

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Derin Kazılarda 2B ve 3B Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması

Investigation of 2D and 3D Analysis of Deep Excavation by Finite Element Method

Göksu Tunç^{1,*}, Seyhan Fırat²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 09.04.2025

Kabul / Accepted: 14.05.2025

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Göksu Tunç goksuhiziroglu@gmail.com

ÖZ: Büyük şehirlerde ulaşımın yoğunluğu ve mevcut yolların kısıtlı olması nedeniyle, mevcut zemin seviyesinin altında bu durumu çözmeye yönelik ulaşım alternatifleri değerlendirilmektedir. Kazı çevresindeki yapılar, yollar ve diğer yapılarda oluşabilecek etkileri önlemek için kazılar uygun yöntemler ile desteklenmektedir. Bu nedenle mevcut binalara yakın bir yerde derin kazıların yapılması kaçınılmazdır. Seçilecek iksa sistemi zemin yapısına ve bu çevre yapılarına doğrudan bağlıdır. Derin kazılarda oluşacak iksa düşey elemanının tesir kuvvetlerinin ve yatay deplasmanlarını elde etmek amacı ile çoğunlukla iki boyutlu analizleri yapılmaktadır. Ancak, derin kazılarda üç boyutta da bu etkiler oluşur. Bu kazılarda köşe etkisi iki boyutlu programlar kullanılarak modellenemez. Bu durumda iki boyutta yapılan analizlere ek olarak üç boyutlu analizlere ihtiyaç duyulmakta ve sistem davranışı iki durumda da irdelenerek hesaplanan sonuçlar ölçülen sonuçlarla karşılaştırılır. Bu çalışma, sonlu eleman yöntemi ile iki boyutlu ve üç boyutlu analiz yaparak sonuçlarının irdelenmesi ile iki durumun aralarındaki oransal farklılıkların tespit edilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında bir bölge seçilerek zemin idealize edilip geoteknik parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametre seti Plaxis2D ve Plaxis3D ile modeller oluşturulmuştur. Üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analiz yardımı ile elde edilen sonuçların oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Derin Kazılar, Kazık, Sonlu Elemanlar Metodu Analizleri, Maliyet Analizi.

ABSTRACT: In big cities, due to the intensity of transportation and limited existing roads, transportation alternatives are being evaluated to solve this situation below the existing ground level. Excavations are supported with appropriate methods to prevent possible effects on existing structures, roads and other structures around the excavation. Therefore, it is inevitable to make deep excavations close to existing buildings. The excavation support system to be selected is directly dependent on the ground structure and these surrounding structures. To obtain the impact forces and horizontal displacements of the vertical excavation support element to be formed in deep excavations, two-dimensional analyses are mostly performed. However, excavations behave in a way defined as three-dimensional. When deep excavations are made, the corner effect on the behavior of the support elements cannot be modeled using two-dimensional programs. In this case, in addition to the analyses made in two dimensions, three-dimensional analyses are needed, and the system behavior is examined in both cases and the calculated results are compared with the measured results. This study aims to determine the proportional differences between the two cases by examining the results by performing two-dimensional and three-dimensional analyses with the finite element method. Within the scope of the study, a region was selected, the ground was idealized, and its geotechnical parameters were determined. The obtained parameter set was used to create models with Plaxis2D and Plaxis3D. It is thought that the results obtained with the help of two-dimensional analysis without three-dimensional modeling can be interpreted proportionally.

Keywords: Deep Excavation, Pile, Finite Element Method (FEM) Analysis, Cost Analysis.

1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda temel veya bodrum katları, yeraltı petrol tankları, metrolar veya toplu taşıma sistemlerinin inşasında kazı kaçınılmazdır. Yeraltı alanına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu doğrultuda derin kazılara ihtiyaç artmakta bu durumda kazı aşamaları sırasında bitişik yapılara, yollara daha da dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durumda en önemli etkileri oluşturan durum zemindeki gerilim durumlarının değişmesidir. Kazı davranışı gözlemlerken içinde bulunulan zeminin özellikleri iyi tayin edilmeli bu doğrultuda tedbirler alınmalıdır. Bu sayede bitişik nizam yapılar ile derin kazı yapılan yapının etkileşimi en asgari düzeyde tutulup tedbirler en doğru şekilde nihailendirilmelidir.

Uygun bir kazı destek sisteminin tasarımı, kazı kaynaklı deformasyonları azaltmak için önemlidir. Kazı destek sistemi çok sayıda faktörden etkilenebilir. Derin kazı analizi hem stabilite hem de deformasyon analizini içerir. Kazıların temel çalışma prensibi yapı-zemin etkileşimidir. Zemin doğrusal olmayan, elastik olmayan ve anizotropik bir malzemedir ve su içeriği zemin davranışını etkiler. Dolayısıyla kazı yapılan zeminin içeriği, kohezyonlu, kohezyonsuz ya da kaya olması sistemdeki genel davranışı etkileyerek standardize edilemeyen karmaşık sonuçları doğuracaktır. Derin kazı sistemlerinin analizi, toprağın elasto-plastik davranışının, zemin ile destek sistemindeki iksa elemanının arasındaki arayüz davranışının ve kazı sürecinin simülasyonlarını içerir. Bu nedenle, bu karmaşık yapının çözümlemesi sayısal yöntemleri kullanarak mümkün kılınmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi diferansiyel denklemler için sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan bir sayısal tekniktir. Sonlu elemanlar yöntemi içerisinde bulunan her bir tanımlamayı elemana böler ve bu elemanları düğüm noktalarında yeniden birleştirir. Elemanları birbirine bağlayarak, alan niceliği tüm zemin veya yapı üzerinde interpolate edilmiş olur. Bu süreç, eş zamanlı cebirsel denklemlerle sonuçlanır. 2009 yılında Kung tarafından yatay iksa hareketini etkileyen faktörler üç grup altında sınıflandırılmış ve kazının karmaşık bir yapı-zemin etkileşimi olduğu vurgulanmıştır [1]. Bu faktörler incelendiğinde zeminin karakterizasyonu, tasarımı etkileyen genel kabuller ve inşaatın yapımında

sistem davranışını etkileyen faktörler olarak özetlenmektedir.

