

BİLEŞİK KAZIK TASARIMI YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLEN BİR KAZIK YÜKLEME DENEYİNİN SEM İLE GERİ ANALİZLERİ

BACK ANALYSES OF A PILE LOADING EXPERIMENT EVALUATED WITH UNIFIED PILE DESIGN METHOD USING FINITE ELEMENT METHOD

Erdem ÜSTÜNAY¹, Mehmet BERİLGİN²

ÖZET

Kazıklı temeller çoğunlukla oturma problemini önlemek için inşa edilseler de alışagelmış geoteknik kazık tasarımında kuvvete dayalı taşıma gücü hesabı ile temel sistemi projelendirilmektedir. Bu durumun üstesinden gelmek için Bileşik Kazık Tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde kazığın üst yapıdan aktarılan yükler yanında çevre zemininin oturması dolayısı ile meydana gelecek zemin oturmaları dikkate alınarak kazık taşıma kapasitesi hesaplandığından ideal kazık tasarımı yapılabilmektedir. Bu çalışmada bileşik kazık tasarımı yöntemi ile değerlendirilen bir kazık yükleme testinin sonlu elemanlar yöntemi ile geri analizlerinin yapılarak karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bildiri kapsamında dikkate alınan kazık yükleme testi uluslararası katılımlı taşıma gücü ve oturma tahmini anketinde kullanılmış olup kumlu bir tabakaya oturan ve çevresinde kumlu silt ve siltli-killi tabakalar yer alan 400mm çapında ve 25m uzunlukta prekast öngermeli bir kazık üzerinde düşey yükler altında gerçekleştirilmiştir. Kazık yükleme testinden ölçülen şekil değiştirme ölçümlerinden elde olunan normal kuvvetler dikkate alınarak kazık çevre dirençleri ve kazık uç taşıma kuvvetleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler yanında zemin oturmaları hesaplanarak bileşik kazık tasarımı hesapları gerçekleştirilmiştir. Geri analizler Plaxis 2D yazılımı ile nonlineer zemin davranışı ve yükleme adımları dikkate alınarak eksenel simetri model ile yapılmıştır. Betonarme kazık eksenel simetrik sonlu elemanlar modelde katı sonlu eleman, düzlem şekil değiştirme durumunda ise sıralı kiriş sonlu eleman ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerde elde edilen kazık çevre ve kazık uç direnci değerleri kazık yükleme deneyinin bileşik kazık tasarım yöntemine göre gerçekleştirilen geri analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan oturma ve kuvvetler ile kazık düşey kuvvet-deplasman değişimlerinin grafikleri çizilerek bu karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bileşik kazık tasarımı, fore kazık, temel mühendisliği

¹ İnş. Y. Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi FBE Doktora Öğrencisi, erdemustunay@gmail.com

² Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi Emekli Öğretim Üyesi, mberilgen@gmail.com

ABSTRACT

While pile foundations are primarily constructed to mitigate settlement problems, conventional geotechnical pile design typically involves designing the foundation system based on force-based load capacity calculations. Because of this limitation, the Unified Pile Design method has been developed. This method allows for the calculation of pile-bearing capacity considering soil settlements, enabling the design of an ideal pile foundation. This study aims to compare the back analyses of a pile loading test evaluated using the Unified pile design method with the finite element method. The pile loading test considered in this study was conducted on a precast pre-stressed pile with a diameter of 400mm and a length of 25m, placed on a layer of sandy soil surrounded by sandy silt and silty-clay layers. Normal forces obtained from deformation measurements during the pile loading test were used to determine the pile skin friction and pile tip bearing capacities. In addition to these values, soil settlements were calculated, and Unified pile design calculations were performed. The analyses were conducted using the Plaxis 2D software, considering nonlinear soil behavior and loading steps with axial symmetry and plane strain deformation idealizations. Solid finite elements were used for axial symmetric modeling for reinforced concrete piles. The pile skin friction and pile tip resistance values obtained from the analyses were compared with the back analysis results performed according to the Unified pile design method for the pile loading test. Graphs of calculated settlements and forces, as well as pile vertical force-displacement changes, were plotted to compare the results, showing their compatibility with each other.

