Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

BİR DERİN KAZININ GÖMÜLÜ KİRİŞ, PLAK ELEMAN VE EŞDEĞER ZEMİN MODELİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF EMBEDDED BEAM, PLATE ELEMENT, AND EQUIVALENT SOIL MODELS FOR A DEEP EXCAVATION

Tayyar İlke HAMURSUZ[1], İlbüke YALÇINKAYA[2], Zeynep ÇEKİNMEZ BAYRAM[3]

ÖZET

Bu çalışmada, bir derin kazı projesindeki iksa sisteminin davranışı saha ölçümleri ve sayısal analizlerle değerlendirilmiştir. İksa sisteminin konsol bölgesine yerleştirilen inklinometrelerden elde edilen yatay deplasman verileri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı geoteknik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, aynı geometri, zemin parametreleri ve yükleme koşulları altında oluşturulan Gömülü Kiriş (Embedded Beam), Plak Eleman (Plate) ve Eşdeğer Zemin (Cluster) modellerinin iksa davranışını temsil etme performanslarını incelemektir. Sayısal analizlerde iksa sistemi üç farklı yaklaşımla modellenmiştir. Gömülü Kiriş modelinde elastisite modülü, kazık çapı, kazık aralığı, çevre sürtünmesi ve uç direnci dikkate alınmıştır. Plak Eleman modelinde sistem, eksenel ve eğilme rijitlikleri kullanılarak eşdeğer sürekli bir yapı elemanı olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer Zemin modelinde ise iksa sistemi, eşdeğer mekanik özelliklere sahip bir zemin kümesi olarak temsil edilmiştir. Her model için kazı aşamaları tanımlanmış; yatay deplasman, kesme kuvveti ve eğilme momentleri hesaplanmıştır. Sonuçlar inklinometre ölçümleriyle karşılaştırılarak modellerin doğruluğu değerlendirilmiş ve saha davranışını en gerçekçi şekilde yansıtan yaklaşım belirlenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Plak eleman, gömülü kiriş, eşdeğer zemin, inklinometre*

ABSTRACT

In this study, the behavior of a retaining system used in a deep excavation project was evaluated through field measurements and numerical analyses. Horizontal displacement data obtained from inclinometers installed in the cantilever section of the retaining system were compared with results from a finite element-based geotechnical analysis software. The main objective was to investigate the ability of Embedded Beam, Plate, and Equivalent Soil (Cluster) models to represent retaining system behavior under identical geometry, soil conditions, and loading scenarios. The retaining system was modeled using three different approaches. In the Embedded Beam model, parameters such as elastic modulus, pile diameter, pile spacing, shaft resistance, and base resistance were considered. In the Plate model, the system was represented as an equivalent continuous structural element using axial and bending stiffness values. In the Equivalent Soil model, the retaining system was simulated as a soil cluster with equivalent mechanical properties. For each approach, excavation stages were defined and horizontal displacements, shear forces, and bending moments were calculated. The results were compared with field measurements to assess the accuracy of each modeling technique. The effects of different finite element models on displacement, shear force, and bending moment predictions were examined, and the approach that best represented field behavior was identified.
Keywords: *Plate element, embedded beam element, soil cluster, inclinometer*

[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, tihamursuz@yukselproje.com.tr (Sorumlu Yazar)
[2] İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, iuslu@yuıkselproje.com.tr
[3] Dr. İnşaat Mühendisi Yüksel Proje, zcekinmez@yukselproje.com.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde artan kentleşme ve yeraltı yapılaşmaları nedeniyle derin kazı uygulamalarının sayısı önemli ölçüde artmıştır. Özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde gerçekleştirilen kazılarda çevre yapıların ve altyapı elemanlarının güvenliğinin sağlanabilmesi için kazı kaynaklı deformasyonların doğru tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle tasarım aşamasında gerçekleştirilen sayısal analizlerin güvenilirliği hem ekonomik hem de mühendislik açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Derin kazı projelerinde zemin davranışının ve zemin-yapı etkileşiminin değerlendirilmesinde sonlu elemanlar yöntemine dayalı geoteknik analiz yazılımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, iksa sisteminin sayısal model içerisinde nasıl temsil edildiği analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilmektedir. Aynı geometri, yükleme koşulları ve zemin parametreleri altında farklı sonlu eleman tipleri kullanılarak oluşturulan modeller; deplasman, kesme kuvveti ve eğilme momenti bakımından farklı sonuçlar üretebilmektedir. Bu durum, modelleme yaklaşımının belirlenmesini derin kazı analizlerinde önemli bir mühendislik problemi haline getirmektedir.

PLAXIS ortamında fore kazıklı iksa sistemleri farklı yöntemlerle modellenebilmektedir. Bunlar arasında gömülü kiriş (Embedded Beam), plak eleman (Plate) ve eşdeğer zemin yaklaşımı (Equivalent Soil/Cluster) yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Gömülü kiriş modeli kazık-zemin etkileşimini çevre sürtünmesi ve uç direnci gibi parametreler üzerinden tanımlarken, plak eleman yaklaşımında sistem eşdeğer rijitliğe sahip sürekli bir yapı elemanı olarak temsil edilmektedir. Eşdeğer zemin yaklaşımında ise iksa sistemi, uygun mühendislik parametreleri atanmış bir zemin kümesi şeklinde modellenmektedir. Her yöntemin hesaplama yaklaşımı farklı olduğundan elde edilen sonuçların da farklılık göstermesi beklenebilen bir durumdur.