Literatürde yapılan araştırmalar da göstermektedir ki derin kazılar basit bir problemten ziyade karmaşık bileşenleri olan birden fazla değişken barındıran mekanizmalardır. Zemini doğru tanımak içerisindeki kazı yöntemini bu doğrultuda oluşturmak en temel husustur. Kazı yapılmadan önce öngörülemeyen problemler için nümerik analizler yapılarak gerçeğe en yakın tanımlamalar ile derin kazılar incelenmelidir. Kazı modellemelerinde dikkate alınması gereken en önemli unsurlar kazılacak olan bölgenin gerçeğe en doğru yansıtılmasıdır. Bu doğrultuda kazı çukurunun derinliği, kazının yapılacağı bölgede bulunan tüm çevre yapılar (kat bilgisi, bodrum bilgisi gibi), mevcut altyapılar ile ilişkisi, kazı yapılacak olan bölgenin detaylı arazi bilgisi, zemin/kaya tabakalanması özellikleri, yeraltı suyu koşulları gibi detaylı bilgilere sahip olunmalı ve elde edilen veriler doğrultusunda model gerçeğe en doğru şekilde simüle edilmelidir.

Yapılan literatür araştırmalarında çoğunlukla iksa elemanlarının yatay deplasmanları incelenirken yapılan modellemeler ile saha çalışmaları kıyaslanmaktadır. 2002 yılında yayımlanan okul kazısından elde edilen çalışmada [2] yer alan veriler kazı sırasında oluşan yatay deplasmanların açıl dönme oranları ile kıyasını içermektedir. Diğer bir çalışma ise Kaliforniya, San Francisco şehir merkezindeki kıyı şeridi boyunca yapılan metro kazılarından elde edilen yatay deplasmanları ve elde edilen bitişik binaların tahmini oturmaları ile yapım sonrasında oluşan deformasyonların tolere edilebilir sınırları incelemektedir [3]. Literatürde yer alan çalışmalardan bazıları ise sistem davranışının üç boyutlu olarak tanımlanması gerektiğini, bu sayede köşe etkisinin merkeze kıyasla daha az deplasman değerlerine sahip olduğunu ve bu davranışın ise daha kabul edilebilir olduğunu göstermektedir [4]. İksa yatay deplasmanlarına destek olması ve iksa yer değiştirmesini sınırlamak için etkili bir önlem olarak pasif direncini artırma girişiyle jet grouting ile iyileştirme yöntemleri de yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Bu amaçla yapılan çalışmalar da [5] iksa yatay deplasmanlarının iyileştirme yöntemi kullanıldığında ne ölçüde iksa yatay davranışını etkilediği araştırılmıştır [6]. Üç boyut etkisinin incelendiği diğer bir çalışma ise

Bangkok zeminlerinde yapılan bir kazıyı incelemektedir. Bu çalışma temelinde analiz yapmadan tablo yöntemi ile kazı sırasında iksa duvarlarında oluşan yanal maksimum deformasyonu, köşe etkisini de içerecek şekilde yakınsamasını incelemektedir. Yapılan çoğu çalışma iksa yatay deplasmanlarının iki boyutta ve üç boyuttaki deplasmanlarını incelerken bu sonuçları gerçek saha deplasman sonuçları ile kıyaslamakta ve oransal yaklaşım sunmaktadır. Genellikle sonuçlar iksa sistemindeki kazık/diyafram duvar gibi düşey elemanların eğilme davranışını incelemez. Ancak literatürde yer alan [7] çalışma sistem davranışını deplasmanların yanı sıra düzlem içi eğilme ve düzlem dışı eğilme momenti olarak incelemekte ve bu davranışları köşe etkisini de içinde bulunduran tahminlerle sunmaktadır. Bu makale davranış yorumlaması sırasında kazı derinliği ve bu kazının kare/dikdörtgen olması gibi değişkenleri de hesaba katan detaylar içererek yüzdece farkları yansıtmaktadır. Literatür verileri gösteriyor ki derin kazı yapılması basit bir problem olmaktan ziyade zemin davranışının gerçeğe en yakın tanımlanması gerektiği karmaşık bir mekanizmadır. Bu durumun yapılan çalışmalarla, ampirik formüllerle ve en önemlisi gelişen teknoloji ile sonlu elemanlar yardımı ile modellenerek ön çalışmalarının yapılması, sonrasında ise kazı sahasının kontrollü şekilde kazılarak izlenmesi gerekmektedir.