Keywords: Unified pile design, bored pile, foundation engineering

1. GİRİŞ

Gelişen dünya ekonomisi ve artan nüfus dolayısı ile ihtiyaç duyulan üst yapıların temel yüklerinin artması ve/veya kentin problemlili temel zeminin olduğu bölgelerinin yerleşime açılması kazıklı temellerin kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Temel zeminin taşıma gücü yeterli olsa da oturma ve deformasyon sorununun önüne geçmek için kazıklı temel kullanılması zorunlu olmaktadır. Kazıklı temeller çoğunlukla oturma problemini önlemek için inşa edilseler de alışagelmış geoteknik kazık tasarımında kuvvete dayalı taşıma gücü hesabı ile temel sistemi projelendirilmektedir. Yapı yükleri altında meydana gelecek oturma ve deformasyonlar ise ayrı bir analiz ile tasarım kapsamında yer almaktadır. Yüksek bütçeli projelerde kazıklı temel sistemi zemin tabakaları ile birlikte 3D sayısal modelleme ile analiz edilmekte ve imkanlar dahilinde üstyapı ile birlikte modellenebilmektedir. Bu hesap yaklaşımlarına göre kazık taşıma gücü hesabında oturmalar, oturma-deformasyon analizlerinde ise kazık taşıma kapasitesi göz ardı edilmek durumunda kalınmaktadır. Bileşik Kazık Tasarım yöntemi sayesinde bu durumun üstesinden gelinebilmekte ve bu yöntemde zemin oturmaları dikkate alınarak kazık taşıma kapasitesi hesaplanabildiğinden ideal kazık tasarımı yapılabilmektedir.

Diğer yandan sonlu elemanlar yöntemini esas alan sayısal analizlerde eleman sayısını azaltmak yanında kazıkların tesir kuvvetlerini doğrudan kazık taşıma kapasitelerini dikkate alarak hesaplayan bir boyutlu sonlu elemanlar geliştirilmiştir. Bu sonlu elemanlar 2 ve 3

boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde kazık, ankraj kökü ve zemin çivisi gibi elemanların zeminle etkileşimini kapasiteleri kapsamında modelleyebilmektedir.

Bu çalışmada bileşik kazık tasarımı yöntemi ile değerlendirilen bir kazık yükleme testinin sonlu elemanlar yöntemi ile geri analizlerinin yapılarak karşılaştırılması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen geri analizler Plaxis 2D yazılımı ile nonlineer zemin davranışı ve yükleme adımları dikkate alınarak eksenel simetri model ile yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. BİLEŞİK KAZIK TASARIMI

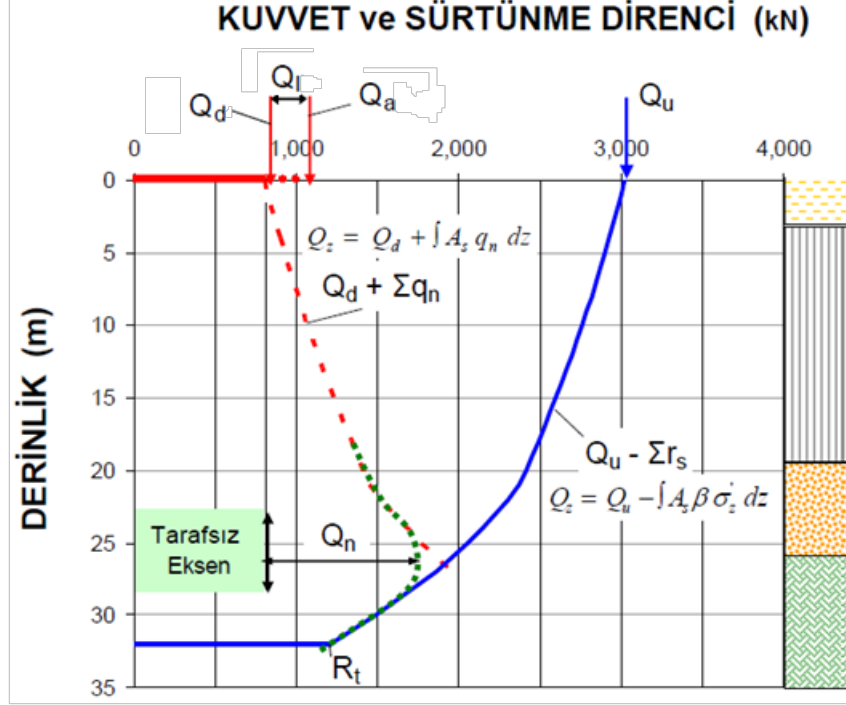
Kazıklı temellerin statik yükler altında geoteknik tasarımı teorik ve/veya ampirik mühendislik yaklaşımları kullanılarak yapılmaktadır. Burada geoteknik tasarımdan kasıt kazığın öngörülen bir kazık geometrisi için belirli bir yük taşıma kapasitesi değerinin belirlenmesidir. Bu değer kazık tasarımında dikkate alınan yönetmelik veya standartlarda önerilen güvenli kazık taşıma gücü ve/veya izin verilen oturmaları sağlayan düşey yük olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda kazık kapasitesi veya güvenli kazık taşıma gücünün belirlenmesi için yaygın uygulama taşıma gücü ve yer değiştirmelerin ayrı hesaplar kullanılmasıdır. Her ne kadar günümüz bilişim imkanları ile gelişmiş elasto plastik zemin davranışı ile kazık-zemin etkileşimini dikkate alan gerilme şekil değiştirme analizleri yapılması mümkün olsa da bu analizler daha çok oturmaların tahmininde kullanılmakta ve kazık taşıma gücü ayrı bir hesapla bulunmaktadır. 2 ve 3 boyutlu gerilme şekil değiştirme analizlerinde kazık taşıma gücünü dikkate alarak zemin yapı etkileşimini modelleyen gömülü eleman kavramı geliştirilse de bir sayısal modelde bunların birim çevre ve uç taşıma dirençlerinin tanımlanması taşıma gücü hesaplarının yapılmasını gerektirmektedir.

