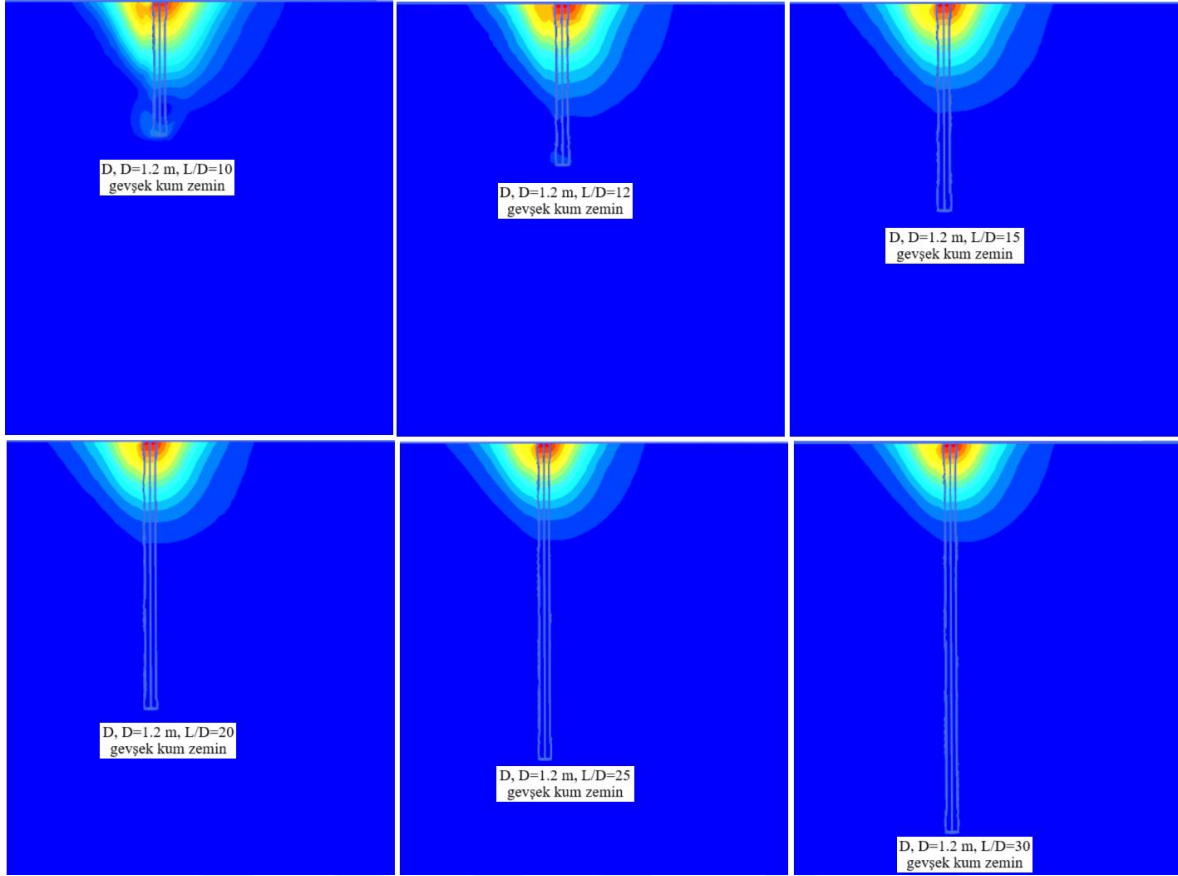


Şekil 114. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe 3D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

$D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin) Şekil 115'te verilmektedir. Yanal yük-deplasman eğrilerinin benzer olduğu kazıklar  $L/D=15$ ,  $L/D=20$  ve  $L/D=25$  oranlarındadır. Gevşek kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 116'da verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıklarda kısa kazık davranışı,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık davranışı görülmektedir.

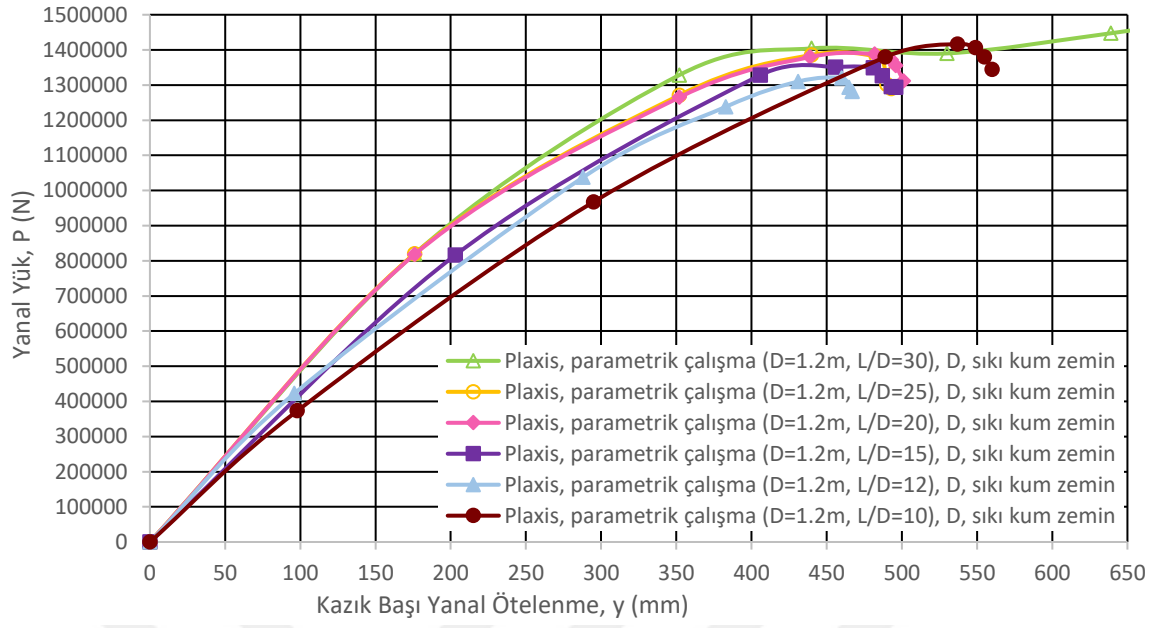


Şekil 115.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (gevşek kum zemin)

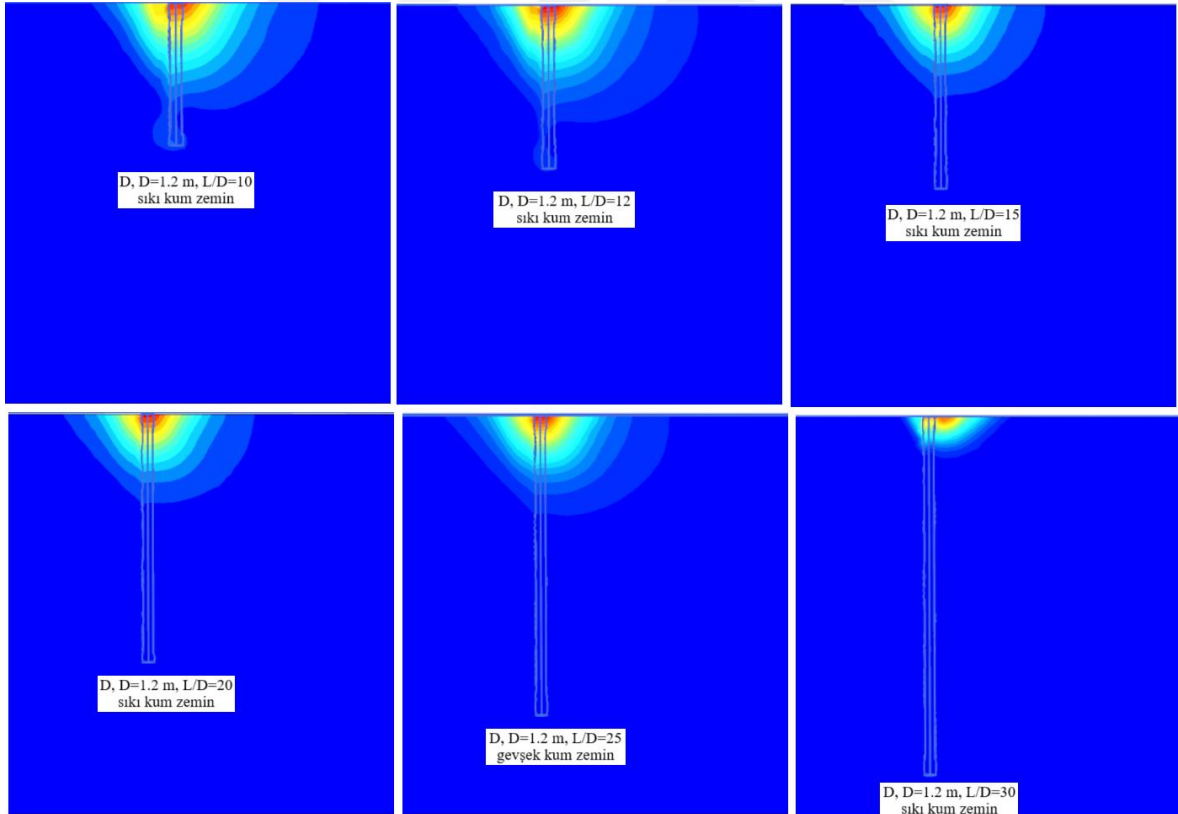


Şekil 116.  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (gevşek kum zemin)

$D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin) Şekil 117’de verilmektedir.  $L/D=20$  ve  $L/D=25$  olan kazıklarda yanal yük-deplasman eğrisi benzer olduğu görülmüştür. Sıkı kum zeminde,  $D=1.2$  m olan  $L/D$  oranlarındaki kazıklar arası mesafe  $D$  olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri Şekil 118’de verilmektedir.  $L/D=10$  olan kazıkta kısa kazık,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklarda uzun kazık olduğu tespit edilmiştir.

