

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali GÜMÜŞ**

**YANAL YÜKLÜ KAZIKLARIN DENEYSEL VE SAYISAL  
ANALİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA-2021**

## ÖZ

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### YANAL YÜKLÜ KAZIKLARIN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

Ali GÜMÜŞ

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK  
Yıl: 2021, Sayfa: 99  
Juri : Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK  
: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ALTAY

Bu çalışmada, kıyı yapılarında sıklıkla kullanılan silindirik çelik kazıklara etkiyen yanal yükler üzerine bir araştırma yapılmıştır. ASTM D 3966 standardı uyarınca, inşaat sahasında düzeneği hazırlanan test kazıklarına uygulanan yanal yükleme sonucunda elde edilen “deplasman-zaman” ve “yük-deplasman” eğrileri baz alınarak, PLAXIS 3D’de modellenip inşaat sahasındaki şartlar sağlanmıştır. İnşaat sahasındaki şartları sağlayan model kullanılarak, parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalar kapsamında silindirik çelik kazığın çapı, et kalınlığı, yük uygulama yüksekliği ve kazık gömülme boyu değiştirilerek deplasmanlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kazık et kalınlığı ve kazık çapı ile kazık tepe noktasındaki yanal deplasman arasında ters orantı olduğu, yük uygulama kolu uzunluğu ile kazık tepe noktasındaki yanal deplasman arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. Kazık gömülme boyunun kazık tepe noktasındaki yanal deplasmana etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kıyı yapıları, yanal yükleme testi, silindirik çelik kazıklar, PLAXIS

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF Laterally Loaded Piles

Ali GÜMÜŞ

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK  
Year: 2021, Pages: 99  
Jury : Asst. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK  
: Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Asst. Prof. Dr. Gökhan ALTAY

The main purpose of this study was to research and assess lateral loads affecting tubular steel piles, that are frequently used in the construction of coastal structures. Following the ASTM D 3966 standard, the "displacement-time" and "load-displacement" curves obtained as a result of the lateral loads applied to installed test piles at the construction site are modeled in PLAXIS 3D. A model of the specific conditions in the construction site has also been created in finite elements. With this information, parametric studies have been carried out using the model matching the conditions at the construction site. Within the scope of parametric studies, the displacements were compared by changing the diameter, pile wall thickness, load effect height, and embedded length of the tubular steel pile. As a result, it has been observed that there is an inverse proportional relationship between the pile wall thickness and the lateral displacement at the top of the pile. Furthermore, there is also a similar inverse relationship between the pile diameter and lateral displacement. Conversely, there is a direct proportionality between the length of the lateral load arm and the lateral displacement at the top of the pile. It was concluded that pile embedment length had no effect on lateral displacement at the top of the pile.

**Keywords:** Coastal structures, lateral loading test, tubular steel piles, PLAXIS

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Dünyada küreselleşmenin hız kazanması ve ülkelerin ticaret hacimlerinin artması, deniz taşımacılığına ve limanlara olan ihtiyacı artırmıştır. Liman yapılarında, rıhtım yapımında kullanılan çeşitli inşaat yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler tasarım gemisi boyutlarına, tasarlanan rıhtımın derinliğine, rıhtımın kullanım amacına ve öngörülen bütçeye göre değişebilir.

Bu çalışmada, 2016 yılında yapımı tamamlanan Mersin Limanı Genişleme Projesi Faz-1 İnşaat Altyapı İş'i'nde X:4074754.766 ve Y:378526.463 (ITRF 96; 3 derece) koordinat noktasında çakılan (kazık üst kotu +1.00 m ve çakıldığı noktadaki dolgu derinliği -2.00 m) et kalınlığı 20 mm ve kazık çapı 40" (Ø1016 mm) olan 2 no'lu test kazığı incelenmiştir. Test kazığının sonlu elemanlar metodu ile yenileme kriterleri Mohr Coulomb (MC) olacak şekilde sayısal modellemesi yapılmıştır. Bilgisayar modellemesi sonuçları, sahada uygulanan yanal yükleme testlerinin verileri ile karşılaştırılmış ve bu sayede bilgisayar modelinin kontrolü sağlanmıştır. Sahada proje kapsamında yapılan geoteknik çalışmalar baz alınarak; öncelikle PLAXIS 2D'de "*plate*" yapı elemanı ile bir model kurulmuş ve kurulan sonlu elemanlar model sonuçları, sahada ASTM D 3966'ya göre yapılmış yanal yükleme testinin "yük-deplasman" eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Yanal yükleme tekil kazıkta yapıldığından, bu problemin üç boyutlu olarak çözülmesi gerektiği PLAXIS 2D verileri ile sahadaki yatay deplasman değerlerine yaklaşılamamasından da anlaşılmıştır.

Sonrasında, PLAXIS 3D modeli "*embedded beam*" yapı elemanında kurulmuştur. Sahadaki yatay deplasman değerine yaklaşmak için yüzey sürtünme katsayısı değiştirilmiş fakat deplasman değerine yaklaşılamamıştır. PLAXIS 3D modelinde "*beam*" yapı elemanı kullanılarak yeniden analiz yapılmıştır. Çelik kazık, suyun içinde dolguda olduğundan, yatay deplasmanı büyük ölçüde kazığın konsol boyu, dolgunun ve kazığın malzeme elastisite modülü etkileyecektir. Sahadaki deney düzeneğinin aynı şekilde modellenmesi gerektiğinden dolayı kazık

konsol boyunun sabit kalacağından, modelin gerçekçiliğini etkilememesi açısından çeliğin elastisite modülü radikal olarak büyük miktarda değiştirilip indirilemeyeceğinden dolayı, suyun altında olan dolgu malzemenin elastisite modülü 75 MPa'dan 50 MPa'ya düşürülüp, çeliğin elastisite modülü kabul edilebilir bir düzeyde 207 GPa'dan 180 GPa'ya düşürülerek analiz yapılmıştır. Bu sayede sahada yapılan yanal yükleme sonucu oluşan yatay deplasman değeri, yaklaşık olarak % 5 farkla PLAXIS 3D modelde elde edilmiştir. Ayrıca tüm modellerde, yatay deplasmanı önemli ölçüde etkilemese de silindirik çelik kazık boru şeklinde olduğundan ve zemine çakıldığında içi doymun zemin ile dolu olduğundan dolayı içindeki doymun kuru birim hacim 20 kN/m<sup>3</sup> kabulü ile çeliğin birim hacim ağırlığı olan 77 kN/m<sup>3</sup> hedeflenerek, silindirik kazık içindeki doymun zemin düşünülerek, modelleme yapılırken çeliğin birim hacim ağırlığı 57 kN/m<sup>3</sup> olarak PLAXIS'e tanımlanmıştır.

Sahadaki deplasman değeri ile uyumlu olarak elde edilen PLAXIS 3D modelinde, kazığın diğer yapısal özellikleri ve etkilenen yanal yükün büyüklüğü her aşamada sabit kalacak şekilde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, çelik silindirik kazık et kalınlığı artırılmış, yük etkime yüksekliği azaltılmış (yük kolu azaltılmış), kazık çapı artırılıp azaltılmış ve dolgu üstünde kalan kazık uzunluğu sabit kalacak şekilde toplam kazık boyu dolgu içinde azaltılmıştır.

Parametrik çalışma sonucunda PLAXIS 3D paket programından elde edilen “yük-deplasman” eğrileri incelendiğinde et kalınlığı ve kazık çapı ile yatay deplasman arasında ters orantı olduğu, yükün uygulandığı yükseklik (yük kolu) ile yatay deplasman arasında doğru orantı olduğu ve kazık gömülme boyunun kazık üst kotunda ölçülen yatay deplasman üzerinde bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca; bilgisi ve karakterli duruşu ile bana ışık tutan, yapıcı yaklaşımları ile tez çalışmamın tamamlanmasını sağlayan, lisans bitirme tezinde de beraber çalıştığım, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK’a sonsuz teşekkür ederim.

Kıyı Yapılarının Tasarımı ile Kıyı ve Liman Mühendisliği konularında, yüksek lisans eğitim döneminde kendisinden çok şey öğrendiğim değerli hocam Prof. Dr. Mevlüt Sami AKÖZ’e çok teşekkür ederim.

Yoğun iş tempomuza rağmen, yüksek lisans eğitimimi destekleyen ve tez çalışmamdaki veriler için tarafıma kullanım izni veren, desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen MIP Mersin Uluslararası Limanı A.Ş. üst yönetimine teşekkür ederim.

Tecrübelerinden faydalandığım, beraber çalışmaktan kıvanç duyduğum, yüksek lisans eğitimim boyunca beni sürekli destekleyen, cesaretlendiren ve benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Necdet AKSOY’a, Sayın Serkan MAHMUTOĞLU’na ve Sayın Ali İskender DİNLER’e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği bilgi ve tecrübesi ile bu çalışmanın olgunlaşmasındaki katkılarından dolayı Sayın Dr. İlhan Burak DURAN’a çok teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen canım anneme, babama, ağabeyime ve çalışmalarımın yoğunlaştığı dönemleri anlayışla karşılayan, bana her zaman ve her konuda destek olan meslektaşım ve sevgili eşim Bensu’ya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

|                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZ .....                                                         | I    |
| ABSTRACT.....                                                    | II   |
| GENİŞLETİLMİŞ ÖZET .....                                         | III  |
| TEŞEKKÜR.....                                                    | V    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                | VI   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                          | VIII |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                            | X    |
| 1. GİRİŞ .....                                                   | 1    |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....                                        | 5    |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                       | 17   |
| 3.1. Materyal .....                                              | 17   |
| 3.1.1. Silindirik Çelik Boru .....                               | 17   |
| 3.1.2. SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici.....                  | 19   |
| 3.1.3. Proje Alanı Zemin Profilleri .....                        | 20   |
| 3.2. Metot.....                                                  | 32   |
| 3.2.1. Kazık Çakımı.....                                         | 32   |
| 3.2.2. Yanal Yükleme Testi Yapılması.....                        | 38   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                    | 45   |
| 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....                                | 45   |
| 4.1.1. PLAXIS Paket Programı.....                                | 45   |
| 4.1.1.1. Zemin Modelleme, Yeraltı Su Seviyesi ve Zemin Modu..... | 45   |
| 4.1.1.2. Yapı Modu ve Ağ Modu .....                              | 47   |
| 4.1.1.3. Kademeli İnşaat Modu .....                              | 47   |
| 4.1.1.4. Plaxis Sonuç Çıktıları.....                             | 48   |
| 4.2. Arazi Deneyi Sonuçları.....                                 | 48   |
| 4.3. Sonlu Elemanlar Analizi .....                               | 51   |
| 4.3.1. PLAXIS 2D Modelleme .....                                 | 51   |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.2. PLAXIS 2D Analizi.....                                              | 54 |
| 4.3.3. PLAXIS 3D Modelleme .....                                           | 56 |
| 4.3.4. PLAXIS 3D Analizi.....                                              | 59 |
| 4.4. Deney Sonuçları İle Sonlu Elemanlar Analizinin Karşılaştırılması..... | 72 |
| 4.5. Parametrik Çalışmalar.....                                            | 76 |
| 4.5.1. Et Kalınlığının Deplasmana Etkisi .....                             | 78 |
| 4.5.2. Yük Etkime Noktasının Deplasmana Etkisi .....                       | 79 |
| 4.5.3. Kazık Çapının Deplasmana Etkisi.....                                | 81 |
| 4.5.4. Kazık Gömülme Boyunun Deplasmana Etkisi.....                        | 82 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                               | 85 |
| 5.1. Sonuçlar .....                                                        | 85 |
| 5.2. Öneriler .....                                                        | 87 |
| KAYNAKLAR .....                                                            | 89 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                             | 91 |
| EKLER.....                                                                 | 92 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Deney Düzeneği Kısımları.....                                                 | 13 |
| Çizelge 2.2. Kesme Gerilmesine Karşı Boyutsuz Sabitlerin Gösterimi.....                    | 15 |
| Çizelge 3.1. SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici Boyutları ve Özellikleri .....            | 20 |
| Çizelge 3.2. Sondaj Koordinatları ve Derinlikleri .....                                    | 23 |
| Çizelge 3.3. Sondaj Detayları .....                                                        | 24 |
| Çizelge 3.4. SPT Değerleri; GSK-01 ve GSK-02 .....                                         | 27 |
| Çizelge 3.5. SPT Değerleri; GSK-03 ve GSK-04 .....                                         | 28 |
| Çizelge 3.6. SPT Değerleri; GSK-05 ve GSK-06 .....                                         | 29 |
| Çizelge 3.7. SPT Değerleri; GSK-07 ve GSK-08 .....                                         | 30 |
| Çizelge 3.8. SPT değerleri; GSK-09 .....                                                   | 31 |
| Çizelge 3.9. ASTM D 3966-8.1.4.(C) Tablosu (2007) .....                                    | 42 |
| Çizelge 4.1. Arazi Deneyi Deplasman Değerleri .....                                        | 49 |
| Çizelge 4.2. PLAXIS 2D Model Parametreleri.....                                            | 53 |
| Çizelge 4.3. “Plate” Parametre Tablosu (Efill=75 MPa) .....                                | 54 |
| Çizelge 4.4. PLAXIS 2D Analiz Sonuçları.....                                               | 55 |
| Çizelge 4.5. PLAXIS 3D Model Parametreleri (Efill=75 MPa) .....                            | 58 |
| Çizelge 4.6. “Embedded Beam” Parametre Tablosu .....                                       | 60 |
| Çizelge 4.7. “Embedded Beam” Model Tskin=50 kN/m ve Tskin=3 kN/m Analiz Sonuç Tablosu..... | 61 |
| Çizelge 4.8. “Beam” Parametre Tablosu .....                                                | 63 |
| Çizelge 4.9. “Beam” Model (Efill=75 MPa) Analiz Sonuç Tablosu .....                        | 64 |
| Çizelge 4.10. PLAXIS 3D Model Parametreleri (Efill=50 MPa) .....                           | 66 |
| Çizelge 4.11. “Beam” Parametre Tablosu (Eçelik=1,80E+08 kN/m <sup>2</sup> ) .....          | 67 |
| Çizelge 4.12. “Beam” Model (Efill=50 MPa) Analiz Sonuç Tablosu .....                       | 68 |
| Çizelge 4.13. Saha Deneyi Parametreleri.....                                               | 76 |
| Çizelge 4.14. Parametre Çalışmasındaki Değişkenler Tablosu .....                           | 77 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

|             |                                                                       |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | Proje Sahası Genel Görünüş.....                                       | 4  |
| Şekil 2.1.  | Direkt ve Endirekt Yükleme.....                                       | 5  |
| Şekil 2.2.  | Laboratuvar Modeli.....                                               | 10 |
| Şekil 2.3.  | Deney Düzeneği Plan ve Kesit.....                                     | 14 |
| Şekil 3.1.  | Çelik Kazıklar Kaynak İşleri.....                                     | 17 |
| Şekil 3.2.  | Test Kazıkları .....                                                  | 18 |
| Şekil 3.3.  | Saha Kazık İşleri .....                                               | 18 |
| Şekil 3.4.  | Çelik Silindirik Kazık.....                                           | 19 |
| Şekil 3.5.  | SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici.....                              | 19 |
| Şekil 3.6.  | Sondaj Vaziyet Planı .....                                            | 22 |
| Şekil 3.7.  | Kazığın Çakımdan Önce Yüzdürülmesi İçin Uçlarının<br>Kapatılması..... | 33 |
| Şekil 3.8.  | Kazık Kaynak Sahası ve Yuvarlama Rampası .....                        | 33 |
| Şekil 3.9.  | Kazığın Yüzdürülmesi.....                                             | 34 |
| Şekil 3.10. | Kazığın Kaldırılması Faz-1 .....                                      | 34 |
| Şekil 3.11. | Kazığın Kaldırılması Faz-2 .....                                      | 35 |
| Şekil 3.12. | Kazık Çakılması Faz-1 .....                                           | 35 |
| Şekil 3.13. | Kazık Çakılması Faz-2 .....                                           | 36 |
| Şekil 3.14. | Mersin Limanı Proje Sahası .....                                      | 37 |
| Şekil 3.15. | Yanal Yükleme Deney Düzeneği .....                                    | 38 |
| Şekil 3.16. | Topografik Ölçüm .....                                                | 39 |
| Şekil 3.17. | Yükleme Pistonu .....                                                 | 40 |
| Şekil 3.18. | Kazık Yükleme Testi Kurulumu .....                                    | 40 |
| Şekil 3.19. | Basınç Ölçer Barometre .....                                          | 41 |
| Şekil 3.20. | Yanal Yükleme Deney Düzeneği Görünüm (2) .....                        | 41 |
| Şekil 3.21. | Yanal Yükleme Deney Düzeneği Görünüm (3) .....                        | 42 |
| Şekil 3.22. | Deney Düzeneği Plan .....                                             | 43 |

|             |                                                                                  |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.23. | Deney Düzeneği Kesiti.....                                                       | 43 |
| Şekil 3.24. | Deney Düzeneği Yan Görünüş.....                                                  | 44 |
| Şekil 4.1.  | Sondaj Kuyusu ve Yeraltı Su Seviyesi Gösterimi.....                              | 46 |
| Şekil 4.2.  | 3D Zemin Elemanları – 10 düğümlü.....                                            | 47 |
| Şekil 4.3.  | Arazide Yapılan Yük-Deplasman Eğrisi.....                                        | 50 |
| Şekil 4.4.  | Arazide Yapılan Deplasman-Zaman Eğrisi.....                                      | 50 |
| Şekil 4.5.  | Ø1016 mm Test Kazığı Kesiti (t:20 mm).....                                       | 51 |
| Şekil 4.6.  | PLAXIS 2D Model Görünümü.....                                                    | 52 |
| Şekil 4.7.  | PLAXIS 2D Sondaj Kuyusu Detayı.....                                              | 52 |
| Şekil 4.8.  | 2D Model Yük-Deplasman Eğrisi.....                                               | 56 |
| Şekil 4.9.  | 2D Model Deplasman-Zaman Eğrisi.....                                             | 56 |
| Şekil 4.10. | PLAXIS 3D Model Görünümü.....                                                    | 57 |
| Şekil 4.11. | PLAXIS 3D Sondaj Kuyusu Detayı.....                                              | 57 |
| Şekil 4.12. | “Embedded Beam” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi.....                             | 62 |
| Şekil 4.13. | “Embedded Beam” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi.....                               | 62 |
| Şekil 4.14. | “Beam” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi.....                                      | 69 |
| Şekil 4.15. | “Beam” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi.....                                        | 69 |
| Şekil 4.16. | PLAXIS 3D Sonuç Görüntüsü (Deformed mesh).....                                   | 70 |
| Şekil 4.17. | %50 Yük Altında Eğilme Momenti.....                                              | 70 |
| Şekil 4.18. | %100 Yük Altında Eğilme Momenti.....                                             | 71 |
| Şekil 4.19. | %200 Yük Altında Eğilme Momenti.....                                             | 71 |
| Şekil 4.20  | “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-<br>Zaman Eğrisi .....        | 72 |
| Şekil 4.21. | “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman<br>Eğrisi .....           | 72 |
| Şekil 4.22. | “Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi .....                     | 73 |
| Şekil 4.23. | “Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi .....                       | 73 |
| Şekil 4.24. | “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model<br>Deplasman-Zaman Eğrisi ..... | 74 |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.25. “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-<br>Deplasman Eğrisi .....             | 74 |
| Şekil 4.26. “2D Model”, “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D<br>Model Deplasman-Zaman Eğrisi..... | 75 |
| Şekil 4.27. “2D Model”, “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D<br>Model Yük-Deplasman Eğrisi.....   | 75 |
| Şekil 4.28. Model Geometrisi.....                                                                       | 76 |
| Şekil 4.29. Et kalınlığı Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi .....                                            | 78 |
| Şekil 4.30. Et kalınlığı Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi .....                                              | 79 |
| Şekil 4.31. Yük Etkime Noktası Kotu Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi .....                                 | 80 |
| Şekil 4.32. Yük Etkime Noktası Kotu Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi .....                                   | 80 |
| Şekil 4.33. Kazık Çapının Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi.....                                            | 81 |
| Şekil 4.34. Kazık Çapının Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi.....                                              | 82 |
| Şekil 4.35. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi.....                                       | 83 |
| Şekil 4.36. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi.....                                         | 83 |



## 1. GİRİŞ

Liman yapılarında genellikle rıhtımlarda çakma kazık, keson bloklar veya kütle beton bloklar kullanılır. Günümüzde konteyner taşımacılığında kullanılan gemiler genelde 14-16 metre arası draftlı gemilerdir. Bu gemilerin yanaşabileceği rıhtım yapısı tasarımı yapılırken rıhtım önü oyulma tahkimatı, gemi hareket halinde iken oturma etkisi dikkate alınarak tasarım derinliği 17 metreden fazla yapılmaktadır. Liman içi çalkantı miktarı gemi salınımını artırdığından operasyon sürelerini kısıtlamakta ve verimliliği düşürmektedir. Yanaşma yapısı blok betonlu bir yapı ise yapıdan tam dalga yansıması oluşacak ve difraksiyona uğrayan dalga yüksekliğinin 2 katı duran dalga oluşumu olacaktır. Bu durum da liman içi çalkantıyı artıracaktır. Çelik kazıklara gelen dalga yansıma yapmayacağından sönümlenecektir. Tasarım hesaplarında kazıklı rıhtımlar için yansıma katsayısı 0 (sıfır), bloklu rıhtımlar için yansıma katsayısı 1 (bir) alınır. Yapının kullanımının yanı sıra inşaatın ekonomisi ve inşaat yapım metodu göz önüne alındığında, çelik kazıkların deniz yapılarında kullanım alanı oldukça yaygındır.

Kazıklar, yüzeyden gelen yatay ve düşey yükleri zeminde daha derine ileten ahşap, beton/betonarme ve çelik yapı elemanlarıdır. Kazıklar, yumuşak zeminlerde yüzeyden gelen yükü daha derindeki sert zemine ileterek kazık uç noktasına aktarır veya kazık yüzeyindeki sürtünme kuvvetleri ile kazığa gelen yükü karşılar.

Kazıklı temeller, yüzeysel temellere göre daha maliyetlidir. Kazıkların kullanım alanları ve görevleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Yapıdan gelen yatay ve düşey yükleri zemine aktarır.
- Su tablasının altında kalan temellerde, devrilme ve kaldırma yüklerine karşı direnç sağlar.
- Farklı zemin özellikleri üzerinde yayılan temellerde oturma kontrolü sağlar.

- Titreşime maruz kalan temellerde zemini rijitleştirerek titreşim kontrolü sağlar.
- Akıntıdan kaynaklı oyulmaları önlemek amacı ile akarsu üzerinde bulunan köprü veya viyadük temelleri altında kullanılır.
- Deniz yapılarında, suyun üstündeki yapıdan gelen yükün zemine aktarılmasında kullanılır. Limanlardaki kazıklı yapılarda yapıya gelen dalga sönümlenip yansımaları olmayacağından, liman içi çalkantı miktarının kontrolü sağlanır.

Kazıkların yerinde uygulanması çeşitli yöntemlerle yapılabilir, bunlardan en yaygın olanları aşağıda tanımlanmıştır;

- Yerine yerleştirilen kazığın, uygun güç ve kapasitede kazık çakım çekici vasıtasıyla zemine çakılarak yerleştirilir. Bu yöntem gürültü kirliliği yaratıp yakın bölgelerde titreşim hissettirebilir ve bu titreşim bitişik yapılara zarar verebilir.
- Titreşim kullanarak kazık çakımı yapılır. Bu yöntemin, kohezyonlu zeminlerde uygulanabilirliği fazladır.
- Fore kazık yapılabilir. Bu yöntemde zemin durumuna göre, kazıcı kova veya spiral şeklinde kazıcı ekipman kullanarak malzeme çıkarılır. Kazık betonu yerinde dökülür.

Çelik kazıklar yaygın olarak H şeklinde veya silindirik olarak uygulanır. Birbirlerine birleştirilmesi kaynak yapılarak oldukça kolaydır. Kazık çakma çekici ile zemine çakılır. Yüksek taşıma kapasitelidir ve deplasman değerleri düşüktür. Çelik kazıklar korozyondan zarar görebilir ve önlem alınması gerekir. Bu sebeple, katodik koruma yapılarak önlem alınır. Kazığa sürekli ve belirli değerde sabit akım yollanarak veya genellikle çinko ve magnezyum gibi çelikten daha aktif, daha önce korozyona uğrayan metaller bağlanarak korozyondan korunabilir.

Deniz yapılarında kullanılan çelik kazıklar düşey ve yanal yüklere maruz kalırlar. Düşey yükler, yapıdan gelen sabit yükler ve operasyon kaynaklı hareketli yüklerden oluşmaktadır. Yanal yükler ise genel olarak dalga yükleri, zemin yanal basınçları, gemi yanaşması sırasında çarpmadan kaynaklı yükler ve geminin halatlar ile bağlanması sırasında oluşan çekme kuvvetlerinden oluşur.

İnşaat aşamasında test kazıklarına statik ve dinamik yükleme testleri yapılır. Bu testler, proje servis yükünü test kazıklarına uygulayarak yapının davranışı hakkında bilgi verir ve deplasmanların kontrolü sağlanır. Test sayıları ve test metotları projelerin teknik şartnamelerinde tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, 2016 yılında yapımı tamamlanan Mersin Limanı Genişleme Projesi Faz-1 İnşaat Altyapı İş'i'nde rıhtım kazıklarına uygulanan yanal yükleme testlerinin verileri, sonlu elemanlar metodu ile sayısal modellemesi yapılarak bilgisayar modellemesinin kontrolü yapılacaktır. Yanal yüklemeler, ASTM D 3966'ya göre yapılmış olup total station kullanılarak yatay deplasmanlar izlenmiştir. Yüklemeler artırılıp ve azaltılarak “deplasman-zaman”, “yük-deplasman” olarak ölçülüp kaydedilmiştir. Ø1219.2 ve Ø1016 tipi kazıklar maksimum enerjisi 333.54 kNm olan SEMW D-100 (Şekil 3.5) dizel tipi çekici kullanılarak çakılmış ve kazık refü hesabı Kummel metodu kullanılarak yapılmıştır.

Kazıkların yatay yük altındaki davranışları yaygın araştırma konularından birisidir. Mersin Limanı Genişleme Projesi Faz-1 İnşaat Altyapı İş'i'nde sahada 4 adet test bölgesinde, et kalınlığı 22 mm olan 3 adet çapı 48” (Ø 1219.2/22 mm) ve et kalınlığı 20 mm olan 1 adet çapı 40” (Ø1016/20 mm)'lik silindirik çelik kazıklara yanal yükleme yapılmıştır. Bu çalışmada X:4074754.766 ve Y:378526.463 (ITRF 96; 3 derece) koordinat noktasında çakılan (kazık üst kotu +1.00 m ve çakıldığı noktadaki dolgu derinliği -2.00 m) et kalınlığı 20 mm ve kazık çapı 40” (Ø1016 mm) olan 2 no'lu test kazığı incelenmiştir. Saha deneylerinden elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar metodu ile sayısal modellemesi yapılarak karşılaştırılacaktır. Saha deney koşullarını modelledikten

sonra, parametrik çalışılacaktır. Mevcut deney sisteminden sadece et kalınlığı değişmesinin, sadece yük etkime noktası yüksekliğinin (yük kolu) değişmesinin, sadece kazık çapının değişmesinin ve sadece kazık gömülme boyunun değişmesinin deneyde uygulanan maksimum yanal yük altında meydana gelen yatay deplasmanlar üzerindeki etkisi araştırılacaktır.

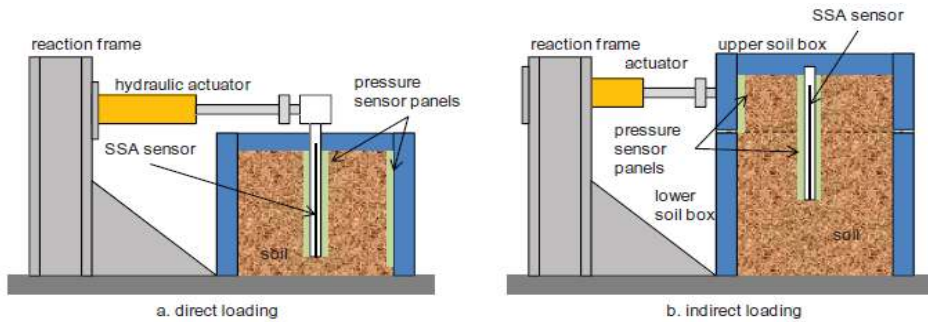


Şekil 1.1. Proje Sahası Genel Görünüş

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde kazıkların yanal yüklere maruz kalmaları durumunda davranışları üzerine yapılan araştırmalar toplanmış ve aşağıda özetlenmiştir.

Helm ve Suleiman (2012), kazıkların zeminle etkileşimi net anlaşılamamasına rağmen birçok yapı temellerinde kazıklar kullanılmaktadır. Ulusal Araştırma Konseyi'nin 2003'teki raporunda Zemin Yapı Etkileşimi (SSI), inşaat mühendislerinin en zorlayıcı konulardan biri olarak tanımlanmıştır. Burada problemin asıl konusu, kazık ile çevrili olduğu zemin arasındaki basıncın ölçülmesi ve bununla beraber yapı elamanının bu etkiye bağlı olarak yaptığı hareketin ölçülmesidir. Bunu araştırmak için Lafayette Üniversitesi'nde 2 farklı yük koşulunu sağlayacak şekilde test düzeneği kurulmuştur. İlk olarak, yanal yük direkt olarak kazığın başına uygulanmış ve bu şekilde etrafında çevrili zemine baskı yapması sağlanmıştır. Bu durum, direkt yükleme olarak adlandırılmıştır. Diğer yanal yükleme koşulu ise kazığın yerleştirildiği sistemi 2 parçadan oluşturup, zemin kutsunun üst parçasına yanal yükleme etkiltilerek, kazık etrafındaki zeminin kazığa yanal yüklemeyi aktarmasıyla dolaylı olarak yükleme yapılmasıdır. Bu durum da endirekt yükleme olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.1. Direkt ve Endirekt Yükleme

Deney düzeneğinde üç adet test yapılmıştır. İlk testte kazık direkt olarak 1.7 kN yükle yüklenmiştir ve bu yük, kazığın baş kısmını 52.7 mm hareket

ettirmiştir. İkinci testte endirekt olarak 17.8 kN yükleme yapılmıştır. Üstteki zemin kutusu 122.6 mm hareket etmiş ve kazık 69.7 mm hareket etmiştir. Üçüncü test tıpkı ikinci test gibi endirekt olarak yüklenmiştir fakat kazıksız yükleme yapılmıştır. 14.5 kN yük altında üstteki zemin kutusu ikinci deney ile aynı deplasmanı yapmıştır. Görüntü kolerasyon sistemi, yüzey deplasmanlarını yapılan üç testte de ölçebilmiştir. Zemin-yapı etkileşiminin etkileri tek bir endirekt yükleme testinden belirlenebileceğini göstermiştir. Kazıklı endirekt testindeki zemin hareketi ile sadece zeminle yapılan endirekt testteki zemin hareketinin, üstteki zemin kutusunun eşit hareket yapması halinde, daha fazla bilgi elde edilebileceği vurgulanmıştır. Elde edilen veriler test sistemindeki diğer sensörlerden elde edilen bilgilerle birleştirildiğinde zemin-yapı etkileşiminin etkileri daha iyi anlaşılabilirdiği belirtilmiştir.