Bu araştırmanın amacı, derin kazılarda 2B ve 3B yöntemi ile sonlu eleman modellemelerinin yapılmasıdır. Üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analizlerin yardımı ile elde edilen sonuçların da oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

2. SONLU ELEMANLAR ANALİZ KABULLERİ

2.1 Modelleme Bilgileri

Bu çalışmaya konu olan derin kazı bir metro kazısı olup seçilen bölgenin iki cephesinde de yapılar yer almakta ve kazı derinliği yaklaşık 27 m'dir. Modelde kazılması planlanan yapı boyutları 21,80 m eninde 107,80 m boyundadır. Bu kazı düşeyde 120 cm ara ile 100 cm'lik fore kazıklarla desteklenecek olup yatay destek elemanı olarak dört farklı kotta strut (boru eleman) kullanılmıştır.

Kazı derinliği göz önüne alındığında model genişliği ve derinliği yönetmelikte [8] verildiği üzere minimum koşulların üzerinde modellenmiştir. Zemin tabakaları tanımlanırken tasarıma uygun bünye modeli seçilmiş ve her iki analizde de (2B ve 3B Plaxis analizi) aynı metot ve zemin girdileri kullanılmıştır.

Modelleme yapılırken alınan kararlar Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1: Modellemeye dair genel bilgiler.

Tanımlamalar	Detay Bilgisi
Kazı Derinliği	27,05 m
Düşey İksa Elemanı	Ø100/120 cm Kazık
Düşey İksa Eleman Boyu	32,15 m
Düşey İksa Eleman Soket Boyu	6 m
Yatay İksa Elemanı 1.Sıra	812,8 x 15,9 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 2.Sıra	1219,2 x 20 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 3.Sıra	1219,2 x 20 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 4.Sıra	1219,2 x 15,9 mm Strut
Yatay Eleman Yatay Aralığı	5 m
Başlık Kirişi Boyutları	120 x 90 cm Kiriş
1. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş
2. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş
3. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş

2.2 Kazı Aşamaları

Gerçeğe en uygun sonuçların alınabilmesi ancak gerçeğe en doğru modelleme yöntemi ile sağlanabilmektedir. Bu doğrultuda kazı aşamaları sırası ile tariflenmeli, inşaat aşamasında da bu metodoloji doğrultusunda kazılmalıdır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemi ile bu aşamaları tanımlayabilen ve verilen sıralama doğrultusunda nihai kazık deplasmanlarını, yüzey oturmalarını ve kazık tesirlerini verebilmektedir. Modelde verilen yapım yöntemi gerçeğe en yakın şekilde Tablo 2'de verilmektedir.

Modelleme yapılırken her adım modelle girilmeli ve elde edilen sonuçların sağlıklı kıyaslanabilmesi için her iki analiz metodunda da aynı kabullerle gidilmelidir.

Tablo 2: Derin kazı aşamaları.

Derin Kazı İmalat Yöntemi
Yüzey yüklerin aktif edilmesi
Kazık imalatının yapılması
Başlık kirişinin imal edilmesi*
1.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi
1.sıra strutın imal edilmesi
2.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
2.sıra strutın imal edilmesi
3.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
3.sıra strutın imal edilmesi
4.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
4.sıra strutın imal edilmesi
Tam kazı kotuna kadar kazılması
Temel imalatının yapılması
4.sıra strutın demontajının yapılması
Ara döşeme imalatının yapılması
3.sıra strutın demontajının yapılması
Ara döşeme imalatının yapılması
2.sıra strutın demontajının yapılması
En üst tabliye betonunun imalatının yapılması
1.sıra strutın demontajının yapılması
Nihai durum güvenlik analizinin yapılması

*Kiriş imalatları 3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır.

3. MODEL İÇİN KULLANILAN ZEMİN BİLGİLERİ

Çalışma kapsamında analizlere konu olan bir metro istasyonu olup kazı için bir bölge seçilmiş, zemin verileri bu bölge üzerinde oluşturulmuş ve yer altı su seviyesi yüzeyden 8 m aşağıda alınmıştır. Bu kapsamda oluşturulan idealize zemin profili yüzeyden itibaren sırası ile kalın bir dolgu tabakası ardından zeminleşmiş kaya ardalanması ve analiz sonuna kadar da orta dayanımlı-zayıf Kireçtaşı-Kiltaş-Marn ardalanması (W3-W4) olarak görülmektedir. İdealize zemin profiline ait veriler Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3: İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri.

Derinlik (m)	Tabaka Betimlemesi	Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m ³)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)	Deformasyon Modülü E' (MPa)
0.0-4.0	Dolgu	18	5	25	15
4.0-18.0	Zeminleşmiş Killi Kireçtaşı-	20	15	27	40
18.0-...	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltaş-Marn Ardalanması (W3-W4)	23	70	27	140
18.0-...	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltaş-Marn Ardalanması (W3-W4) (D=0.7)	23	40	18	55

Analizlerde kullanılacak tasarım parametreleri kayanın mekanik kazılar sırasında örselenme durumu da göz önüne alınarak kazı bölgesine etkiyen ilk üç metre için örselenme faktörü (D=0.7) olarak alınmış, üç metreden sonraki bölgeler için ise örselenmemiş (D=0) kaya verileri hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu durum Hoek tarafından 2002 tarihli makalesinde [9] detaylıca anlatılmaktadır. Plaxis modelleri içerisinde kullanılan bünye modeli Dolgu ve Zeminleşmiş kaya parametreleri için "Hardening Soil (HS)- Pekleşen Zemin Modeli" kullanılırken, kaya modellemesinde "Mohr-Coulomb Modeli (MC)" kullanılmaktadır.

Zemin verilerine ek olarak model içerisinde derin kazılara çevre yapıların etkisinin de etkisini tespit etmek amacı ile yapı eklenmiş olup bu bina bilgileri Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4: Çevre yapı bilgileri.