Sayısal analizlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde saha ölçümleri önemli bir doğrulama aracı oluşturmaktadır. Özellikle inklinometre ölçümleri, kazı süresince gelişen yatay deformasyonların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmakta ve tasarım aşamasında yapılan tahminlerin sahadaki davranışla karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle sayısal model sonuçlarının saha verileri ile birlikte değerlendirilmesi, modelleme yaklaşımının performansının belirlenmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, 7 m derinliğindeki fore kazıklı bir iksa sisteminin davranışı incelenmiştir. Çalışma alanındaki zemin profili üstten alta doğru siltli kil, kil, siltli kum ve kil tabakalarından oluşmaktadır. Yer altı su seviyesine 15m de rastlanılmıştır. Analizler PLAXIS 2D ortamında Hardening Soil zemin modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İksa sistemi gömülü kiriş, plak eleman ve eşdeğer zemin yaklaşımları ile ayrı ayrı modellenmiş; elde edilen yatay deplasman, kesme kuvveti ve eğilme momenti sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca analiz sonuçları, iksa sisteminin konsol bölgesinde bulunan inklinometreden elde edilen nihai ölçümler ile değerlendirilmiştir. Böylece farklı modelleme yaklaşımlarının saha davranışını temsil etme kabiliyetleri araştırılmış ve derin kazı analizlerinde kullanılabilecek uygun modelleme yöntemlerine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2. SAYISAL ANALİZ

Derin kazı projelerinde iksa sistemlerinin davranışının belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analizler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak analiz sonuçlarının doğruluğu yalnızca kullanılan zemin modeline değil, aynı zamanda iksa sisteminin sayısal ortamda temsil edilme yöntemine de bağlıdır. Özellikle fore kazıklı iksa sistemlerinin iki boyutlu düzlem şekil değiştirme (plane strain) analizlerinde modellenmesi, üç boyutlu kazık-zemin etkileşiminin sadeleştirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle literatürde fore kazıkların gömülü kiriş (Embedded Beam), plak eleman (Plate) veya eşdeğer ortam yaklaşımları kullanılarak temsil edilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. (Sluis vd, 2013)

Plak elemanlar uzun yıllardır fore kazık ve diyafram duvar sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda kazık sistemi eşdeğer sürekli bir perde olarak kabul edilmekte ve eksenel rijitlik (EA) ile eğilme rijitliği (EI) parametreleri kullanılarak temsil edilmektedir. Bununla birlikte, plak elemanların kullanılması durumunda zemin ağı elemanın her iki tarafında ayrılmakta ve ayrık kazıklar arasındaki gerçek zemin davranışı tam olarak modellenememektedir. Bu nedenle özellikle kazık aralıklarının büyük olduğu durumlarda sistem davranışının olduğundan daha rijit tahmin edilebileceği belirtilmektedir. (Sluis vd, 2013)

PLAXIS içerisinde geliştirilen gömülü kiriş (Embedded Beam Row) elemanları ise ayrık kazıkların iki boyutlu analizlerde daha gerçekçi temsil edilebilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda kazık, zemin ağı üzerine yerleştirilen bir kiriş elemanı olarak tanımlanmakta; çevre sürtünmesi, uç direnci ve yatay etkileşim mekanizmaları özel ara yüz formulasyonları ile hesaba katılmaktadır. Yapılan çalışmalarda gömülü kiriş yaklaşımının, geleneksel plak eleman modellemelerine kıyasla kazık-zemin etkileşimini daha gerçekçi temsil edebildiği ve bazı durumlarda üç boyutlu analiz sonuçlarına daha yakın davranış sergilediği belirtilmiştir. (Andersen vd, 2023)
Alternatif bir yaklaşım olarak kullanılan eşdeğer zemin modeli (Equivalent Soil/Cluster) ise yapısal eleman kullanımını azaltarak iksa sistemini eşdeğer mekanik özelliklere sahip bir zemin bölgesi şeklinde temsil etmektedir. Bu yöntem özellikle ön tasarım çalışmaları ve parametrik analizlerde hesaplama süresini azaltabilmesine rağmen, yapısal elemanlara ait iç kuvvetlerin doğrudan elde edilememesi ve sistem rijitliğinin temsil edilmesindeki belirsizlikler nedeniyle dikkatli kullanılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, yaklaşık 7 m derinliğindeki fore kazıklı bir iksa sistemi gömülü kiriş, plak eleman ve eşdeğer zemin yaklaşımları kullanılarak ayrı ayrı modellenmiştir. Aynı geometri, yükleme koşulları ve zemin parametreleri altında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen yatay deplasman, kesme kuvveti ve eğilme momenti sonuçları karşılaştırılmış; ayrıca hesaplanan deplasmanlar saha inklinometre ölçümleri ile değerlendirilerek farklı modelleme yaklaşımlarının performansları araştırılmıştır.

2.1. Vaka Analizi

Bu çalışma kapsamında, Manisa ili Salihli ilçesinde yer alan bir fabrika tesisinin inşası amacıyla gerçekleştirilen kazı çalışmaları incelenmiştir. Proje sahasında kazı güvenliğinin sağlanması amacıyla fore kazıklı iksa sistemi uygulanmıştır. Çalışmada, herhangi bir ankraj veya iç destek elemanı içermeyen ve konsol olarak çalışan iksa kesiti ele alınmıştır. İncelenen kesitin seçilmesinde, destek elemanlarından kaynaklanabilecek ilave

değişkenlerin ortadan kaldırılarak farklı modelleme yaklaşımlarının daha doğrudan karşılaştırılabilmesi ve bu kesitte elde edilen inklinometre verilerinin değerlendirmeye elverişli olması etkili olmuştur.
İlgili kesitte nihai kazı derinliği 7m, fore kazıkların toplam boyu ise 13m'dir. İksa sistemi, 0.80 m çapında ve merkezden merkeze 1m aralıklarla imal edilen fore kazıklardan oluşmaktadır. Kazıkların üst kotunda birlikte çalışmalarını sağlamak amacıyla başlık kirişi bulunmaktadır.
Kazının PLAXIS'te tanımlanması işlemleri üç kademe halinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde saha uygulamasına uygun olarak kazı aşamaları kademeli biçimde tanımlanmış ve iksa sisteminin kazı sürecindeki davranışı aşamalı inşaat yaklaşımıyla modellenmiştir. İksa sisteminin arkasında organize sanayi bölgesine ait bir yol bulunması nedeniyle yol ve trafik etkilerini temsil etmek amacıyla modelde 10 kN/m/m değerinde yayılı sürşarj yükü dikkate alınmıştır.

