Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1) 245-258 2025
Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 6(1) 245-258 2025
ISSN: 2687-2315 / E-ISSN: 2757-7686

Ankrajlı Fore Kazıklı İksa Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve İnklinometre Ölçümleri ile Karşılaştırılması

Aslı SAĞLAM[1], Saeid ZARDARİ[1*]

[1]İstanbul Okan Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: saeid.zardari@okan.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 27.10.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 23.03.2025

Öz

İnşaat projelerinde derin kazıların yapılması, günümüzde çeşitli faktörler nedeniyle kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu tür kazılarda zemin stabilitesini sağlamak amacıyla iksa sistemleri kullanılmakta olup, özellikle eğimli arazilerde, kayma ve göçme riski taşıyan zeminlerin korunması ve bodrum katlı yapıların temellerinin güvenli bir şekilde yerleştirilmesi için oldukça büyük öneme sahiptir. Bu çalışma, ankrajlı fore kazıklı derin kazı destekleme sisteminin etkin kullanımını ve zemin deformasyonlarının izlenmesinin önemini incelemektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile modellenen sistemdeki potansiyel deformasyonlar, saha inklinometre ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Zemin verileri, raporlardan ve laboratuvar deneylerinden alınarak belirlenen parametrelerle tasarımda kullanılmış, iksa sistemi PLAXIS programı üzerinden modellenmiştir. Zeminin malzeme modelleri oluşturulmuş ve yatay deformasyonlar ile saha ölçümleri arasındaki farkların sebepleri araştırılmış, bu farkların nedenleri geri analizler aracılığıyla ortaya konulmuştur. Sayısal analiz ve saha ölçümleri, iksa sisteminin yatay deformasyonları etkin bir şekilde kontrol altında tuttuğunu ve güvenli bir tasarım sağladığını ortaya koymuştur. İnklinometre ölçümleri, deformasyonların izlenmesi konusunda önemli bir doğrulama aracı olmuştur. Elde edilen bulgular, derin kazı uygulamalarında iksa sistemlerinin başarısını ve zemin parametrelerinin tasarımda ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Sonuçlar, iksa sistemlerinin tasarımında ve inşaat sürecinde güvenliği artıran önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ankraj, inklinometre, yatay deplasman, sonlu elemanlar yöntemi, fore kazık

Analysis of Anchored Bored Pile Shoring Systems Using the Finite Element Method and Comparison with Inclinometer Measurements

Abstract

In construction projects, deep excavations have become unavoidable due to various factors. To ensure soil stability in such excavations, shoring systems are used, which are particularly important for protecting slopes and preventing the collapse of soils prone to sliding and settlement, especially in sloped terrains, as well as for the safe placement of foundations for basement structures. This study examines the effective use of anchored bored pile shoring systems and the importance of monitoring soil deformations. Potential deformations in the system, modeled using the Finite Element Method (FEM), were compared with inclinometer measurements taken during field applications. Soil parameters, determined from reports and laboratory experiments, were incorporated into the design, and the shoring system was modeled using the PLAXIS software. Material models for the soil were created, and the causes of the differences between calculated horizontal deformations and field measurements were investigated through back-analysis. The numerical analysis and field measurements showed that the shoring system effectively controlled horizontal deformations and provided a safe design. Inclinometer measurements proved to be an important verification tool for monitoring deformations. The findings emphasize the success of shoring systems in deep excavation applications and highlight the significance of soil parameters in design. The results offer valuable insights that enhance safety during the design and construction process of shoring systems.

Keywords: Anchor, inclinometer, horizontal displacement, finite element method, bored pile

Cite as;
Sağlam, A., Zardari, S. (2025). Ankrajlı Fore Kazıklı İksa Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve İnklinometre Ölçümleri ile Karşılaştırılması. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 245-258. Doi: 10.53501/rteufemud.1591291

1. Giriş

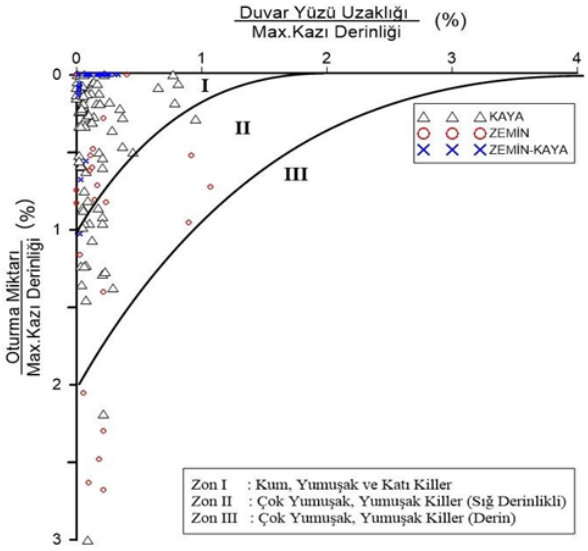
Derin kazıların stabilitesini sağlamak için tasarlanan iksa sistemleri, çeşitli seviyelerde deformasyona uğrayabilir. Bu deformasyonlar hem iksa sisteminin bütünlüğünü hem de çevredeki yapıların güvenliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, derin kazılarda uygun mühendislik tasarımlarının yapılması ve sistem davranışının doğru bir şekilde öngörülmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın temel katkısı, ankrajlı fore kazıklı iksa sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların, saha uygulamalarında gerçekleştirilen inklinometre ölçümleriyle karşılaştırılmasıdır. Mevcut literatürde, benzer sistemlerin analizleri genellikle teorik hesaplamalarla sınırlı kalmış, sahada yapılan ölçümlerin doğrulama sürecine dahil edilmesi ihmal edilmiştir. Bu çalışma, teorik modelleme ile saha verilerini bir araya getirerek iksa sistemlerinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve uygulamada karşılaşılan farklılıkların nedenlerini anlamaya katkı sağlamaktadır.

2. Literatür Araştırması

Derin kazı destekleme sistemlerinde meydana gelen deplasmanlar ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda öncelikle ampirik bağıntılar kullanılmış, daha sonra sonlu elemanlar yöntemi olan yazılımlar ile nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Bu nümerik çalışmalar sayesinde deplasmana etki eden parametreler belirlenmiştir.

Peck (1969), derin kazı destek sistemi tasarımı için yaptığı çalışmalarda, yanal hareketleri ve kazı arkasındaki zemin oturmalarını incelemiştir. Kazı arkasında oluşan oturma profillerini 3 farklı bölgeye ayırmış ve bu zonları Şekil 1'de sunmuştur.



Şekil 1. Oturma miktarının kazı destekleme sistemine göre değişimi (Peck 1969)

Figure 1. *Change in settlement amount based on excavation support systems (Peck 1969)*

Zemin koşulları, üç bölge tanımlanarak ana etki faktörü olarak belirlenmiştir. Oturmalar için, bölge I'de (kum ve yumuşak-sert kil) düşey deformasyonun kazı derinliğinin %1,0'inden daha az, bölge III'te (önemli derinliğe kadar çok yumuşak-yumuşak kil) düşey deformasyonun, kazı derinliğinin %2,0'sinden daha fazla olduğu, bölge 2'de ise düşey deformasyonun kazı derinliğinin %1,0' ile %2,0'si arasında bir değerde olduğu görülmüştür. Yumuşak ve çok yumuşak zeminlerde, zemin yüzeyindeki oturmaların duvar yüzü uzaklığının, kazı derinliğinin yaklaşık dört katına ulaşabilirken, kum ve kilde oturmaların boyutu kazı derinliğinin iki katı ile sınırlıdır. Peck'in yaptığı araştırmalar sonucunda, zeminin cinsi ve kazının derinliğinin kazı arkasında oluşan oturma miktarlarında önemli bir rol olduğunu vurgulamıştır.