Bina/Yapı Konumu	Kat Bilgisi	Bodrum Bilgisi	Temel Derinliği (m)	Kazıktan Merkezin Uzaklığı (m)	Alınan Bina/Yapı Yüklü (kPa)
Planda Kuzeyde Kesitte Kazı Bölgesinin Sağında	6	1	3	4 ile 7 (Değişken)	110
Planda Güneyde Kesitte Kazı Bölgesinin Solunda	9	1	3	3 ile 7.5 (Değişken)	135

Plaxis 2D ve Plaxis 3D sonlu eleman yazılımı ile derin kazılar gerçekle uyumlu şekilde modellenmiş, kazı sırasında yapılan her adım için fazlar iki modelde de aynı kabullerle tamamlanmıştır.

3.1 Hardening Soil (HS)- Pekleşen Zemin Modeli

Pekleşen zemin (Hardening soil) modeli temeli plastisite teorisi olan gelişmiş bir zemin modelidir [10]. Bu model en yaygın olarak bilinen hiperbolik modeli temel alır ancak hiperbolik modelden daha çok gelişmiş bir versiyonudur. Hiperbolik model ile en temel farkı elastik teori yerine plastik teoriyi kullanır [11].

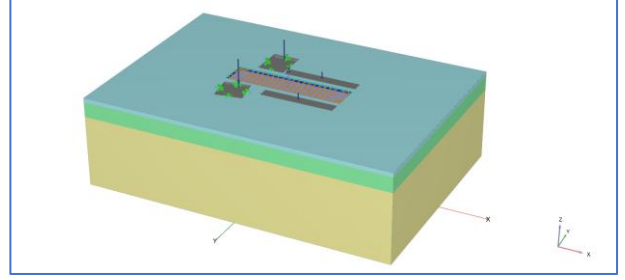
3.2 Mohr-Coulomb Modeli

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ilk bölgesi elastik, ikinci bölgesinde ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımını temel alan bir çözüm yöntemidir. Bu bünye modeli zeminlerde önerilmemekte olup yükleme ve yük boşaltma durumlarındaki zemin davranışını modelde yansıtamadığı için genelde önerilmediği bilinmektedir [11].

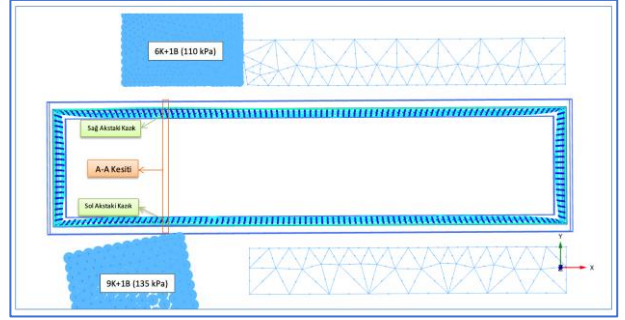
4. 2B VE 3B ANALİZ ÇALIŞMALARI

Plaxis2D olarak adlandırılan 2B Plaxis yazılımı, iki boyutta geoteknik mühendisliğinde zeminde oluşan deformasyon ve stabilite analizi için geliştirilmiş, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir programdır. 3D sonlu elemanlar analizi için PLAXIS 3D yazılımı kullanılır. PLAXIS 3D, Geoteknik mühendisliğinde kazı yaparken oluşan üçüncü boyut etkilerini de dikkate alarak analiz yapabilmektedir. İki modelleme yönteminde de zemin verileri aynı alınmış, bünye modelleri aynı doğrultuda kullanılmıştır. Buna ek olarak kazı aşamaları aynı şekilde tanımlanarak değişkenler minimize edilmiş, sonuçlarda elde edilen farklılıkların yalnızca üçüncü boyut etkisi üzerindeki değişkenliğin incelenmesi amaçlanmıştır [12].

Derin kazılarda incelenen ana unsurlar düşey iksa elemanının deplasman değeri ve buna bağlı oluşan iç tesir kuvvetleridir. Bu doğrultuda sistem çözümünde en olumsuz sonucu veren kesit bölgesi belirlenir ve 2B analizler bu bölgeyi içerecek şekilde oluşturulur. 3B analizlerde ise mevcut yapılar kazılacak olan bölge ile gerçeğe uygun şekilde modellenerek genel davranış incelenebildiği gibi detaylı incelenme gereken bölgelerden kesitler alınarak incelemeler yapılabilir. 2B modelinde alınan kesit çevre yapı etkileşimlerinin de etkisini inceleme amacı ile iki tarafında da mevcut bina tanımlaması olan bölgeden alınmış olup 3B modelde de aynı bölgede yer alan sonuçlarla kıyaslanmıştır. 3B modellemesi Şekil 1’de gösterilmiş olup Şekil 2’de ise ilgili modeldeki plan görünümü verilmektedir. Plan görünümünde analizlerin kıyaslanacağı Kesit A-A olarak adlandırılan kesit yeri gösterilmektedir.

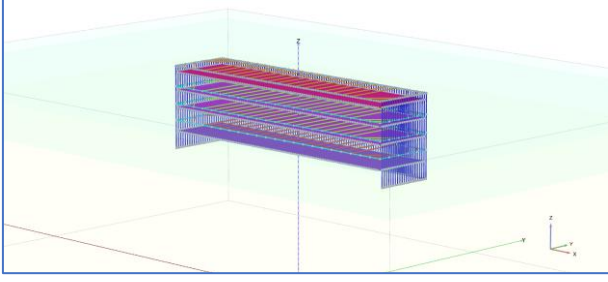


Şekil 1: Plaxis3D modeli.