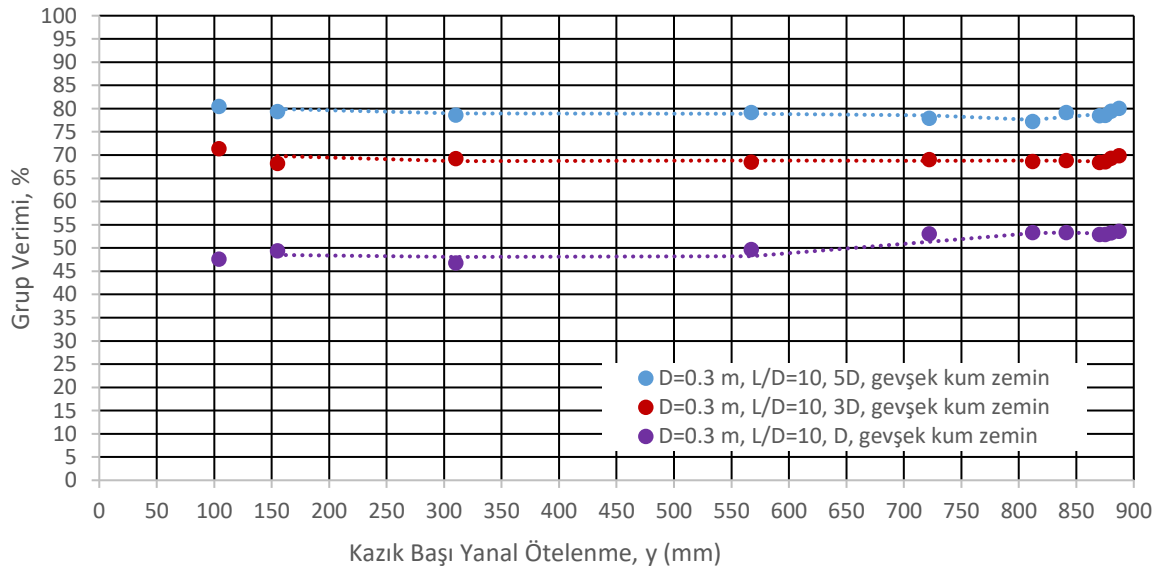


Şekil 117. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların yanal yük-deplasman grafiği (sıkı kum zemin)

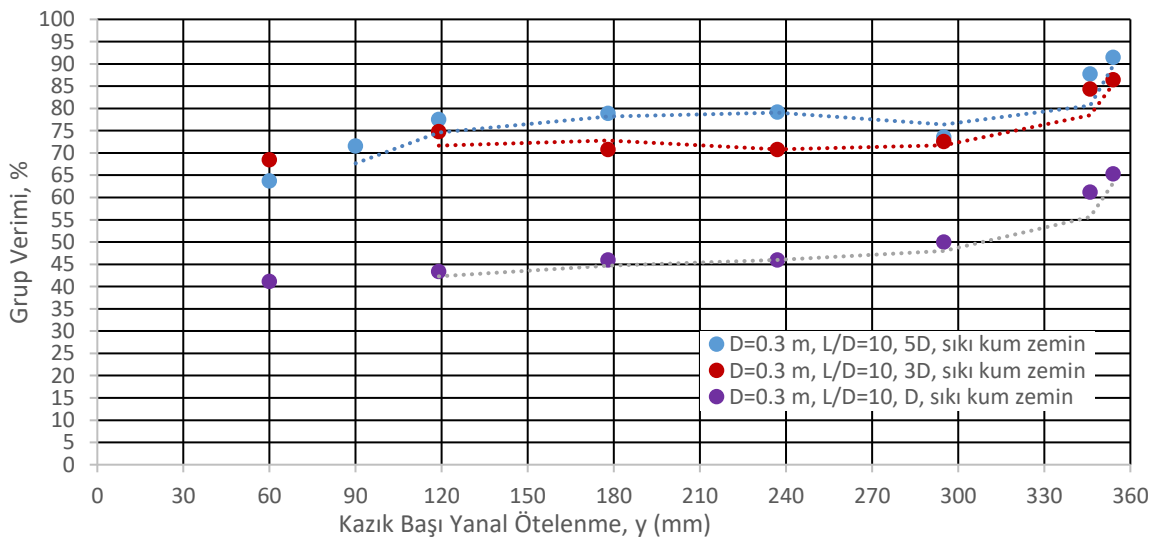


Şekil 118. D=1.2 m olan L/D oranlarındaki kazıklar arası mesafe D olan kazıkların Plaxis 3D analiz görüntüleri (sıkı kum zemin)

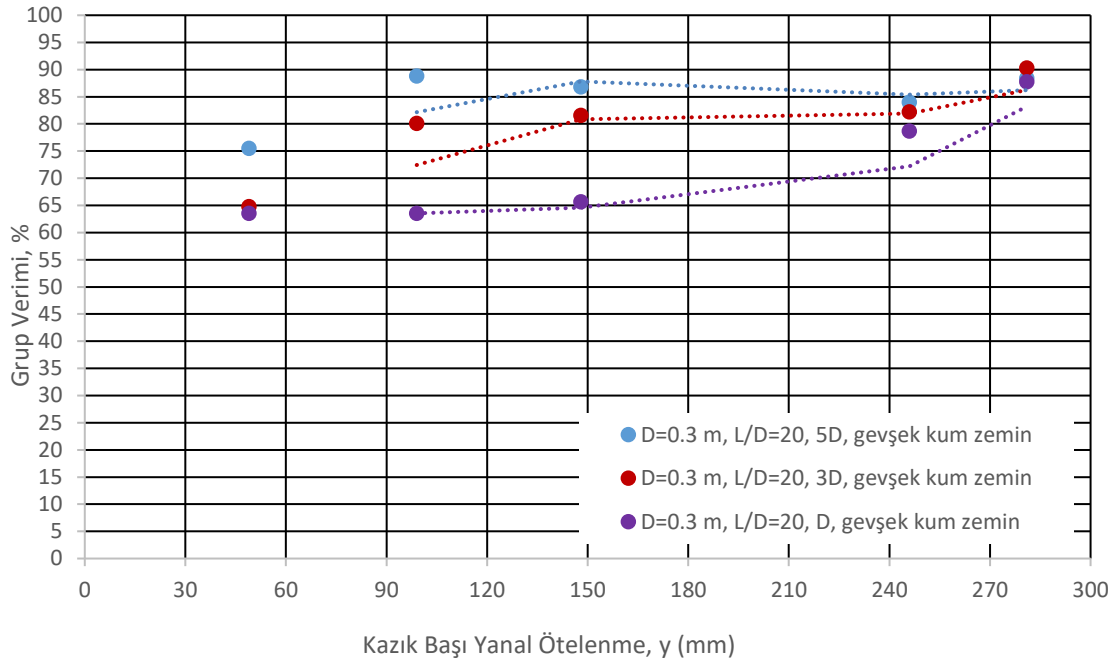
Hem gevşek hem de sıkı zeminde, kazıklar arası mesafe  $5D$ ,  $3D$  ve  $D$  olan kazıklardaki kazık gruplarında grup verimi araştırılmıştır.  $D=0.3$  m,  $D=0.65$  m,  $D=0.8$  m ve  $D=1.2$  m kazıklarda  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  olan kazıklarda grup verimi-kazık başı yanal ötelenme grafikleri Şekil 119, 120, 121 ve 122’de verilmiştir. Kazıklardaki grup veriminin 1’den küçük olduğu görülmüştür. Kazık grubu verimi, aynı deplasman değerlerine karşılık yatay yükler kullanılarak elde edilmiştir.



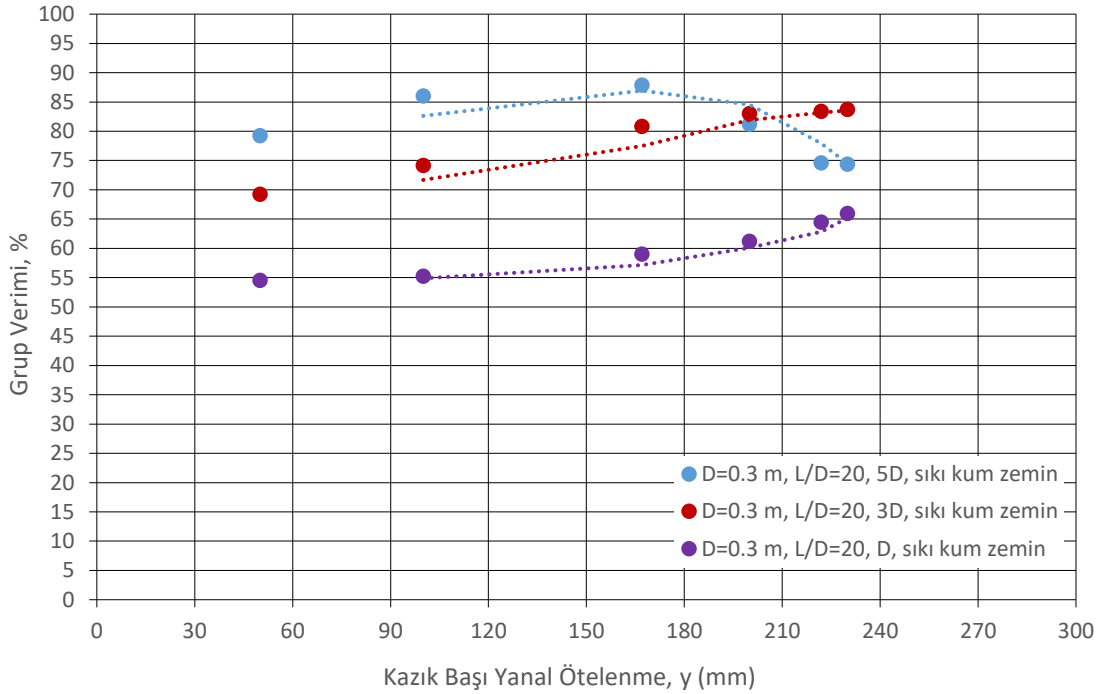
Şekil 119.  $D=0.3$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe  $5D$ ,  $3D$  ve  $D$  olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 120.  $D=0.3$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe  $5D$ ,  $3D$  ve  $D$  olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