Eksenel yüklü kazıkların kuvvete dayalı yöntemler ile analizi için geliştirilen yöntemler limit dengeye dayalı yarı ampirik yöntemler olup kazığın yer aldığı zemin tabakasının yükleme ve drenaj durumu dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan kazık taşıma gücü yöntemleri α , β ve λ yöntemleridir (Poulos, 1980). Yer değiştirmelere dayalı kazık analiz yöntemleri ise kazıkların bir boyutlu modellendiği Winkler hipotezine dayalı yöntemler ile kazıkların 2 veya 3 boyutlu modellendiği elastisite teorisine dayalı yöntemlerdir. Winkler hipotezine dayalı yöntemlerden p-y yöntemi yarı ampirik olarak elastoplastik zemin davranışını dikkate almakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Prakash ve Sharma, 1990). Elastisite teorisine dayalı yöntemler ise kazık ve zemin ortamının birlikte dikkate alındığı denge durumunun diferansiyel ifadesinin çözümüne dayalı olup karmaşıklığı dolayısı ile sayısal çözüm yöntemlerinden biri ile yapılabilmektedir. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemi en fazla tercih edilen sayısal çözüm yöntemleridir.

Tek kazık veya çoklu kazık grupları üzerinde desteklenen kazıklı temellerin yük ve oturma tasarımı Fellenius tarafından önerilen bileşik kazık tasarım yöntemidir. Bu yöntemde enstrumante edilen bir kazık yükleme deneyi ölçüm verileri kullanılmakta ve aşağıda verilen hesap adımları izlenerek kazık tasarımı yapılmaktadır.

İlk olarak zemin profili belirlenir. İkinci aşamada kazık çevresi ve uç taşıma güçleri hesaplanır. Üçüncü aşamada Şekil 1'de görüldüğü şekilde belirlenen taşıma gücü değerleri kullanılarak kazığa uygulanan yük altında yük transferi ve çevre sürtünmesi eğrileri çizilir.

Kazık çevresinin taşıma gücü hesabında β yöntemi tercih edilir (Fellenius, 2024). Bu yaklaşımda çevre zeminin kazığa uyguladığı aşağı çekme kuvvetleri (dragforces) dikkate alınmaktadır. Buna göre kazığa etkiyen maksimum kuvvet proje yükünden aktarılabilecek yük olmayıp bu yüke ilave zeminin aşağı çekme kuvvetidir (Şekil 1).



Şekil 1. Yük-transfer ve sürtünme eğrileri (Fellenius, 2024)