Şekil 2: Plaxis3D plan kesiti (A-A kesit gösterimi).

Bu çalışma kapsamında kazı sırasında oluşan kazık deplasmanlarına ek olarak kazıklara etkiyen tesir kuvvetleri de incelenmiştir. Bu kazık davranışları ve tesir kuvvetleri incelendiğinde elde edilen maksimum kesme ve moment kuvvetleri mesnet noktalarında olup olmadığına bakılmıştır. Mesnet noktalarında oluşan rijitlik değişiminden kaynaklı noktalar silinmiş, ilgili bölgeler sonuçlara dahil edilmemiştir. Bu mesnet noktaları model içerisinde yer alan strutlar, döşemeler ve temel olarak tanımlanan rijitliklerinin değişken olduğu bölgelerdir. Kıyas yapılırken diğer bir önemli nokta sonuçların aynı birim özelinde değerlendirilmesidir. 2B modelden elde edilen sonuçlar, birim metre için verilmiş olup bu durum 2B modelleme temelinde” plain strain-düzlem gerinim” çözüm yöntemini kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Plain strain-düzlem gerinim çözüm yöntemini düzlem içi gerilmeleri ihmal edip 2 boyutlu olarak modellemeyi mümkün kılmaktadır. Elde edilen sonuçlar bu nedenle birim metre başına verilmekte olup sonuçlar değerlendirilirken 2B analizlerinden alınan tesir kuvvetleri nihai durumda etki aralığı ile çarpılmıştır. Şekil 3’te verilen iç yapı modellenmesinde görüleceği üzere 3B analizde kazıklar aralıklı modellenmiştir.

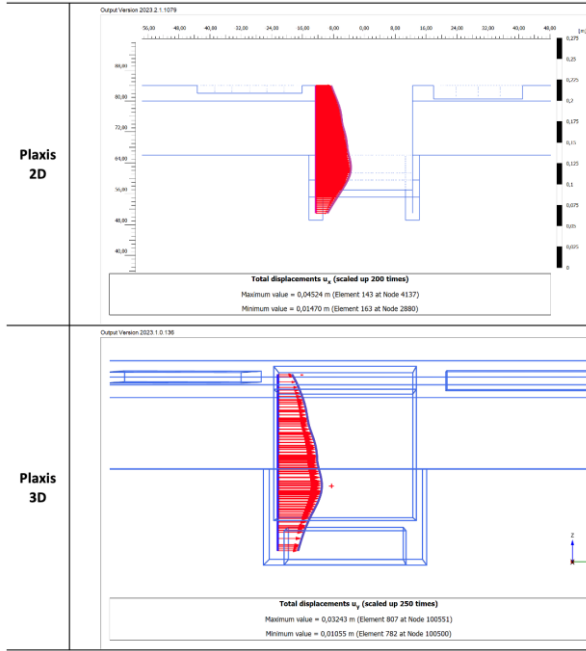


Şekil 3: Plaxis3D analiz iç yapı modellenmesi.

Yapılan çalışmalar sunulurken sırası ile kazık yatay deplasmanları, kazıklarda oluşan kesme kuvveti sonuçları ve eğilme momentleri sonuçları verilmektedir.

4.1 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Deplasmanları

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen deplasman grafikleri Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4: 2B ve 3B Plaxis kazık deplasman değerleri.

2B analizden elde edilen sonuç 4,52 cm iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık deplasmanı 3.24 cm'dir.

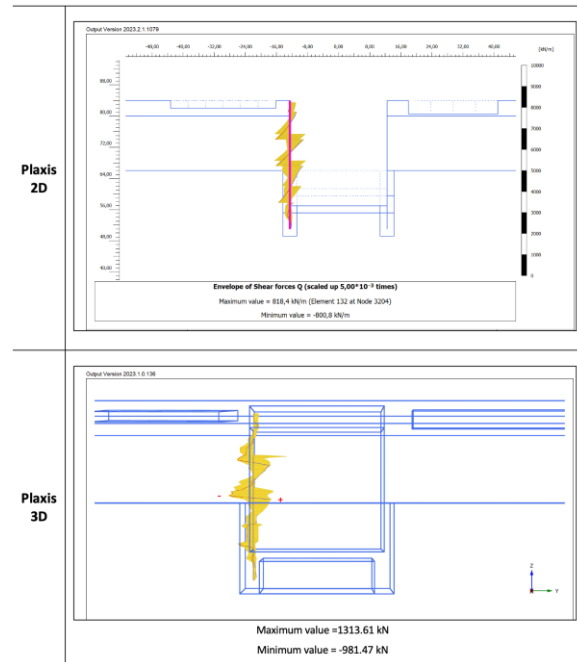
Tablo 5: Kazık deplasman değer özet tablosu.

A-A Kesiti Sol Aks Kazık	
	Deplasman (cm)
Plaxis 2D (Self+Soil)	4,52
Plaxis 3D (Self+Soil)	3,24
Sonuç	28% ↓

Tablo 5 ile sunulan değerler kazıktan elde edilen deplasman değerinin faktörsüz olarak yüzde değişimini vermektedir.