Manoppo (2009), tek kazıkların homojen kumlarda yatay yükler altında nihai taşıma kapasitesi, davranışı ve uygulanabilirliği deneysel olarak tartışılmıştır. Testler, esnek kazıklar kullanılarak  $\beta = 0^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$  ve  $\pm 30^\circ$  açılarda gevşek, orta ve sıkı homojen kumda ve kazıklara kademeli artan yatay yükler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kazıkların yüklemesi yüzeyden 20 mm ve 25.4 mm yukarıda yapılmıştır. Test kazıkların malzemesi çelik, alüminyum, akrilik ve sert kauçuk olarak seçilmiştir. Homojen kumda yatay yükler altında düşey ve eğik kazıklar üzerinde yapılan model testlerin sonuçları, kazık eğiminin ( $\beta$ ) ve zeminin birim ağırlığının ( $\gamma$ ) kazığın taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.  $\beta = -15^\circ$ 'deki negatif eğik kazıklar, yatay yüklere düşey kazıklardan ve pozitif yöndeki kazıklardan daha dayanıklıdır. Ayrıca, teoride düşey kazıklara eğik yük uygulandığından teorik taşıma kapasitesi  $\beta = -30^\circ$  eğimli kazıklarda daha yüksek verilmiştir.  $\beta = -15^\circ$  ile yerleştirilen tek eğik kazık nihai taşıma kapasitesi, düşey kazıkların yatay taşıma kapasitesinin 1.25 katı kadardır. Çalışmada, negatif eğimli kazıkların düşey ve pozitif kazıklara göre daha yüksek taşıma kapasiteli olduğu bulunsa da saha deneylerinin gerekliliği belirtilmiştir.

Rahimi ve Bargi (2010), ABAQUS programı üzerinden üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 21 adet dikey ve 4 adet eğik kazık ile sıkı kumda bulunan rıhtım yapısı simüle edilmiştir. Kazıkların pozisyonunu ve kazıklı rıhtımda eğimin etkisini araştırmak için kazık başına 15,000 kN'luk bir yanal yükleme yapılmıştır. Eğilme momentinin üç boyutlu dağılımına önem verilerek kazık başlarının deplasmanları ve yük dağılımları üzerine çalışılmıştır. 7x3'lük kazık grubuna uygulanan 15,000 kN'luk yanal yükün %33'ünü en öndeki kazık sırası (uygulanan yüke en yakın sıra) taşımaktadır. Kazıklı rıhtımın kazık yerleşimi 6 farklı modelde modellenmiştir ve eğik kazıklar tüm pozisyonlarda 20° ile yerleştirilmiştir. Uygulanan yük altında, minimum deplasman 6 numaralı modellemede ve en yüksek deplasman 2 numaralı modellemede okunmuştur. Uygulanan yük referans alındığında, 1. sıradaki kazıkların başlarındaki maksimum eğilme momenti 2 numaralı modellemede 3114 kN.m değerinde ve en düşük eğilme momenti 6 numaralı modellemede 2628 kN.m değerindedir. Nümerik analiz sonuçları, kazıklı bir rıhtım yapısında kazık eğimindeki değişim ile beraber kazıkların pozisyonundaki değişim, kazık kuvvetlerinin ve kazık momentlerinin dağılımını etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi grup etkisinin kritik yönünü yakalayabildiğinden, artık çeşitli yük grubu konfigürasyonlarını yerinde yük testinden daha düşük maliyetle sistematik olarak incelemek için kullanılabildiği ve tasarımda kullanılabilecek etkileşim faktörleri türetilebileceği belirtilmiştir.

Uncuoğlu (2009), çalışmada rijit kısa kazıkların zemin yüzeyinden belirli bir yükseklikte maruz kaldıkları yanal yük altındaki davranışları üç boyutlu non-lineer sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek nümerik analizler yapılmıştır. Zemin-kazık etkileşimi, zemin elastisite modülü değişimin etkileri parametrik çalışmalar ile nümerik olarak çalışılmıştır. Kazıkların bulunduğu ortam kohezyonsuz homojen zemindir. Tabakalı ve şevli durumlarda geometrileri ve rijitlikleri değişen kazıklar üzerinde çalışılmıştır. Yükleme hızlarının gevşek ve sıkı kum zemin durumunda moment taşıma ve yanal yük taşıma kapasitesini %7-%8

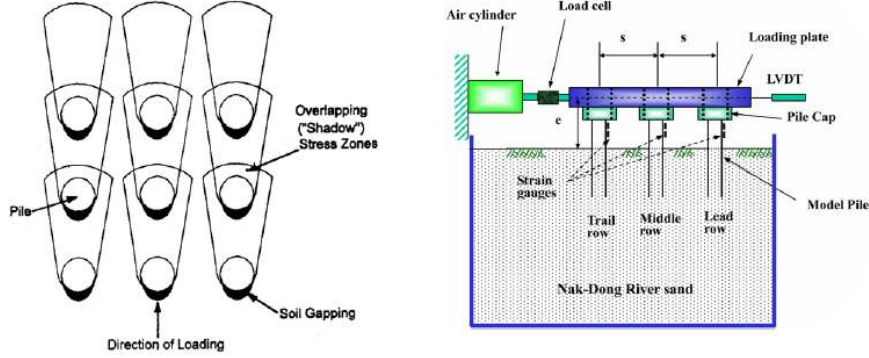
oranında etkilediği ve bu etkinin çok düşük olduğu belirtilmiştir. Kazığın uzunluğunun kazığın çapına oranının, kazığın zemin içindeki uzunluğuna bağlı değişiminin kazığın yanal taşıma kapasitesine etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Gevşek kum zemin ortamında, kazığın en kesit şeklinin yanal yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde etkilediği vurgulanmıştır. Tabakalı olarak kurulan deney modelinde, üstteki gevşek kum tabakanın kalınlığı artırıldığında kazığın yanal yük taşıma kapasitesi homojen gevşek kum durumundaki kapasite değerine yaklaşmaktadır. Kazığın malzemesinin yanal yük taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerden biri olduğu belirtilmiştir. Zeminin sıklığı artırıldığında, dönme noktasının derinliği yüzeye doğru yaklaşmaktadır. Kum zeminde yer alan yanal yüklenmiş rijit kısa kazıkların üç boyutlu nümerik analiz sonuçları, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Kong ve Zhang (2007), kumda bir dizi yanal yüklü kazık testi yapmak amacı ile dört eksenli robotik manipülatörler kullanarak santrifüj modelleme yapılmıştır. Santrifüj ivmelendirilmeden önce dört adet model test kazığı kuma yerleştirilmiştir. Santrifüj 40 G'ye ivmelendirilmiştir ve durdurulmadan ardışık olarak farklı yükleme hızlarında yanal olarak yüklenmiştir. Bu durum da test boyunca zeminin tutarlılığını maksimum seviyeye çıkararak, hazırlık aşamasındaki hataları minimum seviyeye indirmektedir. Yatay kuvvet-deplasman eğrileri, eğilme momenti dağılımları, yanal direnç ve yükleme oranları arasındaki ilişkiler, ölçülen eğilme momenti dağılımlarından türetilen p-y eğrileri test sonucunda sunulmaktadır. Bunlara ek olarak, yükleme hızı ve zemin yüzeyinin etkileri test sonuçlarına göre tartışılmıştır. İncelenen koşullar altında yanal yükleme oranının belirtilen yatay direnç üzerinde çok az etkisi olduğu, ancak eğilme momenti ve zemin reaksiyon dağılımları üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

Suleiman ve ark. (2010), 101.6 mm çapında ve 1.17 m boyunda prekast beton kazık kesitinin merkezine 4 numara donatı ( $\varnothing=12.7\text{mm}$ ) yerleştirilmiş ve yanal yüke maruz bırakılan bu kazığın etrafındaki zemin ile etkileşimi incelenmiştir. Kazık uzunluğu boyunca gerilim ölçerler ve deplasman sensörleri,

yükleme noktasına da deplasman ölçerler ve eğim göstergeleri yerleştirilmiştir. Ayrıca kazık grubunun etrafı basınçölçerler ile donatılmıştır. Kazığın etrafındaki zemin iyi derecelendirilmiş kum olarak sınıflandırılmış ve bu çalışmada yanal yüklenmiş kazıklarda kazık ve zemin etkileşimini ölçmeye odaklanılmıştır. Test kazıklarının 3566 N yanal yükte yaptığı deplasman 144 mm olarak ölçülmüştür. Ölçülen kuvvet-deplasman tepkisinin ekstrapolasyonu, nihai yük 4300 N'u ve 200 mm yatay deplasmanı göstermiştir. Kazığın kuvvet-deplasman tepkisinin başlangıç rijitliği 35.27 N/mm'dir ve ölçülen maksimum gerilimin yeri kazık çapının 4.75 katına denk gelen (4.75D) 482 mm derinlikte görülmüştür. Zemin ve kazık etkileşim basıncı başarıyla ölçülmüştür ve maksimum basınç aralığı 47.2 cm ve 56.6 cm aralığında olduğu belirlenmiştir.

Kim ve Yoon (2011), bu çalışmanın amacı kapsamlı bir laboratuvar modeli ile kazık gruplarının etkileşimini araştırmaktır. Kazıklar arası mesafe 3D ve 8D olacak şekilde 6 farklı kazık grubu oluşturulup gevşek ve orta sıkılıktaki kum ortamına yerleştirilmiştir. Yanal yükleme testinde dış çapı 12 mm, uzunluğu 250 mm ve et kalınlığı 0.25 mm olan kazıklar kullanılmıştır. Kazıklar paslanmaz çelikten olup, kazıklara 8 mm arayla 2 farklı seviyede gerilme ölçer yerleştirilmiştir. Kazık grubunda kazık çapının 6 katından (6D) daha fazla kazık aralığı, gevşek ve orta kum zeminlerde kazık grup etkisini ortadan kaldıracak kadar fazla bir aralık olduğu görülmüştür. Kullanılan "p" çarpanı yaklaşımının, kazık gruplarındaki yanal yüklü düşey kazıkların gölgeleme etkilerini karakterize etmek için kullanılabileceği anlaşılmıştır. 3x1, 3x2, 3x3 kazık gruplarında yük referans alınarak sondaki ortadaki ve baştaki kazıklarda "p" çarpanı, sırasıyla 0.84, 0.58 ve 0.40 olarak tahmin edilmiştir.



Şekil 2.2. Laboratuvar Modeli

Orta ve sıkı kum zeminlerdeki kazık gruplarının “p” çarpan faktörü yük referans alınarak orta ve öndeki sıralarda kazık grubu yerleşimi ve kazıkların aralarındaki mesafeye bağlı olarak değiştiği görülmüştür.  $PSR > 1$  için “p” çarpan faktörü,  $PSR < 1$  için olandan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Plasto ve Arsoy (2014), bu çalışmada,  $k_{hmax}$  yöntemi ve karakteristik yükleme metodu incelenip bu yöntemlerle bulunan yanal yüklü tekil kazıklar ve kazık gruplarının yük eğilme davranışı ile p-y yöntemi ile bulunan veriler karşılaştırılmıştır. Yöntemler tanımlanmış, avantajları ve dezavantajları makalede anlatılmıştır. Kuma yerleştirilen iki adet yanal yüklü kazık yükleme testi ve sert kile gömülü yanal kazık yükleme testi  $k_{hmax}$  yöntemi, karakteristik yükleme metodu ile p-y yöntemi kullanarak yük-deplasman tahmini için çalışma yapılmıştır.  $k_{hmax}$  yöntemi mühendislik kararları için alt ve üst sınır değerleri sağladığından bahsedilmiş ve p-y yöntemi ve karakteristik yükleme metodu üzerindeki avantajı vurgulanmıştır.

Salini ve Girish (2009), bu çalışmada, kuru nehir kumuna sürülmüş yumuşak çelik ve silindirik alüminyum kazıkların davranışı laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Kazık çapı, kazık ağırlığı, kazık uzunluğu, kazığın malzemesi, kum yoğunluğu ve kazık pürüzlülüğünün kazığın yanal yük kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek için yük-deplasman eğrileri çizilmiştir. Kazıkların yanal yük

kapasitesinin uzunluk, kazığın ağırlığı, kazık çapı, kazık pürüzlülüğü ve kumun sıklığı ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Çelik kazıkların yanal yük taşıma kapasitesi alüminyumdan daha fazla olduğu bulunmuştur. Kazık grubunun ve kazığın yanal yük taşıma kapasitesi, kumun sıklığı ile doğru orantılıdır.  $Dr=77$  için kazığın yanal yük kapasitesi  $DR=17$ 'den 10 kat daha fazladır. Kazık grubunun yanal yük kapasitesi, tekil kazıklara göre daha fazla olduğu ve kazığın yanal yük kapasitesi aynı çap için uzunluk artışı ile doğru orantılıdır. Uzunluğun artması ile kazığın yanal yük taşıma kapasitesinin artmasının sebebi, kazık gömüldükçe pasif dirençte artış olur. Kazık yanal yük kapasitesi kazığın rijitliği,  $EI$ , kazık çapına bağlı olan atalet ile doğru orantılı olduğundan çapın artmasıyla doğru orantılıdır. Yumuşak çelik kazık gruplarında, aynı zemin koşullarında ve aynı boyutlardaki alüminyum kazıklara göre yanal yük taşıma kapasitesi daha yüksek olduğu görülmüştür ve daha pürüzlü olan kazık gruplarının pürüzlülüğü arttıkça yüzey sürtünmesi artmasından dolayı yanal yük taşıma kapasitesinin %30 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Terzi ve ark. (2009), bu çalışmada, yağmurlama sistemi ile eşdeğer sıklık ve homojen dolgu ortamı oluşturularak, laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneğinde alüminyum silindirik model kazığın kademeli yanal yükleme altında gösterdiği davranış deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada Şile kumu kullanılmış ve bu kumun üzerinde, üç eksenli basınç deneyi, mikroskobik fotoğraflama çalışmaları ve X-Ray deneyleri yapılmıştır. Yanal yük altındaki kazık davranışını anlamak için deney başlangıcında kalibrasyonu yapılan gerilme ölçerler ve pozisyon ölçerler kullanılmıştır. Kazık davranışının analizi p-y yöntemi ve yatak katsayısı yöntemi ile yapılmıştır. LPILE ve SAP 2000 programları nümerik modellemede kullanılmışlardır. Sayısal analizler ile deney sonuçları kıyaslandığında kazık davranışının belirlenmesinde p-y yönteminin yatak katsayısı yöntemine göre daha güvenilir olduğu görülmüştür. Ayrıca, zemin sıklığı arttıkça kazıkta oluşan deplasmanların azaldığı belirlenmiştir.

Chik ve ark. (2009), bu çalışmada, farklı su tablası seviyelerinde tekil kazıkların sadece yanal yük altında ve kombine yanal ile düşey yükler altında 3 boyutlu sonlu elemanlar analizine dayanan sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır. Kazık malzemesinin modellenmesinde lineer elastik model kullanılırken, Mohr-Coulomb modeli kazığı çevreleyen zemini simüle etmek için kullanılmıştır. Yanal yük durumunda yanal zemin basıncı, uygulanan yükün yoğunluğuna ve su seviyesine bağlı olarak kazık derinliği ve kazığın genişliğine göre değiştiği gözlemlenmiştir. Su tablası seviyesi kazığın yanal yük altındaki tepkisini etkilemiştir. Düşey yük etkisi, kombine yükleme altındaki kazık için kazık genişliği boyunca yanal zemin basıncını etkilediği görülmüştür. Bu basınç değeri, uygulanan düşey yükün yüzeydeki düşey yükün dört katı olduğu ve yüzeyden kazık boyunun beşte biri kadar aşağıda ( $0.2L$ ) meydana geldiği görülmüştür.

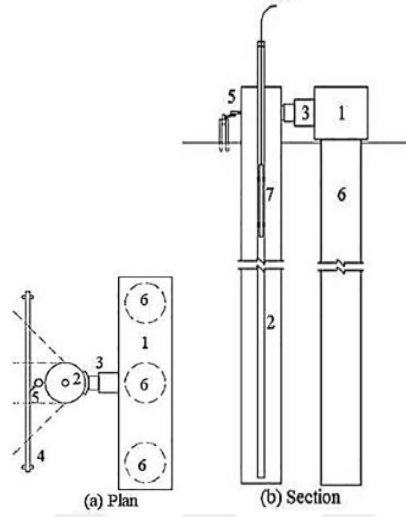
Muthukkumaran ve Krishnan (2012), bu çalışmada, yatay ve şevli zeminlerdeki kazıkların lokasyonları ve zeminin rölatif sıklıkları sırası ile 33 derece 40 dakika %30 sıklıkta, 26 derece 33 dakika %45 sıklıkta, 18 derece 27 dakika %70 sıklıkta olan modelde FLAC 3D programı kullanılarak üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile pasif yük altında analiz yapılmıştır. Zemin tabakası elasto-plastik Mohr-Coulomb olarak, kazık da giriş elemanı modellenmiştir. FLAC 3D programı kullanılarak nümerik olarak analizi yapılan modelden elde edilen sonuçlar eldeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve uyum gözlenmiştir. Yüzey eğimi 0'dan 1V:1,5H artışta sabitleme derinliği %30, %45, %70 sıklıktaki zeminlerde sırasıyla,  $D$  kazık çapı olmak üzere,  $1.5D$ ,  $0.85D$ ,  $0.7D$  artar. Zeminin eğimindeki artışın, kazığın yanal yük kapasitesini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Kazığın önündeki yanal direnç, yatay zemine göre çok daha az olduğundan ve zeminde kavrama etkisine yol açtığından yanal yük kapasitesi belirgin ölçüde azaldığı görülmüştür. Zeminin bağıl yoğunluğu ile kazık yanal yük kapasitesi doğru orantılıdır. Eğim dikkate alınmaksızın rölatif sıklığın maksimum eğilme momenti ile ters orantılı olduğu, yanal yük kapasitesi ile doğru orantılı olduğu çalışmada belirtilmiştir. Kazık uzunluğunun kazık çapına oranındaki ( $L/D$ )

artış, yanal yük kapasitesini ve eğilme momentini önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır. L/D oranı 22'den 30'a çıktığında, rölatif sıklığı %30 olan zeminde ve 1V:1.5H eğimdeki model için eğilme momenti %50 azalmaktadır. Çalışmada, FD analiz sonuçlarına dayanarak eğimin tepesinde bulunan ve pasif yüklemeye maruz kalan tek kazıkların sabitlik derinliğini tahmin etmek için denklem geliştirilmiştir.

Sivaraman ve Muthukkumaran (2020), bu çalışmada, kil zeminde yanal yükle yüklenmiş 600 mm çaptaki ve 16 metre boyundaki fore kazık davranışı incelenmiştir. Saha koşullarına göre temel sistemi tasarlanmış; 12 ay, 18 ay ve 24 aylık sürede sahanın iyileştirme süreci ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Eğimölçer verilerinden kazık eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyon profili oluşturulmuştur. Deneysel verilerden elde edilen sonuçların analitik yöntemle karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Saha geliştirme sürecinden kaynaklanan farklı konsolidasyon dönemlerinde gerçekleştirilen yük testinden elde edilen doğrusal olmayan yanal yük-yer değiştirme eğrileri analiz edilmiştir.

Çizelge 2.1 Deney Düzeneği Kısımları

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1 | Kazık Başlığı          |
| 2 | Test Kazığı            |
| 3 | Hidrolik Kriko         |
| 4 | Referans Destek Çubuğu |
| 5 | Gösterge               |
| 6 | Reaksiyon Kazıkları    |
| 7 | Tel eğim Ölçer Probu   |



Şekil 2.3. Deney Düzeneği Plan ve Kesit

Killi zeminin drenajsız kesme dayanımının 1 metre derinlikte, başlangıç değerine kıyasla %62 arttığı belirtilmiştir. Drenajsız kesme dayanımındaki iyileşme 12 aylık dolgudan sonra azaldığı ve 18 ay ile 24 ay arasında ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Drenajsız kesme dayanımındaki iyileşme derinliğe göre azalmakta olduğu ve 5 metre derinliğin altında etkisinin sıfır olduğu görülmüştür. Bu nedenle, dolgu işleminin neden olduğu aşırı yük basıncının 24 ay sonra zeminin sağlamlaşması ve mukavemetinin artırılması üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Sürşarj yüklemesinden sonraki 6, 12, 18 ve 24 ayların sonunda çalışma sahası dışındaki bir röper noktasına göre zemin oturması sırasıyla 182 mm, 264 mm, 298 mm ve 301 mm olarak ölçülmüştür. Buna göre konsolidasyon derecesi sırasıyla %42, %54, %63 ve %71 olarak değerlendirilmiştir. Böylelikle, kazığın yanal yük kapasitesi 18 aya kadar önemli ölçüde artmış ve sonraki iyileştirmenin önemsiz olduğu, yani %70 konsolidasyon derecesine ulaşana kadar olduğu görülmüştür. 24 aylık saha geliştirmesinden sonra kazık testinin yanal yük kapasitesinin, saha geliştirmenin ilk aşamasında kazık testininkinden 1.73 kat daha fazla olduğu gözlenmiştir. Derinlikle yanal yer değiştirme, ilk aşama sırasında kazıklar üzerindeki yanal yüklerle ilgili olduğu ve

eğimölçer kullanılarak ölçülen 24 aylık zemin iyileştirmenin sayısal analizle karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Yanal yük artışlarına göre kazık eğilme momenti, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonunun profilindeki değişimler ve saha kazık yük testinin zaman periyodu analiz edilmiş ve sonuçların analitik yöntemle karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.2. Kesme Gerilmesine Karşı Boyutsuz Sabitlerin Gösterimi

| Saha iyileştirme Safhaları | Ulaşılan konsolidasyon yüzdesi (%) | a    | b      |
|----------------------------|------------------------------------|------|--------|
| Başlangıç                  | 42                                 | 125  | 113.50 |
| 12 ay sonra                | 54                                 | 1.23 | 102.00 |
| 18 ay sonra                | 63                                 | 1.2  | 93.60  |
| 24 ay sonra                | 71                                 | 1.2  | 910.00 |

$$\frac{k_h}{k_{h\max}} = ae^{-b\gamma} \quad (2.1)$$

Kesme gerilme eğrisine karşı boyutsuz  $k_h/k_{h\max}$ 'a dayalı olarak, çevreleyen zeminin konsolidasyon derecesine bağlı iki sabitli analitik bir denklem önerilmiştir. Mevcut çalışmada önerilen bölgeye özgü bu denklem, kesme gerilmesi ve empoze edilen sürşarj yükü üzerini çevreleyen zeminin konsolidasyon derecesine göre, sabit değerler kümesine dayanan doğrusal olmayan yanal yük yer değiştirme eğrisinin oluşturulması için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Literatür araştırıldığında kazıkların yanal yük altındaki davranışı kurulan deneysel yöntemlerle anlaşılabildiği, kazık eğimli ise kazık eğiminin ve zemin birim ağırlığının yanal taşıma kapasitesinde önemli rol oynadığı, sonlu elemanlar yönteminin kazık grubu etkisinin kritik yönünü yakalayabildiğinden yerinde test yapmak yerine daha düşük maliyetle tasarımda kullanılabilecek etkileşim

faktörlerinin türetilebileceği, zemin-kazık etkileşimi sayısal modelleme ile kurulup deneysel ortamda elde edilen sonuçlarla desteklendiği, kazıkların yanal yük taşıma kapasitelerinin bağlı olduğu değişkenlerden yorumlanabileceği görülmüştür.

Literatürde yanal yüklü kazıkların genellikle kurulan test düzeneğinde incelendikleri görülmüştür. Bu çalışmanın önemi, yanal yüklü kazıkların sahadaki gerçek davranışını analiz edip bu davranışın sayısal modelleme ile doğrulanmasıdır. Kurulan sayısal model aracılığıyla, test kazığının parametreleri farklı değerlerde tekrar analiz edilmiş ve kazık davranışları incelenmiştir. Bu yaklaşımla birlikte kazık parametrelerinin kazığın yanal yük altındaki davranışına olan etkisi daha kapsamlı incelenmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Silindirik Çelik Boru

Yanal yükleme testlerinde Test-1, Test-3 ve Test-4 bölgelerinde et kalınlığı  $t=22$  mm olan  $\varnothing 1219$  mm (48") çapında, Test-2 bölgesinde et kalınlığı  $t=20$  mm olan  $\varnothing 1016$  mm (40") çapında kazık kullanılmıştır. Kazıkların çelik kalitesi EN 10025-2 uyarınca S355J0 veya API 5L, PSL1 uyarınca X52'dir. Kazıkların minimum karakteristik özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Akma Dayanımı  $f_{yk}$  (MPa) : 360
- Çekme Dayanımı  $f_u$  (MPa) : 510
- Özgül Ağırlık ( $kN/m^3$ ) : 78.50

Kazıklar spiral kaynaklı veya dikişsiz veya uzunlamasına kaynaklarla imal edilebilmektedir. Fabrika ekleri çevresel kaynaklarla olmalıdır.



Şekil 3.1. Çelik Kazıklar Kaynak İşleri



Şekil 3.2. Test Kazıkları

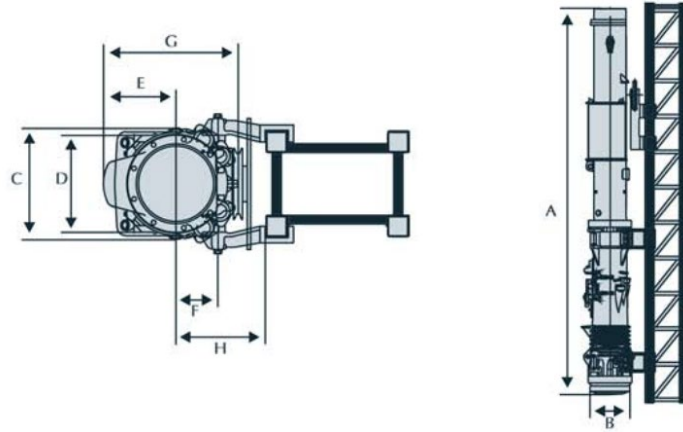


Şekil 3.3. Saha Kazık İşleri



Şekil 3.4. Çelik Silindirik Kazık

### 3.1.2. SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici



Şekil 3.5. SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici

Çizelge 3.1. SEMW D-100 Dizel Kazık Çakım Çekici Boyutları ve Özellikleri

| Bölge                         | Açıklama                                                        | Uzunluk (mm)               |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|
| A                             | Uzatması hariç dizel çekicin boyu                               | 7358                       |
| B                             | Vurul Bloğunun dış çapı                                         | 820                        |
| C                             | Dizel çekicin genişliği                                         | 890                        |
| D                             | Kılavuz çeneleri takılma genişliği                              | 800                        |
| E                             | Pompa muhafazası ile çekiç merkezi arası mesafe                 | 550                        |
| F                             | Kavuz çenesi üzerindeki somunlar ile çekiç merkezi arası mesafe | 350                        |
| G                             | Çekicin derinliği                                               | 1110                       |
| H                             | Kılavuzun yüzeyi ile çekicin merkezi arasındaki mesafe          | 660                        |
| Piston Vuruş Ağırlığı:        |                                                                 | 10,000 kg                  |
| Vuruş Başına Enerji:          |                                                                 | 360-214 kNm                |
| Vuruş Sayısı:                 |                                                                 | 35-45 dakika <sup>-1</sup> |
| Çakılabilecek kazık ağırlığı: |                                                                 | 7-100 ton                  |
| Mazot Tankı / Tüketimi:       |                                                                 | 155 litre / 30 litre/sa    |
| Yağ Tankı / Tüketimi:         |                                                                 | 32 litre / 2.6 litre/sa    |

### 3.1.3. Proje Alanı Zemin Profilleri

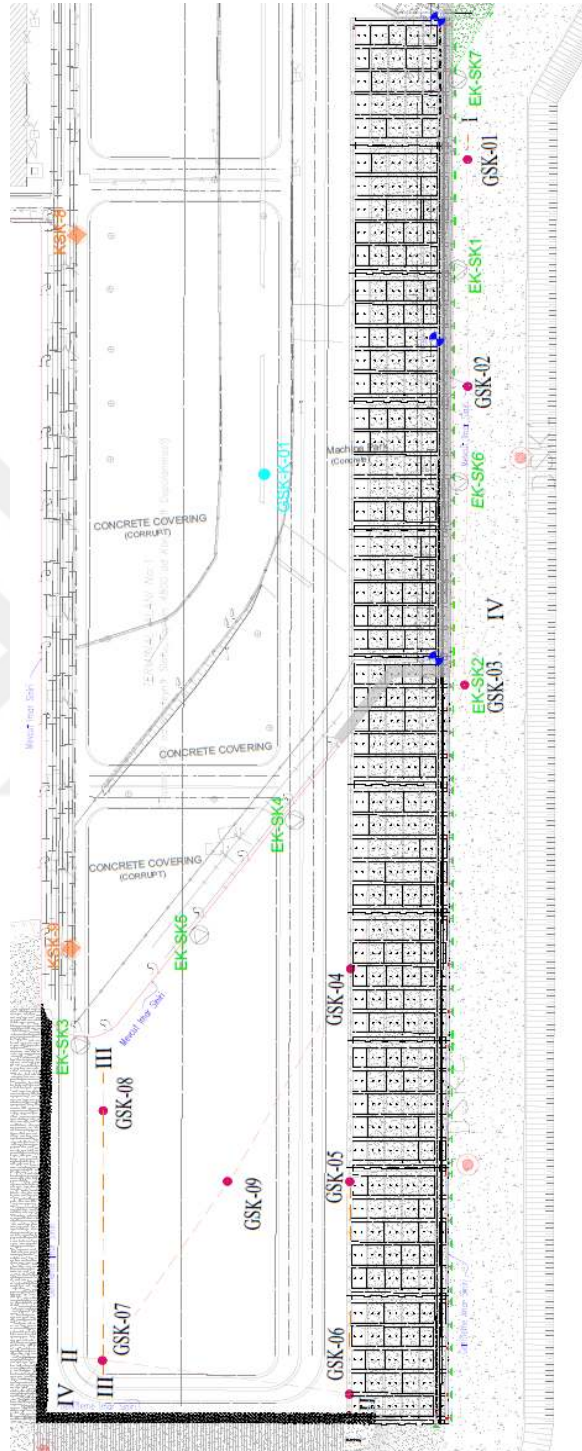
Mersin Limanı Genişleme Projesi Faz-1 İnşaatı kapsamında Kasım-2014'te Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti. tarafından hazırlanan Geoteknik Etüd Raporu baz alınarak zemin profilleri oluşturulmuştur.