Goldberg vd. (1976), yatay destek sistemlerinin tasarımları için maksimum yatay hareketleri, maksimum zemin oturmalarını ve kazının arkasında kalan yüzeyin oturma profilinin şeklini araştırmak için vaka analizlerinden ve ölçümlerinden aldığı bilgileri kullanmışlardır. Böylece zemindeki oturmaların ve deformasyon değerlerinin, kazı derinliği ve zemin cinsine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Bulunan sonuçlara göre, kum, çakıl ve katı-sert kil zeminlerde yapılan

kazılarda, yatay destek sistemi yanal hareketlerinin, kazı derinliğinin %0,4 'ünden daha az olduğu görülmüştür. Yumuşak zeminlerde ise yanal hareketlerin, kazı derinliğinin ortalama %1'i civarında olduğu görülmüştür. Mana ve Clough (1981), parametrik sonlu elemanlar analizlerini ve saha performanslarını kullanarak kil zemindeki destekli kazıların davranışları üzerinde araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, 11 farklı kazı yatay deformasyon gözlem sonucuna göre maksimum yatay deformasyon miktarının kazı tabanı kabarması güvenlik faktörü ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Buldukları sonuçlara göre, kazı tabanı güvenlik faktörünün 3,5'tan büyük olması durumunda, yatay deformasyon, kazı yüksekliğinin %0,25'i ile %0,5'i arasında kalmıştır. Sistem rijitliğini arttırmanın destekli kazıların hareketini azalttığını bulmuşlardır. Clough ve O'Rourke (1990), vaka analizlerinden yola çıkarak derin kazıların sebep olduğu hareketleri ve yer değiştirmeleri araştırmışlardır. Aynı zamanda kazının aşırı olmasının zemin ve duvar oturmalarında önemli artışlara neden olabileceğini vurgulamışlardır. Farklı zeminlerde kazı civarındaki oturma dağılımının belirlenebilmesi için kumlar, katı-çok sert killer ve yumuşak-orta killer olmak üzere oturma modelleri oluşturmuşlardır. Aynı zamanda çalışmalarında, rijit sistemlerin yumuşak zeminlerdeki hareketleri azaltabildiği yönünde sonuca varmışlardır. Clough ve O'Rouke katı ve çok katı killer ile kumlar için de destek sistemi yatay deformasyon miktarının kazı yüksekliğinin %0,2'si civarında olacağını vurgulamışlardır. Carder (1995), sert zeminlerde yapılan kazılarda oluşan yatay deformasyonların sistem rijitliği ile bağlantısını araştırmıştır. Rijitliği yüksek olan sistemlerde maksimum deformasyon kazı derinliğinin %0,125'i, orta olan sistemlerde kazı derinliğinin %0,2'si, düşük olan sistemlerde ise kazı derinliğinin %0,4'ü ile sınırlandığını vurgulamıştır. Fernie ve Suckling (1996), yaptıkları çalışmada destek sistemlerinde meydana gelen maksimum yatay deplasman değerlerinin, kazı yüksekliğinin %0,15'i ile %0,2'si arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Moormann (2004), yumuşak kil zeminlerde (Su<75 kPa) yapılan kazılarda oluşan deformasyonun, kazı derinliğinin %0,5'i ile %1,0 arasında olduğunu belirtmiştir. Katı killer için (Su>75 kPa) iksa sistemindeki muhtemel yatay deformasyonun kazı yüksekliğinin %0,2'si civarında olacağını belirtmiştir. (Su: Zeminin Drenajsız Kayma Mukavemeti).

Lim, Ou ve Hsieh (2010), drenajsız koşullar altındaki derin kazı analizleri için kil zemin modellerini değerlendirmişlerdir. Değerlendirme için sonlu elemanlar (Plaxis) programında, 5 adet zemin modeli seçilmiştir. Analizlerde hesaplanan deformasyonlar sahada ölçülen deformasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Lim, Ou ve Hsieh'in elde ettikleri sonuçlara göre kil bir zeminde yapılan derin kazıda, Plaxis programında hesaplanan deformasyonlar ile sahada ölçülen deformasyonların birbirine en yakın değerlerde çıkan modelleri Pekleşen zemin modeli (Hardening Soil) ve drenajsız yumuşak kil modeli olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, zemin parametreleri ve saha koşullarının iksa sistemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hwang vd. (2012), zemin parametrelerinin, deformasyonlara ve diyafram duvara olan etkisini, sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre, deformasyon modülü arttıkça kazı derinliğinin az olduğu durumlarda diyafram duvarın yanal deformasyon değerlerinin düştüğü, kazı derinliğinin yüksek olduğu durumlarda ise diyafram duvar deformasyonlarının zeminin elastisite modülünden bağımsız davranış gösterdiği belirtilmiştir. Swanson ve Larson (1990) bir metro projesinde meydana gelen göçmenin nedenlerini araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, metroda oluşan göçmenin, drenajsız kayma mukavemeti parametresinin hesaplamalarda olduğundan daha yüksek değerde olmasından dolayı meydana geldiğini bulmuşlardır. Steiner (2001) derin kazılarda kullanılan kamyon vinçlerinden dolayı derin kazı çevresinde büyük sürşarj yüklerinin oluştuğunu, bu yüklerin de ankraj yüklerini arttırdığını gözlemlemiştir. Cengiz (2008), Moskova'da yapılan bir inşaatın ankraj ve strutlar ile desteklenen diyafram duvarlı iksa sisteminde

sahada meydana gelen deplasmanlar ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen deplasmanların karşılaştırmasını yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen yatay deplasmanların, sahada ölçülen deplasmanlardan daha yüksek değerlerde çıktığı görülmüştür. Bu ölçümler sonucunda sahadaki deplasmanların aynı değerlere ulaşması için çalışmalar yapmıştır. Yaptığı çalışmada, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve elastisite modülü zemin parametreleri sırasıyla %10, %20 ve %30 oranında arttırılmıştır. Bu parametrik çalışma sonuçlarına göre sahada ölçülen deplasmanlara en yakın çıkan değerler, incelenen zemin parametrelerinin %30 arttırıldığı durum olduğu sonucuna varılmıştır. Aktan (2014), yaptığı çalışmada bir otel inşaatı kapsamındaki iksa sisteminde, zeminin elastisite modülü ve içsel sürtünme açısı zemin parametrelerinin değişikliği sonucunda sistemi nasıl etkilediğini incelemiştir. Ayrıca ankraj aralıklarının da deformasyonlara olan etkileri incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre, elastisite modülünü arttırmanın iksa sistemi üzerindeki yatay deplasmanları ciddi şekilde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ankraj aralığının da azaltılması yatay deformasyonları azalttığı gözlemlenmiştir. Rahmani ve Laman (2016), üç farklı projeyi ele almışlar ve yer altı su seviyesinin iksa sistemlerine olan etkilerini ve meydana gelen yatay deplasmanları incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre, yeraltı suyunun iksa sistemi duyarlılığı üzerinde etkisi olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olduğunda yatay deplasmanlarda artış gözlemlemişlerdir. Yeraltı sularının iksa sistemleri hesaplarında mutlaka katılması gerektiğini vurgulamışlardır.