Fore kazıklı iksa sisteminde meydana gelen yatay deplasmanların izlenmesi amacıyla çözümlenen kazıklardan birinin içerisine inklinometre kuyusu yerleştirilmiştir. İnklinometre kuyusunun uzunluğu, 13m olan kazık boyuna eşittir. analizlerden hesaplanan yatay deplasman profillerinin saha davranışıyla karşılaştırılmasında inklinometreden elde edilen son okuma sonuçları esas alınmıştır.

İncelenen iksa sistemi PLAXIS 2D ortamında gömülü kiriş (Embedded Beam), plak eleman (Plate) ve eşdeğer zemin (Equivalent Soil/Cluster) olmak üzere üç farklı yaklaşımla modellenmiştir. Oluşturulan modellerde kazı geometrisi, zemin tabakaları, zemin parametreleri, sürşarj yükü, sınır koşulları ve kazı aşamaları aynı tutulmuş; yalnızca fore kazıklı iksa sisteminin sayısal modelde temsil edilme biçimi değiştirilmiştir. Böylece modelleme yaklaşımının hesaplanan yatay deplasmanlar, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2.2. Zemin Özellikleri

Proje sahasındaki zemin koşulları, arazi ve laboratuvar çalışmaları kapsamında elde edilen geoteknik veriler esas alınarak değerlendirilmiştir. İncelenen kesitte zemin profili, yüzeyden itibaren sırasıyla siltli kil, kil, siltli kum ve kil tabakalarından oluşmaktadır. İlk siltli kil tabakası zemin yüzeyi ile 2 m derinlik arasında, kil tabakası 2 – 5 m arasında, siltli kum tabakası 5 – 6.5 m arasında ve alt kil tabakası ise 6.5–20 m arasında tanımlanmıştır. Sondaj çalışmalarında yeraltı su seviyesine zemin yüzeyinden yaklaşık 15 m derinlikte rastlanmıştır.

Sayısal analizlerde zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme davranışı Hardening Soil (HS) modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Bu model kapsamında zeminlerin rijitlik davranışının gerilme seviyesine bağlı olarak değişimi dikkate alınmıştır. Her bir zemin tabakası için doğal birim hacim ağırlık (γ_{unsat}), doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat}), kohezyon (c'), içsel sürtünme açısı (ϕ'), sekant rijitlik modülü ($\boldsymbol{E_{50}^{ref}}$), ödometre rijitlik modülü ($\boldsymbol{E_{oed}^{ref}}$), boşaltma-yeniden yükleme rijitlik modülü ($\boldsymbol{E_{ur}^{ref}}$), poisson oranı ($\nu_{ur}$) tanımlanmıştır.

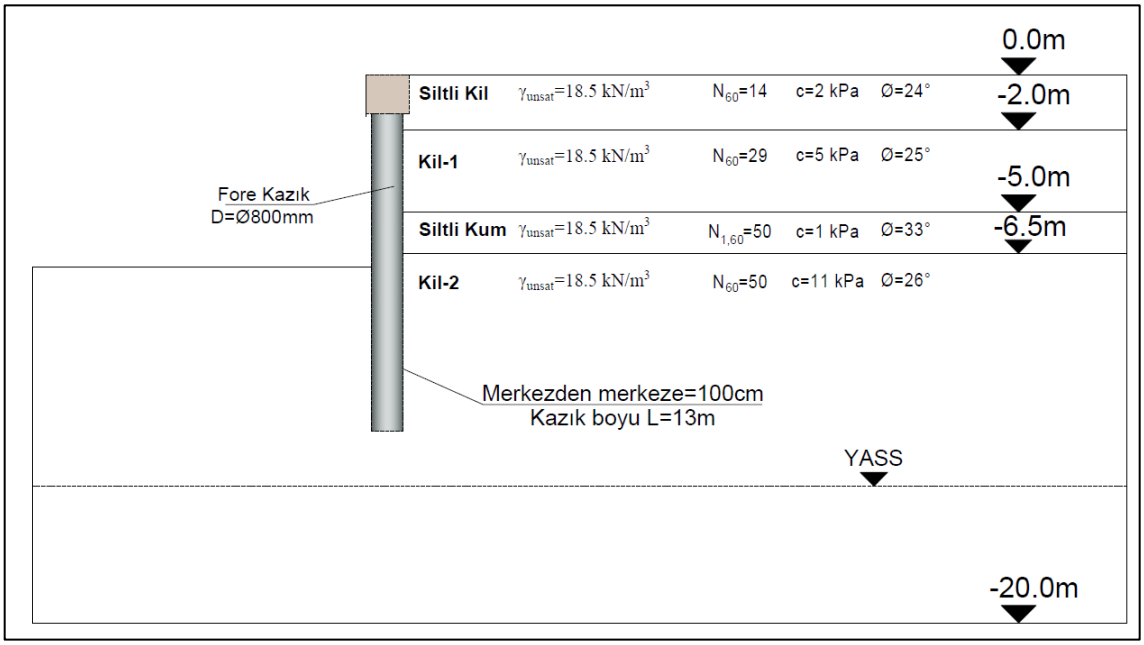
Analizlerde kullanılan zemin parametreleri, proje kapsamında gerçekleştirilen arazi (SPT Deneyleri) ve laboratuvar deneylerinden elde edilen bulgular ile geoteknik değerlendirmeler esas alınarak belirlenmiştir. Zemin parametrelerinin tayini sırasında

zemin katmanlarının kohezyonlu ve kohezyonsuz olmasına dikkat edilerek literatürde yer alan abaklar / ampirik bağıntılar dikkate alınarak Bowles 1996, Terzahgi&Peck 1967 ve Stroud 1988 çalışmalarından faydalanılmıştır. Zemin tabakalarının derinlik aralıkları ve sayısal analizlerde kullanılan mühendislik parametreleri Tablo 1.'de sunulmuştur. Tüm modelleme yaklaşımlarında aynı zemin profili ve malzeme parametreleri kullanılarak, iksa sisteminin farklı temsil biçimlerinin analiz sonuçları üzerindeki etkisinin bağımsız olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 1. Zemin birimlerine ait malzeme parametreleri