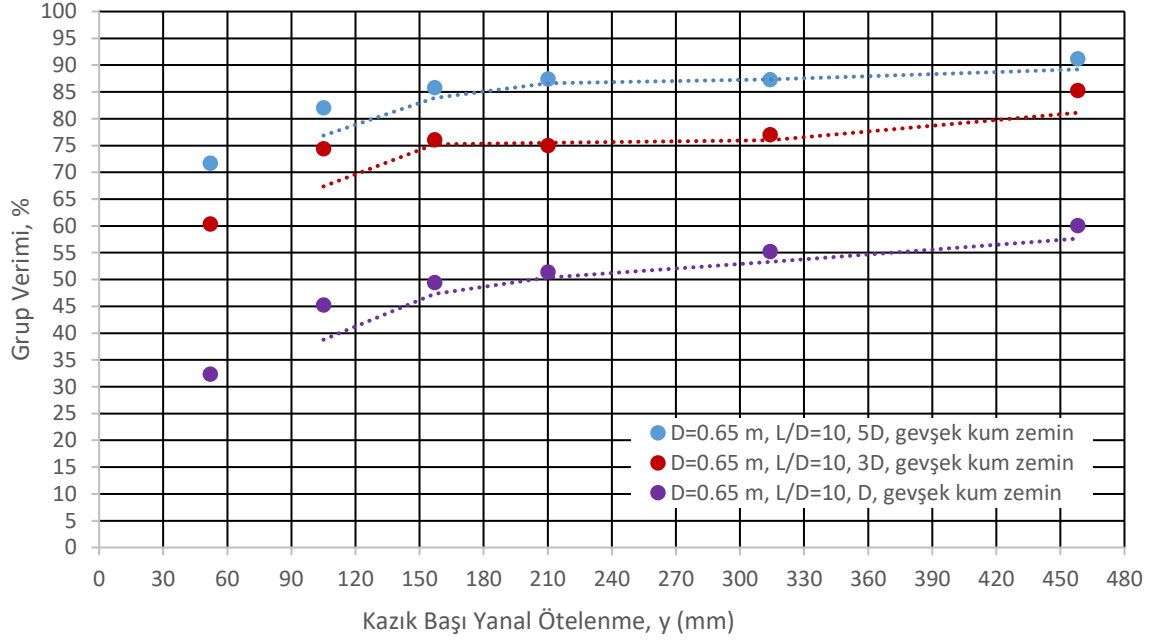


Şekil 121. D=0.3 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

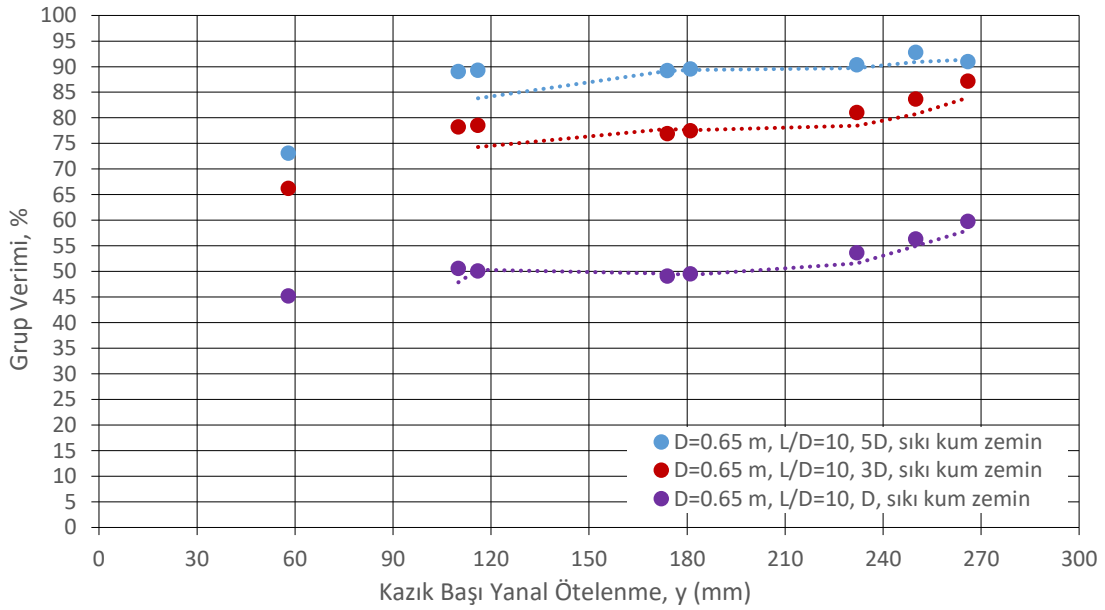


Şekil 122. D=0.3 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

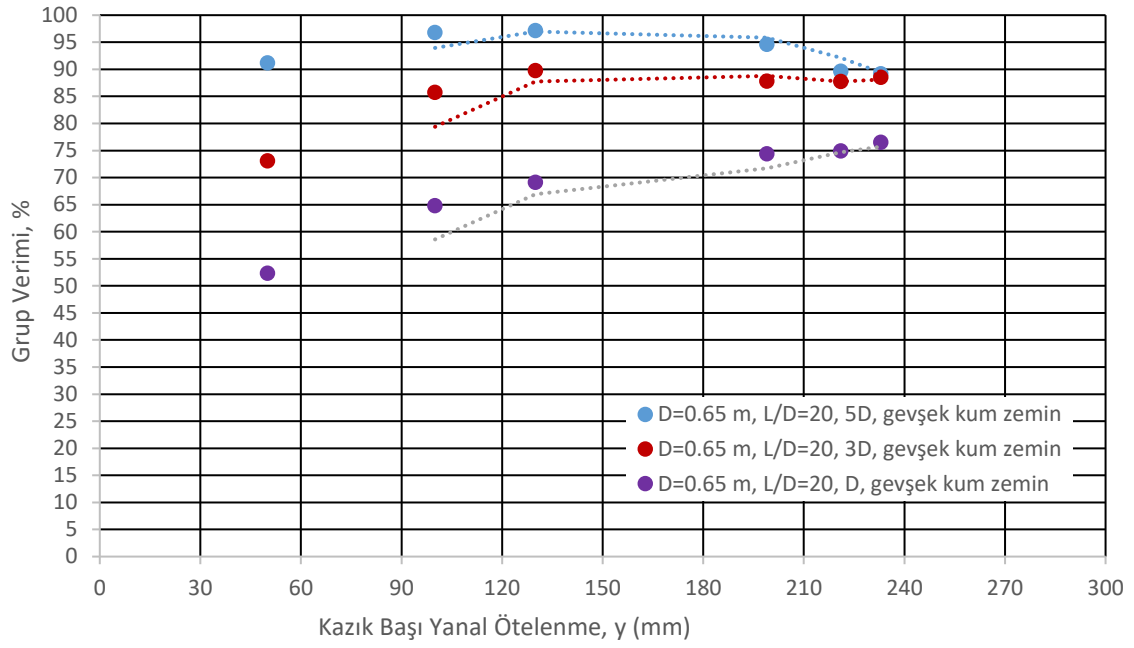
$D=0.65$  m kazıklarda  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  olan kazıklarda grup verimi-kazık başı yanal ötelenme grafikleri Şekil 123, 124, 125 ve 126'da verilmiştir. Kazıklardaki grup veriminin  $l$ 'den küçük olduğu görülmüştür.



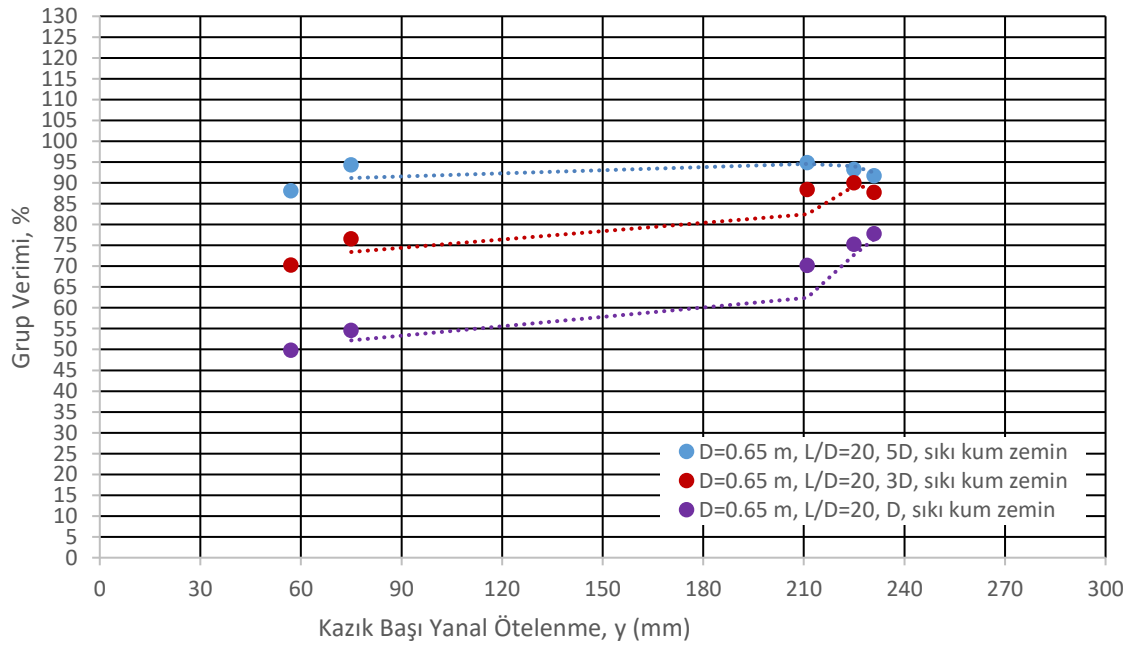
Şekil 123.  $D=0.65$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 124.  $D=0.65$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