Denizde yapılan sondajlarda, deniz suyu derinlikleri 10.00 m ile 10.80 m arasında değişmektedir. Sondajların tamamında deniz tabanından itibaren kalınlığı 0.20 m ile 1.50 m arasında değişen genç deniz çökelleri tabakaları bulunmaktadır. Bu tabakaları gevşek kum ve yumuşak kil/silt tabakaları oluşturmaktadır. Genç deniz çökelleri tabakaları altında kıvamı yukarıdan aşağıya doğru artan katı-çok katı-sert kil/çakıllı kil tabakaları ile orta sıkı-sıkı-çok sıkı kum/çakıl tabakaları

bulunmaktadır. Bu formasyonların üst seviyeleri muhtemelen Pliyosen yaşlı olup, alt seviyelere doğru Oligosen-Miyosen yaşlı olduğu düşünülmektedir.

Çalışma sahası içerisinde jeolojik ve geoteknik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda, inceleme alanı içinde yer alan jeolojik formasyon yayılımını, geoteknik özelliklerini ve mühendislik parametrelerini belirleyebilmek amacı ile denizde 9 ayrı noktada sondaj yapılmıştır. Sondajdan alınan numuneler, makro olarak tanımlanarak logları hazırlanmıştır.

İnceleme sahası içinde, 25.07.2014 – 05.09.2014 tarihleri arasında maksimum derinliği su yüzeyinden itibaren 50.58 m olan 9 adet sondaj yapılmıştır. Deniz sondajları ikiz yüzer duba üzerinden “Shell&auger” ve “marine rotary” tipi sondaj makineleri kullanılarak yapılmıştır. Çalışmalar sırasında Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Sondaj çalışmaları ve zemin tanımlamaları TS 1901 no’lu “İnşaat Mühendisliğinde Numune Alma Yöntemleri” ve BS 5930:1999+A2-2010 no’lu “Code of Practice For Site Investigations, British Standart Institution” standartına uygun olarak yapılmıştır. Sondajlar sırasında, zemin içinde her 1.50 metrede yapılan standart penetrasyon deneylerinde, penetrasyon tüpünden alınan malzeme, temsili zemin numuneleri olarak muhafaza edilmiştir.



### Şekil 3.6. Sondaj Vaziyet Planı

Deniz sondajlarının numaraları, deniz suyu derinlikleri ve sondaj derinlikleri aşağıda sunulmaktadır.

Çizelge 3.2. Sondaj Koordinatları ve Derinlikleri

| Sondaj No | N          | E         | Deniz Seviyesinden İtibaren Sondaj Derinliği (m) | Su Derinliği (m) |
|-----------|------------|-----------|--------------------------------------------------|------------------|
| GSK-01    | 4074992.63 | 378597.43 | 50.38                                            | 10.30            |
| GSK-02    | 4074912.88 | 378591.05 | 50.39                                            | 10.30            |
| GSK-03    | 4074808.11 | 378581.44 | 50.58                                            | 10.80            |
| GSK-04    | 4074711.57 | 378534.20 | 50.41                                            | 10.30            |
| GSK-05    | 4074636.63 | 378527.82 | 50.39                                            | 10.30            |
| GSK-06    | 4074562.13 | 378521.59 | 50.39                                            | 10.70            |
| GSK-07    | 4074580.88 | 378437.43 | 35.39                                            | 10.30            |
| GSK-08    | 4074668.63 | 378445.11 | 35.44                                            | 10.00            |
| GSK-09    | 4074660.32 | 378485.83 | 35.55                                            | 10.20            |

Mevcut deniz yüzeyi 10.00 m ile 10.80 m arasında değişmektedir. Sahanın genelinde deniz tabanı yüzeyi, kalınlığı 0.20 m ve 1.50 m arasında değişen yumuşak koyu gri kil olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.3. Sondaj Detayları

| Sondaj No | Derinlik | Tabaka Derinliği, m | Litoloji          |
|-----------|----------|---------------------|-------------------|
| GSK-01    | 50.38    | 0.00-10.30          | Deniz Suyu        |
|           |          | 10.30-10.50         | Kil               |
|           |          | 10.50-11.90         | Çakıl             |
|           |          | 11.90-24.80         | Kumlu-Çakıllı Kil |
|           |          | 24.80-30.80         | Kumlu Çakıl       |
|           |          | 30.80-33.50         | Kumlu Kil         |
|           |          | 33.50-50.38         | Çakıllı Kum       |
| GSK-02    | 50.39    | 0.00-10.30          | Deniz Suyu        |
|           |          | 10.30-10.50         | Kil               |
|           |          | 10.50-25.55         | Kumlu-Çakıllı Kil |
|           |          | 25.55-36.30         | Kumlu Çakıl       |
|           |          | 36.30-39.30         | Kumlu Kil         |
|           |          | 39.30-46.30         | Killi Kum         |
|           |          | 46.30-50.39         | Kumlu Kil         |
| GSK-03    | 50.58    | 0.00-10.80          | Deniz Suyu        |
|           |          | 10.80-12.30         | Kumlu Kil         |
|           |          | 12.30-13.80         | Çakıllı Kum       |
|           |          | 13.80-17.00         | Kumlu kil         |
|           |          | 17.00-25.80         | Kil               |
|           |          | 25.80-32.40         | Çakıl             |
|           |          | 32.40-35.30         | Kum               |
|           |          | 35.30-41.00         | Kumlu Kil         |
|           |          | 42.00-50.58         | Kumlu Çakıl       |
| GSK-04    | 50.41    | 0.00-10.30          | Deniz Suyu        |
|           |          | 10.30-10.55         | Kil               |
|           |          | 10.55-14.75         | Çakıllı Kum       |
|           |          | 14.75-25.80         | Çakıllı Kil       |
|           |          | 25.80-31.80         | Kumlu Çakıl       |

| Sondaj No | Derinlik | Tabaka Derinliği, m | Litoloji         |
|-----------|----------|---------------------|------------------|
|           |          | 31.80-40.80         | Çakıllı Kil      |
|           |          | 40.80-50.41         | Killi Çakıl      |
| GSK-05    | 50.39    | 0.00-10.30          | Deniz Suyu       |
|           |          | 10.30-10.60         | Kil              |
|           |          | 10.60-15.00         | Çakıllı Kum      |
|           |          | 15.00-26.30         | Çakıllı Kil      |
|           |          | 26.30-27.30         | Çakıl            |
|           |          | 27.30-30.30         | Çakıllı Kil      |
|           |          | 30.30-34.80         | Çakıllı Kum      |
|           |          | 34.80-40.80         | Çakıllı Kil      |
|           |          | 40.80-50.39         | Killi Çakıl      |
|           |          |                     |                  |
| GSK-06    | 50.39    | 0.00-10.70          | Deniz Suyu       |
|           |          | 10.70-11.05         | Kil              |
|           |          | 11.05-16.40         | Çakıllı Kum      |
|           |          | 16.40-22.80         | Siltli Kil       |
|           |          | 22.80-24.30         | Kumlu Çakıl      |
|           |          | 24.30-28.10         | Killi Kum        |
|           |          | 28.10-50.39         | Kumlu Çakıl      |
| GSK-07    | 35.39    | 0.00-10.30          | Deniz Suyu       |
|           |          | 10.30-11.15         | Kil              |
|           |          | 11.15-15.10         | Çakıllı Kum      |
|           |          | 15.10-22.80         | Siltli-Kumlu Kil |
|           |          | 22.80-24.30         | Killi kum        |
|           |          | 24.30-25.80         | Siltli Kil       |
|           |          | 25.80-28.40         | Kumlu Çakıl      |
|           |          | 28.40-31.80         | Siltli Kil       |
|           |          | 31.80-35.39         | Kumlu Kil        |

| Sondaj No | Derinlik | Tabaka Derinliği, m | Litoloji    |
|-----------|----------|---------------------|-------------|
| GSK-08    | 35.44    | 0.00-10.00          | Deniz Suyu  |
|           |          | 10.00-12.30         | Kil         |
|           |          | 12.30-13.80         | Siltli Kum  |
|           |          | 13.80-26.10         | Çakıllı Kil |
|           |          | 26.10-32.00         | Kumlu Çakıl |
|           |          | 32.00-33.40         | Siltli Kum  |
|           |          | 33.40-35.44         | Kumlu Çakıl |
| GSK-09    | 35.55    | 0.00-10.20          | Deniz Suyu  |
|           |          | 10.20-10.50         | Kil         |
|           |          | 10.50-15.10         | Siltli Kum  |
|           |          | 15.10-28.50         | Çakıllı Kil |
|           |          | 28.50-30.50         | Killi Çakıl |
|           |          | 30.50-33.30         | Siltli Kil  |
|           |          | 33.30-34.80         | Siltli Kum  |
|           |          | 34.80-35.55         | Kumlu Çakıl |

Zemin profilinden görüldüğü üzere, genel olarak 10.00 metreden 50.00 metre derinliğe kadar kil ve çakıl zeminler gözlenmiştir. Tüm sondaj noktalarında, ilk önce kil tabakası sonrasında çakıl tabakası bulunmaktadır. Çakıl tabaka, genel olarak deniz su seviyesinden 25.00 metre derinlikte başlamaktadır ve devam etmektedir.

#### 3.1.4. Standart Penetrasyon Deneyi

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Türk Standartları (TS) – 5744'e göre, dış çapı 50.8 mm ve iç çapı 34.9 mm olan yarık bir tüpün 63.5 kg ağırlığındaki bir tokmakla 76 cm yükseklikten zemine çakılmasıyla yapılmıştır. Penetrasyon tüpünün 15'er cm'lik 3 adet girişi için vurulan darbe sayıları sayılır ve kaydedilir. İlk 15 cm için vuruş sayısı ihmal edilir. Son iki 15 cm girişi için vurulan darbe sayısı toplanır ve  $N_{30}$  penetrasyon direnci olarak kaydedilir. SPT değerleri düşey doğrultuda belirgin olarak değişmektedir. Deniz tabanı yüzeyinde 0.20 metreden 2.30 metreye kadar değişen problemlili killi zemin mevcuttur. SPT değerleri her zaman killi zeminler için 30'dan fazla ve çakıl (veya kum) zeminler için 50'den yüksek çıkmıştır. SPT değerleri aşağıda listelenmiştir:

Çizelge 3.4. SPT Değerleri; GSK-01 ve GSK-02

| Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    | Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    |
|-----------|--------------|---------|----------|-----------|--------------|---------|----------|
| GSK-01    | 11.30-11.75  | 32      | Sıkı     | GSK-02    | 11.30-11.75  | 22      | Çok Sert |
|           | 14.30-14.75  | 22      | Çok Sert |           | 12.80-13.25  | 24      | Çok Sert |
|           | 15.80-16.25  | 27      | Çok Sert |           | 15.80-16.25  | 28      | Çok Sert |
|           | 18.80-19.25  | 27      | Çok Sert |           | 17.30-17.75  | 28      | Çok Sert |
|           | 20.30-20.75  | 25      | Çok Sert |           | 18.80-19.25  | 24      | Çok Sert |
|           | 21.80-22.30  | 26      | Çok Sert |           | 21.80-22.30  | 22      | Çok Sert |
|           | 23.30-23.75  | 43 R    | Çok Sert |           | 23.30-23.75  | 27      | Çok Sert |
|           | 24.80-25.25  | 58 R    | Çok Sıkı |           | 24.80-25.25  | 31      | Sert     |
|           | 26.30        | R       | Çok Sıkı |           | 26.30        | 70 R    | Çok Sıkı |
|           | 27.80        | R       | Çok Sıkı |           | 27.80        | 53 R    | Çok Sıkı |
|           | 29.30        | R       | Çok Sıkı |           | 29.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 30.80-31.25  | 51 R    | Sert     |           | 30.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 32.30-32.75  | 60 R    | Sert     |           | 32.50        | R       | Çok Sıkı |
|           | 33.80        | R       | Çok Sıkı |           | 35.50        | R       | Çok Sıkı |
|           | 35.30        | R       | Çok Sıkı |           | 36.80        | R       | Sert     |
|           | 36.80        | R       | Çok Sıkı |           | 38.30        | R       | Sert     |
|           | 36.30        | R       | Çok Sıkı |           | 39.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 39.80        | R       | Çok Sıkı |           | 41.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 41.30        | R       | Çok Sıkı |           | 42.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 42.80        | R       | Çok Sıkı |           | 44.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 44.30        | R       | Çok Sıkı |           | 45.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 45.80        | R       | Çok Sıkı |           | 47.30        | R       | Sert     |
|           | 47.30        | R       | Çok Sıkı |           | 48.80        | R       | Sert     |
|           | 48.80        | R       | Çok Sıkı |           | 50.30        | R       | Sert     |
|           | 50.30        | R       | Çok Sıkı |           |              |         |          |

Çizelge 3.5. SPT Değerleri; GSK-03 ve GSK-04

| Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    | Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    |
|-----------|--------------|---------|----------|-----------|--------------|---------|----------|
| GSK-03    | 11.30-11.75  | 4       | Çok Soft | GSK-04    | 11.30-11.78  | 38      | Sıkı     |
|           | 12.80-13.25  | 36      | Sıkı     |           | 12.80-13.25  | 48      | Sıkı     |
|           | 14.30-14.75  | 32 R    | Sert     |           | 14.30-14.75  | 35      | Sıkı     |
|           | 17.30-17.75  | 32 R    | Sert     |           | 15.80-16.25  | 32 R    | Sert     |
|           | 18.80-19.25  | 36 R    | Sert     |           | 17.30-17.75  | 37 R    | Sert     |
|           | 20.30-20.75  | 48 R    | Sert     |           | 18.80-19.25  | 42 R    | Sert     |
|           | 21.80-22.30  | 44 R    | Sert     |           | 21.80-22.30  | 39 R    | Sert     |
|           | 23.20-23.75  | 43 R    | Sert     |           | 23.30-23.75  | 33 R    | Sert     |
|           | 24.80-25.25  | 44 R    | Sert     |           | 24.80-25.25  | 43 R    | Sert     |
|           | 26.30-26.75  | 79 R    | Çok Sıkı |           | 26.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 27.80        | R       | Çok Sıkı |           | 27.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 29.30        | R       | Çok Sıkı |           | 29.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 32.30-32.75  | 72 R    | Çok Sıkı |           | 32.30-32.75  | 60 R    | Sert     |
|           | 35.30-35.75  | 35 R    | Sert     |           | 33.80-34.25  | 71      | Sert     |
|           | 36.80-37.25  | 67 R    | Sert     |           | 35.30-35.75  | 62 R    | Sert     |
|           | 38.30-38.75  | 47 R    | Sert     |           | 36.80-37.25  | 67 R    | Sert     |
|           | 39.80-40.25  | 51 R    | Sert     |           | 38.30        | R       | Sert     |
|           | 41.30        | R       | Çok Sıkı |           | 39.80        | R       | Sert     |
|           | 42.80        | R       | Çok Sıkı |           | 41.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 44.30        | R       | Çok Sıkı |           | 42.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 45.80        | R       | Çok Sıkı |           | 44.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 47.30        | R       | Çok Sıkı |           | 45.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 48.80        | R       | Çok Sıkı |           | 47.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 50.30        | R       | Çok Sıkı |           | 48.80        | R       | Çok Sıkı |
|           |              |         |          |           | 50.30        | R       | Çok Sıkı |

Çizelge 3.6. SPT Değerleri; GSK-05 ve GSK-06

| Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    | Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum     |
|-----------|--------------|---------|----------|-----------|--------------|---------|-----------|
| GSK-05    | 11.30-11.75  | 34      | Sıkı     | GSK-06    | 11.30-11.75  | 35      | Sıkı      |
|           | 12.80-13.25  | 45      | Sıkı     |           | 12.80-13.25  | 43      | Sıkı      |
|           | 14.30-14.75  | 46      | Sıkı     |           | 14.30-14.75  | 47      | Sıkı      |
|           | 15.80-16.25  | 28      | Çok Sert |           | 15.80-16.25  | 53 R    | Çok Sıkı  |
|           | 18.80-19.25  | 37 R    | Sert     |           | 17.30-17.75  | 36 R    | Sert      |
|           | 20.30-20.75  | 31 R    | Sert     |           | 20.30-20.75  | 28      | Çok Sert  |
|           | 21.80-22.30  | 35 R    | Sert     |           | 21.80-22.30  | 33 R    | Sert      |
|           | 23.30-23.75  | 22      | Çok Sert |           | 23.30-23.75  | 34      | Sıkı      |
|           | 24.80-25.25  | 28      | Çok Sert |           | 24.80-25.25  | 36      | Sıkı      |
|           | 26.30-26.75  | 40      | Sıkı     |           | 26.30-26.75  | 23      | Orta Sıkı |
|           | 27.80-28.25  | 44 R    | Sert     |           | 27.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 29.30-29.75  | 49 R    | Sert     |           | 29.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 30.80        | R       | Çok Sıkı |           | 30.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 32.30        | R       | Çok Sıkı |           | 32.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 33.80        | R       | Çok Sıkı |           | 33.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 35.30        | R       | Sert     |           | 35.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 36.80        | R       | Sert     |           | 36.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 38.30        | 73 R    | Sert     |           | 38.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 39.80        | R       | Sert     |           | 39.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 41.30        | R       | Çok Sıkı |           | 41.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 42.80        | R       | Çok Sıkı |           | 42.80        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 44.30        | R       | Çok Sıkı |           | 44.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 45.80        | R       | Çok Sıkı |           | 50.30        | R       | Çok Sıkı  |
|           | 47.30        | R       | Çok Sıkı |           |              |         |           |
|           | 48.80        | R       | Çok Sıkı |           |              |         |           |
|           | 50.30        | R       | Çok Sıkı |           |              |         |           |

Çizelge 3.7. SPT Değerleri; GSK-07 ve GSK-08

| Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum     | Sondaj No | Derinlik (m) | SPT (N) | Yorum    |
|-----------|--------------|---------|-----------|-----------|--------------|---------|----------|
| GSK-07    | 11.30-11.75  | 23      | Orta Sıkı | GSK-08    | 11.30-11.75  | 27      | Çok Sert |
|           | 12.80-13.25  | 32      | Sıkı      |           | 12.80-13.25  | 48      | Sıkı     |
|           | 14.30-14.75  | 37      | Sıkı      |           | 14.30-14.75  | 34 R    | Sert     |
|           | 15.80-16.25  | 22      | Çok Sert  |           | 17.30-17.75  | 30      | Çok Sert |
|           | 17.30-17.75  | 31 R    | Sert      |           | 18.80-19.25  | 26      | Çok Sert |
|           | 20.30-20.75  | 28      | Çok Sert  |           | 20.30-20.75  | 28      | Çok Sert |
|           | 21.80-22.30  | 32 R    | Sert      |           | 21.80-22.30  | 37 R    | Sert     |
|           | 23.30-23.75  | 30      | Orta Sıkı |           | 23.30-23.75  | 34 R    | Sert     |
|           | 24.80-25.25  | 24      | Çok Sert  |           | 24.80-25.25  | 22      | Çok Sert |
|           | 26.30-26.75  | 53 R    | Çok Sıkı  |           | 26.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 27.80-28.25  | 62 R    | Çok Sıkı  |           | 27.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 29.30-29.75  | 49 R    | Sert      |           | 29.30        | R       | Çok Sıkı |
|           | 30.80-31.20  | 57 R    | Sert      |           | 30.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 32.30        | R       | Çok Sıkı  |           | 32.30-32.75  | 56 R    | Çok Sıkı |
|           | 33.80        | R       | Çok Sıkı  |           | 33.80        | R       | Çok Sıkı |
|           | 35.30        | R       | Çok Sıkı  |           | 35.30        | R       | Çok Sıkı |

Çizelge 3.8. SPT değerleri; GSK-09

| Sondaj No | Derinlik(m) | SPT (N) | Yorum     |
|-----------|-------------|---------|-----------|
| GSK-09    | 11.30-11.75 | 29      | Orta Sıkı |
|           | 12.80-13.25 | 48      | Sıkı      |
|           | 14.30-14.75 | 34      | Sıkı      |
|           | 17.30-17.75 | 30      | Çok Sert  |
|           | 18.80-19.25 | 35 R    | Sert      |
|           | 20.30-20.75 | 28      | Çok Sert  |
|           | 21.80-22.30 | 29      | Çok Sert  |
|           | 23.30-23.75 | 30      | Çok Sert  |
|           | 24.80-25.25 | 36 R    | Sert      |
|           | 26.30       | 38 R    | Sert      |
|           | 27.80       | 44 R    | Sert      |
|           | 29.30-29.75 | 45      | Sıkı      |
|           | 30.80-31.25 | 50      | Sıkı      |
|           | 32.30-32.75 | 52 R    | Çok Sıkı  |
|           | 33.80-34.25 | 55 R    | Çok Sıkı  |
|           | 36.30       | R       | Çok Sıkı  |

Zemin profilinden ve SPT değerlerinden de görüldüğü üzere, deniz suyu yüzeyinden 25 metre derinlikteki çakıl ve kil tabakaları temel zemini için yeterince iyi durumdadır. Bu sebeple, bu tabakalarda taşıma gücü yüksek ve oturma karakteristiği oldukça düşüktür.

Kazık çakım verilerine göre deniz suyu seviyesinden 11.85 metre derinliğinden sonra penetrasyona karşı zemin direnci yüksek değildir fakat 25 – 26 metreden itibaren zemin gittikçe sıklaşmaktadır. (Geoteknik Etüd Raporu, Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti., 2014)

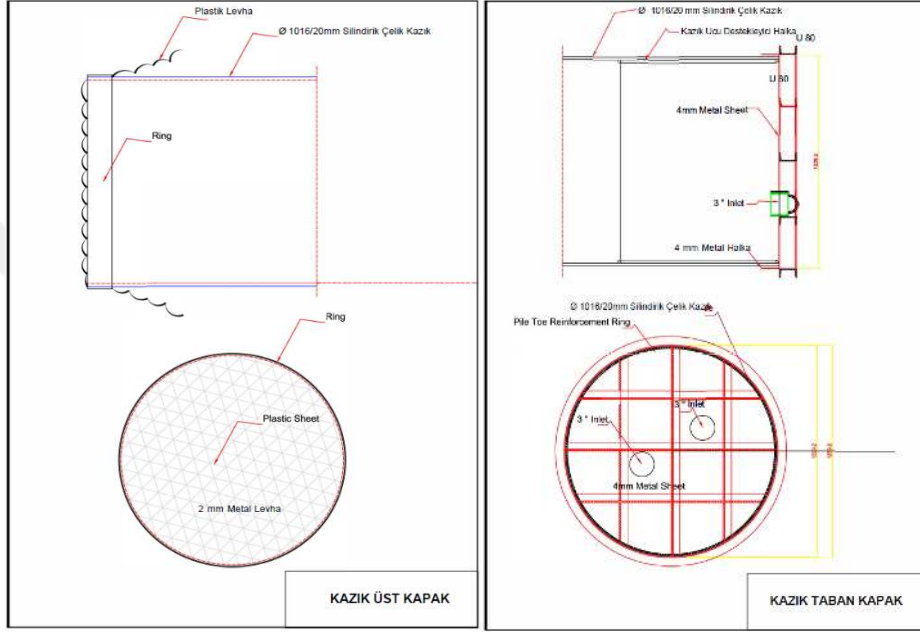
### 3.2. Metot

#### 3.2.1. Kazık Çakımı

Proje Kapsamında Hazırlanan Kazık Çakımını Tanımlar Metot Sunum Dosyası'nda (2015) anlatıldığı gibi test kazıkları, SEMW D-100 dizel tipi çekiçler ile 333.540 kNm enerji kapasitesi ile projedeki diğer tüm kazıklar gibi belirtilen koordinatlarda çakılmıştır. Kazık çakma işlemi başlamadan önce hazırlıklar yapılır, yaklaşık 46 metre uzunluğundaki kazıklar serbest bırakma rampasından düşürülür. 47.5 ton kapasiteli kazık kaldırma eki, silindirik kazığın üst tarafından 120 cm aşağıda olacak şekilde kaynak yapılır. Kazığın çıplak alt tarafına, merkezinde conta ve su giriş vanası bulunan çelik kapak eklenir. Contalı çelik kapağın emniyete alınması ve sabitlenmesi için 2 adet ek parça, su derinliğine bağlı olarak aşağıdan 12-20 metre mesafede kaynatılır ve kapak gergiler ile gerdirilir. Bu sırada mumlu kanvas borunun diğer ucuna yerleştirilmiş ve üzerine 3 mm kalınlığında çelik kapak yerleştirilir. Bu şekilde çakma işlemi için hazır olan silindirik çelik kazık, rampa ile denize bırakılır. Denize bırakılan kazık, römorkör veya servis teknesi yardımı ile çekilerek kazık çakma bölgesinde bulunan kazık çakma dubalarına bağlanır. Kazık çakma duba kulesindeki kazık kaldırma halatı, borunun kazık kaldırma ekine sabitlenir. Servis teknesindeki mürettebat, contalı çelik kapak valfini açarak kazığın alt ucunda suyun girmesini sağlar. Kazık, diğer ucu kuleye sabitlenmiş bir şekilde su alımı miktarıyla orantılı olarak dikey konuma getirilir. Yaklaşık 20-22 metre su alma işleminden sonra, kapağın bir kısmı vince sabitlenip diğer ek kesilir. Kapak vince bağlı taraftan yukarı alınır ve kazık kuleye şerit halinde sabitlenir. Kulede yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra, duba uygulama koordinatlarına vinç vasıtasıyla getirilir. Bu koordinatlar, ölçüm cihazları tarafından doğrulanır. Uç taşıma kazıklarında kazık çakımı, kazık zemine artık girmeyinceye kadar yani refü seviyesine kadar çakılmaya devam edilir. Yeterli çakılma miktarı, belirli bir derinliği kaç vuruşta geçtiği dikkate alınarak sürekli takip edilir. Kazık yük taşıması Kazık Dinamik Analizi (PDA) ile takip edilir ve

istenilen yük taşımasını sağladığı kontrol edilir. Bu süreçte kazık çakma makinası tam güç çalıştırılır.

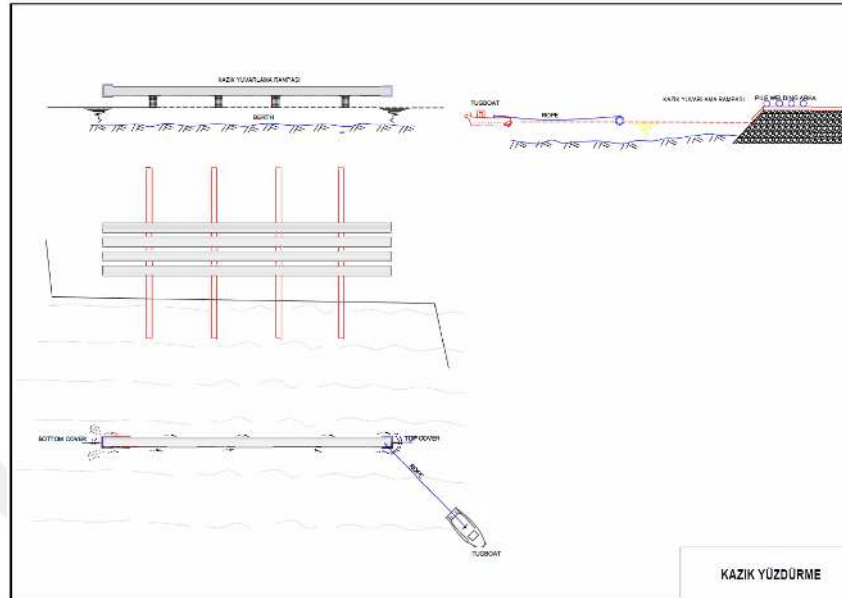
Kazık çakımı, şematik olarak sırası ile aşağıda gösterilmiştir.