2.1. Yanal Toprak Basınçları

İnşaat projelerinde kazılar sırasında zeminde göçmenin oluşmaması kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, zeminin hareketini önlemek için uygun bir şev açısı oluşturulması veya iksa sistemlerinin kullanılması hedeflenir. Ancak, alan kısıtlamalarının olduğu projelerde şev ile kazı yapmak mümkün olamayacağı için göçmeye karşı iksa sistemleri tercih edilir. İksa sistemleri, zeminin oluşturduğu yatay kuvvetlere maruz kalır ve bu kuvvetlerin doğru bir şekilde hesaplanması, sistem tasarımında önemli bir gerekliliktir.

Yanal zemin basıncı, istinat duvarları ve diğer dayanma yapılarının tasarımında temel bir unsurdur. Bu konuda Coulomb ve Rankine tarafından geliştirilen teoriler, yanal toprak basıncını anlamada önemli katkılar sağlamıştır. Yanal toprak basıncı, dayanma yapısının arkasında zeminle temas eden yüzeyde oluşan basınç olarak tanımlanır. Zemin, taneli bir malzeme olarak kayma direncine sahiptir ve bu nedenle ortamda yatay ve düşey gerilmeler eşit değildir. Yanal toprak basıncı Denklem (1) kullanılarak ifade edilir:

$$P_h = K \cdot P_v \quad (1)$$

Bu denklemde:

P_h: Yanal toprak basıncı,

P_v: Düşey toprak basıncı,

K: Yanal toprak basıncı katsayısını ifade eder (Ou, 2006).

Yanal toprak basıncı üç farklı durumda değerlendirilir:

1. Pasif Toprak Basıncı: Dayanma yapısına doğru etki eden yanal toprak basıncıdır. Duvar, toprak kütlesine doğru itildiğinde pasif basınç oluşur. Bu durumda zemin plastik denge halindedir.

2. Aktif Toprak Basıncı: Zeminin dayanma yapısına doğru hareket etmesi sonucunda oluşan yanal basınçtır. Bu durumda da zemin plastik denge halindedir.

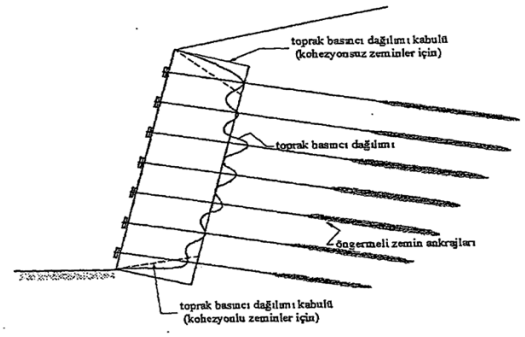
3. Sükunet Durumundaki Toprak Basıncı: Zeminde herhangi bir deformasyonun olmadığı durumu ifade eder. Bu durumda zemin elastik denge halindedir.

2.2. İksa Sistemlerini Etkiyen Toprak Basınçları

İstinat duvar veya konsol duvarda Rankine ve

Coulomb toprak basıncı teorisi kullanılabilmektedir. Fakat yatay destekli sistemler ve çok sıralı ankrajlı sistemler için bu durum geçerli değildir. Rankine ve Coulomb Toprak basıncı teorilerini kullanmanın uygun olmamasının nedeni destekli iksa sistemindeki deformasyon şeklinin ve göçme mekanizmasının konsol duvarlardaki davranışlara göre farklılıklar göstermesidir. (Bowles, 1998).

Yatay destekli iksa sistemlerinde, klasik teorilerde öngörülen basınç diyagramlarının aksine, üçgen şekilli olmayan basınç dağılımları meydana gelir. Özellikle çok sıralı ankrajlı sistemlerde, her kademede gerçekleştirilen kazı işlemleri ve ankrajların gerdirilmesi, yatay hareketlere yol açar. Çok sıra ankrajlı sistemlerde her kademede yapılan kazı ve ankraj germeleri nedeniyle oluşan toprak basıncı dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çok sıralı ankraj sistemlerindeki kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için toprak basıncı dağılımı (Bowles, 1998).
Figure 2. *Soil pressure distribution for cohesive and cohesionless soils in multi-row anchor systems (Bowles, 1998).*

Kazı ve öngerme işlemleri sırasında iksa sisteminin öne ve arkaya doğru birbirine zıt yönlerde hareket etmesinden dolayı iksa sistemine etkiyen toprak basınçlarını tahmin etmek zordur. Bu nedenle tasarım yapılırken basitleştirilmiş toprak basıncı dağılımlarını kullanmak için Terzaghi ve Peck (1967), Navfac, Lehman ve Tschebotarioff tarafından önerilen basitleştirilmiş toprak basıncı dağılımları gösterilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Çok sıralı ankrajlı sistemlerde derinliğe bağlı olarak değişen toprak basıncı dağılımı (Terzaghi ve Peck, 1967)
Figure 3. *Depth-dependent variation of soil pressure distribution in multi-row anchored systems (Terzaghi and Peck, 1967)*

Kohezyonsuz (kum) zeminler için zemin basıncı Denklem (2) kullanılarak hesaplanır:

$P_a = 0{,}65.K_a.\gamma.h$, $K_a = \tan^2(45-\emptyset/2)$ (2)

Kohezyonlu (yumuşak-orta katı kil) zeminler için zemin basıncı Denklem (3) kullanılarak hesaplanır:

$P_a=(1-\frac{4cu}{\gamma H})\gamma H > 0{,}25$, $P_a = 0{,}3.\gamma.H$ (3)

Katı ve sert killer için zemin basıncı Denklem (4) kullanılarak hesaplanır:

$P_a = 0{,}2.\gamma.H-0{,}4.\gamma.H$, $P_a = 0{,}3.\gamma.$ (4)

2.3. Ankrajlı Fore Kazıklı İksa Sistemleri Tasarım Esasları

Ankrajlı fore kazıklı iksa sistemlerinin tasarımı sırasında dikkate alınması gereken önemli hususlar, ilgili yönetmeliklere göre aşağıda özetlenmiştir:

- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) yönetmeliklerine (2018) göre ankrajlar arası yatay mesafe en az 110 cm olmalıdır. Federal Highway Administration (FHWA, 1999) yönetmeliklerine göre ise bu mesafe en az 120 cm olmalıdır.

- FHWA'ya göre zeminlerde ankraj kök boyu 12 m'nin üzerinde olmalıdır. ÇŞB'ye göre ise özellikle kohezyonlu zeminlerde ankraj kök boyu en az 10 m olarak belirlenmelidir.

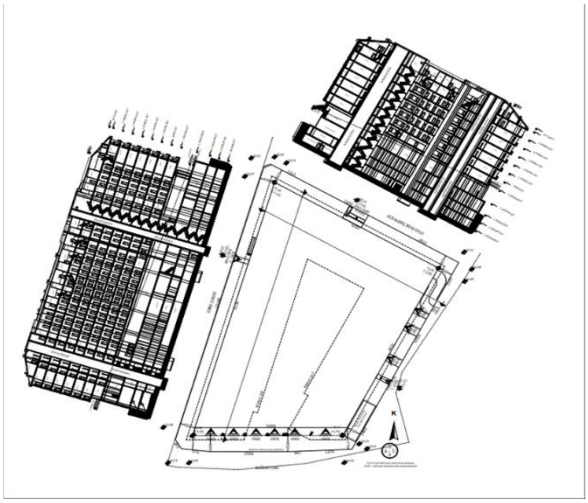
- ÇŞB'ye göre kohezyonlu zeminlerde ankrajlar için servis yükü 35 tonu geçmemelidir.