Zemin Birimi	Derinlik m	γ_{unsat} kN/m^3	γ_{sat} kN/m^3	c' kPa	Φ °	E_{50}^{ref} kN/m^2	E_{oed}^{ref} kN/m^2	E_{ur}^{ref} kN/m^2
Siltli Kil	0 – 2	18.5	18.5	2	24	11000	11000	33000
Kil – 1	2 – 5	18.5	18.5	5	25	23000	23000	69000
Siltli Kum	5 – 6.5	18.5	18.5	1	33	22000	22000	66000
Kil – 2	6.5 – 20	18.5	18.5	11	26	32000	32000	96000

Aşağıda yer alan Şekil 1. de idealize zemin profili, SPT değerleri ve kazık iksa elemanına ait bilgiler yer almaktadır.



Şekil 1. Zemin Profili

2.3. Sayısal Analiz Modeli

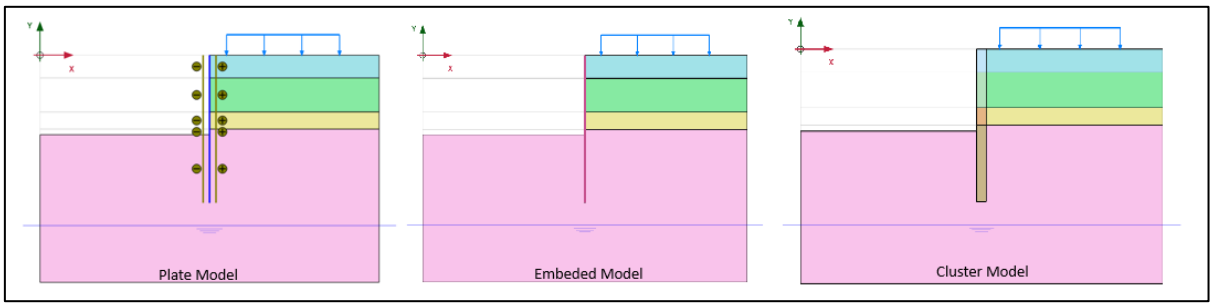
İncelenen fore kazıklı iksa sisteminin sayısal analizleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 2D 2025.1.3.5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model, düzlem şekil değiştirme koşullarında 30 m genişliğinde ve 20 m derinliğinde oluşturulmuştur. Model boyutları belirlenirken kazı nedeniyle meydana gelen gerilme ve şekil değiştirme değişimlerinin model sınırlarından etkilenmemesi amaçlanmıştır.

Modelin düşey yan sınırlarında yatay deplasmanlar sınırlandırılırken düşey deplasmanlara izin verilmiş, alt sınırda ise yatay ve düşey deplasmanlar sınırlandırılmıştır. Zemin yüzeyi

herhangi bir deplasman kısıtlaması tanımlanmadan serbest bırakılmıştır. Sonlu eleman ağı, tüm analiz modellerinde "very fine" ağ sıklığı kullanılarak oluşturulmuş ve fore kazık çevresinde ayrıca yerel ağ sıklaştırması uygulanmamıştır. Böylece farklı modelleme yaklaşımlarının aynı ağ koşulları altında karşılaştırılması sağlanmıştır.

Zemin tabakalarının doğrusal olmayan gerilme–şekil değiştirme davranışı Hardening Soil modeliyle temsil edilmiştir. İncelenen kesitte zemin tabakalarının yaklaşık yatay olması nedeniyle başlangıç gerilmeleri K_0 prosedürü kullanılarak oluşturulmuştur. Kazı aşamalarının modellenmesinde plastik analiz türü kullanılmış ve saha uygulamasına uygun olarak kazı üç kademe halinde gerçekleştirilmiştir. İksa arkasında bulunan organize sanayi yolunun etkisi, model yüzeyine uygulanan 10 kPa büyüklüğünde düzgün yayılı sürşarj yüküyle temsil edilmiştir.

Fore kazıklı iksa sistemi, iksa elemanının sayısal ortamda temsil edilme biçiminin hesap sonuçları üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla üç farklı yaklaşımla modellenmiştir. İlk modelde gömülü kiriş sırası (Embedded Beam), ikinci modelde plak eleman (Plate), üçüncü modelde ise eşdeğer zemin kümesi (Cluster) kullanılmıştır. Üç modelde model boyutları, zemin profili, zemin parametreleri, yeraltı su seviyesi, sürşarj yükü, sınır koşulları, sonlu eleman ağı dağılımı ve kazı aşamaları aynı tutulmuş; yalnızca fore kazıklı iksa sisteminin temsil biçimi değiştirilmiştir. Şekil 2. de modellere ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar modelleri

Gömülü Kiriş Modeli

Bu modelleme yaklaşımında, 0.8m çapında ve merkezden merkeze 1m aralıklı fore kazıklar gömülü kiriş elemanları kullanılarak temsil edilmiştir. Eleman boyu 13m'dir. Bu malzeme modeline ait parametreler aşağıda yer alan Tablo 2. de gösterilmiştir.