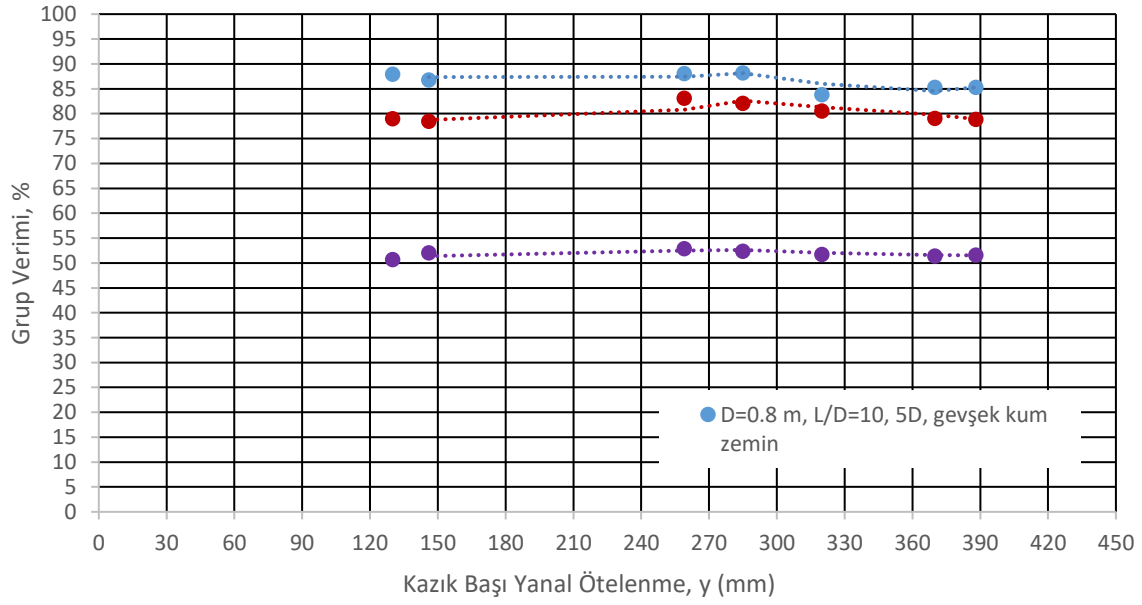


Şekil 125. D=0.65 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

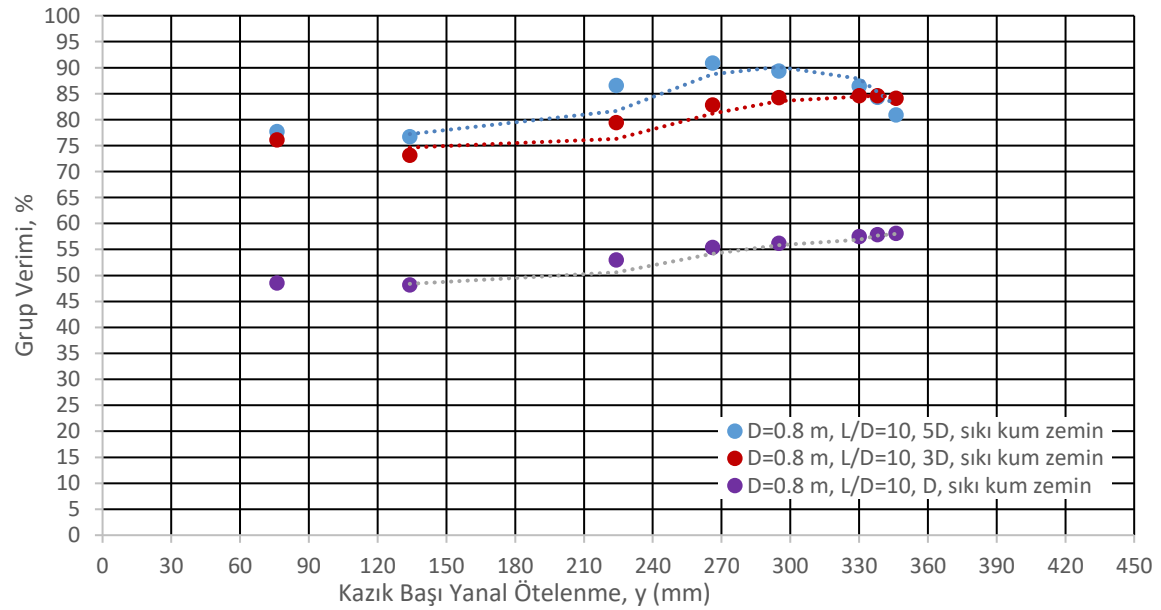


Şekil 126. D=0.65 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

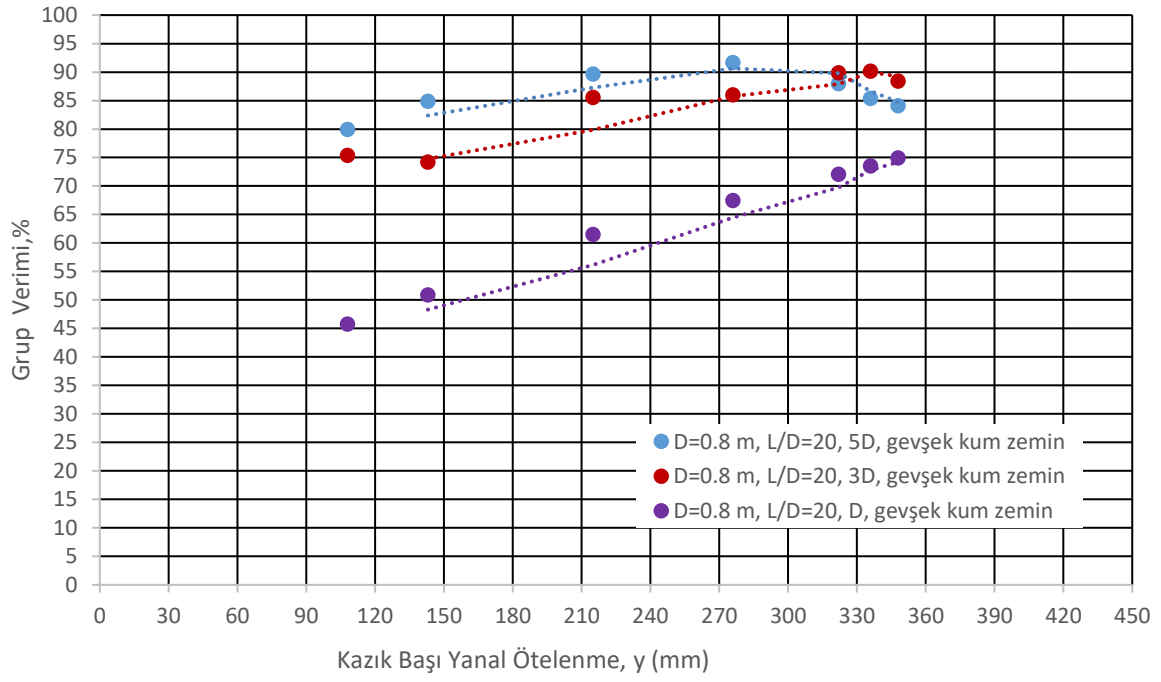
$D=0.8$  m kazıklarda  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  olan kazıklarda grup verimi-kazık başı yanal ötelenme grafikleri Şekil 127, 128, 129 ve 130’da verilmiştir. Kazıklardaki grup veriminin 1’den küçük olduğu görülmüştür. Belirli deplasman değerlerine karşılık gelen yatay yükler kullanılarak grup verimi değerleri elde edilmiştir.



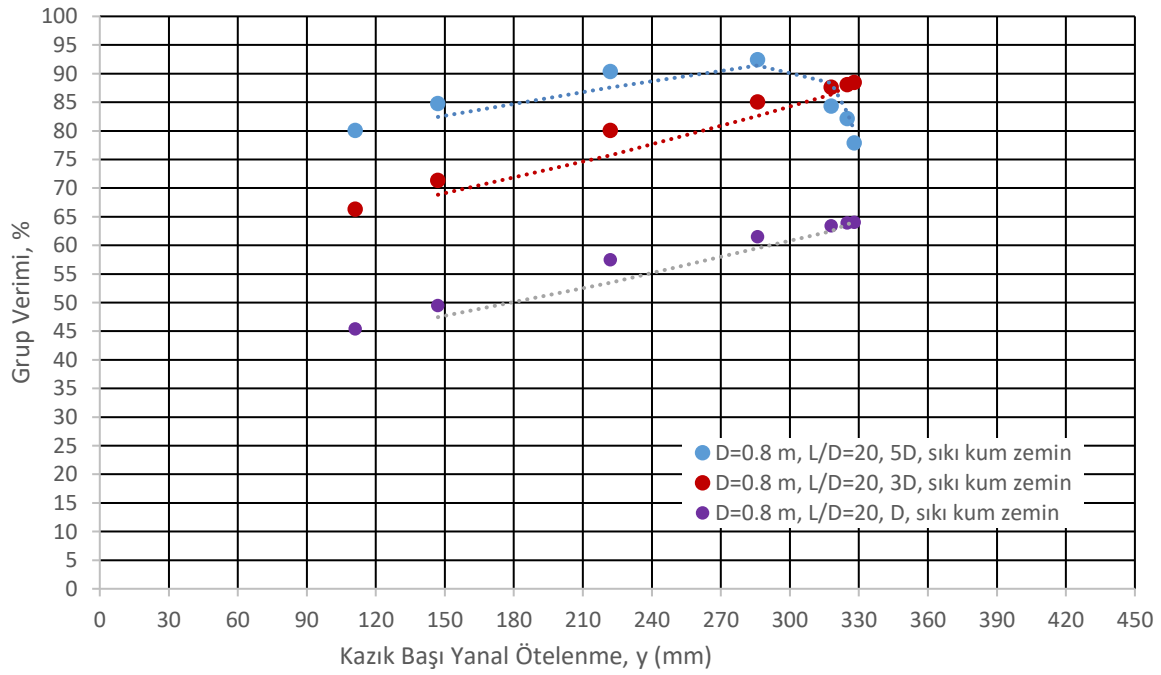
Şekil 127.  $D=0.8$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 128.  $D=0.8$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