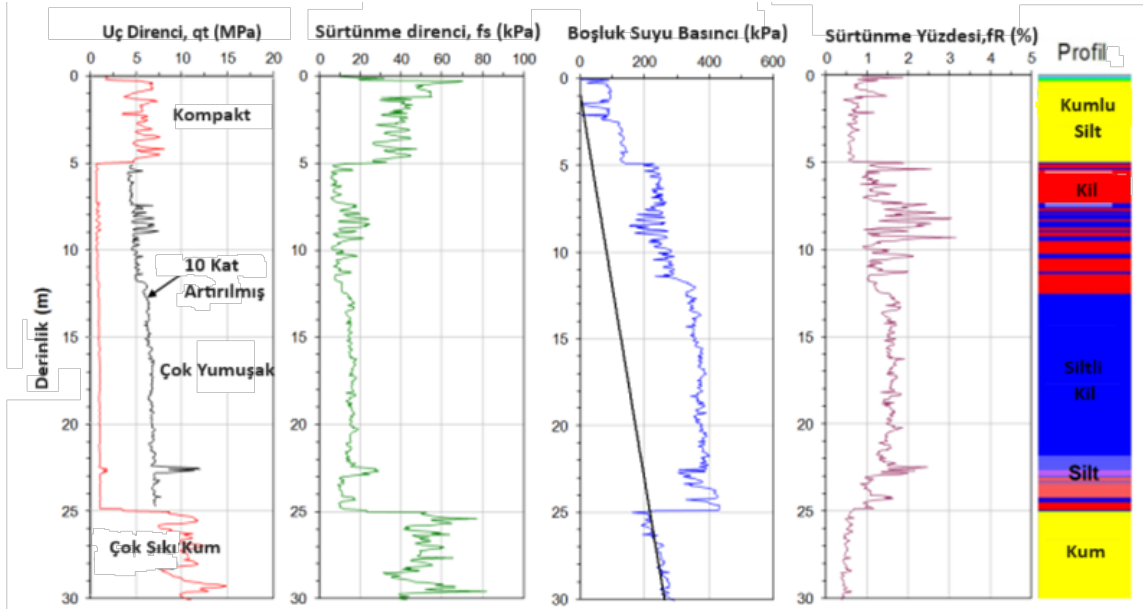
Güvenli bir tasarım için kazığa etkiyen maksimum yükün, uygun bir güvenlik faktörü ile kazığın yapısal dayanımından yeterince küçük olması gerekir. Buna göre maksimum yükün, tarafsız eksen konumunun, pozitif çevre direnci ile negatif çevre direncinin geçiş bölgesinin birleştiği noktanın bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca tarafsız eksen, faktörsüz (azaltılmamış veya artırılmamış) parametreler ve kuvvetler kullanılarak belirlenmelidir. Kazıktan aktarılan kuvvetlerin hesaplanmasında kazık başı yükü olarak üst yapı zati ağırlıkları yanında bir miktar hareketli yük alınması tavsiye edilir (Fellenius, 2024). Bunun nedeni servis yükleri uygulanması aşamasında çevre zeminin drenajını tamamlamasıdır. Bu aşamadan sonra kazık çevresindeki zemin tabakalarının derinlikle oturmaları hesaplanır ve derinlik-oturma grafiği çizilir. Zemin oturmalarının hesabında kazık inşası öncesi yapılan yüzey dolgusu ve yeraltı su seviyesinin inmesinden kaynaklanan gerilme artışları dikkate alınır. Sonrasında kazık tepesi ve uç noktasında kazık yükleme deneyinde dikkate alınan yükleme durumu için ölçülen oturmalar belirlenir. Oturmanın, izin verilen farklı oturma dikkate alınarak, desteklenen yapının yapısal tasarımının izin verdiği maksimum değeri aşmadığının doğrulanması gerekir. Taraflıksız düzlemin konumunun kazık alt ucu hareketinin bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Analiz, yük ve direncin bilinen (veya 'bilgilendirilmiş' varsayımlarla belirlenen veya tahmin edilen) dağılımlarının kullanılmasını gerektirir. Daha sonra, tarafsız eksen konumu, kazık ucu yükü-hareket tepkisinden (q - z fonksiyonu veya sayısal analiz ile) belirlenebilir ve kazık uç kuvveti ile bu seviyedeki zemin ile arasında bir uyum kurulabilir. Analizlerde oturmalar dikkate alındığından kuvvetler faktörsüzdür.

3. KAZIK YÜKLEME DENEYİ

Bu bildiriye göz önüne alınan kazık yükleme deneyi Felleinus (2021) tarafından yapılan bir çalışmadan elde edilmiş olup Kanada'da yapılmıştır. Bu deneyde 40cm çaplı betonarme prekast kazık, yüzeyde silt karışımları ve altında yumuşak-orta katı kil tabakaları bulunan arazide 25m derinlikte yer alan çok sıkı kum tabakasına oturtulmuştur (Şekil 2).

Test kazığı şekil değiştirme ölçerle donatılmıştır. Kazık betonunun mukavemeti 50 MPa olarak belirtilmiştir. Deney kazığı, deneyden yaklaşık bir ay önce 25 m gömme derinliğine çakılmıştır. Amaçlanan proje için kazıklar deney kazığı ile aynıdır ve merkezden merkeze 3 çap aralıklarda yerleştirilmiştir.

Kazık yükleme deneyinin gerçekleştiği sahada ayrıntılı zemin araştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan CPT deneylerinin sonuçları Şekil 2'de gösterilmiş olup arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde olunan zemin tabakalaşması ve zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