Tablo 2. Gömülü kiriş eleman parametreleri

Parametre	Birim	Değer
γ	kN/m^3	7.79
$L_{aralık}$	m	1
Çap	m	0.8
E	kN/m^2	32000000

Gömülü kiriş elemanlarında kazık–zemin etkileşimi, eksenel ve yanal etkileşim mekanizmaları üzerinden tanımlanabilmektedir. İncelenen fore kazıkların temel işlevinin düşey yük taşımak değil, kazı nedeniyle meydana gelen yatay zemin basınçlarını karşılamak olması nedeniyle çevre sürtünmesi tabakaya bağlı (layer dependent) olarak

tanımlanmış ve kazık uç direnci sıfır kabul edilmiştir. Yatay direnç için herhangi bir üst sınır tanımlanmamış ve lateral resistance parametresi unlimited olarak seçilmiştir. Böylece modeldeki yatay davranışın fore kazıkların eğilme rijitliği ve çevre zeminle olan etkileşimi tarafından belirlenmesi sağlanmıştır.

Plak Eleman Modeli

Bu modelleme yaklaşımında fore kazık sırası, eşdeğer sürekli bir plak eleman kullanılarak temsil edilmiştir. Ayrık fore kazıklara ait kesit özellikleri, düzlem dışı yöndeki kazık aralığı dikkate alınarak birim genişlik başına eşdeğer eksenel ve eğilme rijitliklerine dönüştürülmüştür. Bu malzeme modeline ait parametreler aşağıda yer alan Tablo 3. te gösterilmiştir.

Tablo 3. Plak eleman parametreleri

Parametre	Birim	Değer
γ	kN/m^3	7.79
EA	kN/m	16590000
EI	kNm^2/m	663500
d	m	0.69

Plak eleman yaklaşımında kazık sırası, zemin sürekliliğini kesen eşdeğer bir perde olarak temsil edildiğinden kazık–zemin etkileşiminin tanımlanması amacıyla elemanın çevresinde arayüz elemanları kullanılmıştır. Arayüz dayanım azaltma katsayıları, plak elemanın geçtiği zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak $R_{inter} = 0.60 - 0.64$ aralığında tanımlanmıştır. Böylece plak eleman ile farklı zemin tabakaları arasındaki kayma dayanımının, ilgili zemin tabakasının dayanım özellikleriyle uyumlu olarak azaltılması amaçlanmıştır.

Eşdeğer Zemin Modeli

Bu modelleme yaklaşımında fore kazıklı iksa sistemi, eşdeğer mekanik özelliklere sahip bir zemin kümesi kullanılarak modellenmiştir. Herhangi bir yapısal eleman modellenmemiştir. Bu amaçla kazık ekseni boyunca 0.8m genişliğinde bir cluster bölgesi oluşturulmuş ve söz konusu bölgeye doğrusal elastik malzeme modeli atanmıştır. Cluster genişliği, fore kazık çapına eşit seçilerek iksa sisteminin fiziksel geometrisinin model içerisinde korunması amaçlanmıştır.

Fore kazıkların farklı rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip dört zemin tabakasından geçmesi nedeniyle bütün kazık boyu boyunca tek bir eşdeğer elastisite modülü kullanılmamıştır. Kazığın içerisinden geçtiği her bir zemin tabakası için beton ve zemin bileşenlerinin mekanik özellikleri dikkate alınarak ayrı eşdeğer elastisite modülleri hesaplanmıştır. Böylece eşdeğer zemin kümesinin rijitliğinin derinlikle birlikte değişmesi ve kazığı çevreleyen zemin tabakalarının farklı özelliklerinin modele yansıtılması tam olarak en doğru şekilde sağlanmıştır. Rijitlik değerlerinin birbirine yakın çıkmasının ana nedeni zeminlerin elastisite modüllerinin birbirine mertebesel olarak yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Her bir tabaka için hesaplanan eşdeğer elastisite modülleri, ilgili derinlik aralığındaki cluster bölgesine ayrı ayrı atanmıştır. Eşdeğer zemin modelinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 4. de sunulmuştur.

Tablo 4. Cluster parametreleri

Tabaka	Tabaka Tanımı	$\mathbf{E'_{ref}}$ kN/m^2
Layer – 1	Sitli Kil	20.110.281
Layer – 2	Kil -1	20.114.741
Layer – 3	Sitli Kum	20.114.369
Layer – 4	Kil – 2	20.118.086

Eşdeğer zemin modelinden kesme ve moment değerlerine geçiş sırasında Plaxis yazılımında bulunan "structural forces in volume plates" modülü kullanılmıştır.