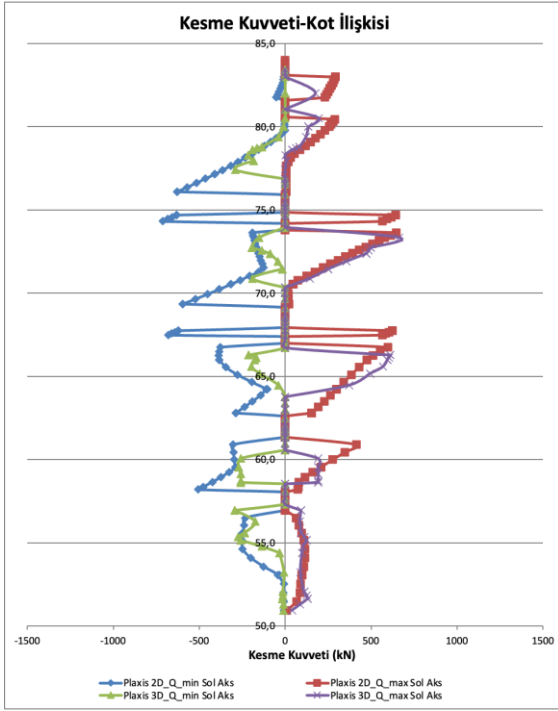
4.2 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Kesme Kuvvet Zarfı

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5: 2B ve 3B analizleri kazık kesme kuvveti.

2B analizden elde edilen kesme kuvvetleri maksimumunda (kesme kuvveti verileri mutlak değerleri alınarak yazılmıştır) 818.4 kN/m iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık kesme kuvveti 1313.61 kN/m'dir. Mesnet noktalarında oluşan tesirler etki zone kadar silinmiş olup elde edilen yeni sonuçlara göre oluşturulan grafik Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6: 2B ve 3B analizleri kazık kesme kuvveti değerleri (Mesnet noktaları silinmiş).

Bu durumda oluşan maksimum kesme değeri 2B analizde 771.19 kN/m iken; 3B analiz sonucunda bu değer 661.08 kN/m olarak görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 2 Boyutlu analizlerde 818.4 kN/m olan kesme kuvveti değeri 771.19 kN/m'ye düşerken, 3 Boyutlu analizlerde bu sonuç 1313.61 kN/m'den 661.08 kN/m'ye inmiştir.

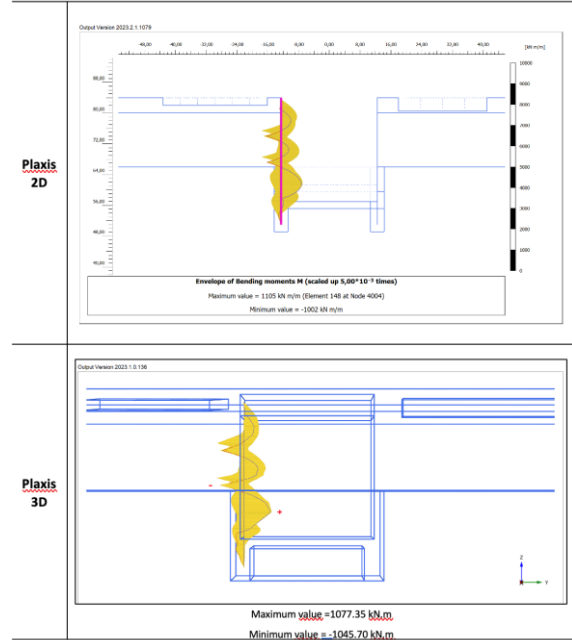
Tablo 6: Kazık kesme kuvveti özet tablosu.

	Kesme (kN/m) (Self+Soil)	Kesme (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	818	982
Plaxis 3D	-	661
Sonuç		33% ↓

Tablo 6'da verilen ilk sütun 2B analizinin birim metre başına verdiği sonuç olup modellemede kazık aralığı 120 cm olarak tasarlandığı için elde edilen sonuçlar 1.2 ile çarpılmıştır. Kıyas için verilen değerler nihai durumda faktörsüz olarak verilmiştir.

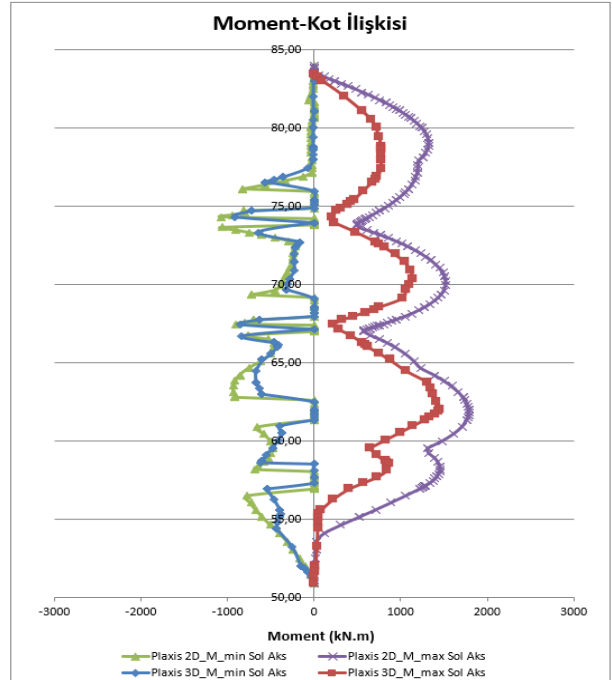
4.3 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Eğilme Moment Zarfı

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7: 2B ve 3B analizleri kazık moment zarfı.