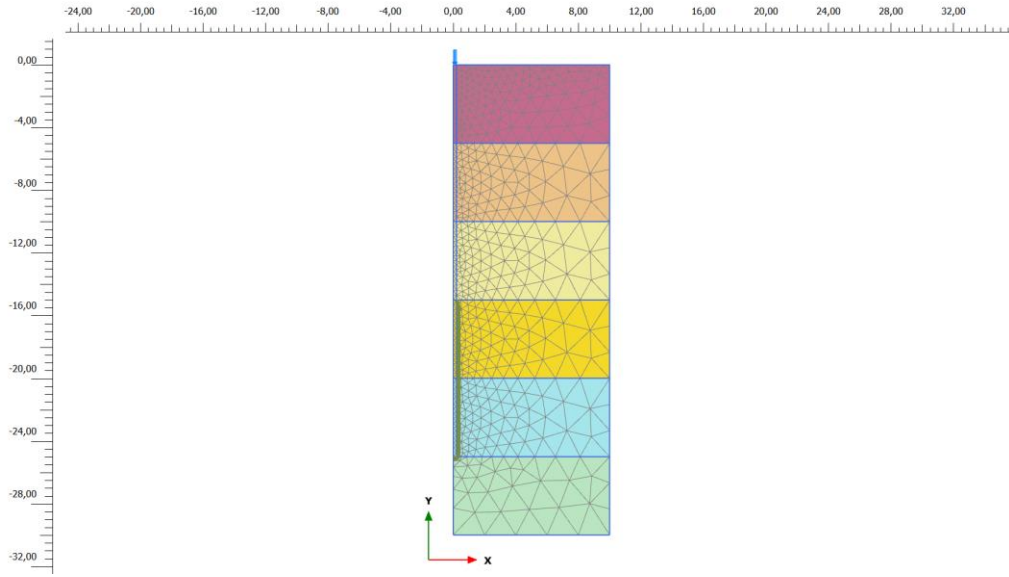
Şekil 2. Arazi CPT deneyi verileri

Tablo 1. Zemin Parametreleri (Felleinus, 2021)

| Derinlik (m) | Zemin Türü (-) | Birim Hacim Ağırlık (γ (kg/m ³)) | Ön konsolidasyon Basıncı (σ_p' (kPa)) | Sıkışma modülü (m (-)) | Tekrar sıkışma modülü (m _r) |
|--------------|----------------|--|---|------------------------|---|
| 0-5 | Siltli Kum | 1,900 | 0 | 180 | |
| 5-10 | Kil | 1,600 | 0 | 15 | |
| 10-15 | Kil | 1,600 | 0 | 20 | |
| 15-20 | Kil | 1,600 | 10 | 30 | 300 |
| 20-25 | Kil | 1,600 | 30 | 30 | 300 |
| 25-30+ | Kum | 2,100 | 100 | 300 | 300 |

4. SAYISAL ANALİZLER

Bildiri kapsamında dikkate alınan kazık yükleme deneyi sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek geri analizleri yapılmış ve bu geri analizlerle kalibre edilen sayısal model ile birleştirilmiş kazık tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde olunan sonuçlar Fellenius (2021) tarafından q-z ve t-z yaklaşımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizler sonlu elemanlar yöntemi ile ticari yazılım paketi Plaxis 2D ile gerçekleştirilmiştir. Eksenel simetri idealizasyonu ile 2B gerçekleştirilen sayısal analizler için oluşturulan modelin geometrisi, sınır koşulları ve sonlu elemanlar ağı Şekil 3'de verilmiştir. (Şekil 6)



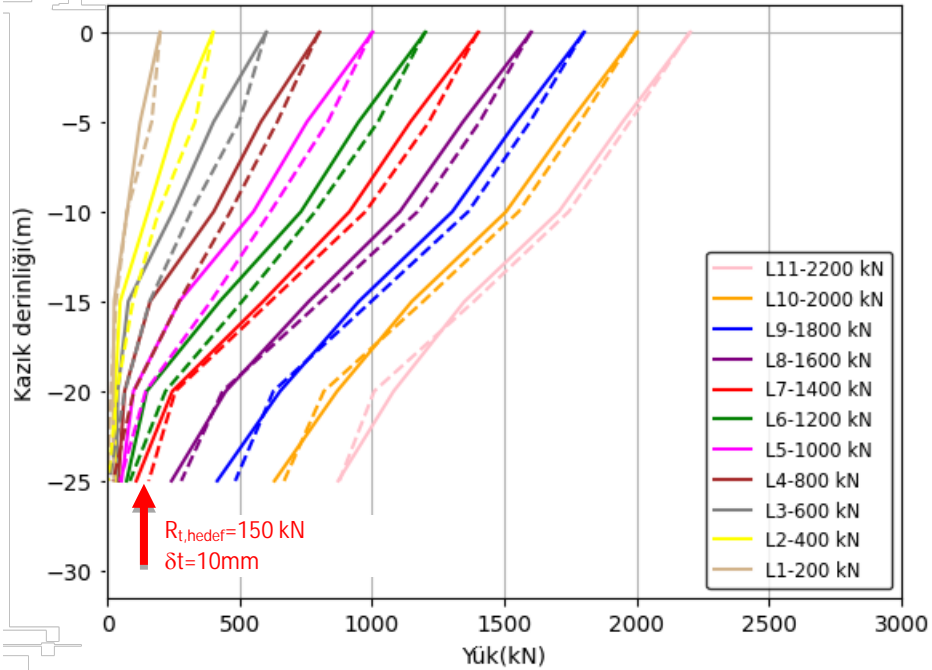
Şekil 3. Sayısal model ve sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar analizlerde zemin tabakalarının yük altında deformasyon davranışı elasto-plastik olarak modellenmiş ve bunu gerçekleştirmek için Hardening Soil Model bünye modeli kullanılmıştır. Bu bünye modeli zeminin deformasyon davranışını yükleme boşaltma durumunu hacimsel ve deviatorik yükleme altında deformasyon davranışını dikkate aldığından yük altındaki zemin davranışını gerçeğe oldukça yakın hesaplanmasını mümkün kılmaktadır (Schanz vd. 1999). Kazık yükleme deneyinin geri analizlerinde kil tabakalarının drenaj davranışı "Undrained A" yaklaşımı ile dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımda zemin iskeleti ve zemin suyu bütünlük malzeme olarak dikkate alınmaktadır. Analizlerde dikkate alınan malzeme parametreleri Tablo 2'de verilmiş olup zemin araştırmalarına dayalı çıkarılmış Tablo 1'deki parametrelerden belirlenmiştir.