Analiz Aşamaları ve Karşılaştırma Yöntemi

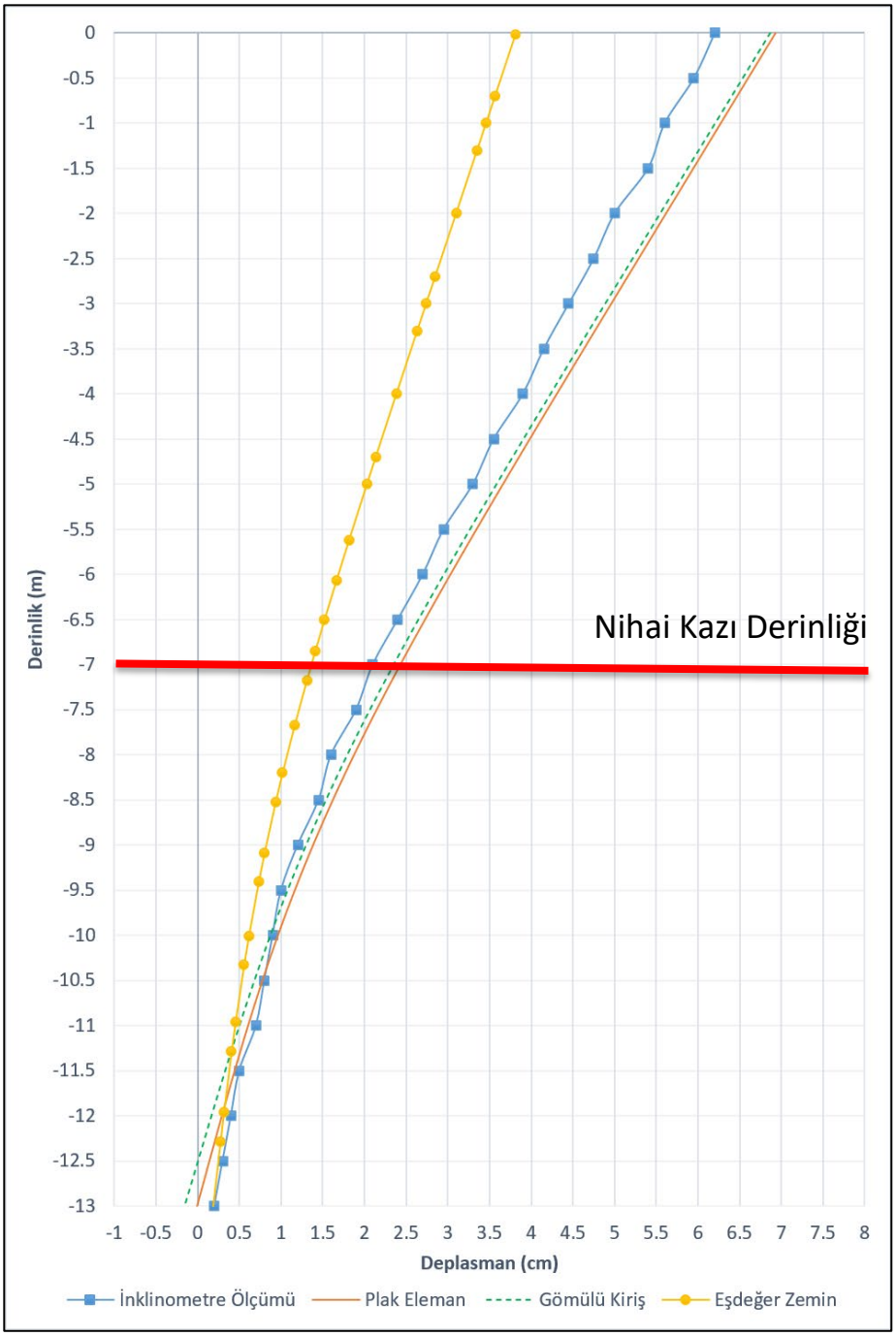
Başlangıç gerilmelerinin oluşturulmasının ardından fore kazıklı iksa sistemi modelde etkinleştirilmiştir. Kazı işlemi saha imalat sırasına uygun biçimde üç aşamada simüle edilmiş ve her kazı aşamasında ilgili zemin kümesi devre dışı bırakılmıştır. Her analiz aşamasında meydana gelen deplasmanlar ve iksa elemanlarında oluşan iç kuvvetler hesaplanmıştır.

Modellerin karşılaştırılmasında nihai kazı aşamasında elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Gömülü kiriş, plak eleman ve eşdeğer zemin modellerinden elde edilen yatay deplasman profilleri karşılaştırılmış; hesaplanan deplasmanlar, kazık içerisine yerleştirilen inklinometreden elde edilen nihai ölçüm profiliyle birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı modelleme yaklaşımlarından elde edilen kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri karşılaştırılarak iksa elemanının sayısal temsil biçiminin iç kuvvet tahminleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Yatay Deplasmanların Karşılaştırılması

Nihai kazı aşamasında inklinometreden ölçülen maksimum yatay deplasman 6.20 cm olarak belirlenmiştir. Aynı aşama için plak eleman modeliyle 6.93 cm, gömülü kiriş modeliyle 6.87 cm ve eşdeğer zemin modeliyle 3.81 cm maksimum yatay deplasman hesaplanmıştır. Plak eleman ve gömülü kiriş modellerinden elde edilen maksimum deplasmanlar arasındaki fark yaklaşık %0.9 olup iki yapısal eleman yaklaşımının birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Plak eleman ve gömülü kiriş modelleri, inklinometre ölçümüne göre sırasıyla yaklaşık %11.8 ve %10.8 daha yüksek maksimum deplasman tahmin etmiştir. Eşdeğer zemin modeliyle hesaplanan maksimum yatay deplasman ise inklinometre ölçümünden yaklaşık %38.5 daha düşük kalmıştır. Şekil 3 de deplasman profilleri karşılaştırılmıştır.