• ÇŞB yönetmeliklerine göre ankrajlı iksa sistemlerinde yatay deplasman, kazı derinliğinin %0,25 ile %0,5'i arasında olmalıdır. FHWA'ya göre ise kumlar ve katı killerde bu oran %0,2 ile %0,5 arasında sınırlandırılmalıdır. Avrupa **Birliğinin** 'EN 1997-1 Geoteknik Dizayn–Bölüm 1: Genel Kurallar' (CEN, 2004) isimli standardında ise sıkı zeminlerde yatay duvar hareketlerinin, kazı derinliğinin %0,1 - 0,2'si aralığında, gevşek zeminlerde ise yatay duvar hareketlerinin, kazı derinliğinin %0,4 - 0,5'i aralığında olması gerektiği belirtilmiştir.

3. Materyal ve Metot

3.1. Çalışma Alanı ve Zemin Koşulları

Bu çalışmada incelemiş olduğumuz projede 5 Bodrum + 1 Zemin + 5 Normal katlı bir yapı inşa edilmesi planlanmıştır. İnceleme alanı 5919,46 m² yüzölçümüne sahip olup, planlanan yapının oturum alanı yaklaşık 4200 m² olarak belirlenmiştir. Yapının yapı yükü 20,28 ton/m² olarak hesaplanmıştır. Yapının çok bodrum katlı olarak tasarlanması nedeniyle, destekli bir derin kazı sistemi gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda proje, ankrajlı ve fore kazıklı iksa sistemi olarak tasarlanmıştır. Temel kazı derinliği, arazinin farklı noktalarında 11,30 metre ile 18,20 metre arasında değişiklik göstermektedir. Projeye ait yerleşim planı ve yan cephe görünüşü Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Projeye ait yan cephelerin görüntüsü
Figure 4. *View of the side elevations of the project.*

İnceleme alanında jeolojik ve geoteknik özelliklerin belirlenmesi amacıyla 13 adet sondaj çalışması ve jeofizik etüt kapsamında 4 adet çok kanallı yüzey dalgası analizi (MASW) yöntemi uygulanmıştır. Sondaj çalışmalarından elde edilen verilere göre, inceleme alanında zeminin litolojik özellikleri ve yer altı suyu durumu şu şekilde tespit edilmiştir:

Yüzeyden 1,00m-1,30m arasında değişen kalınlıklarda dolgu birimi, bu birimin ardından yaklaşık 15,00m-25,00m arasına kadar Sultanbeyli Formasyonu-Altıntepe Üyesi' ne ait kahvemsi sarı renkli, orta plastisiteli, karbonat kongresyonlu, çakıllı, kumlu siltli sert kil tabakası içerisine girilmektedir ve tüm sondajlar bu birim içerisinde sona ermiştir. Söz konusu tabaka içerisinde gerçekleştirilen SPT testlerinde N30 değerleri >50 olarak (çoğunlukla refü) elde edilmiştir. Doğal su muhtevası değerleri %22~%28 aralığında, doğal birim hacim ağırlık değerleri ise 18,7 kN/m³ ~ 19,6 kN/m³ aralığında elde edilmiştir. Zemin veri raporunda verilen mevcut tabakalar için zemin parametreleri detayları aşağıda verilmiştir.

Sondaj veri raporunda, yer altı su seviyesinin yaklaşık 7- 8 metre derinlikte olduğu tespit edilmiştir. Kohezyonlu zeminlerde yer altı suyu durumu, taşıma gücü ve yenilme risklerinin değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Kil zeminler, su muhtevasındaki değişimlere bağlı olarak hacim değişikliğine uğramaktadır. Bu durum, kurak ve yağmurlu mevsimlerin sıklıkla değiştiği iklim koşullarında özellikle belirgin hale gelir. Hacim değişimi, kurumada büzülme ve ıslanmada şişme olarak kendini gösterir. Büyük hacimsel değişiklikler birbirini izleyen kurak ve yağmurlu mevsimlere sahip iklim koşullarında gözlenebilir. Killi zeminlerin mühendislik yapılarını önemli derecede etkileyen özelliği oturma, mukavemet, şişme ve büzülmedir. İyi projelendirilmemiş bir yapıda büzülme ve şişmeden kaynaklı oluşan deformasyonlar yapı için sürekli bir tehdit oluşturabilir. Bu nedenle, kil zeminlerin davranışlarının dikkatle değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Ancak, bu proje için analizlerde yer altı suyu

kullanılmamıştır çünkü aralıklı fore kazıklı iksa sisteminde fore kazıkların aralıklı uygulanmasından dolayı aralıklardan su çıkışı sağlanabildiği düşünülmüştür.

3.2. Sayısal Modelleme Yöntemleri

Proje kapsamında, iksa sistemine etkiyen deformasyonların fazla olduğu Kesit-7, sonlu elemanlar analiz yöntemiyle incelenmiştir (Plaxis, 2018). Söz konusu analizler ile iksa sisteminin temel kazılarına bağlı olarak meydana gelecek deformasyonları ve iksa sistemi kazıkları üzerinde meydana gelecek olan kesit tesirleri elde edilmiştir. Çalışmanın devamında, bu analizlere ilişkin sonuçlar detaylı biçimde sunulmaktadır.

3.2.1. Sayısal Analizlerde Kullanılan Zemin Parametreleri

Zemin veri raporunda tanımlanan mevcut tabakalara ait zemin parametrelerinin detayları, Tablo 1'de sunulmuştur. Malzeme model seçimi olarak Hardening Soil Model (HS) kullanılmıştır. Zemin parametrelerinden olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri laboratuvarda yapılan zeminde direkt kesme deneyi sonuçlarından alınmıştır. Zemin elastisite modülü parametreleri iksa hesap raporundan alınmıştır.

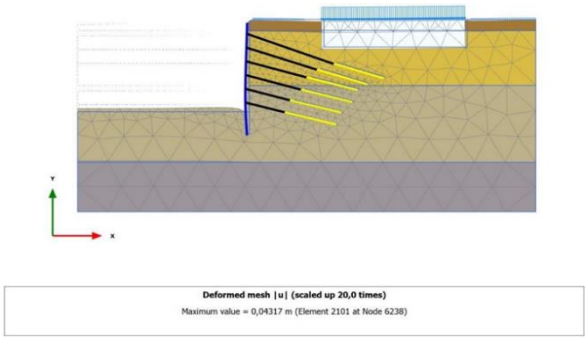
Tablo 1. Hesap Raporunda kullanılan zemin parametreleri
Table 1*. Soil parameters used in calculation report*

	Doğal birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	Elastisite modülü (kN/m^2)	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Poisson oranı
Sembol	γ_n	E	c	ϕ	υ
Üst tabaka kil	18,5	21.000	19	28	0,28
Alt tabaka kil	19	30.000	22	28	0,28
Çok Zayıf Kumtaşı-Arkoz	22	150.000	50	32	0,28

3.2.2. Sayısal Analizlerde Kullanılan İksa Elemanları Parametreleri

Kazı destek yöntem seçiminde, sahaya komşu konumdaki mevcut yapıların ve yolların kazıya bağlı deformasyonlardan olumsuz etkilenmemesi bakımından, iksa uygulamalarının deformasyonları minimize edecek şekilde planlanması gerekmektedir. Bu çerçevede saha için uygun kazı destek sistemi, fore kazıklı ve öngermeli ankrajlı bir iksa sistemi olarak belirlenmiştir.