Tablo 2. Sayısal Analizlerde Kullanılan Zemin Parametreleri

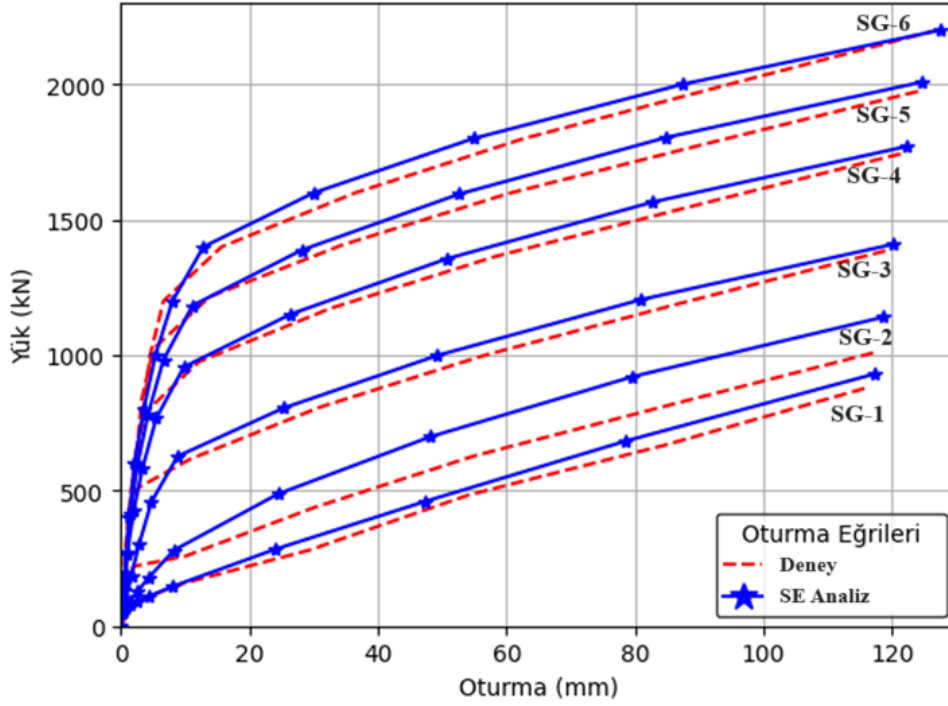
| Parametre | Sembol | Birim | Siltli Kum | Kil-1 | Kil-2 | Kil-3 | Kil-4 | Kum |
|-------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Malzeme modeli | | | Hardening Soil | | | | | |
| Birim Hacim Ağırlık | γ | kN/m ³ | 19 | 16 | 16 | 16 | 16 | 21 |
| Kohezyon | c' | kPa | 10 | 15 | 25 | 25 | 2 | 1 |
| Kayma muk. açısı | ϕ' | ° | 32 | 29 | 29 | 29 | 14 | 36 |
| Dilatasyon açısı | ψ | ° | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| Sekant modülü | E_{50}^{ref} | MPa | 40.0 | 6.0 | 7.5 | 7.0 | 2.5 | 33 |
| Sıkışma modülü | E_{ode}^{ref} | MPa | 40.0 | 6.0 | 7.5 | 7.0 | 2.5 | 33 |
| Yükleme-boşaltma modülü | E_{ur}^{ref} | MPa | 120.0 | 60.0 | 75.0 | 70.0 | 20.0 | 99 |
| Poisson Oranı | ν | - | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Referans gerilme | p_{ref} | kPa | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Geri analizlerde deney sırasında uygulanan ardışık her bir yük kademesi altında sonlu elamanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen kazık yük transfer değerleri deneyden şekil değiştirme ölçümlerinden belirlenenlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te verilen bu karşılaştırmalar analizlerden elde edilen değerlerin ölçümlerden elde edilen değerlere çok yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Kazık yükleme deneyi ve sayısal analizlerden elde edilen kazık yük transferi diyagramları