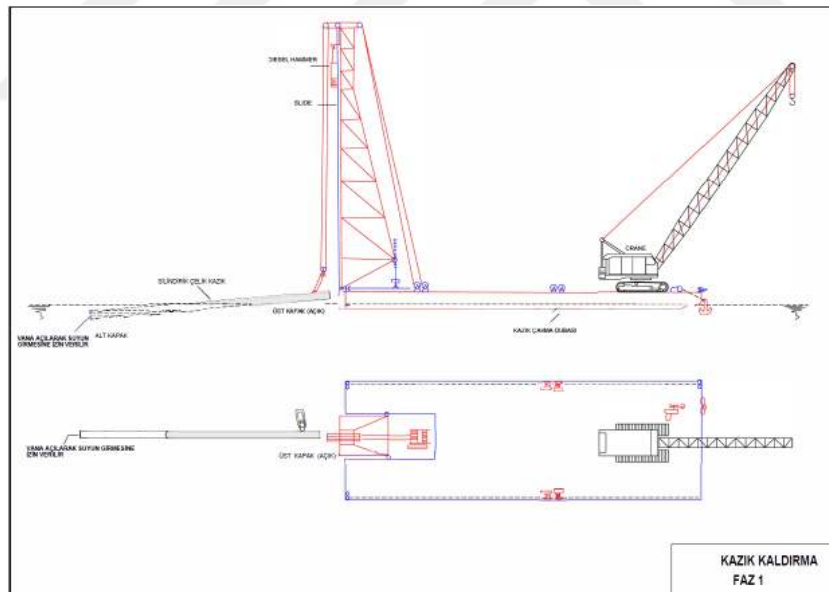
Şekil 3.7. Kazığın Çakımdan Önce Yüzdürülmesi İçin Uçlarının Kapatılması



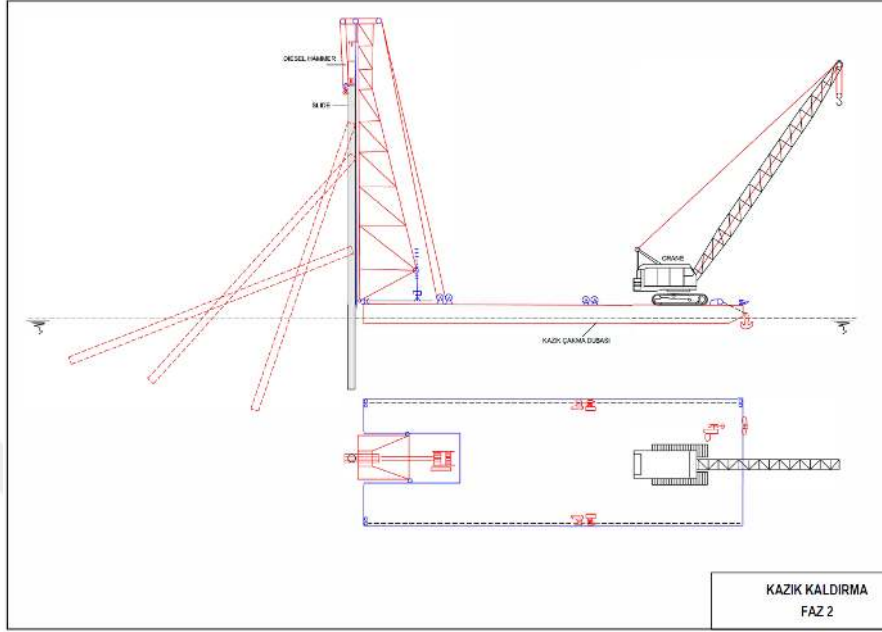
Şekil 3.8. Kazık Kaynak Sahası ve Yuvarlama Rampası



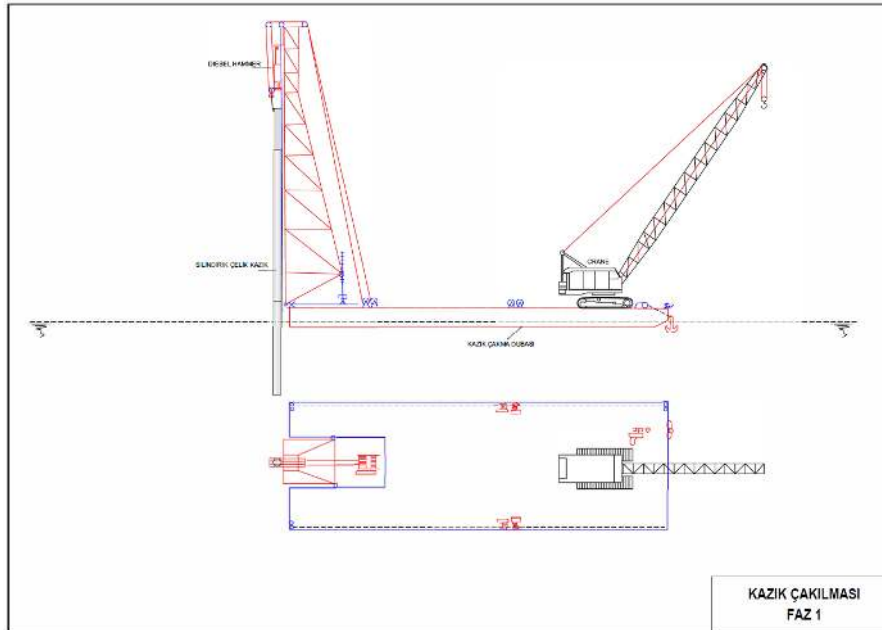
### Şekil 3.9. Kazığın Yüzdürülmesi



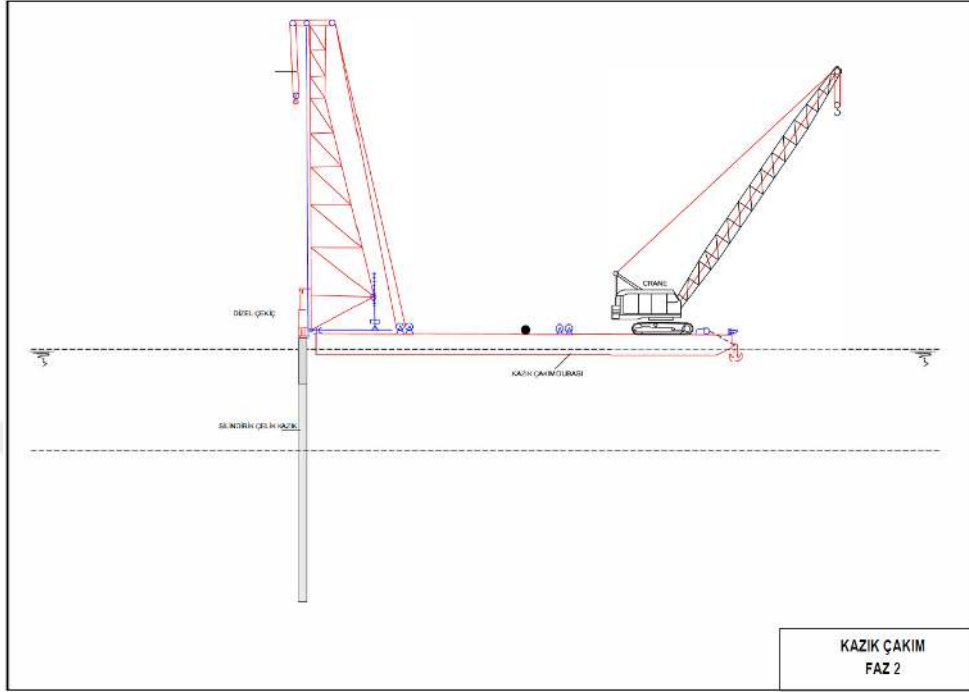
Şekil 3.10. Kazıgın Kaldırılması Faz-1



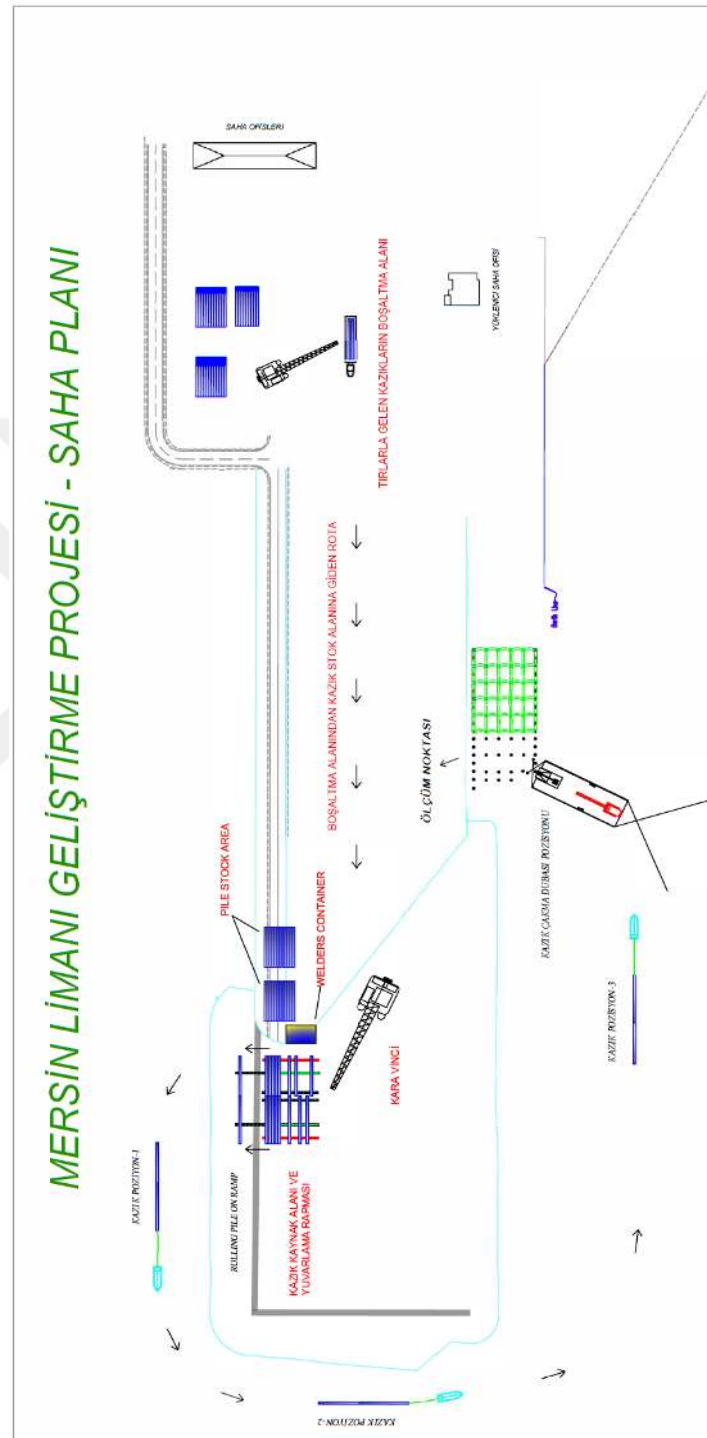
Şekil 3.11. Kazığın Kaldırılması Faz-2



Şekil 3.12. Kazık Çakılması Faz-1



Şekil 3.13. Kazık Çakılması Faz-2



### Şekil 3.14. Mersin Limanı Proje Sahası

### 3.2.2. Yanal Yükleme Testi Yapılması

Proje Kapsamında Hazırlanan Yanal Yükleme Test Sistemini Tanımlar Metot Sunum Dosyası'nda (2015) belirtildiği gibi yanal yükleme testi D 3966 standartı çerçevesinde yapılmıştır. Yüklemeyi artırıp azaltarak, yatay deplasmanlar kaydedilerek “deplasman-zaman” ve “yük-deplasman” grafikleri çizilmiştir.

Daha önce yapılan batimetri çalışmalarına ve geoteknik araştırmalara istinaden varsayılan hesap yöntemlerini doğruluğunu belirlemek amacı ile her bir test bölgesinde, iki adet kazığa yanal yük uygulanmıştır.



Şekil 3.15. Yanal Yükleme Deney Düzeneği

Hidrolik krikonun yerleştirildiği, şartnameye uygun olarak yükü uygulamak amacı ile iki kazık arasına bir platform oluşturulmuştur. Test kazıkları proje yüksekliğine yakın kotta kesilmiştir. Çakılan kazıkların kazık başlarında herhangi bir sıkışma ve kazıklarda plastik deformasyon olup olmadığı kontrol

edilmiştir. Kazıkların arasına yatay doğrultuda sabitlenmiş çerçeve kirişi ile beraber yatay yükü sağlamak için yerleştirilmiş hidrolik kriko, otomatik olmayan bir pompa ile beslenmektedir ve kriko pompası hidrolik hortumlara bağlıdır. Uygulanan yatay kuvvetlerin büyüklükleri, piston yüzeyi üzerinde etki eden basıncın manometre aracılığıyla ölçülmesi ve ölçülen değerin piston alanıyla çarpılması ile hesaplanmıştır. 0-600 kg/cm<sup>2</sup> manometrenin kalibrasyonu daha önce yapılmış olmalıdır. Kağıt reflektörleri, deplasmanları ölçmek için referans olarak kullanılmıştır ve tüm ölçümler mevcut rıhtım üzerinden topografik aletler marifeti ile ölçülmüştür.



Şekil 3.16. Topografik Ölçüm



Şekil 3.17. Yükleme Pistonu



Şekil 3.18. Kazık Yükleme Testi Kurulumu

Yük değerleri, gemi bağlama analizi raporuna göre belirlenmiştir ve yük yüzdeleri ASTM D 3966 madde 8.1.4.(C)'ye göre alınmış ve ilgili madde 8.2.2.'ye göre kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.19. Basınç Ölçer Barometre



Şekil 3.20. Yanal Yükleme Deney Düzenneği Görünüm (2)

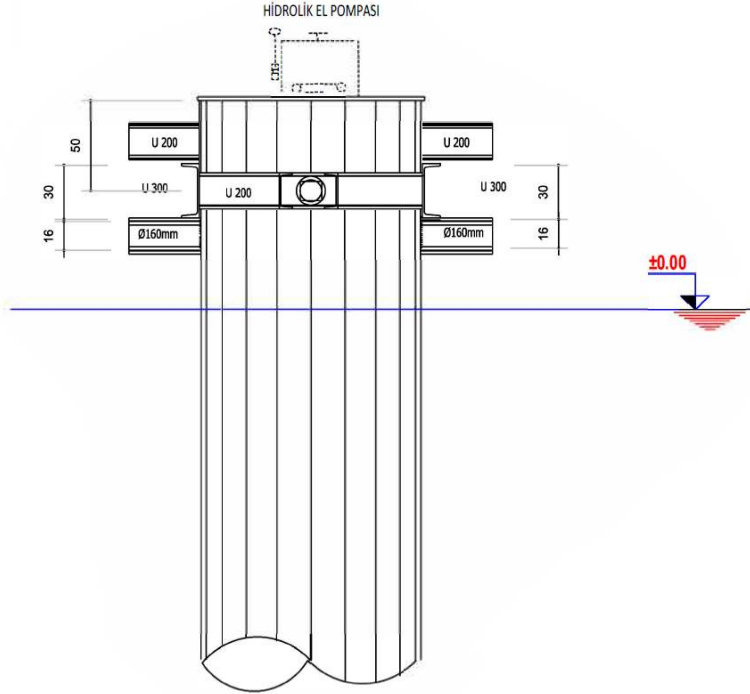


Şekil 3.21. Yanal Yükleme Deney Düzenegi Görünüm (3)

Çizelge 3.9. ASTM D 3966-8.1.4.(C) Tablosu (2007)

| 8.1.4 Procedure C: Cyclic Loading (optional)—Apply and remove the test load in accordance with the following table: |                   |                        |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Cyclic Loading Schedules                                                                                            |                   |                        |                   |
| Standard Loading                                                                                                    |                   |                        |                   |
| Percent of Design Load                                                                                              | Load Duration min | Percent of Design Load | Load Duration min |
| 0                                                                                                                   | —                 | 75                     | 10                |
| 25                                                                                                                  | 10                | 0                      | 10                |
| 50                                                                                                                  | 10                | 50                     | 10                |
| 25                                                                                                                  | 10                | 100                    | 10                |
| 0                                                                                                                   | 10                | 150                    | 10                |
| 50                                                                                                                  | 10                | 170                    | 20                |
| 75                                                                                                                  | 15                | 180                    | 20                |
| 100                                                                                                                 | 20                | 190                    | 20                |
| 50                                                                                                                  | 10                | 200                    | 60                |
| 0                                                                                                                   | 10                | 150                    | 10                |
| 50                                                                                                                  | 10                | 100                    | 10                |
| 100                                                                                                                 | 10                | 50                     | 10                |
| 125                                                                                                                 | 20                | 0                      | —                 |
| 150                                                                                                                 | 20                | —                      | —                 |
| Cyclic Loading Schedules                                                                                            |                   |                        |                   |
| Excess Loading <sup>a</sup>                                                                                         |                   |                        |                   |





Şekil 3.24. Deney Düzeneği Yan Görünüş

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, bir sınır değer problemin çözümünün yaklaşık olarak yapılabilmesi için uygulanan sayısal bir yöntemdir. Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde en etkin biçimde kullanılan sayısal analizlerden biri olan sonlu elemanlar yönteminde, sürekli olan bir ortamı geometrik alt birimlere ayrılarak karmaşık problemlerin çözülmesi sağlanır. İnşaat mühendisliğinin geoteknik, yapı ve hidrolik gibi anabilim dallarında sıkça kullanılan sonlu elemanlar yöntemi birçok mühendislik alanında araştırma veya tasarım amaçlı kullanılmaktadır. Arazide yapılan yanal yükleme deneylerini modellemek ve arazi şartlarının sağlandığı modelden farklı parametrelerde çalışabilmek amacı ile PLAXIS paket program kullanılmıştır.

##### 4.1.1. PLAXIS Paket Programı

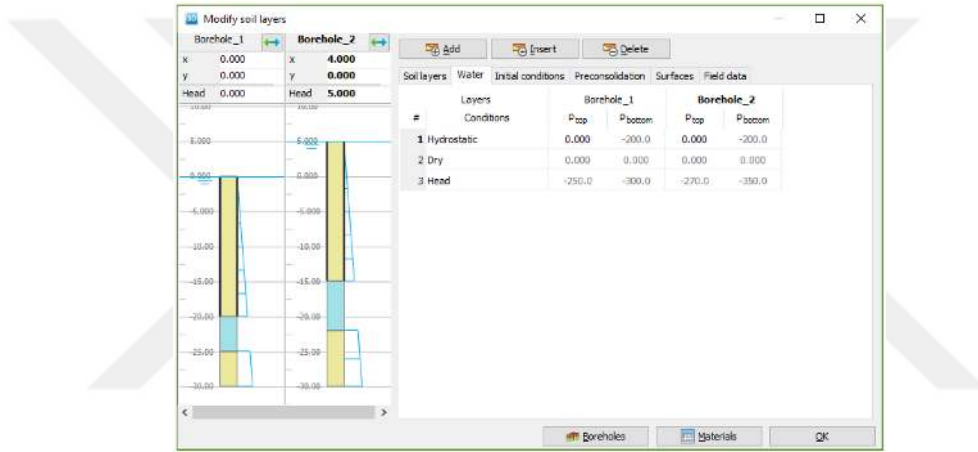
PLAXIS, çeşitli geoteknik uygulamaları için deformasyon, stabilite ve akma analizi yapmak için kullanılan sonlu elemanlar programıdır. Bu program, kullanıcının hızlı bir şekilde geometri modeli ve sonlu eleman ağı oluşturmasını sağlar. İlk versiyonu 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir.

Bu çalışmada PLAXIS 3D'nin Ultimate Edition V21 Update 1 versiyonu kullanılarak analizler yapılmıştır. PLAXIS paket programı karmaşık geoteknik uygulamalarını analiz etmesini sağlayan önemli özelliklere sahiptir. Bu özellikler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

##### 4.1.1.1. Zemin Modelleme, Yeraltı Su Seviyesi ve Zemin Modu

Zemin davranışlarının modellenebilmesi için doğru parametrelerin girilmesi ve uygun zemin modelinin tanımlanması gerekmektedir. PLAXIS

malzeme veri tabanında bulunan veriler de hücrelere atanmak üzere kullanılabilir. Programın “*Borehole*” yani “sondaj” özelliği kullanılarak zemin katmanları tanımlanabilir. Eğer çoklu olarak sondaj kuyusu tanımlandıysa PLAXIS bunları otomatik olarak aralarında enterpole edip sondaj bilgilerine dayanarak zemin katmanlarının pozisyonunu türetir. Yeraltı suyu zemin davranışında önemli bir role sahiptir. PLAXIS, efektif gerilme prensiplerine dayandığından, yeraltı su tablasının seviyesinin düzgün bir şekilde programa girilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.1. Sondaj Kuyusu ve Yeraltı Su Seviyesi Gösterimi

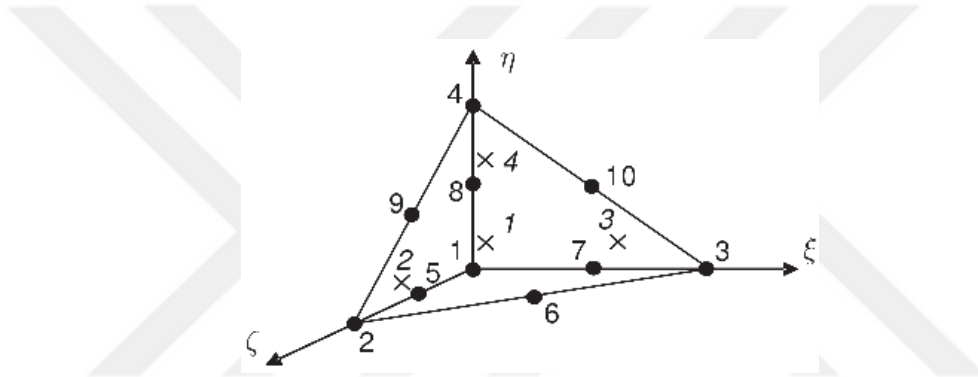
PLAXIS’te zeminin davranışı, altı farklı zemin modeli kullanarak modellenebilir. Bu zemin modelleri aşağıda listelenmiştir;

- Lineer Elastik Zemin Modeli
- Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli
- Hardening-Soil (HS) Zemin Modeli
- Soft Soil (SS) Zemin Modeli
- Soft Soil (SSC) Creep Zemin Modeli
- Jointed-Rock (JR) Zemin Modeli

Modeller hakkında detaylı bilgiler literatürde mevcuttur.

#### 4.1.1.2. Yapı Modu ve Ağ Modu

Yapı modu, temel ve temele etki eden yüklerin modellenmesinin gerçekleştirildiği kısımdır. Yapı modundan sonra “*Mesh*” sekmesi ile Ağ moduna geçiş yapılır. Geometri modelinin tamamlanmasının ardından sonlu elemanlar hesaplamalarını yapabilmek için sonlu elemanlar ağı oluşturulur. PLAXIS, araç çubuğundaki “*Generate Mesh*” butonu vasıtasıyla, geometriyi otomatik ağılar oluşturarak elemanlara böler. 3 boyutlu sonlu elemanlar ağının temel zemin elemanları 10 düğümlü ve dört yüzlü elemanlardır.



Şekil 4.2. 3D Zemin Elemanları – 10 düğümlü

Buna ilaveten; kirişler (“*beams*”) için zemin elemanlarının 3 düğümlü kenarları ile uyumlu olan 3 düğümlü çizgi elemanları, plaka (“*plate*”) ve geogrid davranışını simüle etmek için 6 düğümlü plaka ve geogrid elemanları kullanılır. Ayrıca, zemin yapı etkileşim davranışını simüle etmek için de 12 düğümlü ara yüz elemanı kullanılır.

Ağ ayarları penceresinden genel ağ ayarları yapılabilir ve eleman dağılımı derecesi belirlenebilir.

#### 4.1.1.3. Kademeli İnşaat Modu

PLAXIS’te her inşaat kademesi ayrı ayrı tanımlanabilir. Ayrı tanımlanan inşaat kademelerinde model geometrisini değiştirmek, su seviyelerini değiştirmek,

ankrajlara öngerme uygulamak, zemin veya yapı elemanı için malzeme özelliklerini değiştirmek, yük dağılımını değiştirmek ve yeni yapı elemanları ekleyip çıkarmak mümkündür. Bu mod, kullanıcıya gerçek hayatta arazide uygulanacak inşaat yöntemini gerçeğe yakın bir şekilde simüle etme şansı vermektedir. (PLAXIS 3D Manual)

#### 4.1.1.4. Plaxis Sonuç Çıktıları

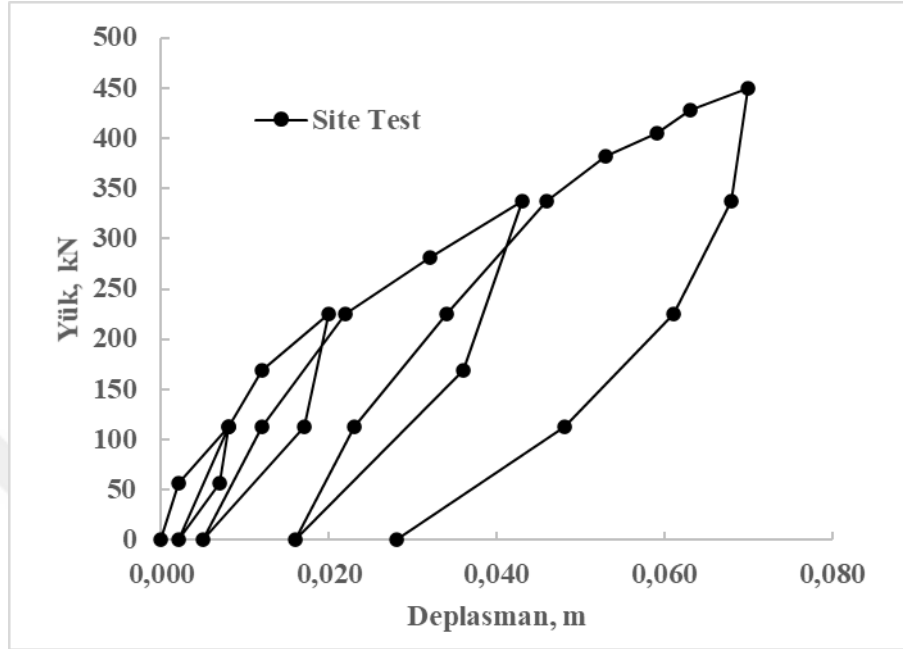
PLAXIS hesaplama adımından sonra sonuçları hem grafik olarak hem de tablo halinde kullanıcıya detaylı olarak raporlanmaktadır. PLAXIS hesap sonuçlarında hesap safhasındaki ve toplam deplasmanları, mutlak yatay ve düşey deplasmanları deplasman yönünü ve rölatif büyüklüğü gösterir oklar ile göstermektedir. Birim deformasyon ve efektif ve toplam gerilmeleri, boşluk suyu basıncını, asal gerilmeler, kontur çizgileri cinsinden gösterimi yapılmaktadır. Su akış analizi sonuçları, dinamik analiz sonuçları, yapısal kuvvetler gösterilebilmekte, enkesitler çizilebilmekte ve animasyon oluşturulabilmektedir. Hesap tamamlandıktan sonra modellenen yapı elemanı seçildiğinde, seçilen elman için yeni bir pencere açılmakta ve detaylı sonuç görüntülenmesi yapılabilmektedir. (PLAXIS 3D Reference Manual)

#### 4.2. Arazi Deneyi Sonuçları

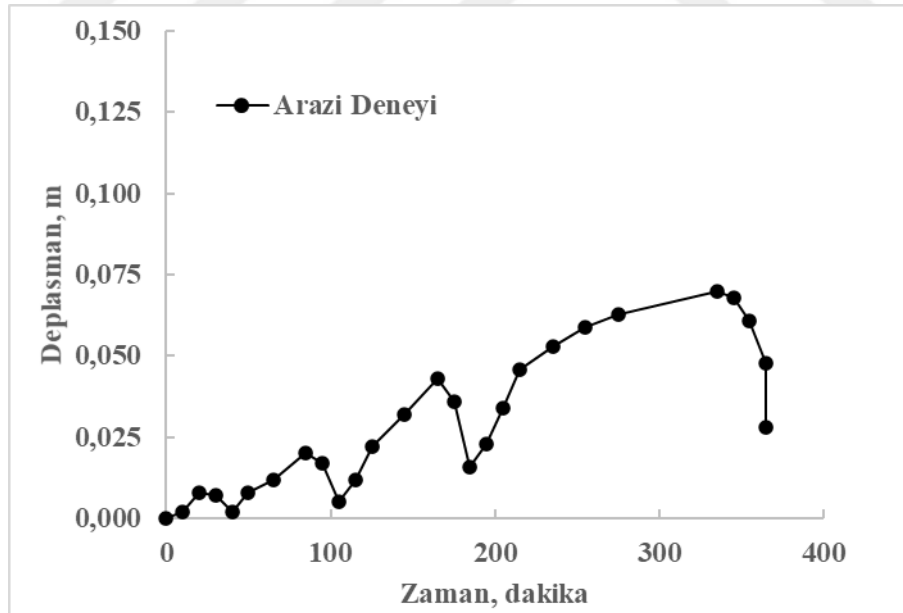
Arazideki yükleme deneyi ASTM D 3966'ya göre yapılmıştır. % 200 mertebesindeki yanal yüklemede 45 ton yükleme yapılmıştır. Şekil 3.23'te görüldüğü üzere kazık üst kotu +1.00 m, kazığın bulunduğu noktada deniz dolgusu -2,00 m kotundadır. Yanal yükleme sırasında, yükleme noktası kotu h:+3,00 m'dir yani yapılan dolgudan 3 metre yüksekte kazık üst kotunda yükleme yapılmıştır. Arazide okunan değerlerden de görüleceği üzere maksimum yüklemede deplasman 7.00 cm olarak ölçülmüştür. Yanal yükleme deneyi tamamlandığında ise 2.80 cm kalıcı deformasyon gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. Arazi Deneyi Deplasman Değerleri

| Yük Yüzdesi | Yük (kN)   | Süre [dak] | u_x [m]      |
|-------------|------------|------------|--------------|
| 0%          | 0          | 0          | 0.000        |
| 25%         | 56.25      | 10         | 0.002        |
| 50%         | 112.5      | 20         | 0.008        |
| 25%         | 56.25      | 30         | 0.007        |
| 0%          | 0          | 40         | 0.002        |
| 50%         | 112.5      | 50         | 0.008        |
| 75%         | 168.75     | 65         | 0.012        |
| 100%        | 225        | 85         | 0.020        |
| 50%         | 112.5      | 95         | 0.017        |
| 0%          | 0          | 105        | 0.005        |
| 50%         | 112.5      | 115        | 0.012        |
| 100%        | 225        | 125        | 0.022        |
| 125%        | 281.25     | 145        | 0.032        |
| 150%        | 337.5      | 165        | 0.043        |
| 75%         | 168.75     | 175        | 0.036        |
| 0%          | 0          | 185        | 0.016        |
| 50%         | 112.5      | 195        | 0.023        |
| 100%        | 225        | 205        | 0.034        |
| 150%        | 337.5      | 215        | 0.046        |
| 170%        | 382.5      | 235        | 0.053        |
| 180%        | 405        | 255        | 0.059        |
| 190%        | 427.5      | 275        | 0.063        |
| <b>200%</b> | <b>450</b> | <b>335</b> | <b>0.070</b> |
| 150%        | 337.5      | 345        | 0.068        |
| 100%        | 225        | 355        | 0.061        |
| 50%         | 112.5      | 365        | 0.048        |
| 0%          | 0          | 365        | 0.028        |



Şekil 4.3. Arazide Yapılan Yük-Deplasman Eğrisi

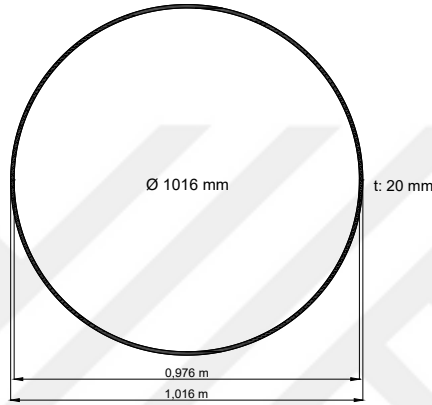


Şekil 4.4. Arazide Yapılan Deplasman-Zaman Eğrisi

### 4.3. Sonlu Elemanlar Analizi

#### 4.3.1. PLAXIS 2D Modelleme

Arazi şartları, PLAXIS 2D’de modellenmiştir. PLAXIS 2D, “düzlem-deformasyon” durumunu temsil ettiğinden aşağıdaki gibi modelleme yapılmıştır. Model parametreleri ve analiz sonuçları aşağıdadır.