Genel proje kapsamında, kazı derinliğinin uygunluğu göz önüne alınarak, kazık çapı 65 cm olarak tasarlanmıştır. Kazıkların merkezden merkeze aralıkları ise 90 cm olarak planlanmıştır. Kök boyu 9 m olan 0,6” öngermeli ankrajlar 4 ile 7 kademe arasında 1,80 m yatay aralıklı, 2,50 m düşey aralıklı olarak yapılacağı belirlenmiştir. Ani deplasmanların oluştuğu kesit olarak incelediğimiz Kesit-7’nin modellemesi ve analizi Plaxis 2D programında yapılmıştır. Kesit-7’deki modele göre iksa sisteminde ankrajlar 6 kademeli olarak oluşturulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. PLAXIS programında tasarlanan Kesit 7
Figure 5. *Section 7 designed in the PLAXIS program*

Analizlerin yapılabilmesi için gerekli olan iksa elemanlarının parametreleri aşağıda verilmiştir.

Fore Kazıklar:

Fore kazıklar için beton sınıfı BS30 olarak

planlanmıştır. BS30 beton için elastisite modülü 30.000.000 kN/m² olarak kabul edilmiştir. 65 cm çapında ve merkezden merkeze 90 cm aralıkla düzenlenen fore kazıklar için kesit özellikleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

- E*A = 11.061.024 kN/m
- E*I = 292.080 kNm²/m

Öngermeli Ankrajlar:

Öngermeli ankrajlarda, 0,6" çapında düşük gevşemeli süper tendonlar kullanılmıştır. Ankraj delgi çapı 120 mm olarak belirlenmiştir. Enjeksiyonlu ankraj kökü için elastisite modülü 1E7 kN/m² olarak alınmıştır. Süper tendon halatlar için elastisite modülü ise 195 MPa'dır. Analizler sonucunda ankraj yatay aralıkları 1,80 m olarak belirlenmiştir. Bu düzenleme, her iki fore kazıkta bir ankraj uygulanması anlamına gelmektedir. Ankrajlar ve ankraj kökleri için hesaplanan rijitlik değerleri şu şekildedir:

- E*A (1,80 m aralık için) = 62.831 kN/m
- E*A (3 adet 0,6" tendon için) = 81.900 kN

3.3. Derin Kazılarda İnklinometre Ölçümleri

Derin kazılar sırasında, çevredeki yapıların güvenliğini tehdit edebilecek deformasyonların oluşma riski yüksektir. Bu nedenle, kazı destekleme sistemlerinde meydana gelebilecek deformasyonların izlenmesi ve gerektiğinde müdahale edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, derin kazılar sırasında oluşabilecek deformasyonların izlenmesi için çeşitli aletsel gözlem yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, derin kazıların güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan inklinometre ölçümleri ele alınmıştır.

İnklinometre, zeminlerde meydana gelen yatay deplasmanları izlemek için kullanılan bir ölçüm cihazıdır. İnklinometreler, eğim sensörleri aracılığıyla sahada yerleştirilen boruların deformasyonlarını tespit eder. Bu cihazlar, özellikle derin kazı uygulamalarında, kazı destekleme sistemlerinde meydana gelen yanal deplasmanları ölçmek için etkin bir şekilde kullanılmaktadır. İnklinometre ölçümleri, aşağıdaki uygulamalar için kullanılmaktadır:

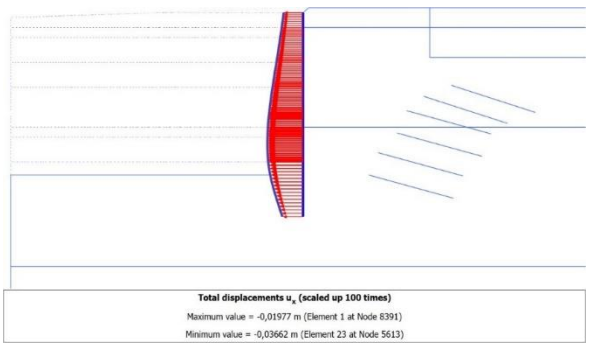
- İnklinometre, heyelan ve kayma bölgelerinin tespit edilmesinde kullanılır.
- Baraj dolguları, zayıf zeminler üzerindeki dolgular, açık kazılar ve tünellerde meydana gelen yatay deformasyonların miktarını ve hızını izler.
- Derin kazı destekleme sistemlerinde ve yapı elemanlarında meydana gelen yanal deplasmanların ölçülmesini sağlar.
- Kazıklar ve istinat duvarları gibi yapıların yatay sapmalarını belirler.

İnklinometre ölçümleri, derin kazılarda meydana gelen deformasyonları izlemek ve kontrol altında tutmak için kullanılır. Bu ölçümler, kazı sırasında oluşabilecek deformasyonların öngörülen sınırları aşmasını önlemeye yardımcı olur ve potansiyel tehlikelerin erken tespitini sağlar. Böylece, çevredeki yapıların güvenliği sağlanır. Ölçüm verileri, kazı sırasında alınacak önlemler ve yapılacak müdahaleler için kritik bilgiler sunar.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Sayısal Analiz Sonuçları

Bu numerik çalışmada, kritik kesit olan Kesit-7 ele alınarak incelemeler yapılmıştır. Kazı derinliği 16,95 m olup, Ø 65 cm çapındaki fore kazıkların boyu 20 m'dir. İksa sistemi, 6 kademeli ankrajlarla desteklenmiştir.



Şekil 6. Toplam maksimum yatay deplasman görseli

Figure 6. *Total maximum horizontal displacement visualization*

Proje kapsamında tasarlanan kesit, sonlu elemanlar analiz yöntemi (PLAXIS 2D) ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen maksimum yatay deformasyon değeri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu deformasyon değerleri, ilgili kesitteki kazı derinliği ve deformasyon miktarının kazı derinliğine oranı ile birlikte aşağıdaki Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. İksa sistemi kesit 7'de yatay deformasyon ve kazı derinliği ilişkisi
Table 2. *Lateral deformation ratios at section 7 of the retaining system*

Kesit No	Yatay Deformasyon [mm]	Kazı Derinliği [m]	Deformasyon Oranı [%]
Kesit-7	~ 36,62	16,95	~ 0,216

Öngermeli ankrajlı iksa sistemleri için kabul edilebilir deformasyon oranı %0,2 olarak belirlenmiş olup, alarm seviyesi (izin verilebilir en üst sınır) %0,5 olarak kabul edilmektedir. Görüleceği üzere, öngermeli ankrajlı iksa sistemi kesiti için elde edilen deformasyon oranı bu sınırlar içinde kalmaktadır.