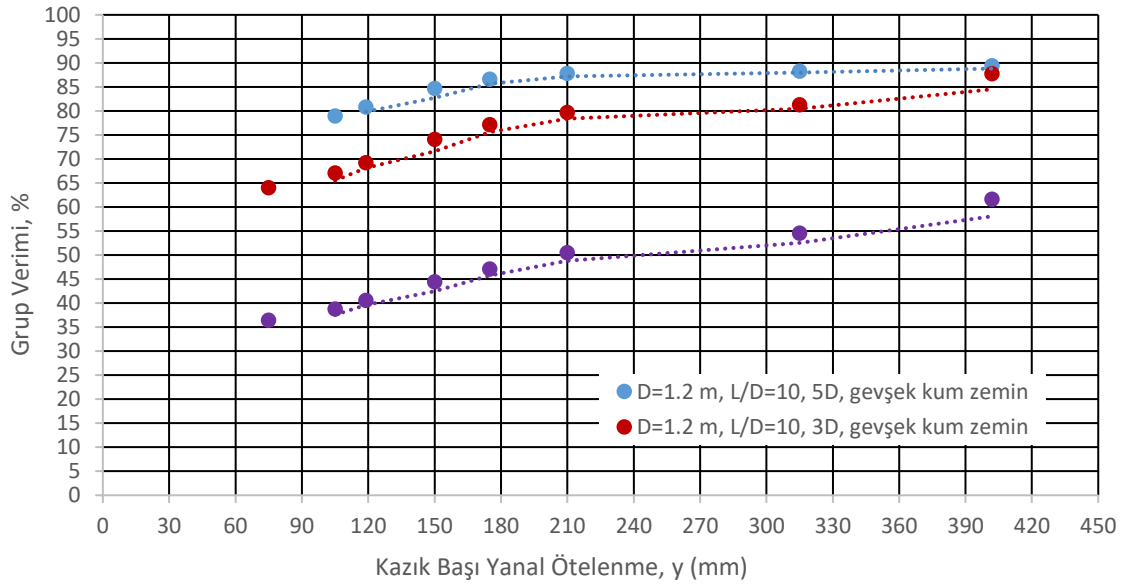


Şekil 129. D=0.8 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

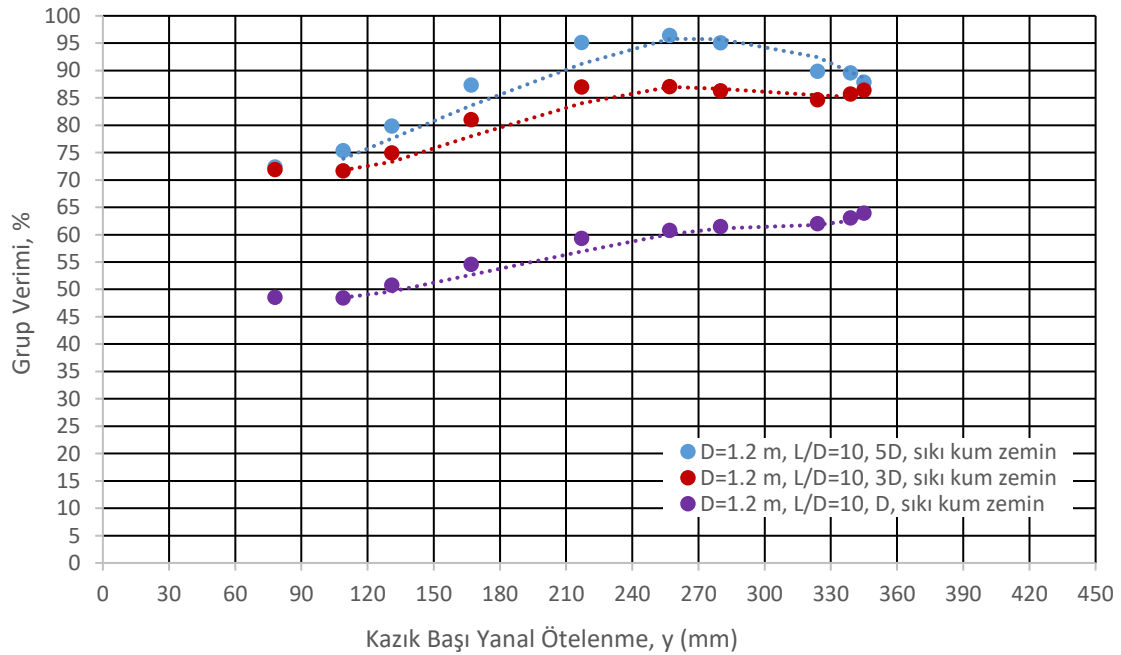


Şekil 130. D=0.8 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

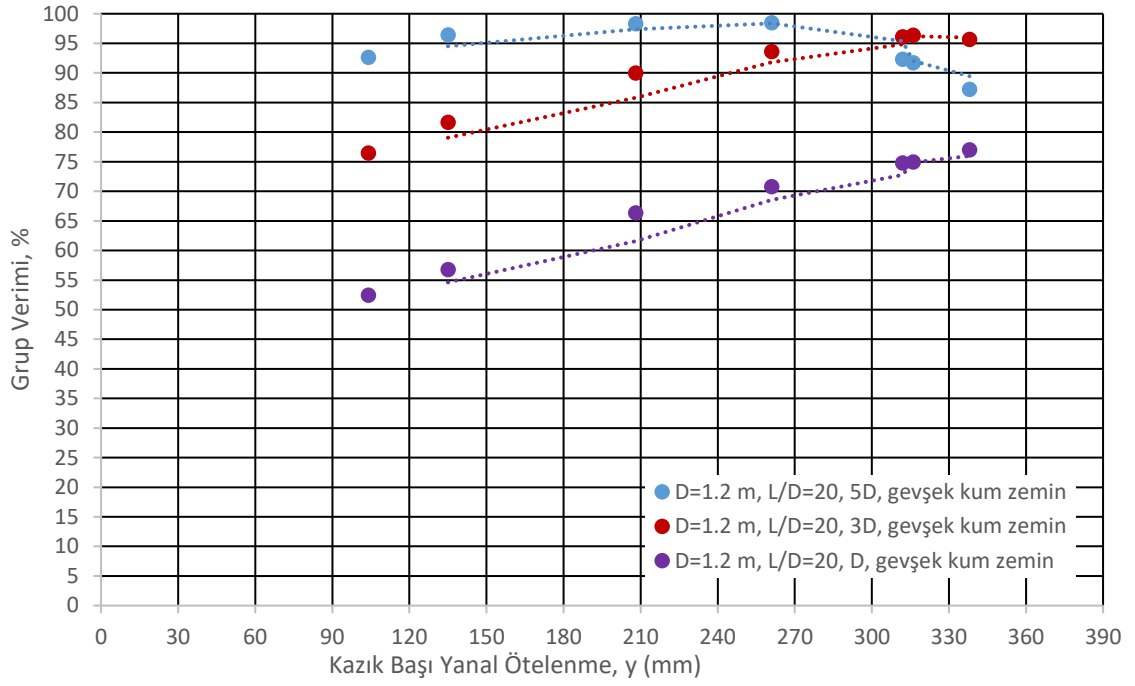
$D=1.2$  m kazıklarda  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  olan kazıklarda grup verimi-kazık başı yanal ötelenme grafikleri Şekil 131, 132, 133 ve 134'te verilmiştir. Kazıklardaki grup veriminin  $l$ 'den küçük olduğu görülmüştür. Kazıklar arası mesafe arttıkça grup verimi artmıştır.



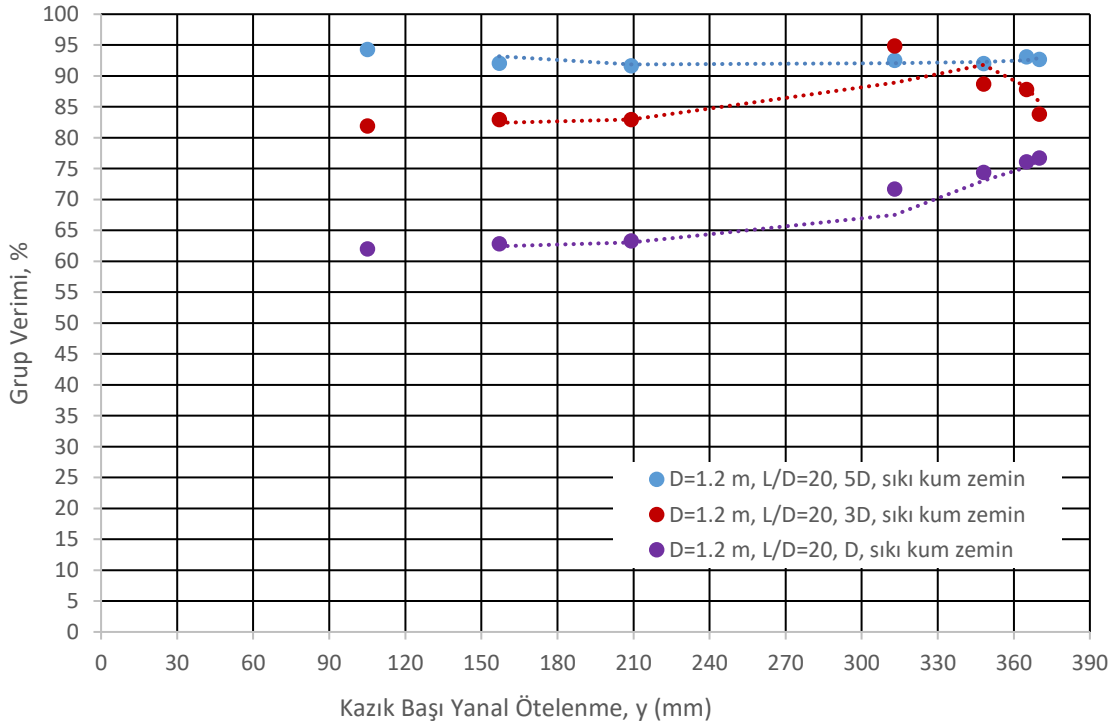
Şekil 131.  $D=1.2$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)



Şekil 132.  $D=1.2$  m, ( $L/D=10$ ), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

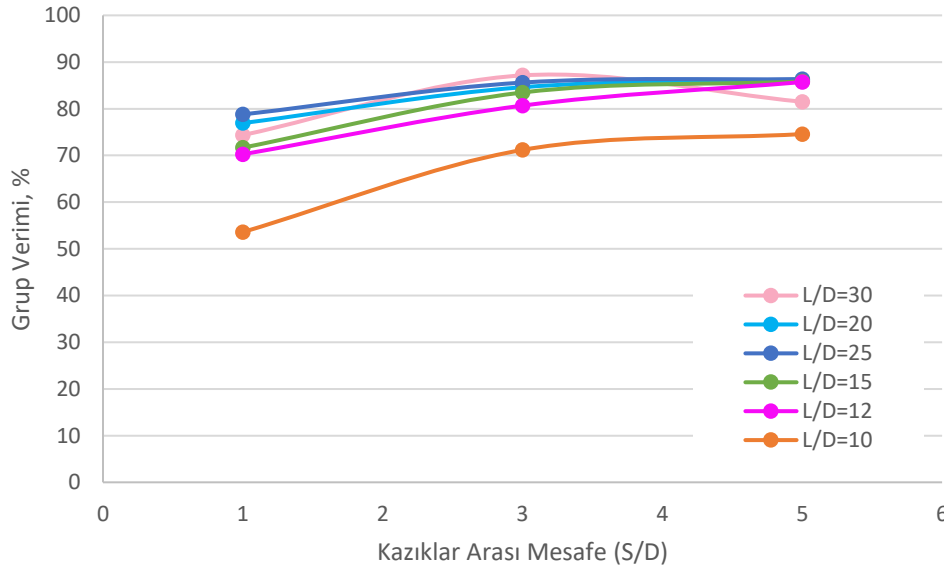


Şekil 133. D=1.2 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (gevşek kum)

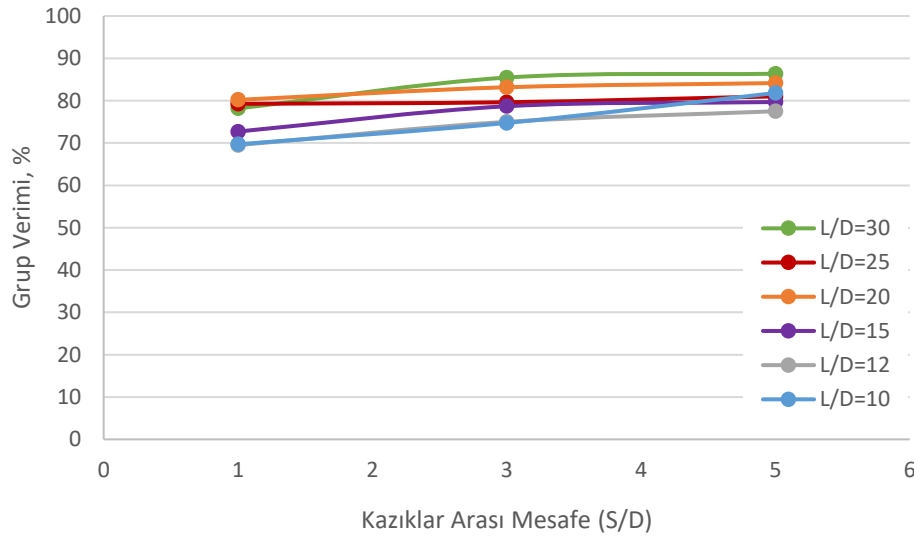


Şekil 134. D=1.2 m, (L/D=20), kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazık grup verimi-yanal ötelenme ilişkisi (sıkı kum)

Yatay yüklü kazıklarda sınır yükler, De Beer (1970) tarafından önerilen log-log yöntemiyle elde edilmiştir. Sınır yüklerden yararlanılarak elde edilen grup verimi değerleri kullanılarak grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri çizilmiştir.  $D=0.3$  m ve  $L/D$  oranlarındaki yatay yüklü kazıkların grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri Şekil 135 ve 136'da gevşek kum ve sıkı kum zemin için verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kazıklar arası mesafe arttıkça kısa kazıklarda grup verimi artmıştır. Kısa kazıklarda grup verimi gevşek zeminde %53 ile %74 arasında değişmekle birlikte sıkı zeminde %69-%82 aralığında değişmektedir. Yani, kısa kazıklar için sıkı zeminde grup verimi daha yüksek olmaktadır. Kazık uzunluğu arttıkça, grup verimi 3D kazık aralığına kadar artmakta, bu kazıklar arasındaki mesafeden itibaren kazıklar arası mesafenin grup verimi üzerindeki etkisi ihmal edilecek düzeye inmektedir. Genel olarak  $D=0.3$  m olan uzun kazıklarda grup verimi değerleri sıkı ve gevşek zeminde birbirine yakın olmuştur.

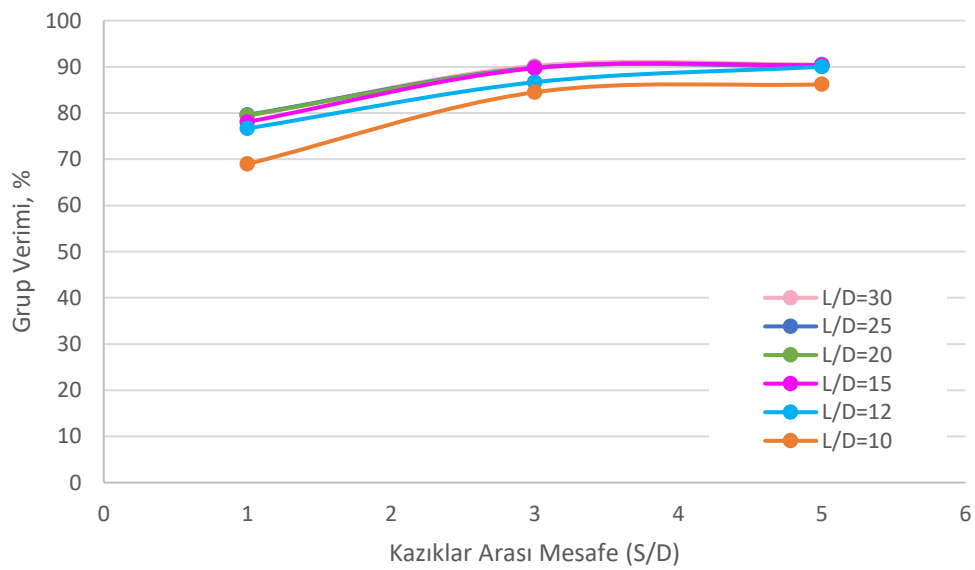


Şekil 135.  $D=0.3$  m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin)