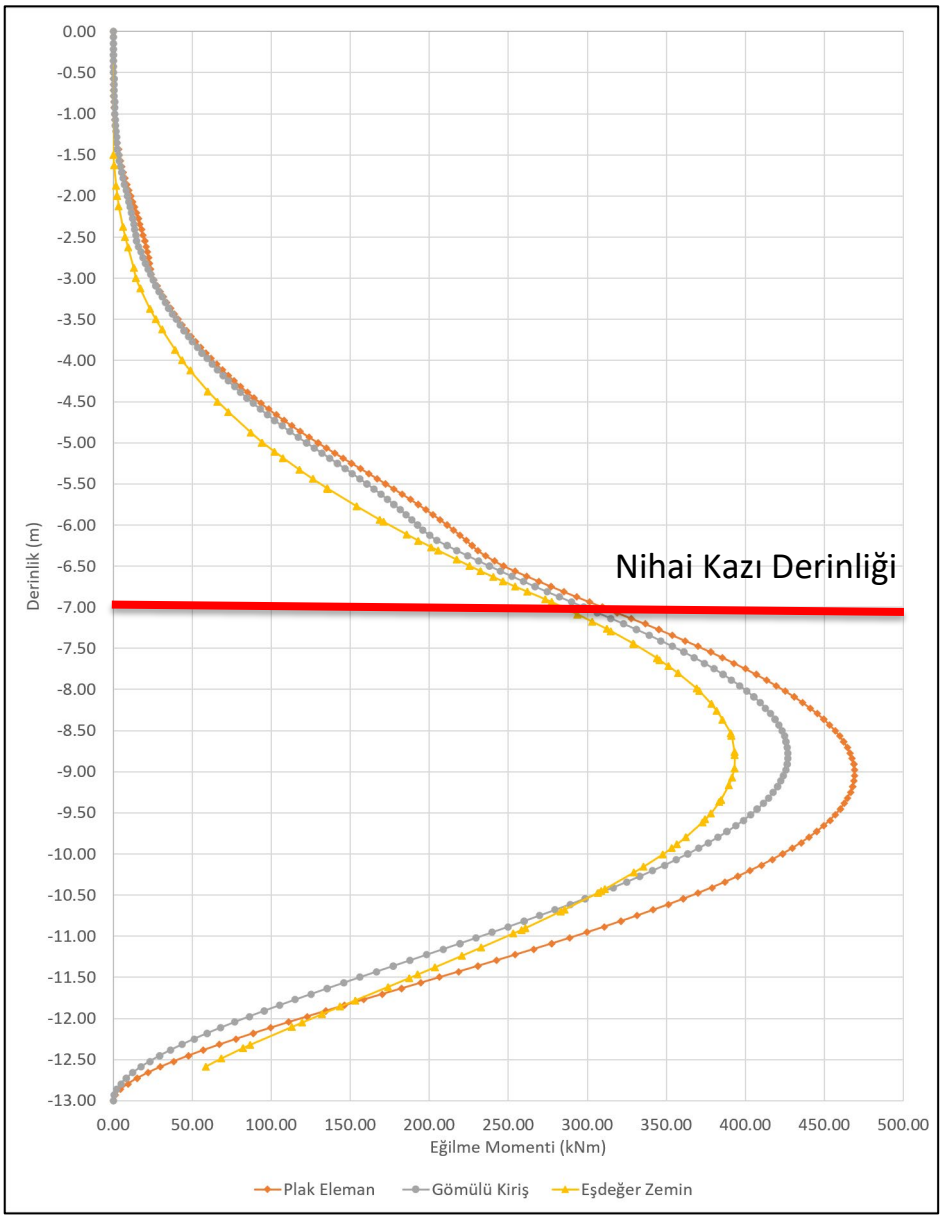


Şekil 3. Deplasman profillerinin inklinometre ölçümleriyle karşılaştırılması

3.2. Eğilme Momentlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4. incelendiğinde, üç modelde de eğilme momenti dağılımlarının benzer bir eğilim gösterdiği, ancak moment büyüklüklerinin farklılaştığı görülmektedir. Maksimum eğilme momentleri kazı tabanının altında, yaklaşık 9m derinlikte oluşmuş; en yüksek değer plak eleman modelinde, en düşük değer ise eşdeğer zemin modelinde elde edilmiştir. Gömülü kiriş modeli bu iki yaklaşım arasında kalırken, tüm modellerde eğilme momentleri kazık tabanına doğru azalarak sıfıra yaklaşmıştır. Bu sonuçlar, farklı modelleme yaklaşımlarının kritik moment bölgesini benzer şekilde öngördüğünü, ancak hesaplanan moment

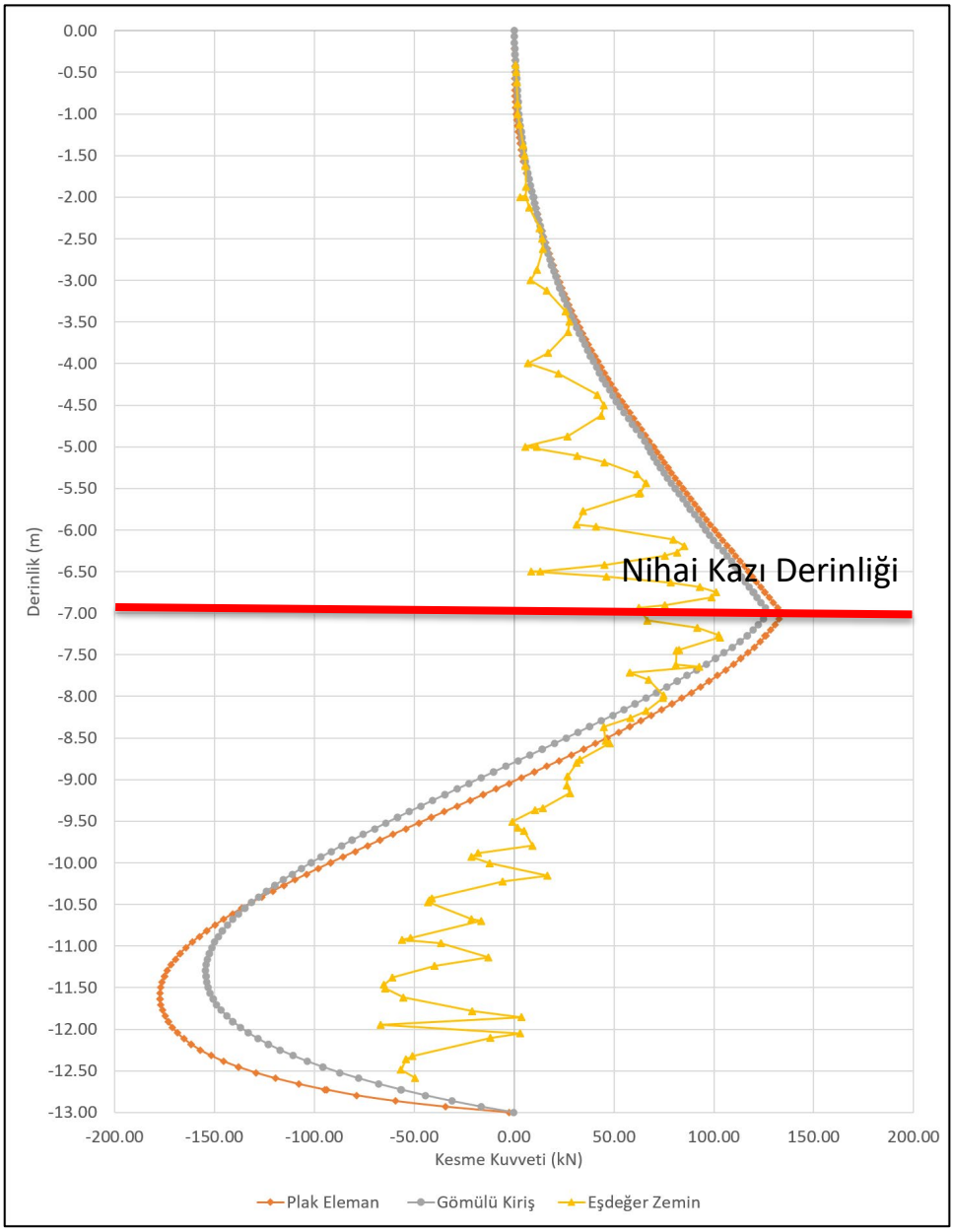
büyüklüklerinin iksa sisteminin temsil biçiminden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 4. Eğilme momentlerinin karşılaştırılması