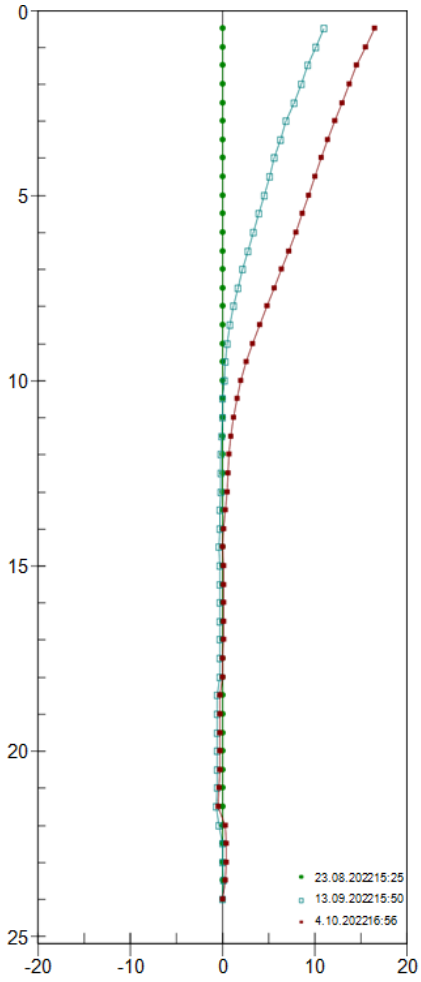
4.2. İnklinometre Ölçüm Sonuçları

Sahadaki inceleme alanında deformasyonların izlenebilmesi amacıyla inklinometre ölçümleri yapılması uygun görülmüştür. Kazı aşamaları sırasında derinlik ile değişen yatay deformasyonlar takip edilmiştir.

İksa derinliği 3. Kademeye indiği zaman Kesit-7 cephesinde imalatı yapılan 6 numaralı inklinometrenin deformasyon ölçümleri yapılmış ve çıkan değerler Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. İlgili kesitte İnklinometre ile ölçülen yatay deformasyon değerleri
Table 3. *Lateral deformation measurements obtained from inclinometers*

Kesit No	Yatay Deformasyon [mm]	Kazı Derinliği [m]	Deformasyon Oranı [%]
1. Okuma	11,02	5,00	0,22
2. Okuma	16,48	7,50	0,22



Şekil 7. İnklinometre ile ölçülen yatay deplasmanlar grafiği
Figure 7. *Graph of horizontal displacements measured by inclinometer*

Tablo 3'te gösterilen 6 numaralı inklinometre okumalarından elde edilen maksimum yatay deformasyon değerlerinde ani bir artış olduğu görülmüş ve deplasmanların kritik seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

4.3. Geri Analizler

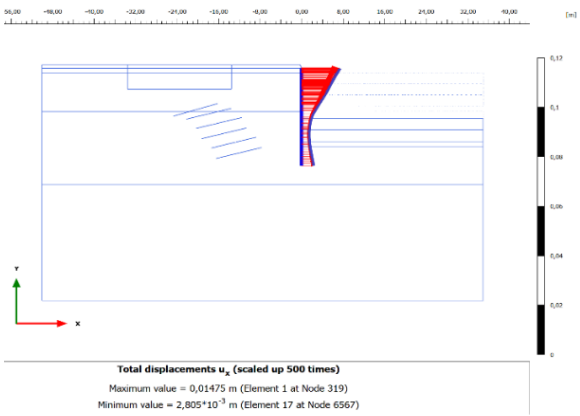
Sahada uygulama aşamasında karşılaşılan bazı durumlar ile model aşamasındaki öngörülerin birbirinden farklı olabilmektedir. Zemin veri raporunda, sahadaki belirli alanlardan toplanan verilerle genel bir profil tahmin edilebilse de tüm alanlardan veri alınamaması nedeniyle uygulama aşamasında belirli profillere uygun olmayan durumlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle, sahada gözlemlenen iksa yatay deformasyon durumunun doğru bir şekilde modellenmesi ve geri analizlerin

yapılması mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, ani deplasmanların nedenlerini araştırmak için çeşitli geri analizler yapılmış ve deformasyon değerleri sahadaki inklinometre ölçümleri ile tekrar karşılaştırılıp değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.3.1. Ankrajların Yatay Deformasyona Etkisi

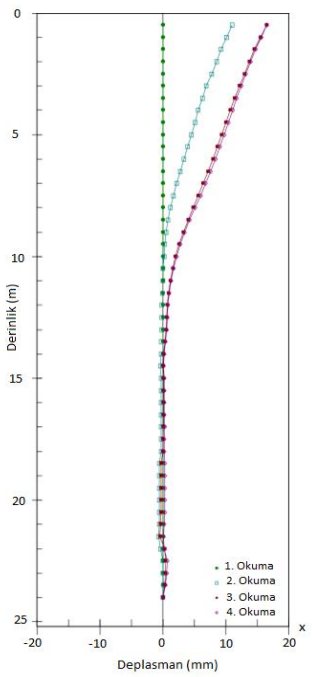
Deformasyon artışının bir sebebi olarak ankrajın uygulama aşamasında yeterli yükünü alamadığı bir durum varsayılmıştır. Ani deformasyon artışını incelemek amacıyla modelde ilk iki kademenin ankraj yükleri 305 kN' dan 100 kN' a düşürülmüştür. Ani deplasman değişimini engellemek için ise projeye ek olarak iksa sisteminde dördüncü kademeye yatay aralıkları 0.9m olacak şekilde ilave ankrajlar eklenmiştir. Analiz sonucunda hesaplanan maksimum yatay deformasyon değeri 14,75 mm çıkmıştır. Oluşturulan model analiz grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Dördüncü kademeye ankraj ilave edilmesi durumundaki toplam yatay deplasmanlar grafiği

Figure 8. *Graph of total horizontal displacements with the addition of an anchor at the 4th stage*

Ankrajlara germe işlemi de uygulandıktan sonra tekrar inklinometre okuması yapılmıştır. İnklinometre ölçümündeki yatay deformasyon değerleri grafiği Şekil 9' da gösterilmiştir.



Şekil 9. İnklinometrede 4. Okumada Ölçülen Yatay Deplasmanlar Grafiği

Figure 9. *Graph of horizontal displacements measured in the 4th reading of the inclinometer*

Şekil 9' da gösterilen grafiğe göre dördüncü okumada maksimum yatay deformasyon değerleri, bir önceki okumadaki ölçüm değerleri ile aynı kaldığı görülmüştür. Başka bir deyişle deplasman artışı engellenmiştir.

Çıkan sonuçlara göre, sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan ve sahada inklinometre ile ölçülen yatay deplasmanlar değerlerinin, birbirlerine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

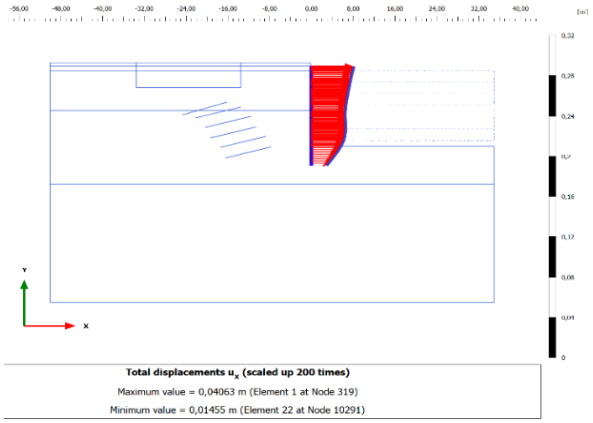
Tablo 4. Dördüncü Kademede Elde Edilen Maksimum Yatay Deformasyonlar

Table 4. *Maximum horizontal deformations obtained at the fourth stage*

Kesit No	Mak. Yatay Deformasyon [mm]	Kazı Derinliği [m]	Deformasyon Oranı [%]
Hesaplanan	14,75	10.00	0,148
2.Okumada Ölçülen	16,48	10.00	0,165

4.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İnklinometre Ölçümlerindeki Yatay Deformasyonların Karşılaştırılması

İnşaatın son aşamasında, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizde elde edilen yatay deformasyonlar Şekil 10'da gösterilmektedir. Hesaplamalı analiz sonuçlarına göre, 16,95 m kazı derinliğinde maksimum yatay deformasyon 40,63 mm olarak bulunmuş ve deformasyon oranı %0,24 olarak hesaplanmıştır. Deformasyon oranının %0,3'ten düşük olması, herhangi bir sorun bulunmadığını göstermektedir.