Şekil 4.5. Ø1016 mm Test Kazığı Kesiti (t:20 mm)

$$A_{kesit} = \frac{\pi x D^2}{4} = \frac{\pi x (1,016)^2}{4} - \frac{\pi x (0,976)^2}{4} = 0,0625 m^2 \quad (4.1)$$

$$\text{Çeliğin birim hacim ağırlığı} = 7,85 t/m^3 x 9,81 = 77 kN/m^3 \quad (4.2)$$

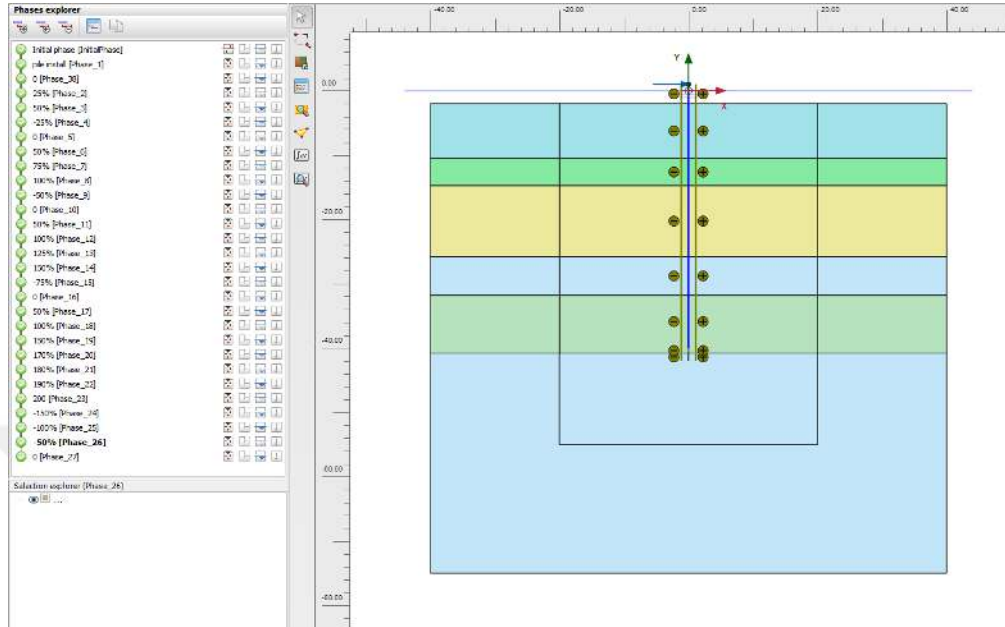
$$w = 77 kN/m^3 x A_{kesit} = 77 x 0,0625 = 4,81 kN/m/m \quad (4.3)$$

$$E_{çelik} = 2,07 x 10^8 kN/m^2 \quad (4.4)$$

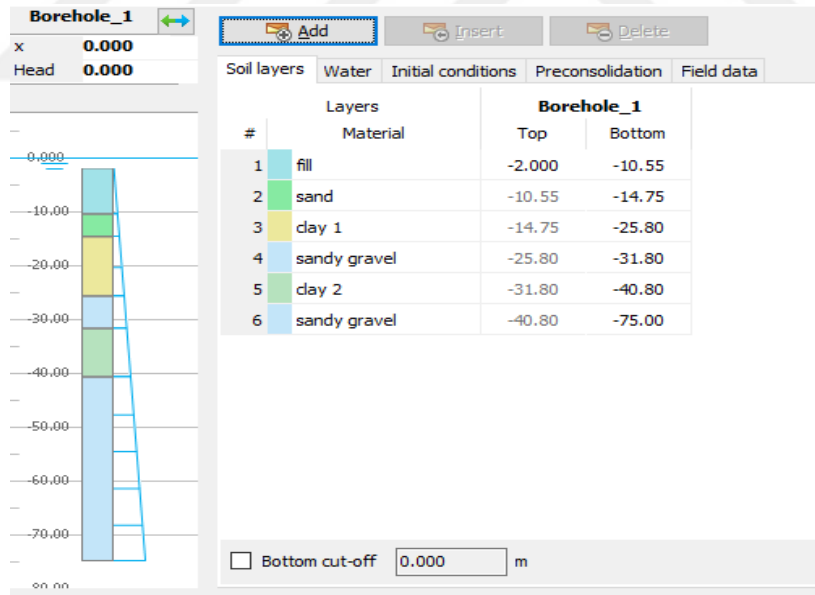
$$I = \frac{\pi}{64} (1,016^4 - 0,976^4) = 0,00776 m^4 \quad (4.5)$$

$$EA = 2,07 x 10^8 kN/m^2 x 0,0625 m^2 = 1,29 x 10^7 kN/m \quad (4.6)$$

$$EI = 2,07 x 10^8 kN/m^2 x 0,00776 m^4 = 1,61 x 10^9 kN m^2/m \quad (4.7)$$



Şekil 4.6. PLAXIS 2D Model Görünümü



Şekil 4.7. PLAXIS 2D Sondaj Kuyusu Detayı

Çizelge 4.2. PLAXIS 2D Model Parametreleri

| Identification                      |                       | clay 1            | clay 2            | fill              | sand              | sandy gravel      |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Identification number               |                       | 3                 | 5                 | 1                 | 2                 | 4                 |
| Material model                      |                       | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      |
| Drainage type                       |                       | Undrained (A)     | Undrained (A)     | Drained           | Drained           | Drained           |
| Colour                              |                       | RGB 236, 232, 156 | RGB 182, 226, 190 | RGB 161, 226, 232 | RGB 134, 234, 162 | RGB 195, 229, 249 |
| Comments                            |                       |                   |                   |                   |                   |                   |
| y <sub>unsat</sub>                  | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 18                | 18,3              | 19                |
| y <sub>sat</sub>                    | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 19                | 21                | 20                |
| Dilatancy cut-off                   |                       | No                | No                | No                | No                | No                |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               |
| e <sub>min</sub>                    |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| e <sub>max</sub>                    |                       | 999               | 999               | 999               | 999               | 999               |
| Rayleigh α                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Rayleigh β                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| E                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 7692              | 7,69E+03          | 7,50E+04          | 2,50E+04          | 1,00E+05          |
| v (nu)                              |                       | 0,4               | 0,4               | 0,25              | 0,2               | 0,25              |
| G                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 2747              | 2,75E+03          | 3,00E+04          | 1,04E+04          | 4,00E+04          |
| E <sub>oed</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 1,65E+04          | 1,65E+04          | 9,00E+04          | 2,78E+04          | 1,20E+05          |
| c <sub>ref</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 69                | 100               | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| φ (phi)                             | °                     | 6.000             | 7.000             | 35                | 33                | 38                |
| ψ (psi)                             | °                     | 0                 | 0                 | 5.000             | 3.000             | 7.500             |
| V <sub>s</sub>                      | m/s                   | 38,69             | 38,69             | 127,9             | 74,73             | 143,7             |
| V <sub>p</sub>                      | m/s                   | 94,78             | 94,78             | 221,5             | 122               | 248,9             |
| Set to default values               |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| E <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Tension cut-off                     |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| Tensile strength                    | kN/m <sup>2</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Undrained behaviour                 |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Skempton-B                          |                       | 0,9532            | 0,9532            | 0,9833            | 0,9866            | 0,9833            |
| v <sub>u</sub>                      |                       | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             |
| K <sub>w,ref</sub> / n              | kN/m <sup>2</sup>     | 2,61E+05          | 2,61E+05          | 2,94E+09          | 1,02E+09          | 3,92E+09          |
| C <sub>v,ref</sub>                  | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Stiffness                           |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Strength                            |                       | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            |
| R <sub>inter</sub>                  |                       | 1                 | 0,8               | 1                 | 1                 | 1                 |
| Consider gap closure                |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| δ <sub>inter</sub>                  |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Cross permeability                  |                       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       |
| Drainage conductivity, dk           | m <sup>3</sup> /day/m | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| R                                   | m <sup>3</sup> K/kW   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| K <sub>0</sub> determination        |                       | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         |
| K <sub>0,x</sub> = K <sub>0,z</sub> |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| K <sub>0,x</sub>                    |                       | 0,8955            | 0,8781            | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| K <sub>0,z</sub>                    |                       | 0,8955            | 1                 | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| OCR                                 |                       | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| POP                                 | kN/m <sup>2</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Data set                            |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Type                                |                       | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            |
| < 2 μm                              | %                     | 10                | 10                | 10                | 10                | 10                |
| 2 μm - 50 μm                        | %                     | 13                | 13                | 13                | 13                | 13                |
| 50 μm - 2 mm                        | %                     | 77                | 77                | 77                | 77                | 77                |
| Use defaults                        |                       | None              | None              | None              | None              | None              |
| k <sub>x</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| k <sub>y</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| -ψ <sub>unsat</sub>                 | m                     | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 5,00E-01          | 5,00E-01          | 5,00E-01          |
| S <sub>s</sub>                      | 1/m                   | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>k</sub>                      |                       | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          |
| c <sub>s</sub>                      | kJ/t/K                | 0                 | 0                 | 0,00E+00          | 0,00E+00          | 0,00E+00          |
| λ <sub>s</sub>                      | kW/m/K                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| p <sub>s</sub>                      | t/m <sup>3</sup>      | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Solid thermal expansion             |                       | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        |
| α <sub>s</sub>                      | 1/K                   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| D <sub>v</sub>                      | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| f <sub>Tv</sub>                     |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Unfrozen water content              |                       | None              | None              | None              | None              | None              |

Çizelge 4.3. “Plate” Parametre Tablosu (E<sub>fill</sub>=75 MPa)

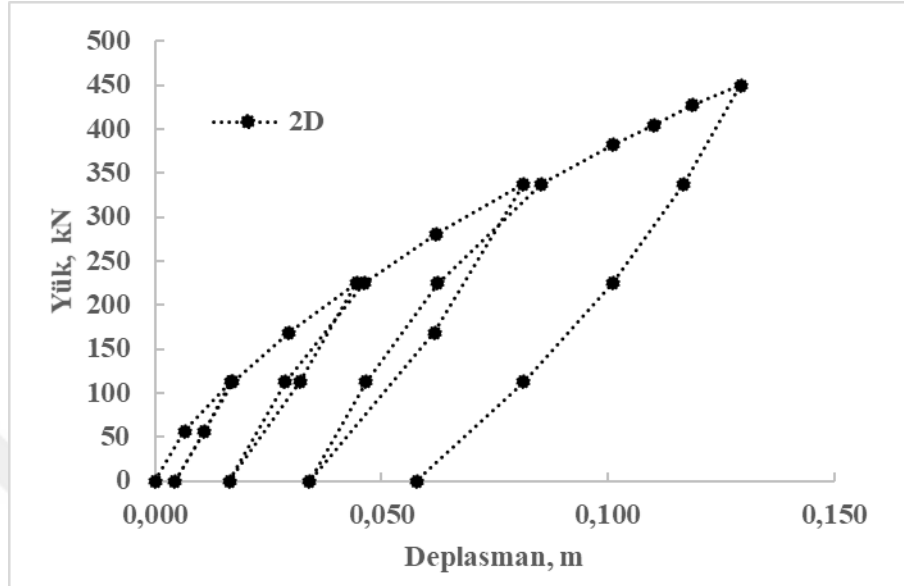
| PLATE                 |                      |               |
|-----------------------|----------------------|---------------|
| Identification        |                      | 1016          |
| Identification number |                      | 1             |
| Comments              |                      | pile          |
| Colour                |                      | RGB 0, 0, 255 |
| Material type         |                      | Elastic       |
| Isotropic             |                      | Yes           |
| EA_1                  | kN/m                 | 1,29E+07      |
| EA_2                  | kN/m                 | 1,29E+07      |
| EI                    | kN m <sup>2</sup> /m | 1,61E+09      |
| d                     | m                    | 1.221         |
| w                     | kN/m/m               | 4.810         |
| v (nu)                |                      | 0,3           |
| Rayleigh $\alpha$     |                      | 0             |
| Rayleigh $\beta$      |                      | 0             |
| Prevent punching      |                      | No            |
| Identification number |                      | 1             |
| c                     | kJ/t/K               | 0             |
| $\lambda$             | kW/m/K               | 0             |
| $\rho$                | t/m <sup>3</sup>     | 0             |
| $\alpha$              | 1/K                  | 0             |

#### 4.3.2. PLAXIS 2D Analizi

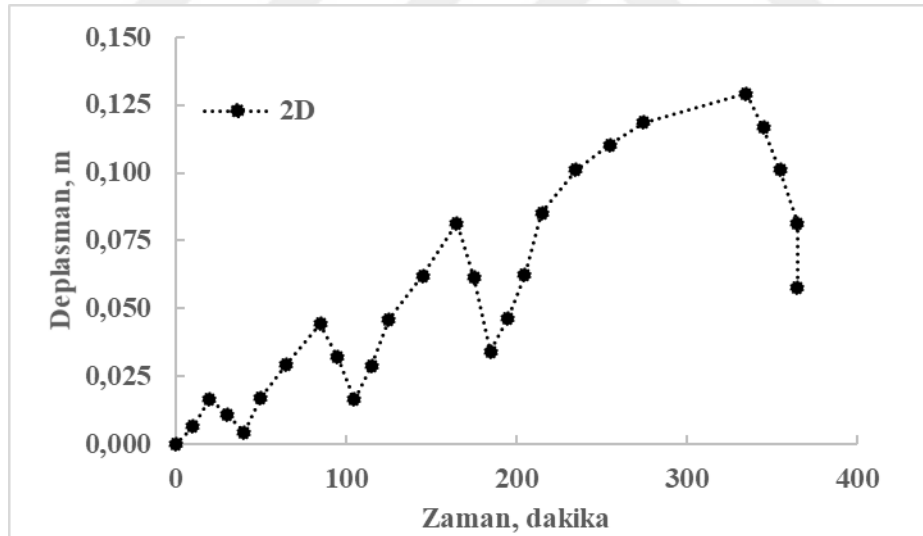
Parametre ve yenileme kriteri Mohr Coulomb (MC) kullanılarak PLAXIS 2D analizi ile modelleme yapıldığında maksimum yük altında görülen deplasman 12.90 cm'dir. 2D analiz, “düzlem-deformasyon” durumunu temsil ettiğinden tekil kazığın yüklemesinde kullanılması uygun değildir. Arazide yanal yükleme tekil kazıkta yapıldığından 3 boyutlu modelleme yapılması daha uygun olacaktır.

Çizelge 4.4. PLAXIS 2D Analiz Sonuçları

| Yük Yüzdesi | PLAXIS 2D - Plate |            |              |
|-------------|-------------------|------------|--------------|
|             | Yük (kN)          | Süre [min] | u_x [m]      |
| 0%          | 0                 | 0          | 0.000        |
| 25%         | 56.25             | 10         | 0.007        |
| 50%         | 112.5             | 20         | 0.017        |
| 25%         | 56.25             | 30         | 0.011        |
| 0%          | 0                 | 40         | 0.004        |
| 50%         | 112.5             | 50         | 0.017        |
| 75%         | 168.75            | 65         | 0.030        |
| 100%        | 225               | 85         | 0.044        |
| 50%         | 112.5             | 95         | 0.032        |
| 0%          | 0                 | 105        | 0.016        |
| 50%         | 112.5             | 115        | 0.029        |
| 100%        | 225               | 125        | 0.046        |
| 125%        | 281.25            | 145        | 0.062        |
| 150%        | 337.5             | 165        | 0.081        |
| 75%         | 168.75            | 175        | 0.062        |
| 0%          | 0                 | 185        | 0.034        |
| 50%         | 112,5             | 195        | 0.047        |
| 100%        | 225               | 205        | 0.062        |
| 150%        | 337.5             | 215        | 0.085        |
| 170%        | 382.5             | 235        | 0.101        |
| 180%        | 405               | 255        | 0.110        |
| 190%        | 427.5             | 275        | 0.119        |
| <b>200%</b> | <b>450</b>        | <b>335</b> | <b>0.129</b> |
| 150%        | 337.5             | 345        | 0.117        |
| 100%        | 225               | 355        | 0.101        |
| 50%         | 112.5             | 365        | 0.081        |
| 0%          | 0                 | 365        | 0.058        |



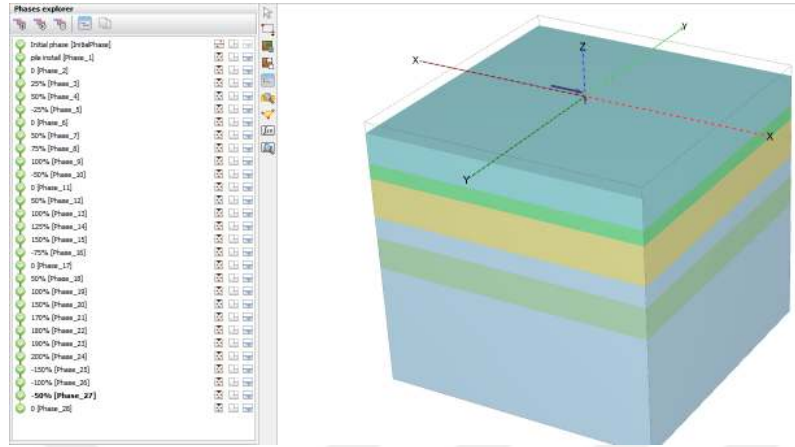
Şekil 4.8. 2D Model Yük-Deplasman Eğrisi



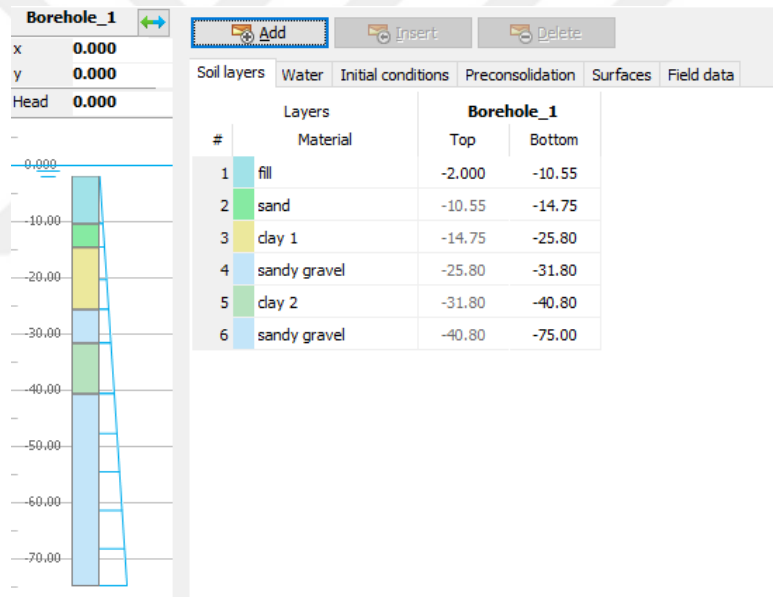
Şekil 4.9. 2D Model Deplasman-Zaman Eğrisi

#### 4.3.3. PLAXIS 3D Modelleme

Arazi şartları, PLAXIS 3D’de modellenmiştir. Model parametreleri ve analiz sonuçları aşağıdadır.



Şekil 4.10. PLAXIS 3D Model Görünümü



Şekil 4.11. PLAXIS 3D Sondaj Kuyusu Detayı

Çizelge 4.5. PLAXIS 3D Model Parametreleri (Efill=75 MPa)

| Identification                      |                       | clay 1            | clay 2            | fill              | sand              | sandy gravel      |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Identification number               |                       | 3                 | 5                 | 1                 | 2                 | 4                 |
| Material model                      |                       | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      |
| Drainage type                       |                       | Undrained (A)     | Undrained (A)     | Drained           | Drained           | Drained           |
| Colour                              |                       | RGB 236, 232, 156 | RGB 182, 226, 190 | RGB 161, 226, 232 | RGB 134, 234, 162 | RGB 195, 229, 249 |
| Comments                            |                       |                   |                   |                   |                   |                   |
| y <sub>unsat</sub>                  | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 18                | 18,3              | 19                |
| y <sub>sat</sub>                    | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 19                | 21                | 20                |
| Dilatancy cut-off                   |                       | No                | No                | No                | No                | No                |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               |
| e <sub>min</sub>                    |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| e <sub>max</sub>                    |                       | 999               | 999               | 999               | 999               | 999               |
| Rayleigh α                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Rayleigh β                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| E                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 7692              | 7,69E+03          | 7,50E+04          | 2,50E+04          | 1,00E+05          |
| ν (nu)                              |                       | 0,4               | 0,4               | 0,25              | 0,2               | 0,25              |
| G                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 2747              | 2,75E+03          | 3,00E+04          | 1,04E+04          | 4,00E+04          |
| E <sub>oed</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 1,65E+04          | 1,65E+04          | 9,00E+04          | 2,78E+04          | 1,20E+05          |
| c <sub>ref</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 69                | 100               | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| φ (phi)                             | °                     | 6.000             | 7.000             | 35                | 33                | 38                |
| ψ (psi)                             | °                     | 0                 | 0                 | 5.000             | 3.000             | 7.500             |
| V <sub>s</sub>                      | m/s                   | 38,69             | 38,69             | 127,9             | 74,73             | 143,7             |
| V <sub>p</sub>                      | m/s                   | 94,78             | 94,78             | 221,5             | 122               | 248,9             |
| Set to default values               |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| E <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Tension cut-off                     |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| Tensile strength                    | kN/m <sup>2</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Undrained behaviour                 |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Skempton-B                          |                       | 0,9532            | 0,9532            | 0,9833            | 0,9866            | 0,9833            |
| v <sub>u</sub>                      |                       | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             |
| K <sub>w,ref</sub> / n              | kN/m <sup>2</sup>     | 2,61E+05          | 2,61E+05          | 2,94E+09          | 1,02E+09          | 3,92E+09          |
| C <sub>v,ref</sub>                  | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Stiffness                           |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Strength                            |                       | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            |
| R <sub>inter</sub>                  |                       | 1                 | 0,8               | 1                 | 1                 | 1                 |
| Consider gap closure                |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| δ <sub>inter</sub>                  |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Cross permeability                  |                       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       |
| Drainage conductivity, dk           | m <sup>2</sup> /day/m | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| R                                   | m <sup>2</sup> K/kW   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| K <sub>0</sub> determination        |                       | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         |
| K <sub>0,x</sub> = K <sub>0,z</sub> |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| K <sub>0,x</sub>                    |                       | 0,8955            | 0,8781            | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| K <sub>0,z</sub>                    |                       | 0,8955            | 1                 | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| OCR                                 |                       | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| POP                                 | kN/m <sup>2</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Data set                            |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Type                                |                       | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            |
| < 2 µm                              | %                     | 10                | 10                | 10                | 10                | 10                |
| 2 µm - 50 µm                        | %                     | 13                | 13                | 13                | 13                | 13                |
| 50 µm - 2 mm                        | %                     | 77                | 77                | 77                | 77                | 77                |
| Use defaults                        |                       | None              | None              | None              | None              | None              |
| k <sub>x</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| k <sub>y</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| ψ <sub>unsat</sub>                  | m                     | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 5,00E-01          | 5,00E-01          | 5,00E-01          |
| S <sub>s</sub>                      | 1/m                   | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>k</sub>                      |                       | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          |
| c <sub>s</sub>                      | kJ/t/K                | 0                 | 0                 | 0,00E+00          | 0,00E+00          | 0,00E+00          |
| λ <sub>s</sub>                      | kW/m/K                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| ρ <sub>s</sub>                      | t/m <sup>3</sup>      | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Solid thermal expansion             |                       | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        |
| α <sub>s</sub>                      | 1/K                   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| D <sub>v</sub>                      | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| f <sub>Tv</sub>                     |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Unfrozen water content              |                       | None              | None              | None              | None              | None              |

#### 4.3.4. PLAXIS 3D Analizi

Sahadaki koşullar PLAXIS 3D ile yukarıdaki gibi bir model oluşturulmuştur. Model “*embedded beam*” kullanılarak çözülmüştür.

İlk önce  $T_{skin}=50$  kN/m alınmış ve analiz sonucunda maksimum yükte deplasman 2.80 cm bulunmuştur. Sonrasında,  $T_{skin}=3$  kN/m alınıp yeniden analiz yapıldığında maksimum yükte deplasman 3.00 cm bulunmuştur.

Mohr-Coulomb (MC) zemin modelinin kullanılmasının sebebi genel olarak literatürde yaygın kullanımının yanında, deney sisteminin yükleme şartları göz önünde bulundurulduğunda ve bu sistemde eksenel yük söz konusu olmadığından Mohr-Coulomb (MC) gerilme kriterinin kullanılmasında bir sakınca yoktur.

Kazık-zemin etkileşim kuvvetleri, “*embedded beam*” elemanları ile bu elemanları çevreleyen zemin hacim elemanları arasında otomatik olarak uygulanan özel arayüzden elde edilir. Kazık uzunluğu birim başına kuvvet birimi olarak ifade edilen yüzey sürtünme kuvveti,  $T_{skin}$ , kazığın eksenel yöndeki deplasmanı ile ilgili kuvvettir. Bu kuvvet, PLAXIS’te “*embedded beam*” malzeme veri setinde tanımlandığı gibi yüzey direnci ile sınırlıdır. (PLAXIS 3D Reference Manual)

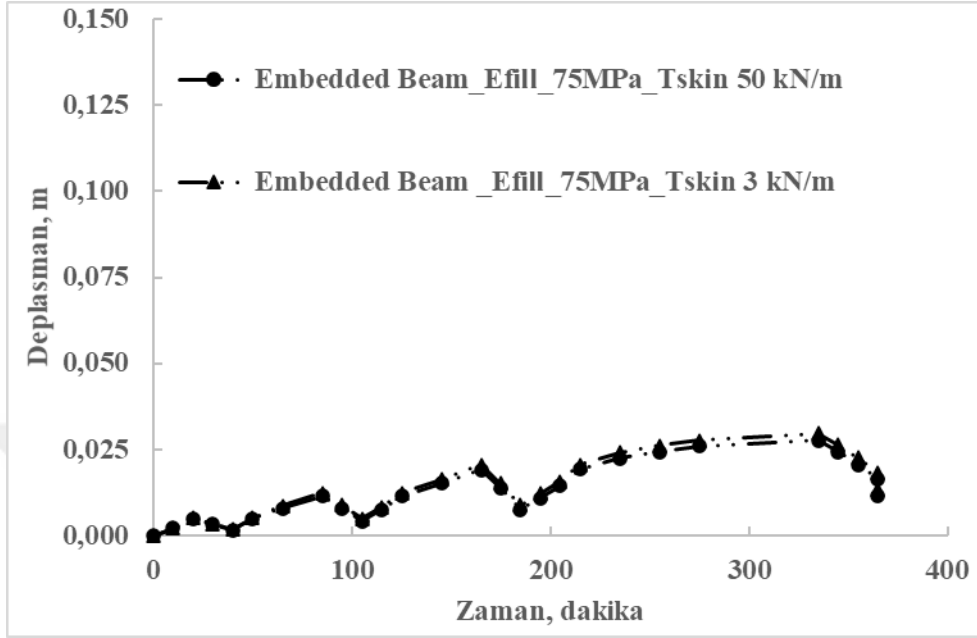
Burada deplasmanı önemli ölçüde etkilemeyecek olsa da dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır, dolgunun ortalama doymuş birim hacim ağırlığı  $20$  kN/m<sup>3</sup> olarak düşünülürse, kurulan modelde kazık parametrelerinde çeliğin birim hacim ağırlığı olan  $77$  kN/m<sup>3</sup>’e tamamlamak için birim hacim ağırlık  $57$  kN/m<sup>3</sup> alınmıştır. Bu çıkan sonuçlar bize göstermektedir ki, sahada ölçülen  $7.00$  cm maksimum deplasman arasında büyük farklılıklar vardır, bu sebeple “*embedded beam*” modelimizde kullanılmak için uygun değildir.

Çizelge 4.6. “*Embedded Beam*” Parametre Tablosu

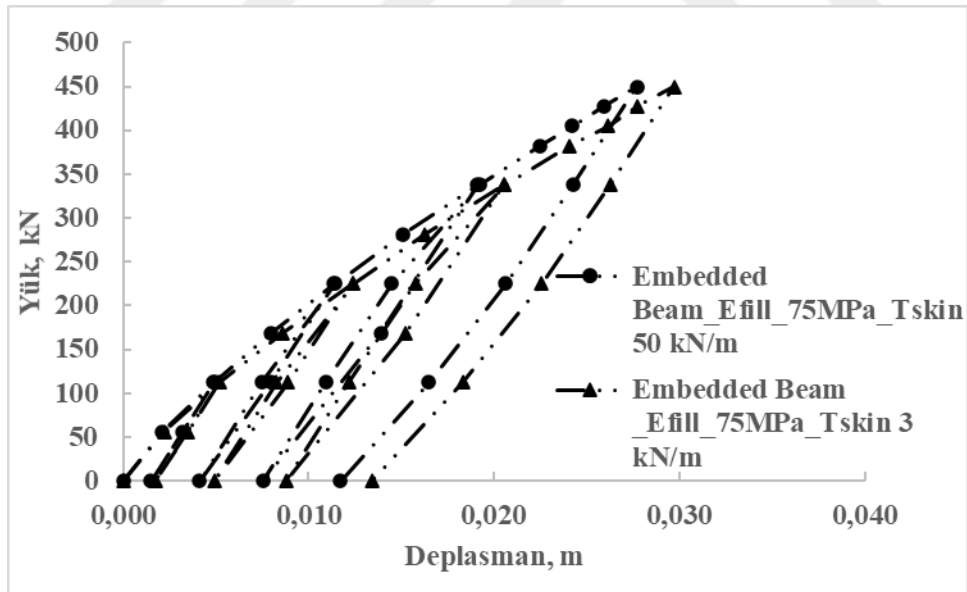
| EMBEDDED BEAM                 |                   |                  |
|-------------------------------|-------------------|------------------|
| Identification                |                   | kazik            |
| Identification number         |                   | 1                |
| Comments                      |                   |                  |
| Colour                        |                   | RGB 199, 82, 143 |
| Material type                 |                   | Elastic          |
| E                             | kN/m <sup>2</sup> | 2,07E+08         |
| $\gamma$                      | kN/m <sup>3</sup> | 57               |
| Beam type                     |                   | Predefined       |
| Predefined beam type          |                   | Circular tube    |
| Diameter                      | m                 | 1,016            |
| Thickness                     | m                 | 0,02             |
| A                             | m <sup>2</sup>    | 0,06258          |
| I <sub>2</sub>                | m <sup>4</sup>    | 7,76E-03         |
| I <sub>3</sub>                | m <sup>4</sup>    | 7,76E-03         |
| Rayleigh $\alpha$             |                   | 0                |
| Rayleigh $\beta$              |                   | 0                |
| Axial skin resistance         |                   | Linear           |
| T <sub>skin, start, max</sub> | kN/m              | 50               |
| T <sub>skin, end, max</sub>   | kN/m              | 50               |
| F <sub>max</sub>              | kN                | 2500             |
| Identification number         |                   | 1                |

Çizelge 4.7. “*Embedded Beam*” Model Tskin=50 kN/m ve Tskin=3 kN/m Analiz Sonuç Tablosu

| Yük<br>(kN) | Süre<br>[dak] | u_x [m]                                       |                                               |
|-------------|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|             |               | Embedded<br>Beam_Efill_75MPa_Tskin<br>50 kN/m | Embedded Beam<br>_Efill_75MPa_Tskin<br>3 kN/m |
| 0           | 0             | 0.000                                         | 0.000                                         |
| 56,25       | 10            | 0.002                                         | 0.002                                         |
| 112,5       | 20            | 0.005                                         | 0.005                                         |
| 56,25       | 30            | 0.003                                         | 0.003                                         |
| 0           | 40            | 0.002                                         | 0.002                                         |
| 112,5       | 50            | 0.005                                         | 0.005                                         |
| 168,75      | 65            | 0.008                                         | 0.009                                         |
| 225         | 85            | 0.011                                         | 0.012                                         |
| 112,5       | 95            | 0.008                                         | 0.009                                         |
| 0           | 105           | 0.004                                         | 0.005                                         |
| 112,5       | 115           | 0.007                                         | 0.008                                         |
| 225         | 125           | 0.011                                         | 0.012                                         |
| 281,25      | 145           | 0.015                                         | 0.016                                         |
| 337,5       | 165           | 0.019                                         | 0.021                                         |
| 168,75      | 175           | 0.014                                         | 0.015                                         |
| 0           | 185           | 0.008                                         | 0.009                                         |
| 112,5       | 195           | 0.011                                         | 0.012                                         |
| 225         | 205           | 0.014                                         | 0.016                                         |
| 337,5       | 215           | 0.019                                         | 0.021                                         |
| 382,5       | 235           | 0.022                                         | 0.024                                         |
| 405         | 255           | 0.024                                         | 0.026                                         |
| 427,5       | 275           | 0.026                                         | 0.028                                         |
| <b>450</b>  | <b>335</b>    | <b>0.028</b>                                  | <b>0.030</b>                                  |
| 337,5       | 345           | 0.024                                         | 0.026                                         |
| 225         | 355           | 0.021                                         | 0.023                                         |
| 112,5       | 365           | 0.016                                         | 0.018                                         |
| 0           | 365           | 0.012                                         | 0.013                                         |



Şekil 4.12. “Embedded Beam” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi



Şekil 4.13. “Embedded Beam” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi

Model “*embedded beam*” yerine aşağıda parametreleri gösterilen “*beam*” parametreleri ile kurulduktan sonra yeniden analiz yapılmıştır. Maksimum deplasman 5.20 cm bulunmuştur. Bu sonuç, arazide ölçülen 7.00 cm’lik deplasman değerine daha yakındır. O halde, “*beam*” modelin aynı şartlarda “*embedded beam*” modele göre yanal yükleme yapılan saha şartlarına daha yakın sonuçlar verdiği sonucuna varabiliriz.