2B analizden elde edilen moment zarfı 1105 kN.m/m iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık momenti 1077.35 kN/m'dir.



Şekil 8: 2B ve 3B analizleri kazık moment zarfı (mesnet noktaları silinmiş).

Mesnet noktaları silindikten sonra oluşan moment diagramı Şekil 8’de sunulmakta olup oluşan maksimum kazık momentleri açıklık momenti olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle kesme kuvvetinde olduğu gibi mesnet noktalarındaki pik noktalar moment diyagramlarında olmadığı için elde edilen sonuçlar değişmemiştir.

Tablo 7: Kazık eğilme momenti özet tablosu.

	Moment (kN.m/m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)
Plaxis 2D	1105	1325
Plaxis 3D	-	1077
Sonuç		19% ↓

Tablo 7’de verilen ilk sütun 2B analiz birim metre başına verdiği sonuç olup modellemeye kazık aralığı 120 cm olarak tasarlandığı için elde edilen sonuçlar 1.2 ile çarpılmıştır. Kıyas için verilen değerler nihai durumda faktörsüz olarak verilmiştir.

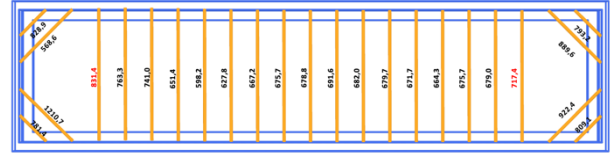
4.4 Çelik Strut Analiz Sonuçları

Kazık davranışına ek olarak yatay destek elemanı olarak kullanılan strutların 2B ve 3B analizlerde ki davranışları da elde edilen sonuçlar kıyaslanmış olup aralarındaki oransal fark verilmektedir.

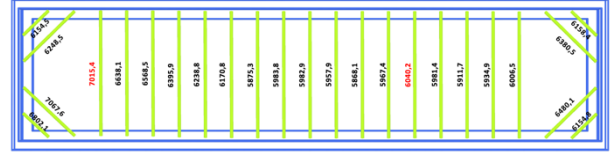
Tablo 8: 2B analiz strut yükleri.

Analiz Kesiti	Yatay İksa Elemanı	Kotu (m)	Tipi	Boru Destek Yüğü Nmax (kN)
Plaxis 2D Kesit A-A	1. Sıra	+83,55	D812.8* 15.9 mm	1581
	2. Sıra	+75,40	D1219.2* 20 mm	7926
	3. Sıra	+68,55	D1219.2* 20 mm	8080
	4. Sıra	+62,05	D1219.2* 15.9 mm	4989

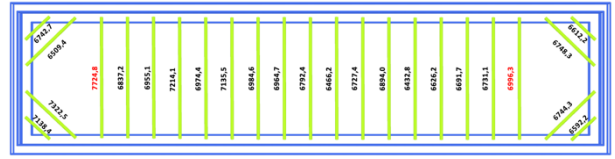
Tablo 8’de 2B analiz sonuçları A-A Kesiti olarak nitelendirilen bölge için yapılmıştır. Aynı bölgeyi temsil eden strutlar 3B analizden de kontrol edilmiştir. 3B modelleme sistemin geneli için yapılmış olup kıyas yapılacak olan bölgenin Kesit A-A olarak nitelendirilen bölge olmasına dikkat edilmiştir.



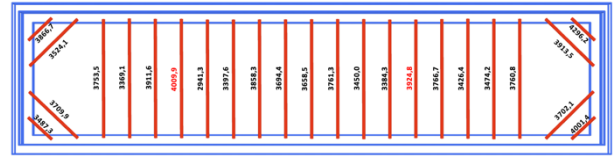
Şekil 9: +83.55 Kotu plaxis3D strut eksenel kuvveti.



Şekil 10: +75.40 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.



Şekil 11: +68.55 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.



Şekil 12: +62.05 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.

Şekiller 9-12’de verilen strut eksenel kuvvetleri Plaxis3D’de sonuçlarından kot bazlı alınmış olup nihai durumdaki maksimum değerleri göstermektedir. Bu değerler iki analiz yönteminde de kot bazında değerlendirilmek üzere Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9: 2b-3b analiz strut yükleri kıyas tablosu.

Kot	+83.55	+75.40	+68.55	+62.05
Plaxis 2D	1580,7	7926,1	8079,5	4988,8
Plaxis 3D	831,4	7015,4	7724,8	4009,9
Sonuç	47% ↓	11% ↓	4% ↓	20% ↓

Kıyas için alınan değerler kesitin geçtiği yere en yakın bölgede bulunan maksimum strut yüküne dikkat edilerek seçilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile bir derin kazıdan elde edilen sonuçların iki boyut ve üç boyut etkisi incelenmiştir.

Yapı-zemin davranışını irdelemek amacı ile 2B ve 3B analiz yöntemi olarak Plaxis2D ve Plaxis3D programı yardımıyla analizler tamamlanmıştır.

Analizi yapılan model için iki cephesinde de yapı yer alan yaklaşık 27 m derinliğinde bir metro kazısı seçilmiştir. Modelde kazılması planlanan yapı boyutları 21,80 m eninde 107,80 m boyundadır. Bu kazı düşeyde 120 cm ara ile 100 cm'lik fore kazıklarla desteklenecek olup yatay destek elemanı olarak dört farklı kotta strut (boru eleman) kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında düşey destek elemanı olarak kullanılan fore kazık ile yatay destek elemanı olarak kullanılan strutlar iki analiz yöntemi ile de irdelenmiştir. Bu doğrultuda kazıklar için yatay deplasmanlar ve kesit tesirler sonuçları kıyaslanırken; çelik strutlar için ise maksimum eksenel kuvvetleri kıyaslanmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki kazık deplasmanları 3B modelde %28 daha az deplasman değeri verirken; kesme kuvveti açısından bu oran %33, eğilme momentine bakıldığında ise %19 daha az kesir tesiri değerleri elde edilmektedir.