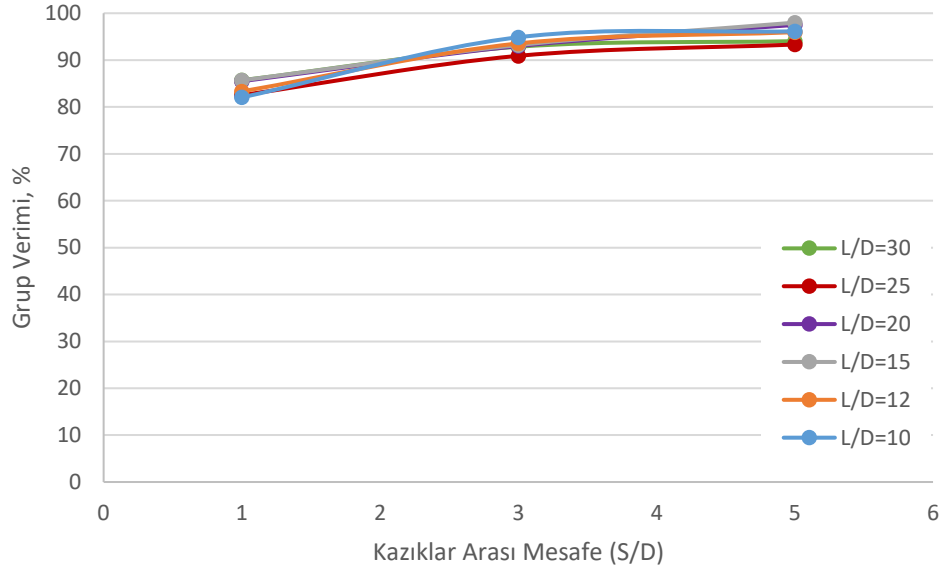


Şekil 136. D=0.3 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin)

D=0.65 m çapa sahip L/D oranlarındaki grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri Şekil 137 ve 138’de gevşek kum ve sıkı kum zemin için verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, grup veriminin gevşek ve sıkı kum zemin durumunda 1’den küçük olduğu görülmüştür. Gevşek kum zeminde kısa kazık diğer L/D oranlarına göre grup verimi daha düşüktür. Kazıklar arası mesafe arttıkça kısa kazıklarda grup verimi artmıştır. Kısa kazıklarda grup verimi gevşek zeminde %68 ile %86 arasında değişmekte ve sıkı zeminde %82-%96 aralığında değişmektedir.

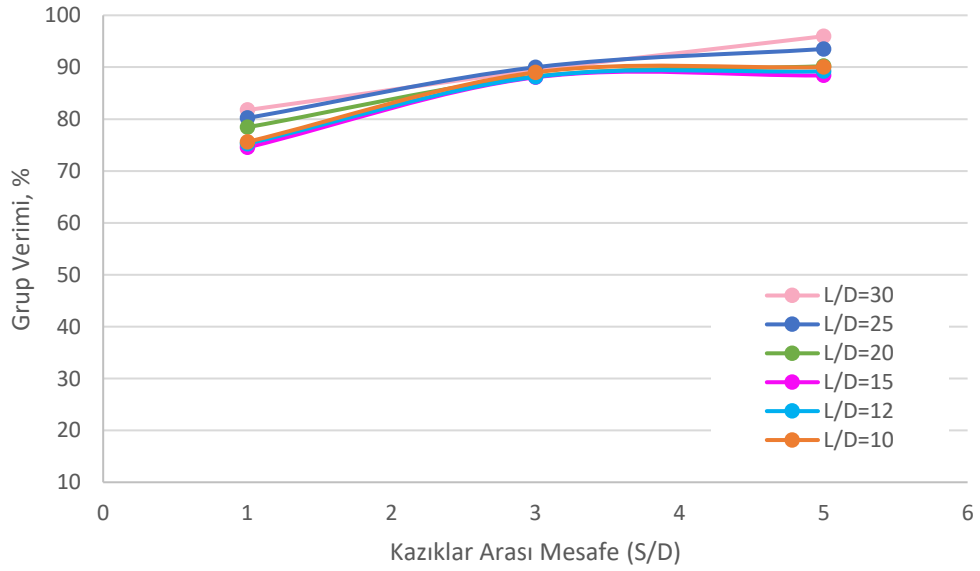


Şekil 137. D=0.65 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin)

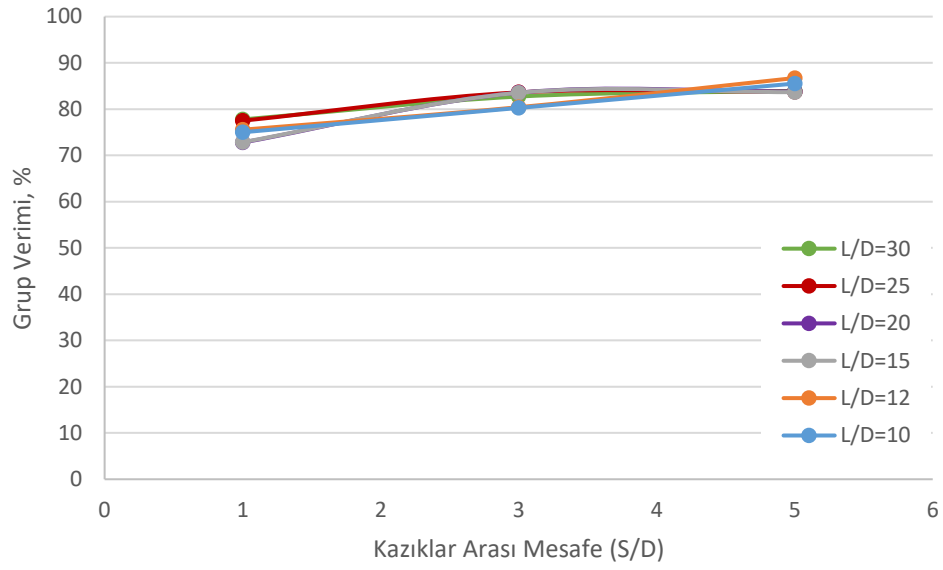


Şekil 138.  $D=0.65$  m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin)

$D=0.8$  m çapa sahip  $L/D$  oranlarındaki grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri Şekil 139 ve 140'da gevşek kum ve sıkı kum zemin için verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kazık uzunluğunun artmasıyla grup verimi değerlerinde benzerlik görülmüştür.

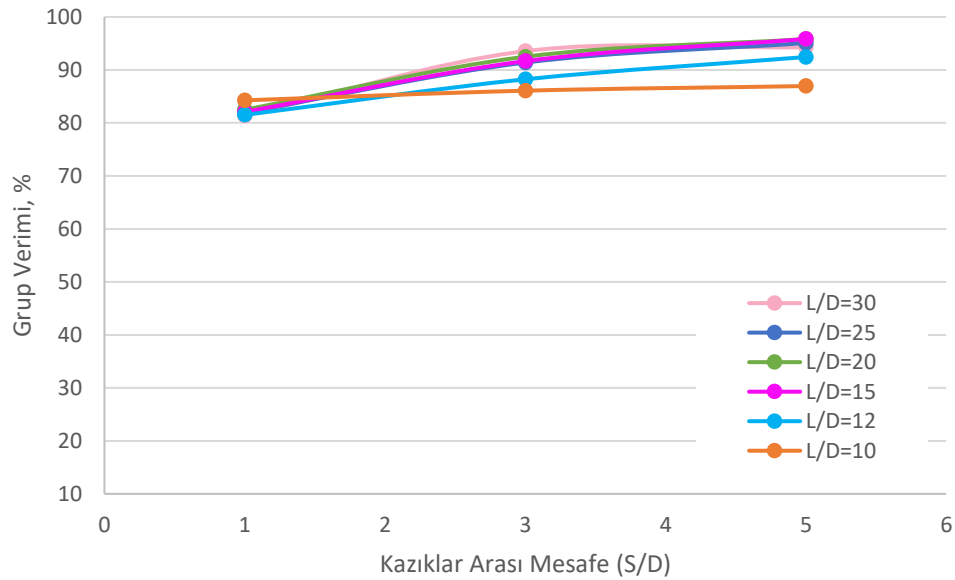


Şekil 139.  $D=0.8$  m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin)

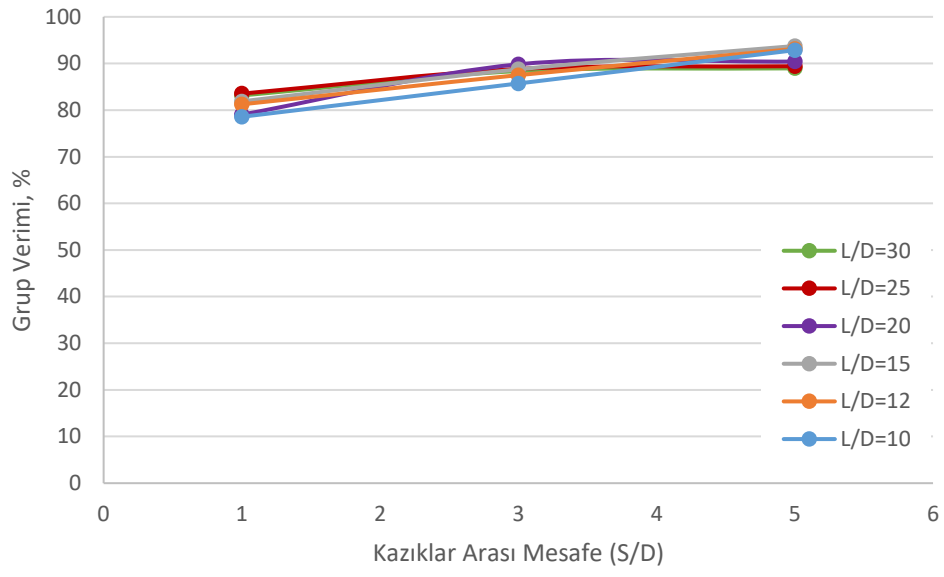


Şekil 140. D=0.8 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin)

D=1.2 m çapa sahip L/D oranlarındaki yatay yüklü kazıkların grup verimi- kazıklar arası mesafe grafikleri Şekil 141 ve 142’de gevşek kum ve sıkı kum zemin için verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, gevşek kum zemindeki kısa kazıktaki 3D ve 5D kazıklar arası mesafede grup verimi-deplasman eğrisi diğerlerinden daha düşüktür.



Şekil 141. D=1.2 m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (gevşek kum zemin)



Şekil 142.  $D=1.2$  m, grup verimi- kazıklar arası mesafe ilişkisi (sıkı kum zemin)

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kum zeminde gömülü yatay yüke maruz serbest başlı kazıklar arası etkileşim deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak incelenmiştir. Kum zemindeki düşey tek kazığa ve kazık gruplarına (kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D) zemin yüzeyi seviyesinde yatay yükler uygulanmıştır. Hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilen bu deneylerde  $D=0.05$  m çapa sahip  $L/D=10$  ve  $L/D=20$  olan kazıklar kullanılmıştır. Deney düzeneğinin modellenmesi için sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 3D programı kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, Plaxis 3D programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak malzeme modeli parametreleri optimize edilmiştir. Deney düzeneğinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan zemin ve kazık özellikleri ile büyük çaplı kazıkların etkileşimini araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda  $D=0.3$  m,  $D=0.65$  m,  $D=0.8$  m ve  $D=1.2$  m olan çaplar;  $L/D=10$ ,  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olan kazıklar için tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olan kazıklar kullanılarak kazıklar arasındaki etkileşim incelenmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar, deneysel ve sayısal analiz sonuçları olmak üzere maddeler halinde verilmiştir.