Çizelge 4.8. “*Beam*” Parametre Tablosu

| BEAM                  |                         |                 |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| Identification        |                         | kazık           |
| Identification number |                         | 1               |
| Comments              |                         |                 |
| Colour                |                         | RGB 255, 0, 255 |
| Material type         |                         | Elastic         |
| <b>E</b>              | <b>kN/m<sup>2</sup></b> | <b>2,07E+08</b> |
| $\gamma$              | kN/m <sup>3</sup>       | 57              |
| Beam type             |                         | Predefined      |
| Predefined beam type  |                         | Circular tube   |
| Diameter              | m                       | 1,016           |
| Thickness             | m                       | 0,02            |
| A                     | m <sup>2</sup>          | 0,06258         |
| I <sub>2</sub>        | m <sup>4</sup>          | 7,76E-03        |
| I <sub>3</sub>        | m <sup>4</sup>          | 7,76E-03        |
| Rayleigh $\alpha$     |                         | 0               |
| Rayleigh $\beta$      |                         | 0               |
| Identification number |                         | 1               |

Çizelge 4.9. “Beam” Model (Efill=75 MPa) Analiz Sonuç Tablosu

|            |            | u_x [m]          |
|------------|------------|------------------|
| Yük (kN)   | Süre [dak] | BEAM_Efill_75MPa |
| 0          | 0          | 0.000            |
| 56.25      | 10         | 0.003            |
| 112.5      | 20         | 0.008            |
| 56.25      | 30         | 0.005            |
| 0          | 40         | 0.002            |
| 112.5      | 50         | 0.008            |
| 168.75     | 65         | 0.013            |
| 225        | 85         | 0.019            |
| 112.5      | 95         | 0.014            |
| 0          | 105        | 0.007            |
| 112.5      | 115        | 0.012            |
| 225        | 125        | 0.020            |
| 281.25     | 145        | 0.026            |
| 337.5      | 165        | 0.034            |
| 168.75     | 175        | 0.026            |
| 0          | 185        | 0.012            |
| 112.5      | 195        | 0.017            |
| 225        | 205        | 0.024            |
| 337.5      | 215        | 0.036            |
| 382.5      | 235        | 0.042            |
| 405        | 255        | 0.045            |
| 427.5      | 275        | 0.048            |
| <b>450</b> | <b>335</b> | <b>0.052</b>     |
| 337.5      | 345        | 0.047            |
| 225        | 355        | 0.039            |
| 112.5      | 365        | 0.030            |
| 0          | 365        | 0.018            |

Modellenen “*beam*” parametrelerinde analiz yaparak sahadaki deplasman değerine yaklaşmak mümkündür. Kazık parametreleri büyük oranda değiştirilemeyeceğinden, çeliğin elastisite modülünü gerçeklikten uzak kabul edilemez derecede değiştirmek mantığa aykırı olacağından ve en önemlisi denizde yapılan dolgunun rijitliği kontrol edilemeyeceğinden dolayı; burada dolgunun elastisite modülü  $E_{fill}=75 \text{ MPa}$  yerine  $E_{fill}=50 \text{ MPa}$  alınmış ve çeliğin elastisite modülü  $2,07E+08 \text{ kN/m}^2$  yerine  $1,80E+08 \text{ kN/m}^2$  (Mendiguren ve ark.,2015) alınarak yeniden PLAXIS 3D analizi yapılmıştır.

Aşağıdaki deplasman tablosundan da görüleceği üzere denizde yapılan dolgunun elastisite modülü 50 Mpa olarak alındığında analiz sonucu bulunan maksimum deplasman 6.60 cm, arazideki maksimum deplasman değeri olan 7.00 cm ile çok yakın bir değerdir ve aradaki yaklaşık %5’lik fark ihmal edilebilir düzeydedir.

Bu analiz, parametrik çalışmalarında sahada yapılan yanal yükleme ile uyumlu olarak kabul edilen model olarak kullanılacaktır.

Çizelge 4.10. PLAXIS 3D Model Parametreleri (Efill=50 MPa)

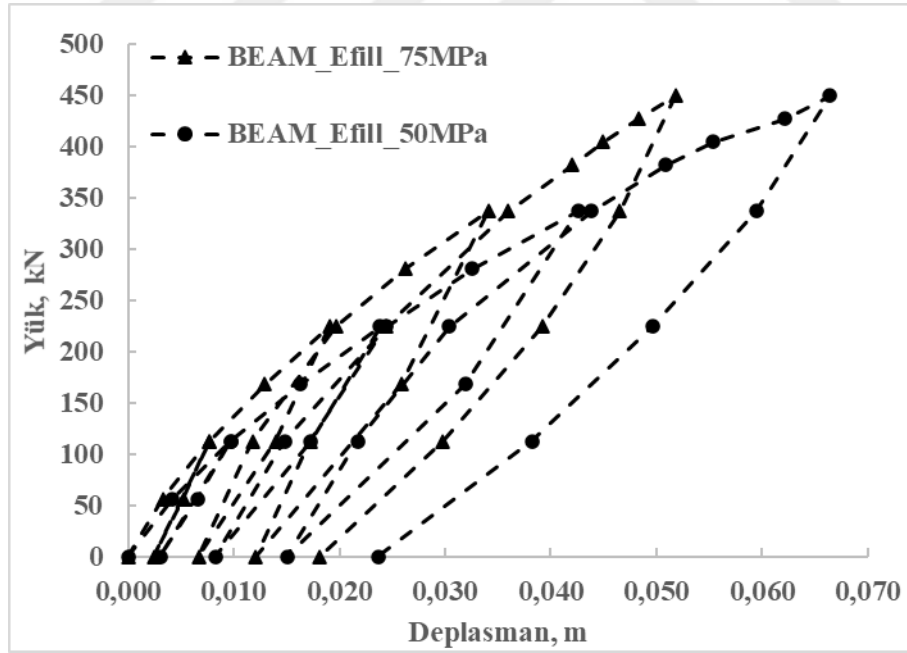
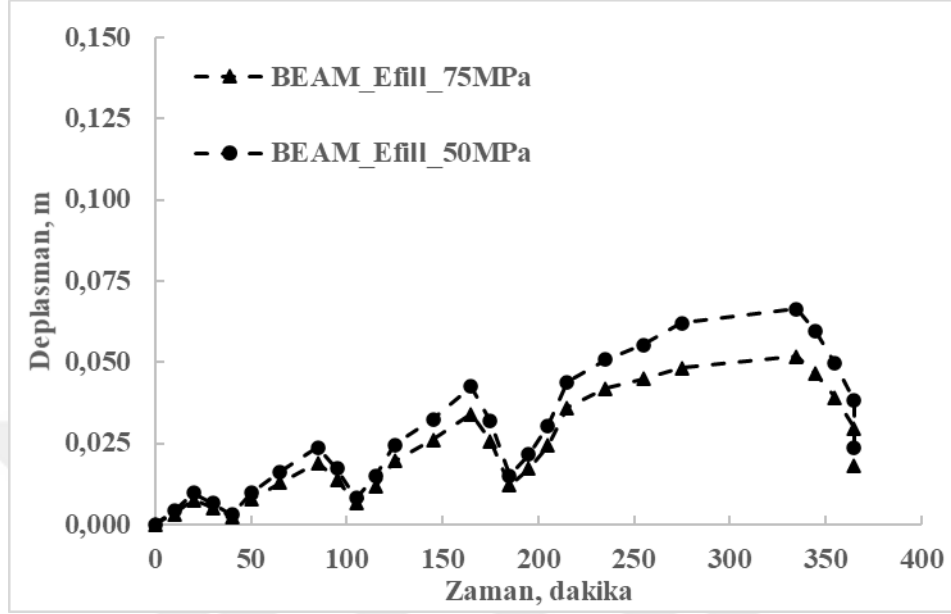
| Identification                      |                       | clay 1            | clay 2            | fill              | sand              | sandy gravel      |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Identification number               |                       | 3                 | 5                 | 1                 | 2                 | 4                 |
| Material model                      |                       | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      | Mohr-Coulomb      |
| Drainage type                       |                       | Undrained (A)     | Undrained (A)     | Drained           | Drained           | Drained           |
| Colour                              |                       | RGB 236, 232, 156 | RGB 182, 226, 190 | RGB 161, 226, 232 | RGB 134, 234, 162 | RGB 195, 229, 249 |
| Comments                            |                       |                   |                   |                   |                   |                   |
| y <sub>unsat</sub>                  | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 18                | 18,3              | 19                |
| y <sub>sat</sub>                    | kN/m <sup>3</sup>     | 18                | 18                | 19                | 21                | 20                |
| Dilatancy cut-off                   |                       | No                | No                | No                | No                | No                |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               |
| e <sub>min</sub>                    |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| e <sub>max</sub>                    |                       | 999               | 999               | 999               | 999               | 999               |
| Rayleigh α                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Rayleigh β                          |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| E                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 7692              | 7,69E+03          | 5,00E+04          | 2,50E+04          | 1,00E+05          |
| ν (nu)                              |                       | 0,4               | 0,4               | 0,25              | 0,2               | 0,25              |
| G                                   | kN/m <sup>2</sup>     | 2747              | 2,75E+03          | 3,00E+04          | 1,04E+04          | 4,00E+04          |
| E <sub>oed</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 1,65E+04          | 1,65E+04          | 9,00E+04          | 2,78E+04          | 1,20E+05          |
| c <sub>ref</sub>                    | kN/m <sup>2</sup>     | 69                | 100               | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| φ (phi)                             | °                     | 6.000             | 7.000             | 35                | 33                | 38                |
| ψ (psi)                             | °                     | 0                 | 0                 | 5.000             | 3.000             | 7.500             |
| V <sub>s</sub>                      | m/s                   | 38,69             | 38,69             | 127,9             | 74,73             | 143,7             |
| V <sub>p</sub>                      | m/s                   | 94,78             | 94,78             | 221,5             | 122               | 248,9             |
| Set to default values               |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| E <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>inc</sub>                    | kN/m <sup>2</sup> /m  | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| y <sub>ref</sub>                    | m                     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Tension cut-off                     |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| Tensile strength                    | kN/m <sup>2</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Undrained behaviour                 |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Skempton-B                          |                       | 0,9532            | 0,9532            | 0,9833            | 0,9866            | 0,9833            |
| v <sub>u</sub>                      |                       | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             | 0,495             |
| K <sub>w,ref</sub> / n              | kN/m <sup>2</sup>     | 2,61E+05          | 2,61E+05          | 2,94E+09          | 1,02E+09          | 3,92E+09          |
| C <sub>v,ref</sub>                  | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Stiffness                           |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Strength                            |                       | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            | Manual            |
| R <sub>inter</sub>                  |                       | 1                 | 0,8               | 1                 | 1                 | 1                 |
| Consider gap closure                |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| δ <sub>inter</sub>                  |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Cross permeability                  |                       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       | Impermeable       |
| Drainage conductivity, dk           | m <sup>3</sup> /day/m | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| R                                   | m <sup>2</sup> K/kW   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| K <sub>0</sub> determination        |                       | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         | Automatic         |
| K <sub>0,x</sub> = K <sub>0,z</sub> |                       | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               | Yes               |
| K <sub>0,x</sub>                    |                       | 0,8955            | 0,8781            | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| K <sub>0,z</sub>                    |                       | 0,8955            | 1                 | 0,4264            | 0,4554            | 0,3912            |
| OCR                                 |                       | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             | 1.000             |
| POP                                 | kN/m <sup>3</sup>     | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Data set                            |                       | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          | Standard          |
| Type                                |                       | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            | Coarse            |
| < 2 µm                              | %                     | 10                | 10                | 10                | 10                | 10                |
| 2 µm - 50 µm                        | %                     | 13                | 13                | 13                | 13                | 13                |
| 50 µm - 2 mm                        | %                     | 77                | 77                | 77                | 77                | 77                |
| Use defaults                        |                       | None              | None              | None              | None              | None              |
| k <sub>x</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| k <sub>y</sub>                      | m/day                 | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| -ψ <sub>unsat</sub>                 | m                     | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          | 1,00E+04          |
| e <sub>init</sub>                   |                       | 0,5               | 0,5               | 5,00E-01          | 5,00E-01          | 5,00E-01          |
| S <sub>s</sub>                      | 1/m                   | 0                 | 0,00E+00          | 0                 | 0                 | 0                 |
| c <sub>k</sub>                      |                       | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          | 1,00E+15          |
| c <sub>s</sub>                      | kJ/t/K                | 0                 | 0                 | 0,00E+00          | 0,00E+00          | 0,00E+00          |
| λ <sub>s</sub>                      | kW/m/K                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| ρ <sub>s</sub>                      | t/m <sup>3</sup>      | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Solid thermal expansion             |                       | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        | Volumetric        |
| α <sub>s</sub>                      | 1/K                   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| D <sub>v</sub>                      | m <sup>2</sup> /day   | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| f <sub>Tv</sub>                     |                       | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| Unfrozen water content              |                       | None              | None              | None              | None              | None              |

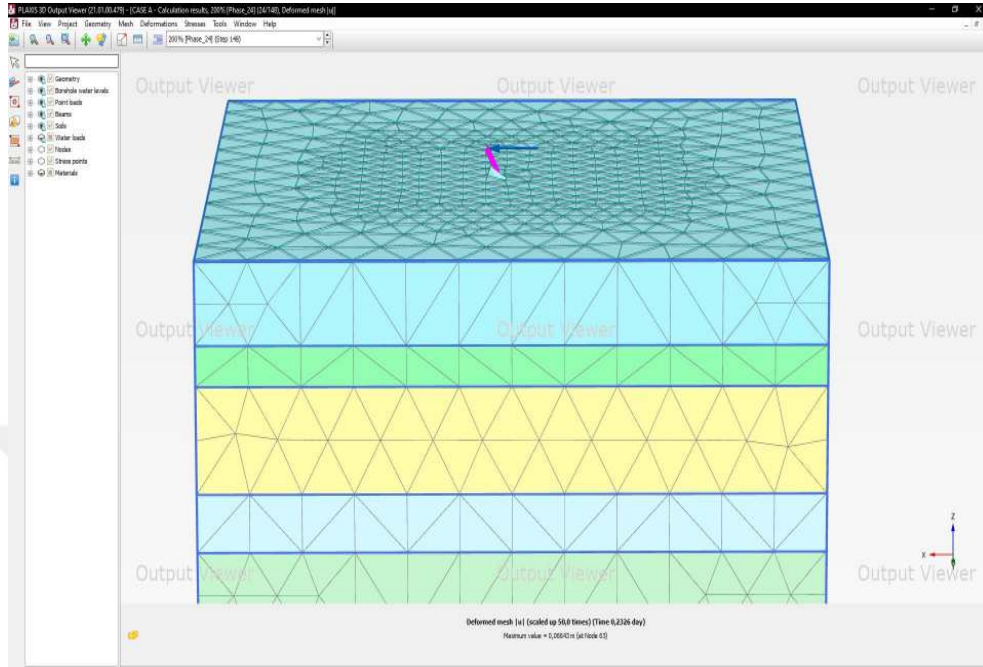
Çizelge 4.11. “*Beam*” Parametre Tablosu (Eçelik=1,80E+08 kN/m<sup>2</sup>)

| <b>BEAM</b>           |                         |                 |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| Identification        |                         | kazik           |
| Identification number |                         | 1               |
| Comments              |                         |                 |
| Colour                |                         | RGB 255, 0, 255 |
| Material type         |                         | Elastic         |
| <b>E</b>              | <b>kN/m<sup>2</sup></b> | <b>1,80E+08</b> |
| <b>γ</b>              | <b>kN/m<sup>3</sup></b> | <b>57</b>       |
| Beam type             |                         | Predefined      |
| Predefined beam type  |                         | Circular tube   |
| Diameter              | m                       | 1,016           |
| Thickness             | m                       | 0,02            |
| A                     | m <sup>2</sup>          | 0,06258         |
| I <sub>2</sub>        | m <sup>4</sup>          | 7,76E-03        |
| I <sub>3</sub>        | m <sup>4</sup>          | 7,76E-03        |
| Rayleigh α            |                         | 0               |
| Rayleigh β            |                         | 0               |
| Identification number |                         | 1               |

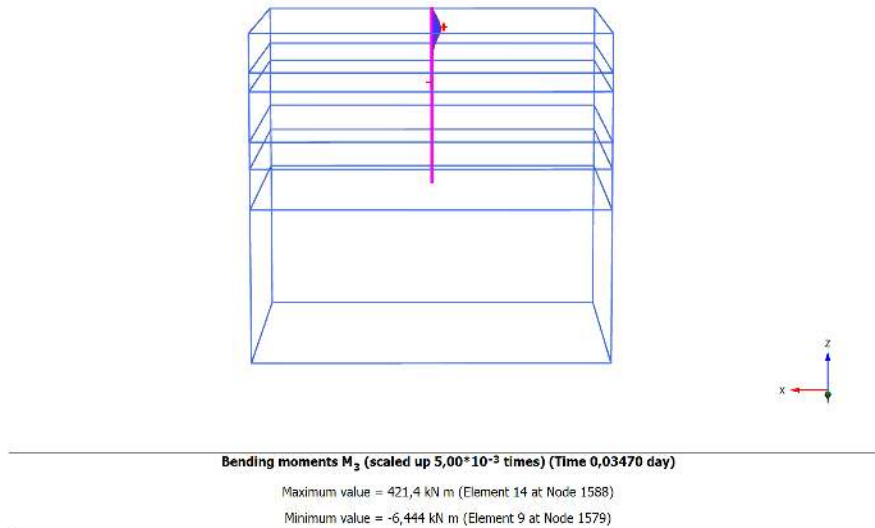
Çizelge 4.12. “Beam” Model (Efill=50 MPa) Analiz Sonuç Tablosu

|            |            | u_x [m]          |
|------------|------------|------------------|
| Yük (kN)   | Süre [dak] | BEAM_Efill_50MPa |
| 0          | 0          | 0.000            |
| 56.25      | 10         | 0.004            |
| 112.5      | 20         | 0.010            |
| 56.25      | 30         | 0.007            |
| 0          | 40         | 0.003            |
| 112.5      | 50         | 0.010            |
| 168.75     | 65         | 0.016            |
| 225        | 85         | 0.024            |
| 112.5      | 95         | 0.017            |
| 0          | 105        | 0.008            |
| 112.5      | 115        | 0.015            |
| 225        | 125        | 0.024            |
| 281.25     | 145        | 0.033            |
| 337.5      | 165        | 0.043            |
| 168.75     | 175        | 0.032            |
| 0          | 185        | 0.015            |
| 112.5      | 195        | 0.022            |
| 225        | 205        | 0.030            |
| 337.5      | 215        | 0.044            |
| 382.5      | 235        | 0.051            |
| 405        | 255        | 0.055            |
| 427.5      | 275        | 0.062            |
| <b>450</b> | <b>335</b> | <b>0.066</b>     |
| 337.5      | 345        | 0.059            |
| 225        | 355        | 0.050            |
| 112.5      | 365        | 0.038            |
| 0          | 365        | 0.024            |

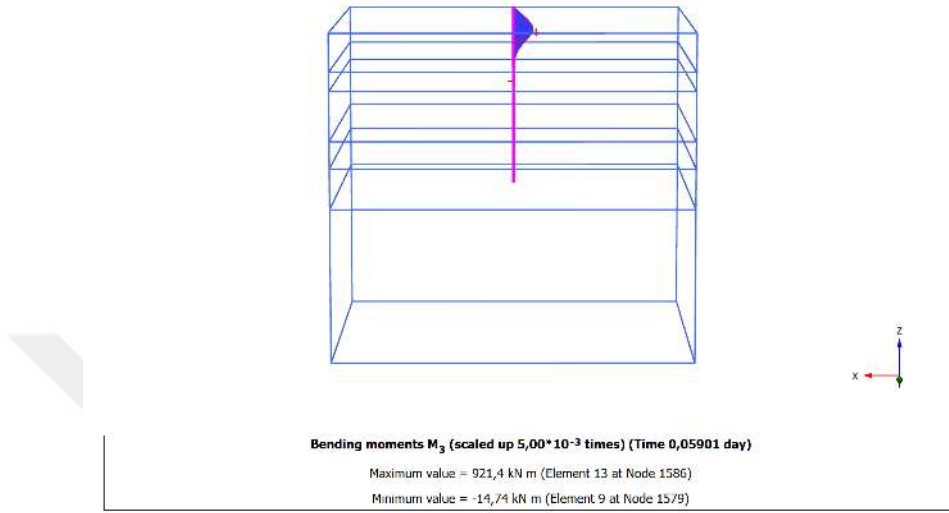




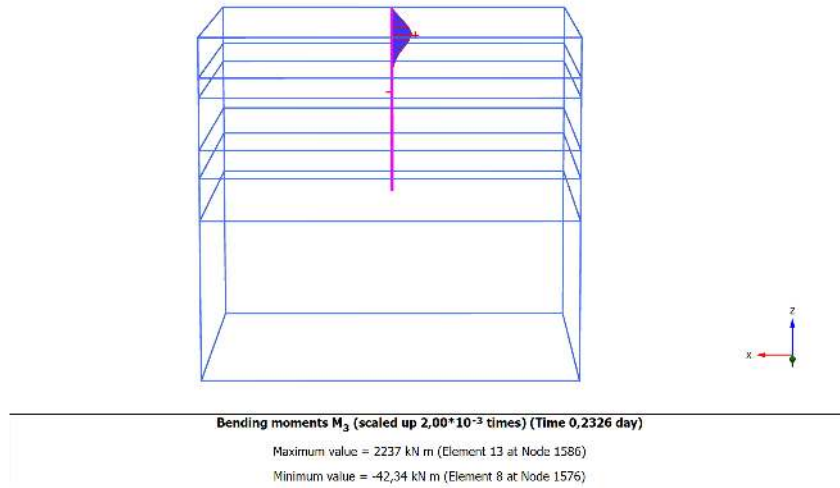
Şekil 4.16. PLAXIS 3D Sonuç Görüntüsü (Deformed mesh)



Şekil 4.17. %50 Yük Altında Eğilme Momenti

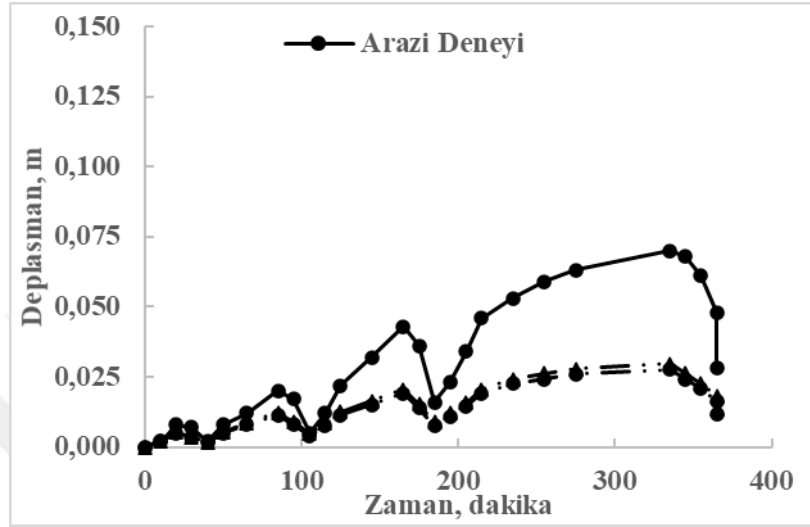


Şekil 4.18. %100 Yük Altında Eğilme Momenti

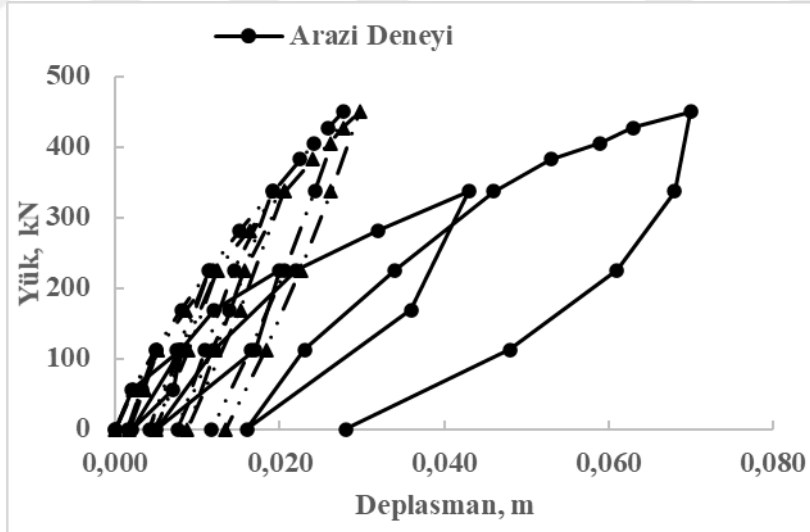


Şekil 4.19. %200 Yük Altında Eğilme Momenti

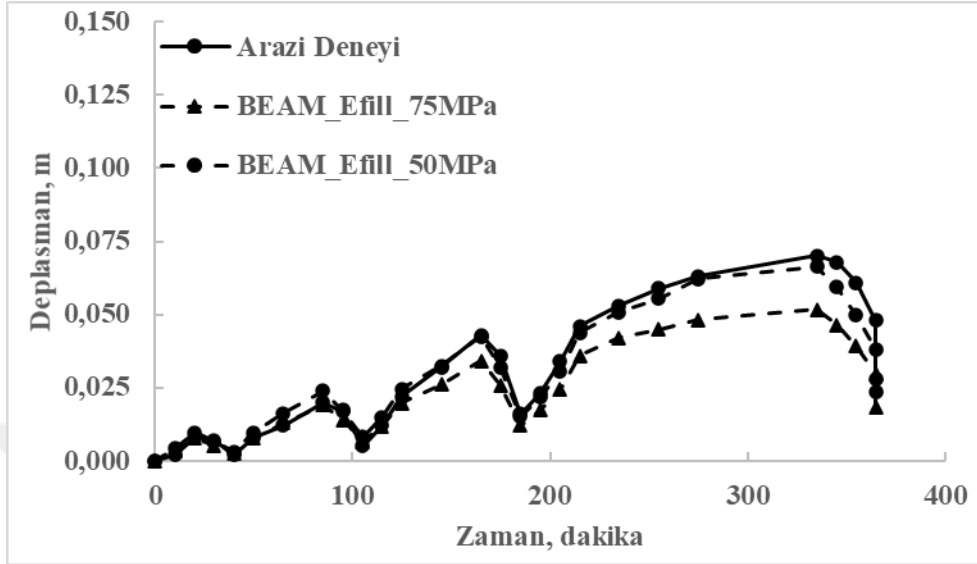
## 4.4. Deney Sonuçları İle Sonlu Elemanlar Analizinin Karşılaştırılması



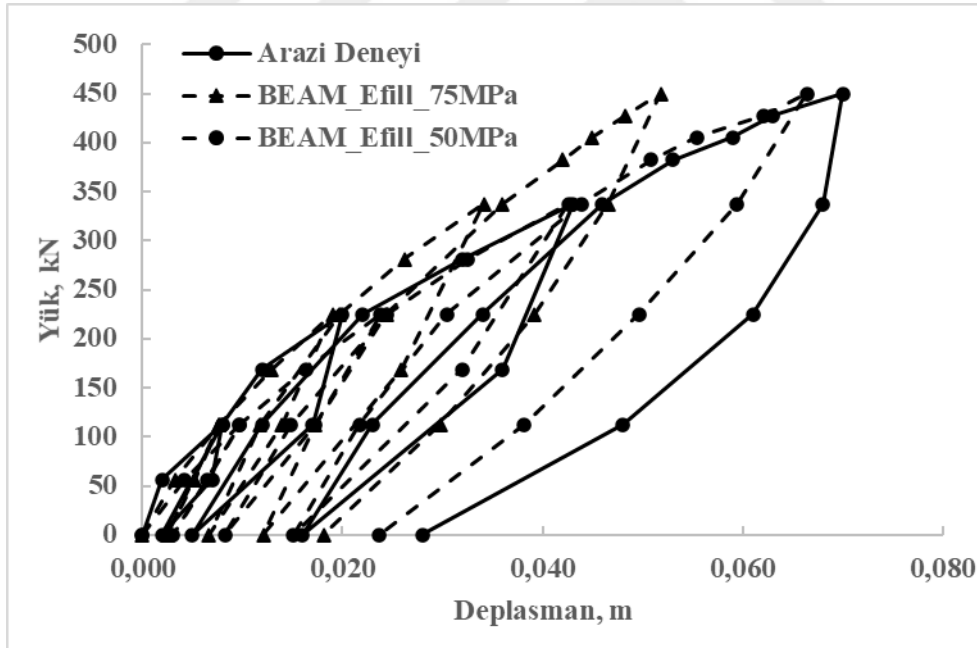
Şekil 4.20 “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi



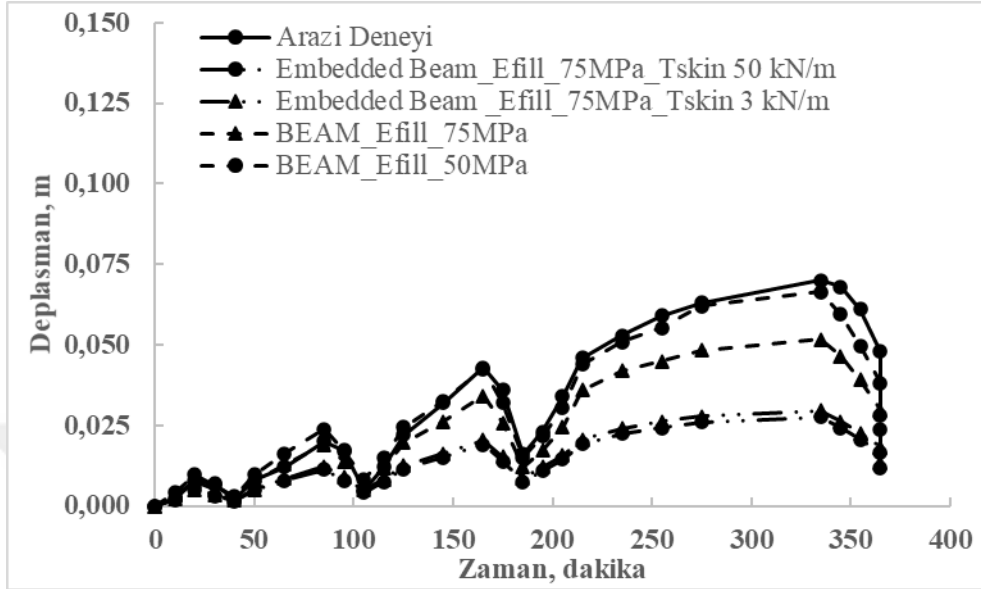
Şekil 4.21. “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi



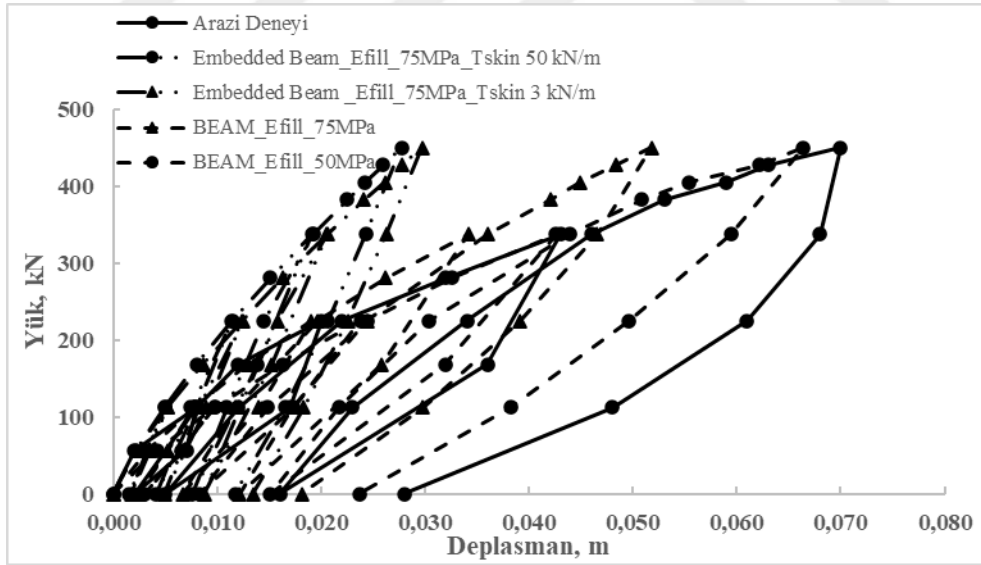
Şekil 4.22. “Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi



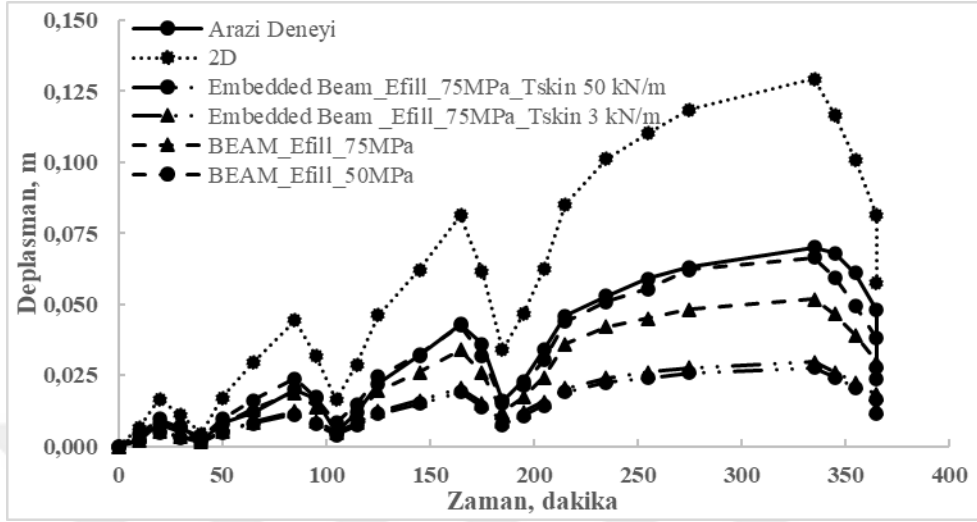
Şekil 4.23. “Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi



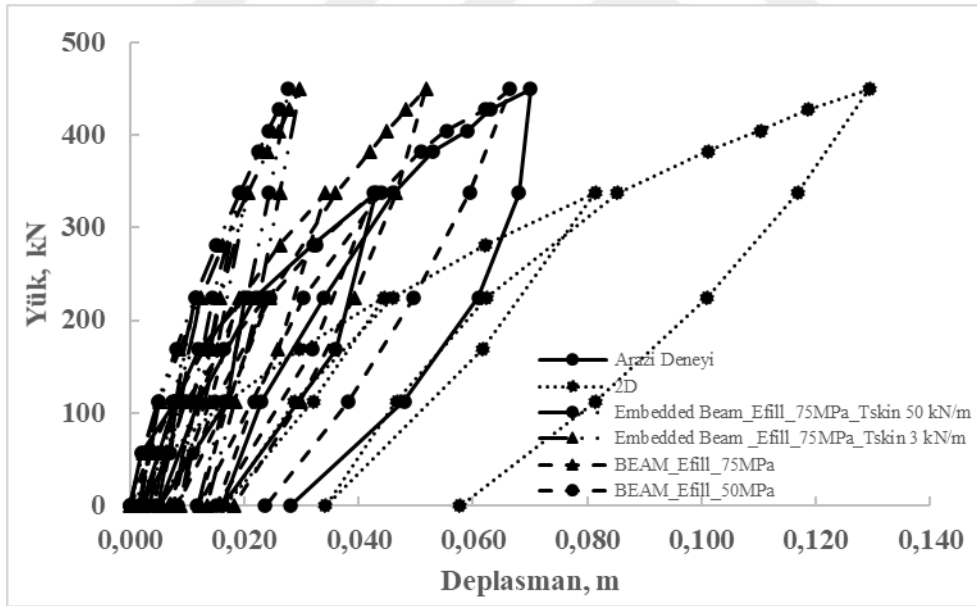
Şekil 4.24. “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi



Şekil 4.25. “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi

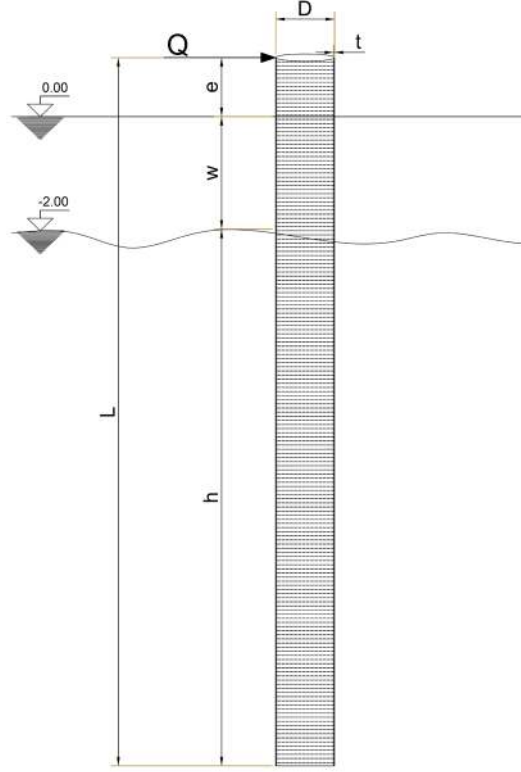


Şekil 4.26. “2D Model”, “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Deplasman-Zaman Eğrisi



Şekil 4.27. “2D Model”, “Beam”, “Embedded Beam”, “Arazi Deneyi” 3D Model Yük-Deplasman Eğrisi

## 4.5. Parametrik Çalışmalar



Şekil 4.28. Model Geometrisi

Çizelge 4.13. Saha Deneyi Parametreleri

| Parametreler                         | Sembol   | Metre (m)      |
|--------------------------------------|----------|----------------|
| Kazık Uzunluğu                       | L        | 40             |
| Deniz Suyu Derinliği                 | w        | 2              |
| Su Seviyesi Üstündeki Kazık Uzunluğu | e        | 1              |
| Gömülü Kazık Uzunluğu                | h        | 37             |
| Kazık Çapı                           | D        | 1.016 (40 inç) |
| <b>Kazık Et Kalınlığı</b>            | <b>t</b> | <b>0.02</b>    |

Arazide yapılan deneyin deplasman değerine en yakın model, 4.3. Sonlu Elemanlar Analizi bölümünde anlatıldığı üzere, kurulmuş ve bu modeldeki parametreler değiştirilerek yeniden analiz yapılmış ve analiz sonuçları bu bölümde incelenmiştir. Arazide yapılan deneyde kullanılan ve modellenen kazık boyu 40 metre, kazık çapı 40" (1016 mm), çelik silindirik kazık et kalınlığı 20 mm ve yanal yükün konsolda etkime kotu +3.00 metredir. Parametrik çalışmada; kazık gömülme boyu, kazık çapı, kazık et kalınlığı ve yük etkime kotu, her biri ayrı ayrı farklı değerlerde ve diğer parametreler arazideki parametrelerle aynı olacak şekilde modellenmiştir.

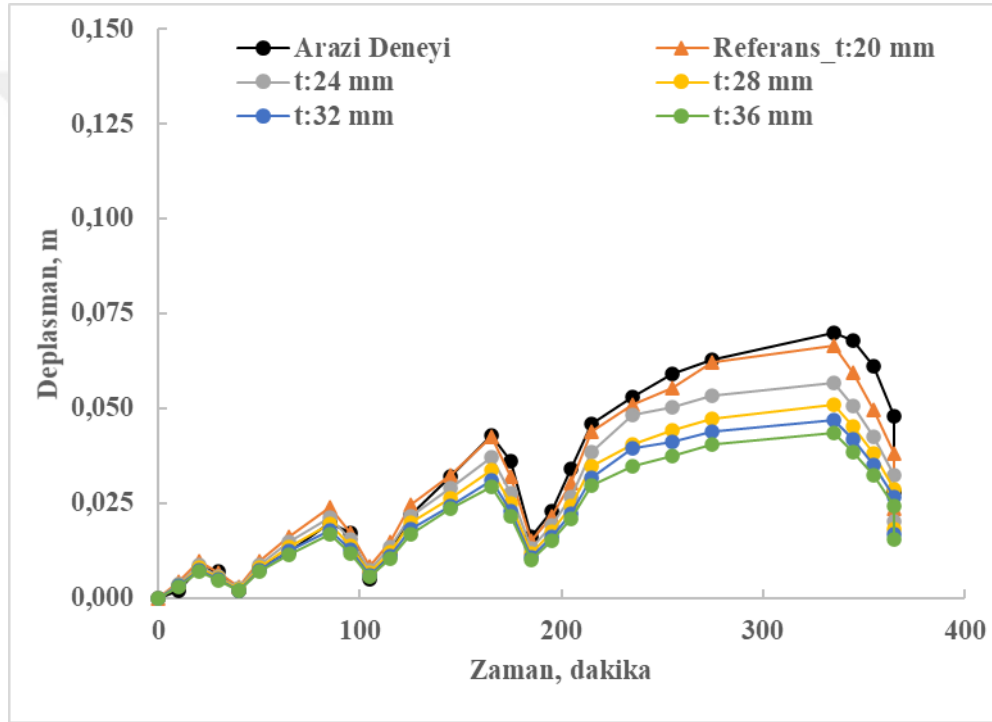
Parametre tablosu aşağıda detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.14. Parametre Çalışmasındaki Değişkenler Tablosu

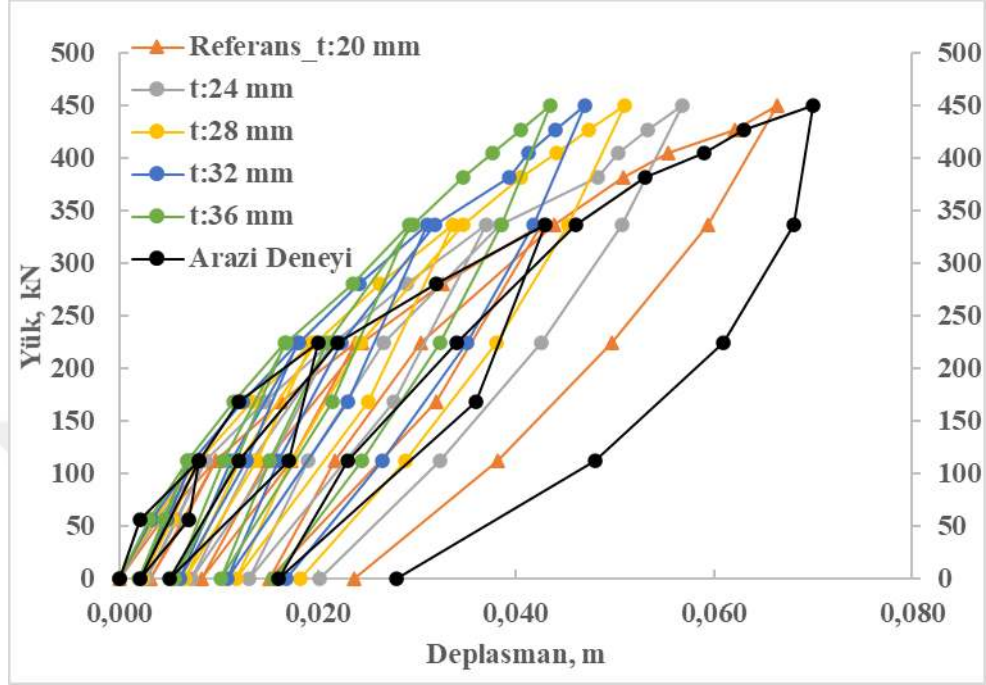
| No | Kazık Çapı<br>D (inç) | Konsolda Yük<br>Etkime Kotu<br>h (m) | Kazık et<br>kalınlığı<br>t (mm) | Kazık Boyu<br>L (m) | Uyumlu Modelden Değişken            |          |
|----|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------|
| 0  | 40"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Saha Deneyi ile Uyumlu Model        | -        |
| 1  | 40"                   | 3.00 m                               | 24 mm                           | 40 m                | Çelik Silindirik Kazık Et Kalınlığı | t:24 mm  |
| 2  | 40"                   | 3.00 m                               | 28 mm                           | 40 m                | Çelik Silindirik Kazık Et Kalınlığı | t:28 mm  |
| 3  | 40"                   | 3.00 m                               | 32 mm                           | 40 m                | Çelik Silindirik Kazık Et Kalınlığı | t:32 mm  |
| 4  | 40"                   | 3.00 m                               | 36 mm                           | 40 m                | Çelik Silindirik Kazık Et Kalınlığı | t:36 mm  |
| 5  | 40"                   | 2.50 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:2.50 m |
| 6  | 40"                   | 2.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:2.00 m |
| 7  | 40"                   | 1.50 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:1.50 m |
| 8  | 40"                   | 1.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:1.00 m |
| 9  | 40"                   | 0.50 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:0.50 m |
| 10 | 40"                   | 0.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Etkime Noktası Kotu                 | h:0.00 m |
| 11 | 30"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Kazık Çapı                          | D:30"    |
| 12 | 35"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Kazık Çapı                          | D:35"    |
| 13 | 45"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Kazık Çapı                          | D:45"    |
| 14 | 50"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 40 m                | Kazık Çapı                          | D:50"    |
| 15 | 40"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 35 m                | Toplam Kazık Boyu                   | L:35 m   |
| 16 | 40"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 30 m                | Toplam Kazık Boyu                   | L:30 m   |
| 17 | 40"                   | 3.00 m                               | 20 mm                           | 25 m                | Toplam Kazık Boyu                   | L:25 m   |

#### 4.5.1. Et Kalınlığının Deplasmana Etkisi

Silindirik çelik kazığın et kalınlığı arazide t:20 mm iken parametrik çalışmalarda sırasıyla t:24 mm, t:28mm, t:32 mm ve t:36 mm alınarak analiz yapılmıştır. Aşağıdaki tablo ve eğrilerde görüldüğü üzere kazık et kalınlığının artması ile kazığın rijitliği arttığından yanal yüke bağlı deplasman azalmıştır. Deplasmanlar Çizelge EK.1. Et Kalınlığı Etkisi Parametre Tablosu'nda verilmiştir.



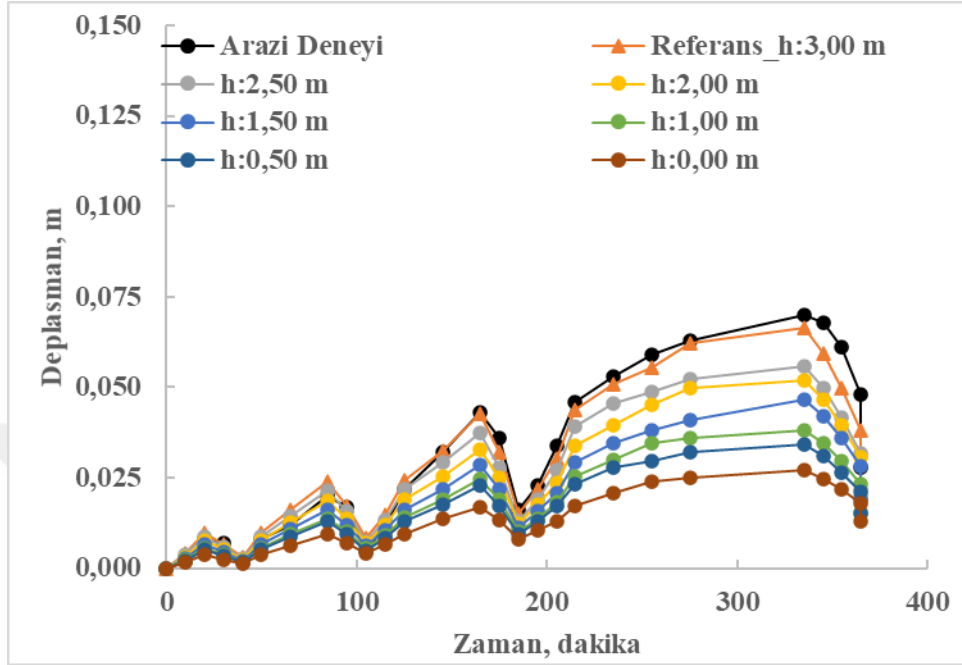
Şekil 4.29. Et kalınlığı Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi



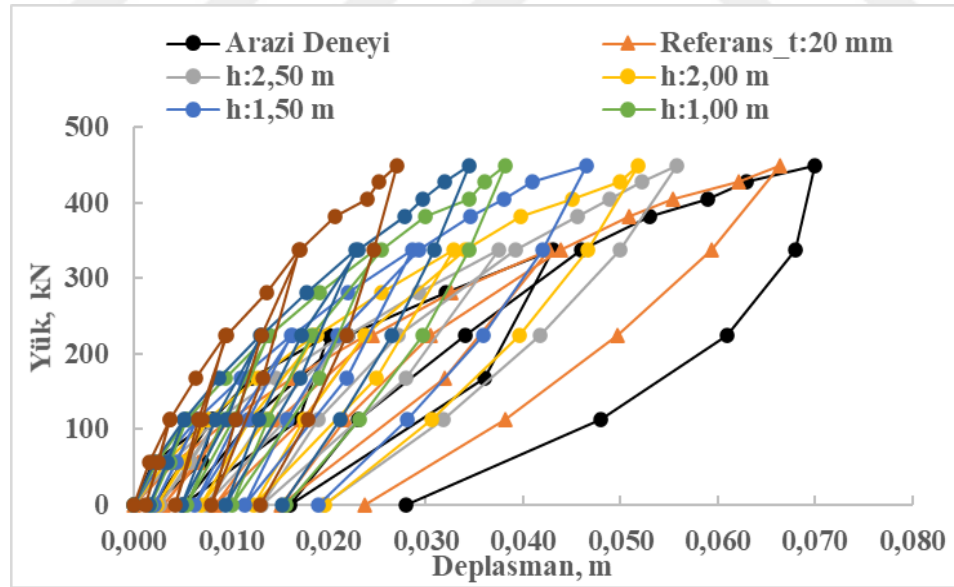
Şekil 4.30. Et kalınlığı Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi

#### 4.5.2. Yük Etkime Noktasının Deplasmana Etkisi

Arazide deney yapılırken dolgu kotu -2.00 m olduğundan ve kazık tepe kotu +1.00 m olduğundan, konsol çalışan kazık boyu 3 metredir. Silindirik çelik kazığa yük etkiye noktası yüksekliği arazide, dolgu üst kotu referans alınarak,  $h$ : +3.00 m iken parametrik çalışmalarda sırasıyla  $h$ :+2.50 m,  $h$ :+2.00 m,  $h$ :+1.50 m,  $h$ :+1.00 m,  $h$ :+0.50 m ve  $h$ :0.00 m alınarak analiz yapılmıştır. Aşağıdaki tablo ve eğrilerde görüldüğü üzere etkiye noktası kotu azalması ile yük kolu uzunluğu azaldığından yanal yüke bağlı deplasman azalmıştır. Detaylar Çizelge EK.2. Yük Etkime Noktası Etkisi Parametre Tablosu'nda verilmiştir.



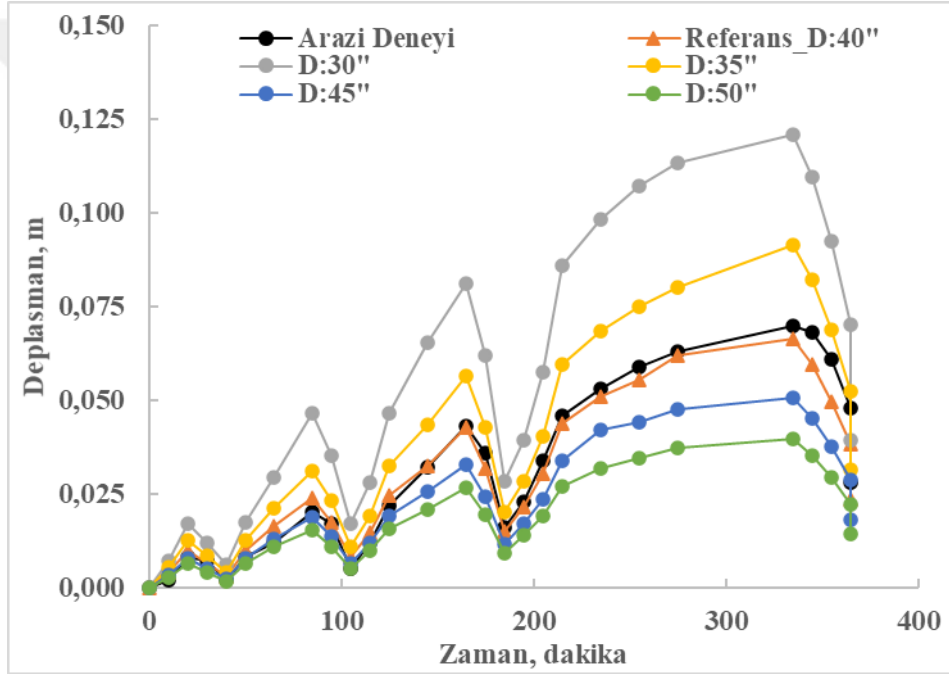
Şekil 4.31. Yük Etkime Noktası Kotu Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi



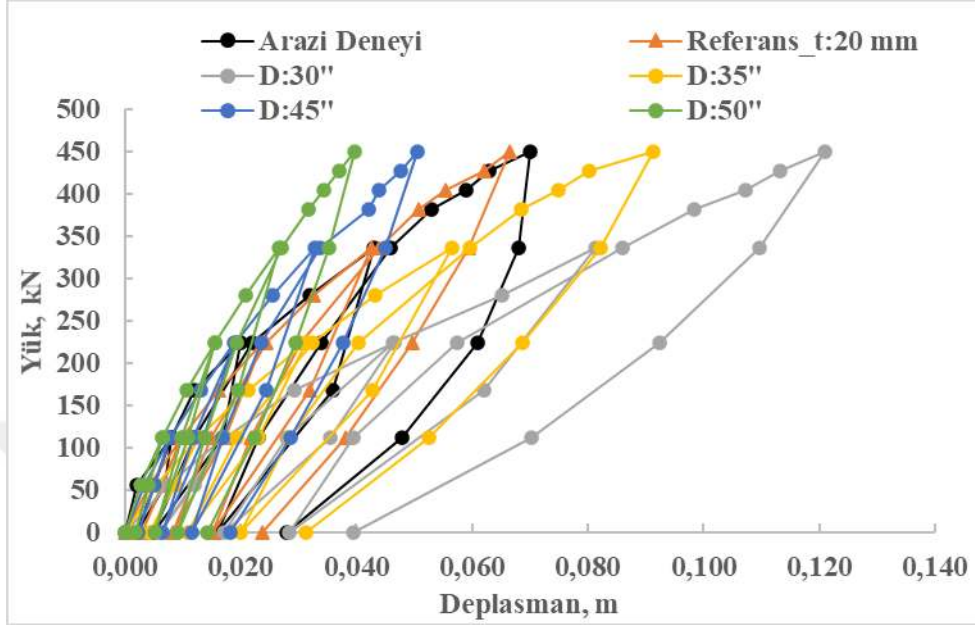
Şekil 4.32. Yük Etkime Noktası Kotu Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi

#### 4.5.3. Kazık Çapının Deplasmana Etkisi

Silindirik çelik kazığın arazideki çapı 1016 mm (40 inç) iken parametrik çalışmalarda sırasıyla D: 762 mm (30 inç), D: 889 mm (35 inç), D: 1143 mm (45 inç) ve D: 1270 mm (50 inç) alınarak analiz yapılmıştır. Aşağıdaki tablo ve eğrilerde görüldüğü üzere kazık çapının artması ile yanal yüke bağlı deplasman azalmış, kazık çapının azalması ile yanal yüke bağlı deplasman artmıştır. Detaylar Çizelge EK.3. Kazık Çapının Etkisi Parametre Tablosu'nda verilmiştir.



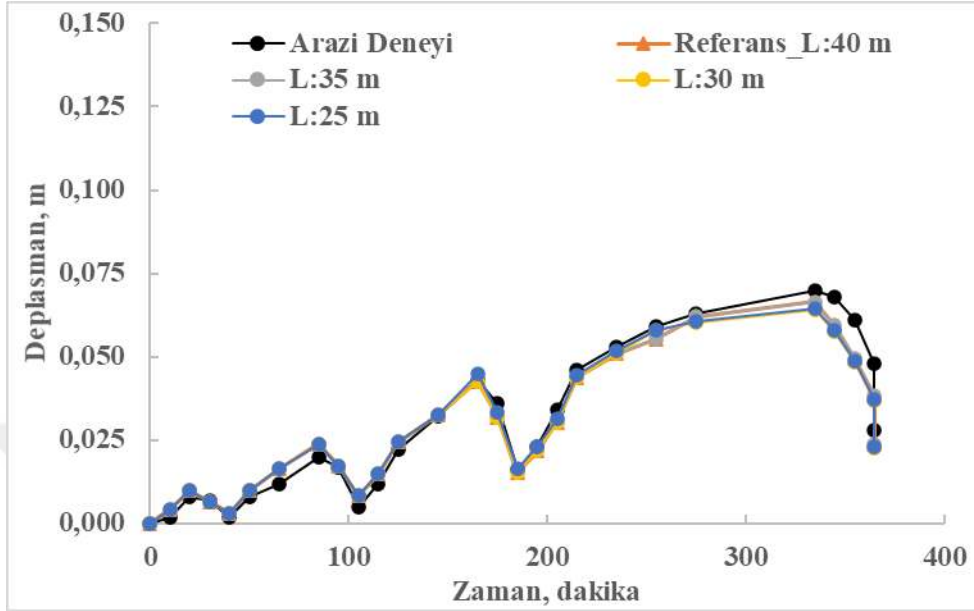
Şekil 4.33. Kazık Çapının Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi



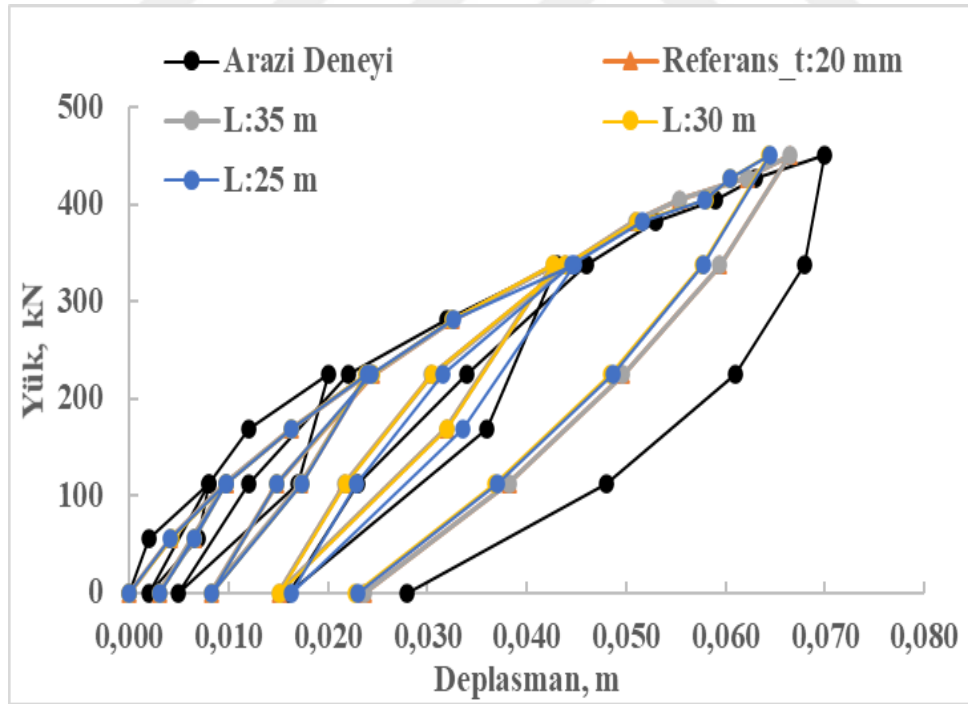
Şekil 4.34. Kazık Çapının Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi

#### 4.5.4. Kazık Gömülme Boyunun Deplasmana Etkisi

Silindirik çelik kazığın arazideki uzunluğu L:40 metre iken parametrik çalışmalarda sırasıyla L:35 m, L:30 m, L:25 m alınarak analiz yapılmıştır. Arazide deney yapılırken dolgu kotu -2.00 m olduğundan ve kazık tepe kotu +1.00 m olduğundan, konsol çalışan kazık boyu 3 metredir. Konsol çalışan kazık boyu değişmeyecek şekilde kazık uzunluğunun değiştirilmesi, kazığın dolgu içindeki gömülme boyunu etkileyecektir. Aşağıdaki tablo ve eğrilerde görüldüğü üzere kazık uzunluğunu değiştirmek yani dolgu içindeki gömülme boyunun kısılması, yanal yüke bağlı deplasmanı etkilememiştir. Detaylar Çizelge EK.4. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Parametre Tablosu'nda verilmiştir.



Şekil 4.35. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Deplasman-Zaman Eğrisi



Şekil 4.36. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Yük-Deplasman Eğrisi



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Çalışmada Mersin Limanı proje sahasında ASTM D 3966 standartına göre yanal yüklenen, 2. test bölgesindeki 1016 mm (40 inç) çapında ve 20 mm et kalınlığındaki çelik silindirik test kazığının fiziksel yerleşimi ve bulunduğu zemin koşulları, PLAXIS 3D paket programında modellenmiştir. Saha deneylerinde etkitilen maksimum yanal yük altında ölçülen yatay deplasman 70 mm, PLAXIS 3D’de aynı fiziksel koşullar altında maksimum yatay deplasman 66 mm elde edilmiştir. PLAXIS 3D model sonuçlarından elde edilen “yük-deplasman” eğrisi ile inşaat sahasında yapılan yanal yükleme testinden elde edilen “yük-deplasman” eğrisi benzerdir.