Yatay destek elemanı olarak kullanılan çelik strutlar çalışma mekanizmaları gereğince basınç elemanı olarak kullanılmakta olup aldıkları eksenel kuvvetler kat bazında değişkenlik göstermektedir. Bu durumda başlık kirişi kotunda %47, 1.sıra kuşak kirişi kotunda %11, 2.sıra kuşak kirişi kotunda %4 ve son sıra kuşak kirişinde ise %20 fark görülmektedir. Nihai sonuçlar yine 3B analizlerin daha az sonuçlar verdiğini göstermektedir.

2B analiz yapıldığında genel sistem incelenip en riskli görülen bölgeyi içine alacak şekilde analiz kesit yerine karar verilir. Bu kabul geneli temsil etmekle birlikte oluşan maksimum etkileri göz önüne aldığı için en olumsuz sonucu vermektedir. Ancak gerçekte bütün kazı yapılan bölge aynı doğrultuda aynı yatay etkilere maruz kalmamaktadır. Dolayısı ile sistem çözümünden elde edilen sonuçlar bütün kazı bölgesinde aynı şekilde sonuç vermeyecektir. Yapılan analizde

metro istasyon kazısının iki cephesinde de mevcut yapı olan bölge incelenmiştir. Bu durum bu problem özelinde en riskli durum olması nedeni ile makul olarak değerlendirilmiş olsa da yapı etki bölgesinden çıktıktan sonraki kısımlar için oldukça güvenli tasarım sonuçları kullanılmasına neden olacaktır. 3B olarak düşüldüğünde ise çevre yapılar gerçeğe en yakın şekilde modellenerek yapı olmadığı bölgelerde yalnızca geçici durumdaki inşaat aktivitesi yükü ya da trafik yükü gibi görece daha düşük yükler verilerek modellenir. Bu durumda değişken zemin tesirleri oluşur ve model içerisinde yer alan düşey ya da yatay iksa elemanları gerçeğe daha yakın davranış göstererek göreceli etkiler de bu sayede gözlemlenebilmektedir. Bunun yanı sıra alınan kesit sayısı arttıkça 3B etkisine daha çok yaklaşılabılır, 3B modellemede yaşanabilecek etkiler değerlendirilebilir.

Günümüzde yapılan derin kazıların güvenli bir şekilde tamamlanması en önemli konu olsa da bu güvenli tasarımı yaparken mühendislik verilerini doğru yorumlamak, teknoloji ile gelişen programları doğru kullanmak ve en önemlisi bu sonuçları gerçekteki sonuçlarla kıyaslayarak en doğru tasarım yapmak amaçlanmalıdır. Bu çalışmanın nihai durumda üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analizle yardımı ile elde edilen sonuçların oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkısı: Bu makale, "Derin Kazılarda 2B ve 3B Yöntemi ile Sonlu Eleman Modellemeleri" başlıklı Yüksek Lisans tezinin geliştirerek 2B ve 3B Analizler yardımı ile kazı-zemin etkileşiminin irdelenmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Teşekkür: Yazarlar Prota Mühendislik Proje ve Danışmanlık Hizmetleri A.Ş.'ye destekleri için teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

6. KAYNAKLAR

- [1] G. T.-C. Kung, "Comparison of excavation-induced wall deflection using top-down and bottom-up construction methods in Taipei silty

- clay," *Computers and Geotechnics*, vol. 36, no. 9, pp. 373–385, 2009.
- [2] R. J. Finno and L. S. Bryson, "Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 16, no. 1, 2002.
- [3] P. Frobenius, C. L. Wu, D. Meyersohn and R. Kulesza, "Deformations during cut-and-cover construction of Muni Metro Turnback Project," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 344–359, 2000.
- [4] B. Y. Shiau, I. W. Wang and C.-Y. Ou, "Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 438–448, 2000.
- [5] C. C. Wang, C.-Y. Ou and H. S. Hsieh, "Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, no. 2, pp. 146–157, 2003.
- [6] T. C. Chung, N. P. Wej and D. G. Lin, "Quantitative evaluation of corner effect on deformation behavior of multi-strutted deep excavation in Bangkok subsoil," *Geotechnical Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 41–57, 2003.
- [7] D. M. Potts, H. D. John and L. Zdravković, "Modelling of a 3D excavation in finite element analysis," *Geotechnique*, vol. 55, no. 7, pp. 497–513, 2005.
- [8] T. C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, *Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları*, Ankara, Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022.
- [9] C. C. Torres, B. Corkum and E. Hoek, "Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition," Toronto, 2002.
- [10] P. A. Vermeer, P. G. Bonnier and T. Schanz, "Formulation and verification of the Hardening-Soil Model," in *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Amsterdam, 1999.
- [11] A. A. Bahadır and M. Onur, "Derin kazı destek sistemi tasarımında zemin modeli seçimi: Bir vaka analizi," in *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [12] Bentley Advancing Infrastructure, *PLAXIS 3D 2024.1 3D 2 Reference Manual*, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/721587598/PLAXIS-3D-2024-1-3D-2-Reference-Manual>