Deneysel çalışmalardan,

$D=0.05$  m çapa sahip,  $L/D=10$  olan serbest başlı düşey kazıklarda, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde geoteknik göçmeye uğradığından kısa kazık davranışında olduğu görülmüştür. Bu kısa kazıklarda, hem kazık baş kısmı hem de kazık alt uç kısmının dönmenin yanı sıra yer değiştirmeye de uğradığı görülmüştür.

$D=0.05$  m çapa sahip,  $L/D=20$  olan serbest başlı düşey kazıklarda, hem gevşek hem de sıkı kum zeminde yapısal olarak göçmeye uğradığından, uzun kazık davranışında olduğu görülmüştür. Bu uzun kazıklar kırılmış ve kazık baş uç kısmı yer değiştirmenin yanı sıra dönmeye uğradığı halde kazık alt uç kısmında yer değiştirme ve dönme oluşmadığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalar hem gevşek hem de sıkı kum zeminde gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve sıkı kum zeminde elde edilen yatay yük değerleri karşılaştığında rölatif sıklığın yatay yük değerleri üzerinde çok önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Deneyler sonucunda, yatay yük-kazık başı yanal ötelenme grafikleri incelendiğinde;  $L=0.5$  m olan kısa kazıklarda kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D kazıkların etkileşim

incelendiğinde gevşek kum zeminde kazıklar arası mesafe 5D olduğunda etkileşimin olmadığı, kazıklar arası mesafe 3D ve D olduğunda kazıklar arası etkileşimin olduğu görülmüştür. Sıkı kum zeminde ise kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D olduğunda kazıklar arası etkileşimin olduğu görülmüştür. Deneyler süresince çekilen fotoğraflar PIVlab ile analiz edilerek kazıkların yatay yüklenmesiyle kazık ve zeminin yer değişimleri incelenmiştir.  $L=0.5$  m olan kazıklarda, sıkı kum zemin durumunda yatay yük etkisinde hareketlenen zemin alanının, gevşek kum durumundan daha fazla olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, yatay yüke maruz kısa kazıklar etkileşimin, zeminin sıklığına bağlı olduğu belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda, yatay yük-kazık başı yanal ötelenme grafikleri incelendiğinde;  $L=1$  m olan uzun kazıklarda kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D kazıkların etkileşim incelendiğinde gevşek kum zeminde kazıklar arası mesafe 5D ve 3D olduğunda etkileşimin olmadığı, kazıklar arası mesafe D olduğunda kazıklar arası etkileşimin olduğu görülmüştür. Yatay yük-kazık başı yanal ötelenme grafikleri incelendiğinde; sıkı kum zeminde,  $L=1$  m olan uzun kazıklarda kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D kazıkların etkileşim incelendiğinde kazıklar arası mesafe 5D olan kazıklarda etkileşimin olmadığı, kazıklar arası mesafe 3D ve D olduğunda kazıklar arası etkileşimin olduğu görülmüştür. Yatay yüke uygulanan uzun kazıklarda, kazıklar arasındaki etkileşim sıklığa bağlı olmakla birlikte kazıklar arası mesafenin etkisi kısa kazıklara göre daha azdır. Yani, kazık uzunluğunun artması kazıklar arası etkileşim azalmasına sebep olmaktadır.

Yatay yük-kazık başı yanal ötelenme grafikleri incelendiğinde, zeminin yük-deplasman davranışının non-lineer olduğu görülmüştür.

Gevşek kum zeminde,  $D=0.05$  m çapa sahip  $L/D=10$  ve kazıklar arası mesafe 3D ve D olan kazıklarda, sıkı kum zeminde ise  $L/D=10$  olan kazıklar arası mesafe D olan kazıkta grup verimi 1'den küçüktür. Aynı çapa sahip  $L/D=20$  olan kazıklarda gevşek kum zeminde kazıklar arası mesafenin D olduğu, sıkı kum zeminde ise kazıklar arası mesafenin 5D, 3D ve D olan kazıklarda grup verimi 1'den küçük olduğu görülmüştür. Kazıklardaki grup verimi azaldıkça kazıklardaki etkileşim artmaktadır.

Sayısal analiz çalışmalarından,

Plaxis 3D programı ile kazıklar arası etkileşim uyumlu olarak modellenenebilir.

Sayısal analizde kullanılan zemin ve kazık özellikleri kullanılarak deneysel olarak araştırılması zor olan farklı çaplardaki farklı  $L/D$  oranlarında parametrik çalışmalar Plaxis 3D programı ile yapılmıştır. Bu çalışmalar tek kazık ve kazıklar arası mesafe 5D, 3D ve D

olarak serbest başlı düşey kazıklarda uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar;  $D=0.3$  m,  $D=0.65$  m,  $D=0.8$  m ve  $D=1.2$  m çapa sahip kazıkların  $L/D=10$ ,  $L/D=12$ ,  $L/D=15$ ,  $L/D=20$ ,  $L/D=25$  ve  $L/D=30$  olarak yapılmıştır.  $D=0.3$  m,  $D=0.65$  m,  $D=0.8$  m ve  $D=1.2$  m çapa sahip kazıklarda kazıklar arası mesafe  $5D$ ,  $3D$  ve  $D$  olan  $L/D=10$  kazıklar geoteknik göçme olduğundan kazıklar kısa kazık;  $L/D=20$  olan kazıklar ise yapısal göçtüğünden dolayı kazıkların uzun kazık olduğu görülmüştür.

Parametrik çalışmalarda,  $D=0.3$  m,  $D=0.65$  m,  $D=0.8$  m ve  $D=1.2$  m olan kazıklar için grup verimi değerleri hem gevşek hem de sıkı zeminde incelenmiştir. Analizler sonucunda  $L/D=10$  ve  $L/D=20$ , kazıklar arası mesafenin  $5D$ ,  $3D$  ve  $D$  olan kazıklarda grup verimi 1'den küçük olduğu görülmüştür. Kazıklar arası mesafe arttıkça grup verimi de artmıştır. Bu da kazıklar arası etkileşimin azaldığını göstermektedir. Ayrıca aynı  $L/D$  oranı için kazık çapı arttıkça grup veriminin arttığı görülmüştür.

## 5. ÖNERİLER

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışma sonrasında bazı öneriler;

- Killi zeminlerde farklı kazıklar arası mesafeye sahip yatay yüklere maruz serbest başlı kazıklarda kazıkların etkileşimi araştırılabilir.
- Tabakalı zeminlerde zemin yüzeyi seviyesinden yatay yüklere maruz kalan kazıkların etkileşimi araştırılabilir.
- Zeminin belirli yüksekliğinden yatay yüklere maruz kalan kazıkların etkileşimi incelenebilir.
- Eğik kazıklara etkiyen yatay yüklerin kazıklar arası etkileşimi incelenebilir.
- Çalışmalar, benzer şekilde arazi koşullarında da gerçekleştirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abduljawwad, S.N., Al-Sulaimani, G.J., & Basunbul, I.A. (1990). Model Piles Embedded in Submerged Sand and Subjected to Static and Cyclic Lateral Loadings. *Geotechnical Engineering*, 21, 161-175.
- Abendroth, R.E., & Greimann, L.F. (1990). Pile Behavior Established From Model Tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (4), 571-588.
- Adrian, R.J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*, 23 (1), 261-304.
- Altay, G., & Kayadelen, C. (2017). *Momente Maruz Kazıkların Nümerik Olarak İncelenmesi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(4), 127-134.
- Amjad, U., Amjad, M., Ahmad, I. & Israr, M. (2025). Behavior of a Laterally Loaded Pile in a Pile Group: a Simplified Analytical Study. *Spectrum of Engineering Sciences*. Volume 3, Issue 5.
- Anderson, J.B., Townsend F.C., & Grajales, B. (2003). Case History Evaluation of Laterally Loaded Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (3), 187-196.
- Ashour, M., & Norris, G. (2000). Modeling Lateral Soil-Pile Response Based on Soil-Pile Interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 420-428.
- Ateş, B. (2019). *Kum Zemindeki Kazıklı Radye Temellerin Davranışlarının DeneySEL ve Nümerik Yöntemlerle Araştırılması*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversite, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bhushan, K., Haley, S.C. ve Fong, P.T. (1979). Lateral Load Tests on Drilled Piers in Sand, Preprint of the annual ASCE meeting St. Louis, Missouri, 26-30.
- Brinch-Hansen, J. (1961). The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces. Geoteknisk Institut (The Danish Geotechnical Institute), Bulletin No. 12, 5-9.
- Broms, B.B. (1964a). Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, 90(2), 27-63
- Broms, B.B. (1964b). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90 (3), 123-156.
- Brown, D.A., Morrison, C., & Reese, L.C. (1988). Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (11), 1261-1276.

- Brown, D.A., & Shie, C.F (1990). Three-Dimensional Finite Element Model of Laterally Loaded Piles. *Computers and Geotechnics*, 10: 59-79.
- Chandrasekaran, S. S., Boominathan, A., & Dodagoudar, G.R. (2010). Group Interaction Effects on Laterally Loaded Piles in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4), 573-582.
- Çelik, F. (2022). A Comparative Analytical Investigation on the Effects of Different P-Y Curves for a Laterally Loaded Single Pile Design in Saturated Sandy Soil. *European Journal of Science and Technology*, 34, pp. 474-478.
- Das, B. M. (1990). Principles of Foundation Engineering, PWS-Kent Series in Engineering, Boston.
- De Beer, E.E. (1970). Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand. *Geotechnique*, 20, 4, 387-411.
- El Naggar, M.H., & Wei J.Q. (1999). Response of Tapered Piles Subjected to Lateral Loading. *Can. Geotech. J.*, 36, 52-71.
- EN, European Standard, The, EN 1536:1999, Execution of Special Geotechnical Work-Bored Piles
- Fan, Fan, C.C., & Long, J.H. (2005). Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand, *Computers and Geotechnics*, 32, 274-289.
- Fellenius, B., H. (1975). Test Loading of Piles and New Proof Testing Procedure. ASCE J.G.E, 101, 855-869.
- Gürgüç, S. B. (2013). *İki Doğrultuda Yatay Yüklü Kazık Grupları ile İlgili Bir İnceleme*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Harshani, H.M, Galindo-Torres, S.A., Scheuermann, A., Muhlhaus, H.B. (2016). Experimental study of porous media flow using hydro-gel beads and LED based PIV. *Meas. Sci. Technol.* 28 (1), 015902.
- Ilyas, T., Leung, F., Chow Y.K., & Budi S.S. (2004), Centrifuge Model Study of Laterally Loaded Pile Groups in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(3), 274-283.
- Jain, N., Ottino, J.M., Lueptow, R.M. (2002). An experimental study of the flowing granular layer in a rotating tumbler. *Phys. Fluids* 14 (2), 572-582.
- Karthigeyan, S., Ramakrishna, V.V.G.S.T., & Rajagopal, K. (2006). Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 33, 121-131.
- Karthigeyan, S., Ramakrishna, V.V.G.S.T., & Rajagopal, K. (2007). Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 512-521.