PLAXIS 3D modeli üzerinde, sahadaki deney ortamının zemin koşulları korunarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu parametrik çalışmaların sonuçları aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

1. Silindirik çelik kazığın et kalınlığı arazide t:20 mm iken parametrik çalışmalarda sırasıyla t:24 mm, t:28mm, t:32 mm ve t:36 mm alınarak analiz yapılmıştır. Maksimum yanal yük altında kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanlar sırasıyla; 57 mm, 51 mm, 47 mm, 43 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, kazık et kalınlığı arttıkça yani kazığın rijitliği arttıkça kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanların azaldığını göstermektedir.
2. Arazide deney yapılırken dolgu kotu -2.00 m olduğundan ve kazık tepe kotu +1.00 m olduğundan, konsol çalışan kazık boyu 3 metredir. Silindirik çelik kazığa yük etkime noktası yüksekliği arazide, dolgu üst kotu referans alınarak, h: +3.00 m iken parametrik çalışmalarda sırasıyla h:+2,50 m, h:+2.00 m, h:+1.50 m, h:+1.00 m, h:+0.50 m ve h:0.00 m alınarak analiz yapılmıştır. Maksimum yanal yük altında kazık tepe noktasındaki yatay

deplasmanlar sırasıyla; 56 mm, 52 mm, 46 mm, 38 mm, 34 mm, 27 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, yük etkime noktası kotu azaldıkça, yani dolgu yüzey kotu moment eksenini olarak düşünüldüğünde yük kolunun uzunluğunun azaltılması, kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanların azalmasına sebep olmuştur.

3. Silindirik çelik kazığın arazideki çapı 1016 mm (40 inç) iken parametrik çalışmalarda sırasıyla D: 762 mm (30 inç), D: 889 mm (35 inç), D: 1143 mm (45 inç) ve D: 1270 mm (50 inç) alınarak analiz yapılmıştır. Maksimum yanal yük altında kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanlar sırasıyla; 121 mm, 91 mm, 51 mm, 40 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar göstermektedir ki, kazık çapının artması kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanların azalmasına, kazık çapının azalması ise kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanların artmasına sebep olmaktadır. Bu durum kazığın rijitliği, kazık çapına bağlı olan atalet ile doğru orantılı olmasıyla açıklanabilir.
4. Konsol çalışan kazık boyu değişmeyecek şekilde kazık uzunluğunun değiştirilmesi, kazığın dolgu içindeki gömülme boyunu etkileyecektir. Silindirik çelik kazığın arazideki uzunluğu L:40 metre iken parametrik çalışmalarda sırasıyla L:35 m, L:30 m, L:25 m alınarak analiz yapılmıştır. Maksimum yanal yük altında kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanlar sırasıyla; 66 mm, 64 mm, 64 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, kazık gömülme boyunun değiştirilmesinin kazık tepe noktasındaki yatay deplasmanlar üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

**5.2. Öneriler**

Tez konusu ile ilgili olarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler aşağıda listelenmiştir.

1. Proje kapsamında farklı test bölgelerinde yanal yükleme testi yapılan kazıklar da değerlendirilecek, farklı çaptaki kazıklar için yeniden bir model oluşturulup parametreler incelenecektir.
2. Farklı projelerdeki yanal yükleme deneyleri ile bu çalışmada bulunan sonuçlar doğrulanabilir.
3. ASTM D 3966 standartı kapsamında yapılan yükleme boşaltma işlemi, bir bakıma tekrarlı yüktür. Bu nedenle, yapılan çalışma kazıkların sismik yükler altındaki tanımlamada başlangıç çalışması olarak kullanılabilir.
4. Farklı projelerde yanal yükleme yapılırken kazık tepe noktasındaki deplasmanlar ile birlikte kazık gövdesine sensörler yerleştirilip yeni modeller üzerinden araştırması yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- Astm D 3966 – 07 Yanal Yükler Altında Derin Temeller İçin Standart Test Yöntemleri, 2017.
- Chik, Z.H., Abbas, J.M., Taha, M.R. and Shafiqu, Q.S.M., 2009. Lateral Behavior of Single Pile in Cohesionless Soil Subjected to Both Vertical and Horizontal Loads Lateral Behavior of Single Pile in Cohesionless Soil Subjected to Both Vertical and Horizontal Loads, European Journal of Scientific Research, Vol.29 No.2, 194-205.
- Helm, J., and Suleiman, M., 2012. Measuring Soil-Structure Interaction on Laterally Loaded Piles With Digital Image Correlation, Full field measurements and identification in Solid Mechanics, Procedia IUTAM 4, 66-72.
- Geoteknik Etd Raporu, Geos Geoteknik ve Sondajcılık Ltd. Şti., 2014
- Kim, B.T. and Yoon, G.L., 2011. Laboratory Modelling of Laterally Loaded Pile Groups in Sand. Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering, Vol. 15, No. 1: 65-75
- Kong, L.G., and Zhang, L.M., 2007. Rate-Controlled Lateral-Load Pile Tests Using a Robotic Manipulator in Centrifuge, Geotechnical Testing Journal, Vol. 30, No. 3, Paper ID GTJ13138
- Manoppo, F.J., 2009. Behaviour of the Ultimate Bearing Capacity of Single Flexible Batter Pile Under Horizontal Loads in Homogeneous Sand, Dinamika TEKNIK SIPIL, Vol. 10 No. 2, 116-119
- Mendiguren, J., Cortés, F., Gómez., X., Galdos, L., 2015. Elastic Behaviour Characterisation of TRIP 700 Steel by Means of Loading–Unloading Tests. Materials Science & Engineering A 634: 147–152.
- Method Statement for Test Procedure for Static Axial Compressive–Static Axial Tensile and Lateral Load Tests of Piles. Mersin Port Development Project Construction of New Container Berth and Civil Infrastructure, 2015.

- Method Statement for Pile Driving. Mersin Port Development Project Construction of New Container Berth and Civil Infrastructure, 2015.
- Muthukkumaran, K., and Krishnan, M.G., 2012. Three-Dimensional Analysis of Piles on Sloping Ground Subjected to Passive Load Induced by Surcharge, International Journal of Engineering and Technology Innovation, Vol. 2, No. 1, 31-47
- Plasto, N., and Arsoy, S., 2014. Designing Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loads Using Simple Methods, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi 16 - 17 Ekim 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Plaxis 3D Reference Manual CONNECT Edition V20, Build 10265
- Rahimi, M.R., and Bargi, K., 2010. Efficient Arrangement of Batter Piles of a Pile-Supported Wharf in Sand, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 15, 729-738
- Salini, U., and Girish M.S., 2009. Lateral Load Capacity of Model Piles on Cohesionless Soil, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 14, 1-11
- Sivaraman, S., and Muthukkumaran, K., 2020. Non-linear performance analysis of free headed piles in consolidating soil subjected to lateral loads, Engineering Science and Technology, an International Journal, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.09.007>
- Suleiman, M.T., Raikch, A., Polson, T.W., Kingston, W.J., And Roth, M., 2010. Measured Soil-Pile Interaction Pressures for Small-Diameter Laterally Loaded Pile in Loose Sand, Advances in Analysis, Modeling & Design, (GSP 199), 1498-1506
- Terzi, N.U., Kılıç, H., and Gültekin, S., 2009. Yanal Yüklü Bir Model Kazığın Kum Ortamındaki Davranışının Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle İncelenmesi, Journal of Engineering Sciences, Vol.15, No.1, 119-127
- Uncuoğlu, E., 2009. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıkların Yatay Yük ve Moment Etkisi Altındaki Davranışlarının Analizi, Doktora Tezi, 277s, Adana

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Gümüş ilköğretim ve lise eğitimini Tarsus'ta tamamladı. 2009 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun olarak lisans eğitimini tamamladı. 2014 yılında askerlik görevini tamamlayarak, özel sektörde inşaat mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.





# **EKLER**



Çizelge EK.1. Et Kalınlığı Etkisi Parametre Tablosu

| ET KALINLIĞI |                  |             |                    |          |             |                    |          |             |                    |          |             |                    |          |             |                    |          |             |                    |          |             |                    |  |
|--------------|------------------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|--|
| Yük Yüzdesi  | Referans t:20 mm |             |                    |          |             |                    | t:24 mm  |             |                    |          | t:28 mm     |                    |          |             | t:32 mm            |          |             |                    | t:36 mm  |             |                    |  |
|              | Yük (kN)         | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] |  |
| 0%           | 0                | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              |  |
| 25%          | 56,25            | 10          | 0,004              | 56,25    | 10          | 0,004              | 56,25    | 10          | 0,004              | 56,25    | 10          | 0,003              | 56,25    | 10          | 0,003              | 56,25    | 10          | 0,003              | 56,25    | 10          | 0,003              |  |
| 50%          | 112,5            | 20          | 0,010              | 112,5    | 20          | 0,009              | 112,5    | 20          | 0,009              | 112,5    | 20          | 0,008              | 112,5    | 20          | 0,007              | 112,5    | 20          | 0,007              | 112,5    | 20          | 0,007              |  |
| 25%          | 56,25            | 30          | 0,007              | 56,25    | 30          | 0,006              | 56,25    | 30          | 0,006              | 56,25    | 30          | 0,005              | 56,25    | 30          | 0,005              | 56,25    | 30          | 0,005              | 56,25    | 30          | 0,004              |  |
| 0%           | 0                | 40          | 0,003              | 0        | 40          | 0,003              | 0        | 40          | 0,002              | 0        | 40          | 0,002              | 0        | 40          | 0,002              | 0        | 40          | 0,002              | 0        | 40          | 0,002              |  |
| 50%          | 112,5            | 50          | 0,010              | 112,5    | 50          | 0,009              | 112,5    | 50          | 0,009              | 112,5    | 50          | 0,008              | 112,5    | 50          | 0,007              | 112,5    | 50          | 0,007              | 112,5    | 50          | 0,007              |  |
| 75%          | 168,75           | 65          | 0,016              | 168,75   | 65          | 0,015              | 168,75   | 65          | 0,015              | 168,75   | 65          | 0,013              | 168,75   | 65          | 0,012              | 168,75   | 65          | 0,012              | 168,75   | 65          | 0,012              |  |
| 100%         | 225              | 85          | 0,024              | 225      | 85          | 0,021              | 225      | 85          | 0,021              | 225      | 85          | 0,019              | 225      | 85          | 0,018              | 225      | 85          | 0,017              | 225      | 85          | 0,017              |  |
| 50%          | 112,5            | 95          | 0,017              | 112,5    | 95          | 0,015              | 112,5    | 95          | 0,015              | 112,5    | 95          | 0,014              | 112,5    | 95          | 0,013              | 112,5    | 95          | 0,012              | 112,5    | 95          | 0,012              |  |
| 0%           | 0                | 105         | 0,008              | 0        | 105         | 0,007              | 0        | 105         | 0,007              | 0        | 105         | 0,007              | 0        | 105         | 0,006              | 0        | 105         | 0,006              | 0        | 105         | 0,006              |  |
| 50%          | 112,5            | 115         | 0,015              | 112,5    | 115         | 0,013              | 112,5    | 115         | 0,012              | 112,5    | 115         | 0,012              | 112,5    | 115         | 0,011              | 112,5    | 115         | 0,010              | 112,5    | 115         | 0,010              |  |
| 100%         | 225              | 125         | 0,024              | 225      | 125         | 0,022              | 225      | 125         | 0,020              | 225      | 125         | 0,020              | 225      | 125         | 0,018              | 225      | 125         | 0,017              | 225      | 125         | 0,017              |  |
| 125%         | 281,25           | 145         | 0,033              | 281,25   | 145         | 0,029              | 281,25   | 145         | 0,026              | 281,25   | 145         | 0,026              | 281,25   | 145         | 0,024              | 281,25   | 145         | 0,024              | 281,25   | 145         | 0,024              |  |
| 150%         | 337,5            | 165         | 0,043              | 337,5    | 165         | 0,037              | 337,5    | 165         | 0,034              | 337,5    | 165         | 0,034              | 337,5    | 165         | 0,031              | 337,5    | 165         | 0,029              | 337,5    | 165         | 0,029              |  |
| 75%          | 168,75           | 175         | 0,032              | 168,75   | 175         | 0,028              | 168,75   | 175         | 0,025              | 168,75   | 175         | 0,025              | 168,75   | 175         | 0,023              | 168,75   | 175         | 0,022              | 168,75   | 175         | 0,022              |  |
| 0%           | 0                | 185         | 0,015              | 0        | 185         | 0,013              | 0        | 185         | 0,012              | 0        | 185         | 0,012              | 0        | 185         | 0,011              | 0        | 185         | 0,010              | 0        | 185         | 0,010              |  |
| 50%          | 112,5            | 195         | 0,022              | 112,5    | 195         | 0,019              | 112,5    | 195         | 0,017              | 112,5    | 195         | 0,016              | 112,5    | 195         | 0,015              | 112,5    | 195         | 0,015              | 112,5    | 195         | 0,015              |  |
| 100%         | 225              | 205         | 0,030              | 225      | 205         | 0,027              | 225      | 205         | 0,024              | 225      | 205         | 0,022              | 225      | 205         | 0,021              | 225      | 205         | 0,021              | 225      | 205         | 0,021              |  |
| 150%         | 337,5            | 215         | 0,044              | 337,5    | 215         | 0,038              | 337,5    | 215         | 0,035              | 337,5    | 215         | 0,035              | 337,5    | 215         | 0,032              | 337,5    | 215         | 0,030              | 337,5    | 215         | 0,030              |  |
| 170%         | 382,5            | 235         | 0,051              | 382,5    | 235         | 0,048              | 382,5    | 235         | 0,041              | 382,5    | 235         | 0,041              | 382,5    | 235         | 0,039              | 382,5    | 235         | 0,035              | 382,5    | 235         | 0,035              |  |
| 180%         | 405              | 255         | 0,055              | 405      | 255         | 0,050              | 405      | 255         | 0,044              | 405      | 255         | 0,044              | 405      | 255         | 0,041              | 405      | 255         | 0,038              | 405      | 255         | 0,038              |  |
| 190%         | 427,5            | 275         | 0,062              | 427,5    | 275         | 0,053              | 427,5    | 275         | 0,047              | 427,5    | 275         | 0,047              | 427,5    | 275         | 0,044              | 427,5    | 275         | 0,041              | 427,5    | 275         | 0,041              |  |
| 200%         | 450              | 335         | 0,066              | 450      | 335         | 0,057              | 450      | 335         | 0,051              | 450      | 335         | 0,051              | 450      | 335         | 0,047              | 450      | 335         | 0,043              | 450      | 335         | 0,043              |  |
| 150%         | 337,5            | 345         | 0,059              | 337,5    | 345         | 0,051              | 337,5    | 345         | 0,045              | 337,5    | 345         | 0,045              | 337,5    | 345         | 0,042              | 337,5    | 345         | 0,038              | 337,5    | 345         | 0,038              |  |
| 100%         | 225              | 355         | 0,050              | 225      | 355         | 0,043              | 225      | 355         | 0,038              | 225      | 355         | 0,038              | 225      | 355         | 0,035              | 225      | 355         | 0,032              | 225      | 355         | 0,032              |  |
| 50%          | 112,5            | 365         | 0,038              | 112,5    | 365         | 0,032              | 112,5    | 365         | 0,029              | 112,5    | 365         | 0,029              | 112,5    | 365         | 0,026              | 112,5    | 365         | 0,024              | 112,5    | 365         | 0,024              |  |
| 0%           | 0                | 365         | 0,024              | 0        | 365         | 0,020              | 0        | 365         | 0,018              | 0        | 365         | 0,018              | 0        | 365         | 0,017              | 0        | 365         | 0,016              | 0        | 365         | 0,016              |  |

Çizelge EK.2. Yük Etkime Noktası Etkisi Parametre Tablosu

[illegible]

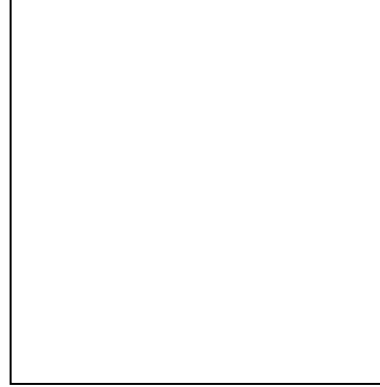
Çizelge EK.3. Kazık Çapının Etkisi Parametre Tablosu

| ÇAPIN ETKİSİ |                |             |                    |                     |          |             |                    |                     |          |             |                    |                     |          |             |                    |                     |          |             |                    |                     |
|--------------|----------------|-------------|--------------------|---------------------|----------|-------------|--------------------|---------------------|----------|-------------|--------------------|---------------------|----------|-------------|--------------------|---------------------|----------|-------------|--------------------|---------------------|
| Yük Yüzdesi  | Referans D:40" |             |                    |                     | D:30"    |             |                    |                     | D:35"    |             |                    |                     | D:45"    |             |                    |                     | D:50"    |             |                    |                     |
|              | Yük (kN)       | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [mm] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [mm] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [mm] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [mm] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [mm] |
| 0%           | 0              | 0           | 0,000              | 0                   | 0        | 0           | 0,000              | 0                   | 0        | 0           | 0,000              | 0                   | 0        | 0           | 0,000              | 0                   | 0        | 0           | 0,000              | 0                   |
| 25%          | 56,25          | 10          | 0,004              | 56,25               | 10       | 0,007       | 56,25              | 10                  | 0,005    | 56,25       | 10                 | 0,003               | 56,25    | 10          | 0,003              | 56,25               | 10       | 0,003       | 56,25              | 10                  |
| 50%          | 112,5          | 20          | 0,010              | 112,5               | 20       | 0,017       | 112,5              | 20                  | 0,013    | 112,5       | 20                 | 0,008               | 112,5    | 20          | 0,008              | 112,5               | 20       | 0,008       | 112,5              | 20                  |
| 25%          | 56,25          | 30          | 0,007              | 56,25               | 30       | 0,012       | 56,25              | 30                  | 0,009    | 56,25       | 30                 | 0,005               | 56,25    | 30          | 0,005              | 56,25               | 30       | 0,004       | 56,25              | 30                  |
| 0%           | 0              | 40          | 0,003              | 0                   | 40       | 0,006       | 0                  | 40                  | 0,004    | 0           | 40                 | 0,002               | 0        | 40          | 0,002              | 0                   | 40       | 0,002       | 0                  | 40                  |
| 50%          | 112,5          | 50          | 0,010              | 112,5               | 50       | 0,017       | 112,5              | 50                  | 0,013    | 112,5       | 50                 | 0,008               | 112,5    | 50          | 0,008              | 112,5               | 50       | 0,006       | 112,5              | 50                  |
| 75%          | 168,75         | 65          | 0,016              | 168,75              | 65       | 0,029       | 168,75             | 65                  | 0,021    | 168,75      | 65                 | 0,013               | 168,75   | 65          | 0,013              | 168,75              | 65       | 0,011       | 168,75             | 65                  |
| 100%         | 225            | 85          | 0,024              | 225                 | 85       | 0,047       | 225                | 85                  | 0,031    | 225         | 85                 | 0,019               | 225      | 85          | 0,019              | 225                 | 85       | 0,016       | 225                | 85                  |
| 50%          | 112,5          | 95          | 0,017              | 112,5               | 95       | 0,035       | 112,5              | 95                  | 0,023    | 112,5       | 95                 | 0,014               | 112,5    | 95          | 0,014              | 112,5               | 95       | 0,011       | 112,5              | 95                  |
| 0%           | 0              | 105         | 0,008              | 0                   | 105      | 0,017       | 0                  | 105                 | 0,011    | 0           | 105                | 0,006               | 0        | 105         | 0,006              | 0                   | 105      | 0,005       | 0                  | 105                 |
| 50%          | 112,5          | 115         | 0,015              | 112,5               | 115      | 0,028       | 112,5              | 115                 | 0,019    | 112,5       | 115                | 0,012               | 112,5    | 115         | 0,012              | 112,5               | 115      | 0,010       | 112,5              | 115                 |
| 100%         | 225            | 125         | 0,024              | 225                 | 125      | 0,046       | 225                | 125                 | 0,033    | 225         | 125                | 0,025               | 225      | 125         | 0,025              | 225                 | 125      | 0,021       | 225                | 125                 |
| 125%         | 281,25         | 145         | 0,033              | 281,25              | 145      | 0,065       | 281,25             | 145                 | 0,043    | 281,25      | 145                | 0,026               | 281,25   | 145         | 0,026              | 281,25              | 145      | 0,021       | 281,25             | 145                 |
| 150%         | 337,5          | 165         | 0,043              | 337,5               | 165      | 0,081       | 337,5              | 165                 | 0,057    | 337,5       | 165                | 0,033               | 337,5    | 165         | 0,033              | 337,5               | 165      | 0,027       | 337,5              | 165                 |
| 75%          | 168,75         | 175         | 0,032              | 168,75              | 175      | 0,062       | 168,75             | 175                 | 0,043    | 168,75      | 175                | 0,024               | 168,75   | 175         | 0,024              | 168,75              | 175      | 0,020       | 168,75             | 175                 |
| 0%           | 0              | 185         | 0,015              | 0                   | 185      | 0,028       | 0                  | 185                 | 0,020    | 0           | 185                | 0,011               | 0        | 185         | 0,011              | 0                   | 185      | 0,009       | 0                  | 185                 |
| 50%          | 112,5          | 195         | 0,022              | 112,5               | 195      | 0,039       | 112,5              | 195                 | 0,028    | 112,5       | 195                | 0,017               | 112,5    | 195         | 0,017              | 112,5               | 195      | 0,014       | 112,5              | 195                 |
| 100%         | 225            | 205         | 0,030              | 225                 | 205      | 0,057       | 225                | 205                 | 0,040    | 225         | 205                | 0,024               | 225      | 205         | 0,024              | 225                 | 205      | 0,019       | 225                | 205                 |
| 150%         | 337,5          | 215         | 0,044              | 337,5               | 215      | 0,086       | 337,5              | 215                 | 0,060    | 337,5       | 215                | 0,034               | 337,5    | 215         | 0,034              | 337,5               | 215      | 0,027       | 337,5              | 215                 |
| 170%         | 382,5          | 235         | 0,051              | 382,5               | 235      | 0,098       | 382,5              | 235                 | 0,068    | 382,5       | 235                | 0,042               | 382,5    | 235         | 0,042              | 382,5               | 235      | 0,032       | 382,5              | 235                 |
| 180%         | 405            | 255         | 0,055              | 405                 | 255      | 0,107       | 405                | 255                 | 0,075    | 405         | 255                | 0,044               | 405      | 255         | 0,044              | 405                 | 255      | 0,034       | 405                | 255                 |
| 190%         | 427,5          | 275         | 0,062              | 427,5               | 275      | 0,113       | 427,5              | 275                 | 0,080    | 427,5       | 275                | 0,048               | 427,5    | 275         | 0,048              | 427,5               | 275      | 0,037       | 427,5              | 275                 |
| 200%         | 450            | 335         | 0,066              | 450                 | 335      | 0,121       | 450                | 335                 | 0,091    | 450         | 335                | 0,051               | 450      | 335         | 0,051              | 450                 | 335      | 0,040       | 450                | 335                 |
| 150%         | 337,5          | 345         | 0,059              | 337,5               | 345      | 0,110       | 337,5              | 345                 | 0,082    | 337,5       | 345                | 0,045               | 337,5    | 345         | 0,045              | 337,5               | 345      | 0,035       | 337,5              | 345                 |
| 100%         | 225            | 355         | 0,050              | 225                 | 355      | 0,092       | 225                | 355                 | 0,069    | 225         | 355                | 0,038               | 225      | 355         | 0,038              | 225                 | 355      | 0,030       | 225                | 355                 |
| 50%          | 112,5          | 365         | 0,038              | 112,5               | 365      | 0,070       | 112,5              | 365                 | 0,052    | 112,5       | 365                | 0,029               | 112,5    | 365         | 0,029              | 112,5               | 365      | 0,022       | 112,5              | 365                 |
| 0%           | 0              | 365         | 0,024              | 0                   | 365      | 0,039       | 0                  | 365                 | 0,031    | 0           | 365                | 0,018               | 0        | 365         | 0,018              | 0                   | 365      | 0,014       | 0                  | 365                 |

Çizelge EK.4. Kazık Gömülme Boyu Etkisi Parametre Tablosu

| KAZIK BOYU (GÖMÜLME DERİNLİĞİ) ETKİSİ |                 |             |                    |                    |          |             |                    |                    |          |             |                    |          |             |                    |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|--------------------|
| Yük Yüzdesi                           | Referans L:40 m |             |                    |                    | L:35 m   |             |                    |                    | L:30 m   |             |                    |          | L:25 m      |                    |
|                                       | Yük (kN)        | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] | Yük (kN) | Zaman [dak] | u <sub>x</sub> [m] |
| 0%                                    | 0               | 0           | 0,000              |                    | 0        | 0           | 0,000              |                    | 0        | 0           | 0,000              | 0        | 0           | 0,000              |
| 25%                                   | 56,25           | 10          | 0,004              |                    | 56,25    | 10          | 0,004              |                    | 56,25    | 10          | 0,004              | 56,25    | 10          | 0,004              |
| 50%                                   | 112,5           | 20          | 0,010              |                    | 112,5    | 20          | 0,010              |                    | 112,5    | 20          | 0,010              | 112,5    | 20          | 0,010              |
| 25%                                   | 56,25           | 30          | 0,007              |                    | 56,25    | 30          | 0,007              |                    | 56,25    | 30          | 0,007              | 56,25    | 30          | 0,007              |
| 0%                                    | 0               | 40          | 0,003              |                    | 0        | 40          | 0,003              |                    | 0        | 40          | 0,003              | 0        | 40          | 0,003              |
| 50%                                   | 112,5           | 50          | 0,010              |                    | 112,5    | 50          | 0,010              |                    | 112,5    | 50          | 0,010              | 112,5    | 50          | 0,010              |
| 75%                                   | 168,75          | 65          | 0,016              |                    | 168,75   | 65          | 0,016              |                    | 168,75   | 65          | 0,016              | 168,75   | 65          | 0,016              |
| 100%                                  | 225             | 85          | 0,024              |                    | 225      | 85          | 0,024              |                    | 225      | 85          | 0,024              | 225      | 85          | 0,024              |
| 50%                                   | 112,5           | 95          | 0,017              |                    | 112,5    | 95          | 0,017              |                    | 112,5    | 95          | 0,017              | 112,5    | 95          | 0,017              |
| 0%                                    | 0               | 105         | 0,008              |                    | 0        | 105         | 0,008              |                    | 0        | 105         | 0,008              | 0        | 105         | 0,008              |
| 50%                                   | 112,5           | 115         | 0,015              |                    | 112,5    | 115         | 0,015              |                    | 112,5    | 115         | 0,015              | 112,5    | 115         | 0,015              |
| 100%                                  | 225             | 125         | 0,024              |                    | 225      | 125         | 0,024              |                    | 225      | 125         | 0,024              | 225      | 125         | 0,024              |
| 125%                                  | 281,25          | 145         | 0,033              |                    | 281,25   | 145         | 0,033              |                    | 281,25   | 145         | 0,033              | 281,25   | 145         | 0,033              |
| 150%                                  | 337,5           | 165         | 0,043              |                    | 337,5    | 165         | 0,043              |                    | 337,5    | 165         | 0,043              | 337,5    | 165         | 0,043              |
| 75%                                   | 168,75          | 175         | 0,032              |                    | 168,75   | 175         | 0,032              |                    | 168,75   | 175         | 0,032              | 168,75   | 175         | 0,034              |
| 0%                                    | 0               | 185         | 0,015              |                    | 0        | 185         | 0,015              |                    | 0        | 185         | 0,015              | 0        | 185         | 0,016              |
| 50%                                   | 112,5           | 195         | 0,022              |                    | 112,5    | 195         | 0,022              |                    | 112,5    | 195         | 0,022              | 112,5    | 195         | 0,023              |
| 100%                                  | 225             | 205         | 0,030              |                    | 225      | 205         | 0,030              |                    | 225      | 205         | 0,030              | 225      | 205         | 0,032              |
| 150%                                  | 337,5           | 215         | 0,044              |                    | 337,5    | 215         | 0,044              |                    | 337,5    | 215         | 0,044              | 337,5    | 215         | 0,045              |
| 170%                                  | 382,5           | 235         | 0,051              |                    | 382,5    | 235         | 0,051              |                    | 382,5    | 235         | 0,051              | 382,5    | 235         | 0,052              |
| 180%                                  | 405             | 255         | 0,055              |                    | 405      | 255         | 0,055              |                    | 405      | 255         | 0,058              | 405      | 255         | 0,058              |
| 190%                                  | 427,5           | 275         | 0,062              |                    | 427,5    | 275         | 0,062              |                    | 427,5    | 275         | 0,060              | 427,5    | 275         | 0,060              |
| 200%                                  | 450             | 335         | 0,066              |                    | 450      | 335         | 0,066              |                    | 450      | 335         | 0,064              | 450      | 335         | 0,064              |
| 150%                                  | 337,5           | 345         | 0,059              |                    | 337,5    | 345         | 0,059              |                    | 337,5    | 345         | 0,058              | 337,5    | 345         | 0,058              |
| 100%                                  | 225             | 355         | 0,050              |                    | 225      | 355         | 0,050              |                    | 225      | 355         | 0,048              | 225      | 355         | 0,049              |
| 50%                                   | 112,5           | 365         | 0,038              |                    | 112,5    | 365         | 0,038              |                    | 112,5    | 365         | 0,037              | 112,5    | 365         | 0,037              |
| 0%                                    | 0               | 365         | 0,024              |                    | 0        | 365         | 0,024              |                    | 0        | 365         | 0,023              | 0        | 365         | 0,023              |

I hereby give permission to allow Ali GÜMÜŞ to use Mersin Port Expansion Project Phase-1 construction calculation reports, test reports, method statements, material submissions, construction photos and construction data on his master thesis at Çukurova University – Civil Engineering Department.





BEKTAŞOĞLU – KULAK (BK) ADI ORTAKLIĞI

16 Ekim 2019

Sayın; Ali GÜMÜŞ

**Konu:** Muvafakat hk

Çukurova Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapan Ali GÜMÜŞ' ün, yapımını üstlendiğimiz Mersin Limanı Genişleme Projesi Faz-1 İnşaat İş'i'nde, işverene sunulmuş bulunan tüm hesap raporlarını, yapım metodlarını, deney sonuçlarını, analizleri ve dataları, işverenin de muavafakati olması kaydıyla, yüksek lisans tezinde kullanmasında Yüklenici firma Bektaşoğlu – Kulak Adı ortaklığı açısından bir sakınca yoktur.

Saygılarımızla;



---

Atatürk BulvarıLokman Apt. Asma Kat 01120 Seyhan / ADANA  
Tel: 0 322 4590363 Fax: 0 322 4573231  
www.bektasoglukulak.com bk@bektasoglukulak.com