Şekil 10. Son aşamaya ait toplam yatay deplasman grafiği

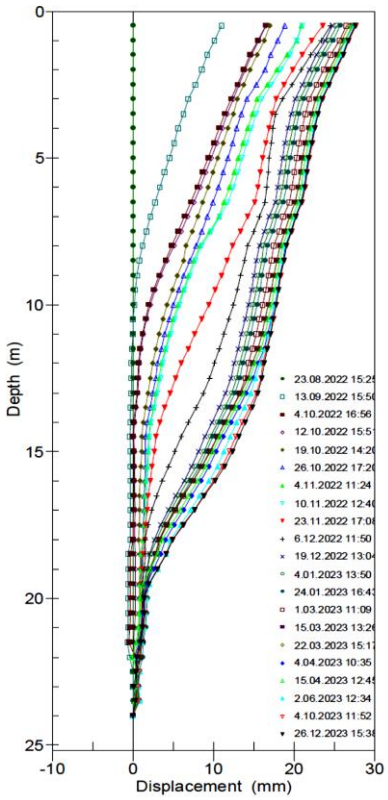
Figure10. *Graph of total lateral displacements at the final stage*

Sahada uygulanan inklinometre ölçümlerinden elde edilen maksimum yatay deplasman değeri ise 27,60mm çıkmıştır. Yatay deformasyon oranı %0.163 çıkmış olup, %0,3'den az çıkması nedeniyle bir sorun olmadığı görülmüştür. Yatay deplasmanlar grafiği Şekil 11' de gösterilmiş olup elde edilen değerler de Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. PLAXIS ve inklinometreden elde edilen yatay deplasmanların karşılaştırılması

Table 5. *Comparison of lateral displacements obtained from PLAXIS and inclinometer*

Kesit No	Yatay Deformasyon [mm]	Kazı Derinliği [m]	Deformasyon Oranı [%]
Hesaplanan	40,63	16,95	0,239
Ölçülen	27,60	16,95	0,163

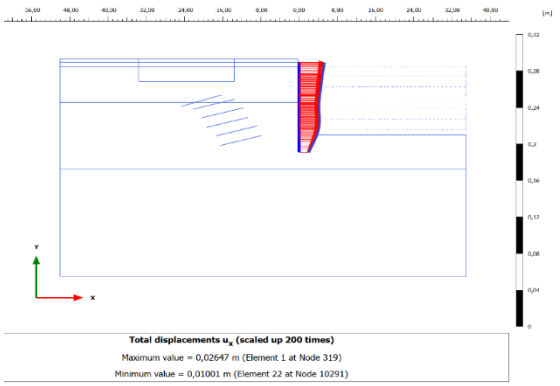


Şekil 11. İnklinometre 6'nın son okumaya ait yatay deplasmanlar grafiği

Figure 11. *Graph of lateral displacements from the final reading of inclinometer No. 6*

4.3.3. Elastisite Modülü Zemin Parametresinin Yatay Deformasyona Etkisi

Hesaplanan ve ölçülen yatay deformasyon değerleri arasında farklılıklar gözlemlenmesi üzerine, elastisite modülünün yatay deformasyonlar üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda, geri analiz sürecinde sonlu elemanlar analizleri ile elastisite modülü değerleri ilk analizde kullanılan parametrelere göre bir miktar arttırılmıştır. Üst kil zemin için elastisite modülü 40,000 KN/m^2'ye, alt kil zemin için ise elastisite modülü 65,000 KN/m^2'ye yükseltilmiştir. Analiz sonucundan elde edilen maksimum yatay deformasyonlar grafiği Şekil 12' de verilmiştir.



Şekil 12. Üst ve Alt kil birimlerinin elastisite modülü arttırıldığı durumundaki toplam yatay deplasman grafiği

Figure 12. *Graph of total horizontal displacement with increased elasticity modulus of the upper and lower clay units*

Şekil 12'de gösterildiği üzere, ilk Analiz hesaplarındaki maksimum yatay deplasman ise 36,62 mm iken, ikinci analiz hesaplarında maksimum yatay deplasman 26,47mm değerinde çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Hesaplanan ve ölçülen maksimum yatay deformasyon oranlarının karşılaştırılması

Table 6. *Comparison of maximum lateral deformation ratios obtained from back analysis and measurements*

Kesit No	Yatay Deformasyon [mm]	Kazı Derinliği [m]	Deformasyon Oranı [%]
İkinci Analiz	26,47	16,95	0,16
İlk Analiz	36,62	16,95	0,22
Ölçülen	27,60	16,95	0,16

Tablo 6'da görüldüğü üzere, zeminin elastisite modülünün artması ile deformasyon değerleri ve deformasyon oranları önemli ölçüde azalmıştır.

İnklinometre sonuçlarına göre iksa sistemi henüz 5m'de 2. Kademe ankraj seviyesine kadar kazılmışken kazıklı sistem maksimum 16,48 mm civarında yatay deplasman yapmıştır. Yönetmeliklerde yatay deplasman/kazı yüksekliği oranı maksimum %0,5 tir. Güvenli tarafta kalmak için alarm seviyesi (izin verilebilir üst sınır) ise %0,3 olarak dikkate alınabilir. İncelenen Kesitte bu oran %0,33 seviyesine kadar çıkmıştır. Projedeki ilgili kesitte ilk iki kademenin ankrajların yükünü alamaması durumu incelenmiştir. Güvenli tarafta kalmak için ani deplasmanları engellemek amacıyla 4. Kademeye ilave ankraj imalatları yapılmasına gerek duyulmuştur. Ek ilave ankrajların da germe işlemleri tamamlandıktan sonra ölçülen inklinometre ölçümlerindeki maksimum yatay deplasman aynı değerde kalmıştır. Sonlu elemanlar ile hesaplanan dördüncü kademedeki deformasyonlar ile karşılaştırılması yapılmış olup, birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. Sonuç olarak saha uygulamalarında yapılan ankraj değişikliği ile iksa sisteminde oluşan ani deplasmanlar durdurulmuş olup, olası problemlerin önüne geçilmiştir. Ayrıca elastisite modülü zemin parametresinin iksa sistemleri üzerindeki yatay deformasyonlara olan etkisini incelemek için geri analiz yapılmıştır. Analizlerde kil birimlerindeki elastisite modülü değerleri yükseltilmiş olup sonuçlar kontrol edilmiştir. Elastisite modülünün maksimum yatay deformasyonundaki etkisi araştırılmıştır. İnklinometrenin son okumasında ölçülen maksimum yatay deplasmanı ile geri analizlerde hesaplanan deplasmanlar birbirine yakın değerlerde çıkmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, ankrajlı fore kazıklı iksa sistemlerinin derin kazı destekleme projelerindeki etkinliğini incelemekte ve zemin deformasyonlarının izlenmesinde inklinometre ölçümlerinin önemini vurgulamaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile yapılan sayısal analizler, iksa sisteminin yatay deformasyonları etkin bir şekilde kontrol ettiğini ve güvenli bir tasarım sağladığını ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında, ani deplasman değişimi yaşayan ankrajlı bir iksa sisteminin inklinometre ölçümleri ile sonlu elemanlar analizinin sonuçları karşılaştırılmış ve deplasmanların sebepleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