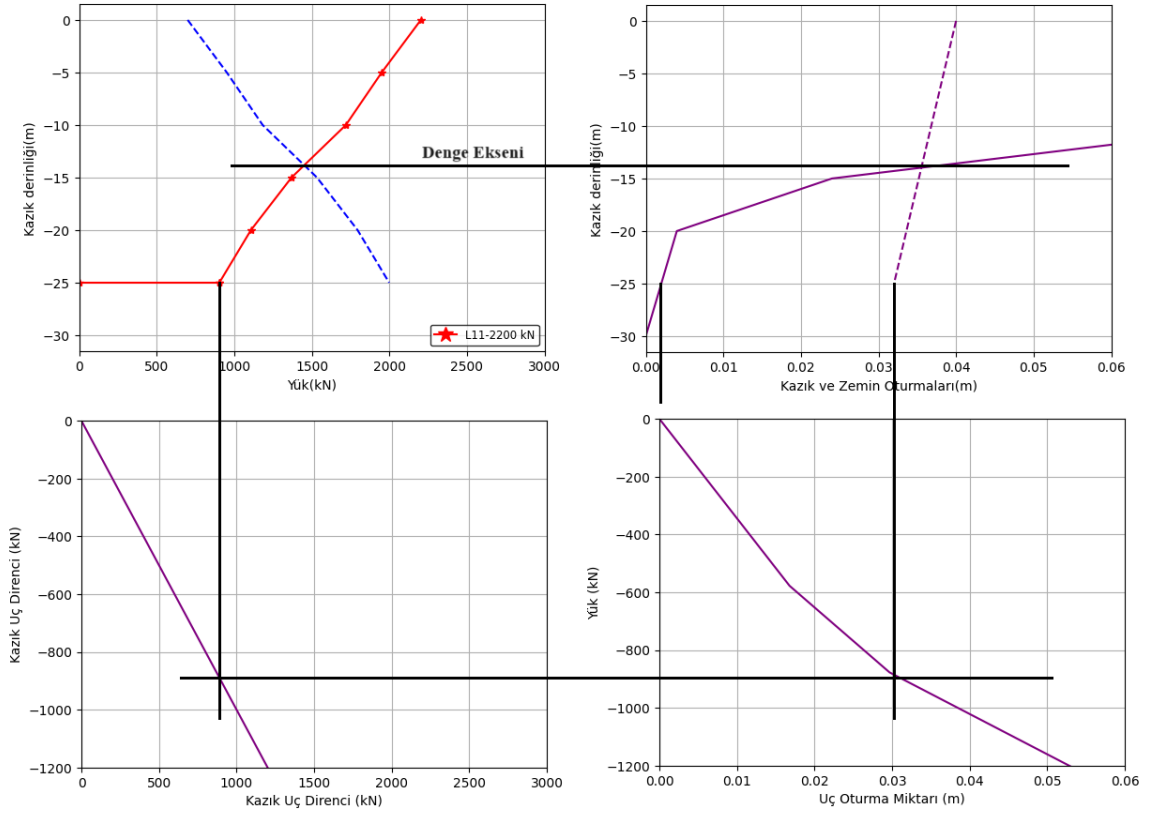
Şekil 4'te gösterilen kazık boyunca hesaplanan kazık dirençleri ile bunların bulunduğu seviyedeki oturmaların değişimi Şekil 5'te deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te verilen bu yük düşey deplasman eğrilerinden en alttaki q-z değerleri ise t-z eğrilerini göstermektedir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi elasto-plastik sonlu elemanlar analizlerden elde edilen t-z eğrileri ile q-z eğrisi deney sonuçlarından elde edilenlere oldukça yakındır.