- Kaur, A., Singh, H., Jha., J.N. (2018). Experimental Study of Behavior of Free-Head Flexible Piles in Two-Layered Sand Under Lateral and Combined Load. *International Conference on Sustainable Waste Management through Design*, 116-124.
- Khati, B. S., A.M.ASCE & Sawant V. A. (2021). Experimental Study of Laterally Loaded Pile Group in Square Arrangement near Sloping Ground. *International Journal of Geomechanics*, 21(2), 04020257.
- Keleşoğlu, K. (2006). *Yumuşak ve Akan Zeminlerde Kazıklar Üzerindeki Yatay Yük Etkisinin Tanımlanması*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kim, B.T., Kim, N.K., Lee, W.J., & Kim, Y.S. (2004). Experimental Load-Transfer Curves of Laterally Loaded Piles in Nak-Dong River Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130 (4), 416-425.
- Kim, B.T., & Yoon, G.L. (2011). Laboratory Modelling of Laterally Loaded Pile Groups in Sand. *Korean Society of Civil Engineers*, 15(1), 65-75.
- Kim, Y., & Jeong, S. (2011). Analysis of Soil Resistance on Laterally Loaded Piles Based on 3D Soil-Pile Interaction. *Computers and Geotechnics*. 38: 248-257.
- Lee, J., Kyung, D., Hong, J., & Kim, D. (2011). Experimental Investigation of Laterally Loaded Piles in Sand Under Multilayered Conditions, *Soils and Foundations*, 51(5), 915-927.
- Lueptow, R.M., Akour, A., Shinbrot, T. (2000). PIV for granular flows. *Exp.Fluid* 28 (2), 183-186.
- Ma, Y., Yan, G., Scheuermann, A., Li, L., Galindo-Torres, S.A., Bringemeier, D. (2020). Discrete microbubbles flow in transparent porous media. In: *Unsaturated Soils: Research & Applications*, pp. 1219-1223.
- Matlock, H. and Reese, L.C. (1960). Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86 (5), 63-91.
- Matlock, H. ve Reese, L. C. (1962). Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles, *Transactions, ASCE*, 127, 1220-1248.
- Matlock, H. (1970). Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay, *Proc. 2nd Annula Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, (OTC 3871), 163-174.
- Maouche, H., Boumekik, A., & Sbartaï, B. (2009). Numerical Analysis of the Response of a Single Pile Embedded in Non Linear Uniform Soils. *International Review of Mechanical Engineering*, 3(5), 674- 678.
- McWay, M., Casper, R., & Shang, T.-I. (1995). Lateral Response of Three-Row Groups in Loose to Dense Sands at 3D and 5D Pile Spacing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 436-441.

- Meyerhof, G.G., Mathur, S.K., & Valsangkar, A.J. (1981). Lateral Resistance and Deflection of Rigid Walls and Piles in Layered Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 159-170.
- Meyerhof, G.G., Sastry, V.V.R.N., & Yalçın, A.S. (1988). Lateral Resistance and Deflection of Flexible Piles. *Can Geotech. J.*, 25, 511-522.
- Mısıır, G., & Laman, M. (2019). Numerical Analysis of Laterally Loaded Battered Rigid Piles. *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*. 30(5). Pages 9507-9531
- Mısıır, G., & Laman, M. (2020). Numerical Modelling of Full-Scale Lateral Load Test. *European Journal of Science and Technology*, 18, 454-464.
- Muqtadir, A., & Desai, C.S. (1986). Three-Dimensional Analysis of A Pile-Group Foundation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10, 41-58.
- Munaga, T. & Gonavaram, K. K. (2021). Influence of Stratified Soil System on Behavior of Laterally Loaded Pile Groups: An Experimental Study. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, 18.
- Mohan, D. (1988). *Pile Foundations*, Oxford & IBH Publishing Company.
- Panchaland, K.M., & Rangari, M.S. (2018). Dynamic Anaysis of Laterally Loaded Piles in Group. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 2319-6726.
- Patra, N.R., & Pise, P.J. (2001). Ultimate Lateral Resistance of Pile Groups in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (6), 481-487.
- Poulos, H.G. (1971). Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single Piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (5): 711-731.
- Plaxis 3D. (2013). Manuals. Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis 3D Version 2013, (Edited by Brinkgreeve, R.J.B.), Delft University of Technology & Plaxis bv., The Netherlands.
- Prakash, S., & Sharma, H. D. (1990). *Pile Foundations in Engineering Practice*, Wiley.
- Prasad, Y.V.S.N., & Chari, T.R. (1999). Lateral Capacity of Model Rigid Piles in Cohesionless Soils. *Soils and Foundations*.
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand, Proceeding of 6th Offshore Technology Conference, Houston, (OTC 2080), 473-483.
- Reese, L.C. and Welch, R.C. (1975). Lateral Loadings of Deep Foundations in Stiff Clay, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 101(7), 633-649.

- Reese, L.C. (1977). Laterally Loaded Piles: Program Documentation, Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 103(GT4), pp. 287-306.
- Reese, L. C. ve Van Impe, W.F. (2001). Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading, A. A. Balkema.
- Ren, Y., Chen, Z. & Zhu, W. (2025). A Numerical Study of the Lateral Load-Sharing Mechanism of the Pile Cap in a  $3 \times 3$  Pile Group. *Buildings*, 15, 1431.
- Reza, M. A. N. & Meysam, B. (2025). Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Volume 55 (2025), Issue 1, 25-34.
- Rollins., K.M., Lane, J.D., & Gerber, T.M. (2005). Measured and Computed Lateral Response of a Pile Group in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (1), 103-114.
- Ruesta, P. F., & Townsend, F.C. (1997). Evaluation of Laterally Loaded Pile Group at Roosevelt Bridge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (12), 1153-1161.
- Rui, R., Tol, A.F., Xia, Y.Y, Eekelen, S.J., Hu, G. (2016). Investigation of soil-arching development in dense sand by 2D model tests. *Geotech. Test j.* 39 (3), 415-430.
- Salgado, R. (2007). *The Engineering of Foundations*. The McGraw-Hill Companies, Inc., UK.
- Salini, U., & Girishi M.S. (2009). Lateral Load Capacity of Model Piles on Cohesionless Soil. *Electron Journal of Geotechnical Engineering*, 14, 1-11.
- Sastry, V.V.R.N., & Meyerhof, G.G. (1990). Behaviour of Flexible Piles Under Inclined Loads. *Can. Geotech. J.*, 27, 19-28.
- Sutton, M.A., McNeill, S.R., Helm, J.D. and Chao, Y.J. (2000). Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. *Photomechanics*. Springer, 323-372.
- Sutton, M.A., Wolters, W., Peters, W., Ranson W. and McNeill, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1 (3), 133-139.
- Terzi, N.U., Kılıç, H., & Gültekin, S. (2009). *Yanal Yüklü Bir Model Kazığın Kum Ortamındaki Davranışının Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle İncelenmesi*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15,119-127.
- Toğrol E., Tan O. (2003). *Kazıklı Temeller*, Birsan Yayınevi. İstanbul.
- Tomlinson, M. J. (1994). *Pile Design and Construction Practice*, E&FN Spon, London.

- Trochanis, A.M., Bielak, J. & Christiano, P. (1991). Three-Dimensional Nonlinear Study of Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(3), 429-447.
- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, TS3168 (1978) Delme Kazıklar
- Uncuoğlu, E., & Laman, M. (2013). Yanal Yüklü Kısa Kazıkların Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *İmo Teknik Dergi*, 394, 6257-6278, 394.
- Vakili, A., Zomorodian, S. M. A. & Totonchi, A. (2020). Laboratory and Three-Dimensional Numerical Modeling of Laterally Loaded Pile Groups in Sandy Soils. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(1).
- Vakili, A., Zomorodian, S. M. A. & Bahmyari, H. (2021). Group Reduction Factors for the Analysis of the Pile Groups Under Combination of Lateral Loads in Sandy Soils. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(1).
- Verruijt, A., & Kooijman, A.P. (1989). Laterally Loaded Piles in a Layered Elastic Medium. *Geotechnique*, 39(1), 39-49.
- Wakai, A., Gose, S., & Ugai, K. (1999). 3-D Elasto-Plastic Finite Element Analyses of Pile Foundations Subjected to Lateral Loading. *Soils and Foundations*, 39(1), 97-111.
- Wang, W., Zhang, X., Yu, S. & Guan, J. (2024). Effect of Cyclic Soil Freezing and Thawing on the Lateral Load Response of Bridge Pile Foundations. *Buildings*, 14, 2540.
- Winkler, E. (1867). Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit. Dominicus Verlag, Prag.
- Yalçın, A.S., & Meyerhof, G.G. (1990). The Effect of Installation on the Ultimate Resistance of Rigid Piles Under Inclined Loads in Layered Sand. *Soils and Foundations*, 30 (3), 37-52.
- Yan, G., Xu, Y., Murgana, V., Scheuermann, A. (2018). Application of image analysis on two-dimensional experiment of ground displacement under strip footing. In: GeoShanghai International Conference, vols. 13-21. Springer, Singapore.
- Yan, G., Cheng, Z., Ma, Y., Scheuermann, A., Li, L. (2022). Applying imaging technique to investigate effects of solute concentrations and gas injection rates on gas bubble generation. *Geofluids* 11.
- Yang, Z., & Jeremic, B. (2003). Numerical Study of Group Effects for Pile Groups in Sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, 1255-1276.
- Yang, Z., & Jeremic, B. (2005). Study of Soil Layering Effects on Lateral Loading Behavior of Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (6), 762-770.
- Yang, K.H., Chiang, J., Lai, C.W., Han, J., Lin, M.L (2020). Performance of geosynthetic-reinforced soil foundations across a normal fault. *Geotext. Geomembranes* 48 (3), 357-373.

- Zhang, F., Okawa, K., & Kimura, M. (2008). Centrifuge Model Test on Dynamic Behavior of Group-Pile Foundation with Inclined Piles and Its Numerical Simulation. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering, China*, 2(3), 233-241.
- Zhengdao, F., Guanlu, J., Shengyang, Y., & Anhong, L. (2019). Lateral Behavior of Piled Bridge Foundation and Stabilizing Piles on Steep Slope. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(10), 4223-4236.



## ÖZGEÇMİŞ

İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Trabzon’da tamamladı. Lisans eğitimine 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde başladı. 2012-2013 güz yarıyılı akademik yılında Erasmus Programı ile İtalya’da bulunan Salerno Üniversitesi’nde eğitim gördü. Lisans öğrenimini 2014 yılında Bayburt Üniversitesi’nde tamamlayarak mezun oldu. 2014 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında özel bir firma olan yapı denetim firmasında mühendis kontrol elemanı olarak bir süre çalıştı. 2016 yılında “Killerin Stabilizasyonunda Doğal Puzolanik Katkı Maddesi İnceliğinin Dayanım ve Durabiliteye Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezini sunarak yüksek lisans programından mezun oldu. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı.

- Yılmaz, F., Fidan, D., (2017). Effect of Wetting-Drying Cycles on Volumetric Stability of Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, *European Journal of Technique*.
- Yılmaz, F., Fidan, D., (2017). Freeze-Thaw Performance of Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, IAREC (16.11.2017-18.11.2017).
- Yılmaz, F., Fidan, D., (2018). Influence of Freeze-Thaw on Strength of Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, *Geomechanics and Engineering*.
- Yılmaz, F., Taş, M. ve Fidan, D., (2018). Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*.