• Ani deplasmanları incelemek için amacıyla ilk analizdeki 305 kN ankraj öngerme yükü, 100 kN'a düşürülmüştür. İksa kesitindeki bu ani deformasyonları engellemek amacıyla 4. kademeye ek ankrajlar yerleştirilmiştir. Analiz sonucunda hesaplanan maksimum yatay deformasyon değeri 14,75 mm, inklinometre ölçümlerinden elde edilen maksimum yatay deformasyon 16,48 mm çıkmış olup ani deplasmanların engellendiği görülmüştür. Deformasyonlar da birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. İnşaatın son aşamasında ölçülen maksimum yatay deplasman değeri 27,60mm çıkmış olup sonlu elemanlar ile hesaplanan yatay deplasman değeri ise 40,63 mm olarak belirlemiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman, belirli ankrajların yükünü alamaması durumunda, ankraj adedinin arttırılması sonucunda ani deformasyonların engellendiği bulgusuna ulaşılmıştır.

• Elastisite modülü zemin parametresinin iksa sistemleri üzerindeki yatay deformasyonlara olan etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizleri ile elastisite modülü değerleri ilk analizde kullanılan parametrelere göre arttırılmıştır. Üst kil zemin için elastisite modülü 40.000 KN/m^2'ye, alt kil zemin için ise elastisite modülü 65.000 KN/m^2'ye yükseltilmiştir. İlk Analiz hesaplarındaki maksimum yatay deplasman ise 36,62 mm iken, ikinci analiz hesaplarında maksimum yatay deplasman 26,47 mm değerinde çıkmıştır. Görüldüğü üzere, zeminin elastisite modülünün artması ile deformasyon değerleri ve deformasyon oranları önemli ölçüde azalmıştır.

Sahada ilgili kademeye uygulanan ilave ankraj düzenlemeleri ile deformasyonlar kontrol altına alınmış, geri analizler ile kontrolü sağlanmıştır. Kritik seviyelere ulaşan herhangi bir yatay deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu durum, projede kullanılan ankrajlı fore kazıklı iksa sistemlerinin etkinliğini ve tasarım güvenliğini pekiştirmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular, derin kazı uygulamalarında kullanılan iksa sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla sayısal analizlerin ve saha ölçümlerinin entegrasyonunun önemini ortaya koymaktadır. Plaxis programı hesaplamalarına göre, ankraj aralığının ve zemin elastisite modülü parametrelerinin maksimum yatay deformasyon değerlerini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Saha incelemelerinde her alandan zemin numunesi alınamamasından dolayı, zemin parametreleri için doğru veri alınamayabilir ve modellemelerde gerçekçi sonuçlar veremeyebilir. Bu nedenle zemin parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve yapı tasarımının buna göre şekillendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, inklinometre ölçümlerinin izlenmesi, sahada oluşabilecek olumsuz durumlar sonucunda meydana gelebilecek ani deplasman değişimlerinin tespit edilmesini, iksa sisteminin güvenliği açısından uygulama değişikliğine gidilerek kontrol altına alınmasını sağlamaktadır. Bu durum, iksa sistemlerinin ve çevre yapılarının güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen bulgular, benzer projelerde güvenlik önlemleri alırken ve tasarım aşamalarında dikkate alınması gereken önemli kriterler sunmaktadır.

Yazar Katkısı

A. Sağlam: Araştırma, Veri toplama, Veri işleme, Kavramsallaştırma, Literatür taraması, Görselleştirme; S. Zardari: Araştırma, Veri toplama, Veri işleme, Literatür taraması, Görselleştirme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rakip finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Etik Standartlar

Bu çalışma için herhangi bir Etik Kurul Onayı gerekmemektedir.

Kaynaklar

Aktan, E., (2014). Öngermeli Ankrajlı Kazıklı Duvar Nümerik Analizi: Hilton İstanbul Bomenti Hotel Ve Konferans Merkezi Projesi Kapsamında Yer Alan Tarihi Bina

Önü İksa Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

ASTM A416 (1997). Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn.

Bowles, J. E. (1998). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill, ISBN: 0-07-912247-7.

Carder, D. R. (1995). Ground movements caused by different embedded retaining wall construction techniques. *Transport Research Laboratory Report* (No. 172). Berkshire, U.K.

CEN. (2004). Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules (EN 1997-1:2004). European Committee for Standardization.

Cengiz, A.D. (2008) ‘‘Bir Diyafram Duvarda Tahmin Edilen Ve Ölçülen Yer Değiştirmelerin Karşılaştırılması’’ Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Clough, G. W. and O’Rourke, T. D. (1990). Construction-inducedmovements on in-situwalls. In *Proceedings of the ASCE Conference on Design andPerformance of Earth RetainingStructures* (Geotechnical Special Publication No. 25, pp. 439-470). ASCE.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler, 31.08.2018 tarih ve 105340 sayılı Genelge.

Fernie, R., and Suckling, T. (1996). Simplifiedapproachforestimating lateral movement of embeddedwalls in U.K. ground. In *Proceedings of the International Symposium on Geo-Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 131-136). City University, London.

FHWA (1999)- Federal Highway Administration. Geotechnical Engineering Circular NO. 4- Ground Anchors and Anchored Systems IF-99-015

Rahmani G.Y. and Laman M. (2016) yeraltı su seviyesı yüksek olan zeminlerde iksa sistemlerinin analizi, ç.ü. fen ve mühendislik bilimleri dergisi. 34-2.

Goldberg, (1976) Goldberg, D.T., Jaworski, W.E., Gordon, M.D. 1976. Lateral Support Systems and Underpinning. Report FHWA-RD75- 128, Vol. 1, Federal Highway Administration, Washington D.C.

Hwang, R.N., Lee, T., Chou., C.R., Su., T.C. (2012). Evaluation of Performance of Diaphragm Walls by Walls by Wall Deflection Paths, *Journal of GeoEngineering*, Vol. 7 (1), pp. 001-012

Mana, A. I., Clough, G. W. (1981). Prediction of movementsforbracedcuts in clay. *Journal of GeotechnicalEngineeringDivision, 107*(6), 759-777.

Moormann, C (2004). Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society- Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database Vol. 44, No. 1, 87-98, Feb.

Ou, C. Y. (2006). *Deep excavation theory and practice*. Taylor & Francis, London.

Peck, R. B. (1969). Deep excavation sand tunneling in softground. In *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanicsand Foundation Engineering*. University Nacional Autónoma de México Instituto de Ingeniería.

Plaxisbv. (2018). *Plaxis 2D* (Version 2018). Plaxisbv. https://www.plaxis.com

Steiner; W., Pedrozzi, G. (2001), Risk analysis of tunnel systems in urban areas with variable ground conditions

Swanson, P.G., Larson, T.W., “Shoring failure on soft clay” Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE GSP 25 , 1990

Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967). *Soilmechanics in engineering practice* (2nd ed.). Wiley.

Tschebotarioff, G.P. (1951). Foundations, Retaining and Earth Structures, McGraw-Hill Book Co. Inc., Newyork,.