Şekil 5. Kazık deneyinde farklı seviyelerde belirlenen yük oturma değişiminin sayısal analizlerle karşılaştırılması

Kazık tasarımı için 10 mm kazık ucu deplasmanı dikkate alındığında Şekil 4'te verilen kazık yük transfer eğrilerinden L7 yüklemesinin dikkate alınması uygun düşmektedir. Bu yükleme durumunda kazık başı 1400kN olup uç direnci 150kN mertebelerindedir. Buna göre 1400 kN yük altında kazık kapasitesi uzun dönem için Şekil 6 (a)'da gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bu yük altında kazık boyunca meydana gelen uzun dönem oturmalar ile kazık inşasından önce zemin tabakalarında 15kPa sürşarj ve yeraltı suyunun 1.0m indirilmesinden dolayı meydana gelen oturmaların derinlikle değişimi sayısal analizler ile hesaplanarak Şekil 6(b)'deki eğriler elde olunmuştur. Şekil 6(a) ve (b)'den görüldüğü gibi nihai kazık direnci eğrisi ile kazık yük transfer eğrisi ve zemin oturma eğrisi ile kazık oturma eğrileri aynı seviyede kesişmektedir. Bu seviye tarafsız düzlem veya kuvvet ve oturma dengesi olarak tanımlanmaktadır (Fellenius, 2021). Tarafsız düzlem dikkate alınan yükleme durumuna göre değişmektedir.

Bileşik kazık tasarımı için önerilen kazık uç direnci ile oturmaların grafikleri Şekil 6(c) ve (d) gösterildiği şekilde çizdirilmiştir. Oturma grafiklerinden elde olunan tarafsız eksenin Şekil 6(c) ve (d)'ye uzantılarının kazık uç direnci ile kesişmesi bu tasarım yaklaşımının gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 6. Bileşik Kazık Tasarım Yöntemi ile düşey yüklü tek kazıkta oturma hesabı

3. SONUÇLAR

Sayısal analizler gerilme şekil değiştirme analizlerine dayalı olmasına rağmen kazıkların tasarımı için yapılan sayısal analizlerde genellikle oturmalar ile yetinilmekte ve kazık tasarımında kazık taşıma gücü klasik hesaplar ile belirlenmektedir. Bileşik Kazık Tasarım yönteminde üstyapıdan gelen yüklerin oluşturduğu zemin oturmaları dikkate alınarak bir kazık taşıma kapasitesi hesaplanabildiğinden ideal kazık tasarımı yapılabilmektedir. Bu tespitler ışığında sayısal analizlerin sonuçları bileşik taşıma gücü yöntemi ile değerlendirilerek ideal kazık tasarımına ulaşılmaktadır.

Bu bildiri kapsamında göz önüne alınan bir kazık yükleme deneyinin sonlu elemanlar yöntemi ile elastoplastik malzeme davranışı dikkate alınarak yapılan geri analizlerinden elde edilen sonuçlar bileşik kazık taşıma gücü yöntemi ile değerlendirilmiştir. Yapılan geri analizlerden belirlenen kazık çevre ve uç dirençleri ile oturmalar kazık yükleme deneyi ölçüm verilerinden elde olunanlara oldukça yakındır. Buna göre bir kazık yükleme deneyi ölçüm verileri ile kalibre edilen sayısal model malzeme parametreleri kullanılarak farklı yükleme koşullarında kazık davranışı sayısal analizler ile belirlenebilir. Sayısal modelde kazık ağırlığı, zemininin elastoplastik davranışı drenaj durumu ile birlikte dikkate alındığından daha gerçekçi kazık davranışına dayanan tasarımlara ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- Fellenius, B.H., 2024. Basics of foundation design. Electronic Edition, www.Fellenius.net, 568 p.
- Fellenius, B.H., 2021. Results of an instrumented static loading test. Application to design and compilation of an international survey. Journal of the Deep Foundation Institute, 15(1) 71-87.
- Fellenius, B.H., 1988. Unified design of piles and pile groups. Transportation Research Board, Washington, TRB Record 1169, pp. 75-82.
- Janbu, N. (1970). Method of settlement computation for various types of soils. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7(3), 201–206. doi:10.1007/bf01704632.
- PLAXIS 2D (Software). (2020). PLAXIS BV. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.
- PLAXIS 2D Material Models Manuals. (2018). PLAXIS BV. Delft, The Netherlands: P.O. Box 572, 2600 AN.
- Poulos, H. G ve Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. New York : Wiley
- Prakash, S. & Sharma, H. D. 1990. Pile Foundations in Engineering Practice. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc
- Python version 3 (Programming Language). The Python Software Foundation.
- Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999) Formulation and verification of the Hardening-Soil Model, Conference: Beyond 2000 in Computational geotechnics, June, Amsterdam

SEMBOL LİSTESİ

| Sembol | Açıklama | Sembol | Açıklama |
|----------------|------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Qd | Kazığa etkiyen ölü yük | Q _n | Tarafsız eksenindeki sürtünme kuvveti |
| As | Kazık yüzey alanı | q _n | Birim negatif çevre sürtünmesi |
| SEM | Sonlu Elemanlar Metodu | Q _l | Hareketli Yük |
| Q _a | izin verilen yük | | |