3.3. Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5. te verilen kesme kuvveti dağılımları incelendiğinde, plak eleman ve gömülü kiriş modellerinin kazık boyunca benzer bir davranış gösterdiği görülmektedir. Her iki modelde kesme kuvveti kazı tabanı yakınında en yüksek pozitif değerine ulaşmış, yaklaşık 10.5m derinlikte işaret değiştirmiş ve 11.5 – 12m aralığında en yüksek negatif değerini almıştır. Plak eleman modeli, gömülü kiriş modeline kıyasla daha yüksek pozitif ve negatif kesme kuvvetleri üretmiştir. Eşdeğer zemin modelinde ise kesme kuvveti dağılımı daha düşük büyüklükte ve belirgin dalgalanmalar içeren bir profil sergilemiş; bu durum eşdeğer zemin yaklaşımının iç kuvvetleri yapısal eleman modelleri kadar düzgün temsil edemediğini göstermiştir.



Şekil 5. Kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, 7 m derinliğindeki konsol fore kazıklı iksa sistemi; plak eleman, gömülü kiriş ve eşdeğer zemin olmak üzere üç farklı yaklaşımla modellenmiş ve nihai kazı aşamasına ait sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tüm modellerde beklenen konsol davranışı elde edilmiş ve maksimum yatay deplasman kazık üst kotunda meydana gelmiştir. İnklinometrede ölçülen maksimum yatay deplasman 6.20 cm iken plak eleman ve gömülü kiriş modellerinde sırasıyla 6.93 cm ve 6.87 cm değerleri hesaplanmıştır. Eşdeğer zemin modelinde maksimum yatay deplasman 3,81 cm olarak hesaplanmış ve bu değer inklinometre ölçümünün yaklaşık %38,5 altında kalmıştır.

Deplasmanlar açısından incelendiğinde gömülü kiriş ve plak elemanların saha ölçümlerine göre en doğru çıktıları verdiği kanaatine varılmıştır.

Nihai kazı aşamasında maksimum eğilme momentleri plak eleman, gömülü kiriş ve eşdeğer zemin modellerinde sırasıyla 469; 427 ve 393 kNm olarak elde edilmiştir. Üç yaklaşımda da moment dağılımının genel biçimi benzer olmuş ve maksimum moment yaklaşık 9m derinlikte, kazı tabanının yaklaşık 2m altında meydana gelmiştir. En yüksek eğilme momenti plak eleman modelinde hesaplanmıştır. Buna göre plak eleman modeli iç kuvvetler açısından en yüksek, eşdeğer zemin modeli ise genel olarak en düşük sonuçları üretmiştir.

İncelenen vaka özelinde plak eleman ve gömülü kiriş yaklaşımları hem deplasman profili hem de saha ölçümlerine yakınlık bakımından benzer sonuçlar vermiştir. Plak eleman modelinde hesaplanan yüksek eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri, bu modelleme yaklaşımının incelenen kesitin yapısal boyutlandırılması açısından daha konservatif sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

3 kesitin her biri için toptan göçmeye karşı güvenlik katsayısı analizleri yapılmış olup, elde edilen değerler sırasıyla 1.19 (plate eleman), 1.23 (beam eleman) ve 1.37 (cluster) olarak hesaplanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu bildirinin hazırlanması sürecinde gerekli tüm imkânlar Yüksel Proje tarafından sağlanmıştır. Çalışmaya verdikleri değerli desteklerden dolayı Yüksel Proje'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Andersen, F., & Lodahl, M. R. (2023). Modelling of Soldier Pile Walls in PLAXIS 2D. Proceedings of the 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2023). DOI: 10.53243/NUMGE2023-25

Bowles, J. E. (1996). "Foundation Analysis and Design" 5th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., London.

Sluis, J., Besseling, F., Stuurwold, P., & Lengkeek, A. (2013). Validation and Application of the Embedded Pile Row Feature in PLAXIS 2D. PLAXIS Bulletin

Stroud M. A. (1988). "The Standart Penetration Test - Its Implication and Interpretation" Penetration Testing in the UK, Thomas Telford, London.

Terzaghi, K. ve Peck, R. B. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice" John Wiley & Sons, New York.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
γ	Birim hacim ağırlık	c'	Kohezyon
E	Elastisite modulu	ϕ'	İçsel sürtünme açısı
d	Eşdeğer çap	EA	Eksenel rijitlik
EI	Eğilme rijitliği	R_{inter}	Arayüz katsayısı