



**HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ**

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

---

## **Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi**

### *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavation Systems Considering Excavation Stages*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Halil Murat Algın, Arda Burak Ekmen, Egemen Kaya

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Algın H.M., Ekmen A.B., Kaya E. “Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 102-111, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>

## Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

Halil Murat Algin, Arda Burak Ekmen, Egemen Kaya

Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

e-posta: hmalgin@harran.edu.tr, ardaburakekmen@harran.edu.tr, kaya.egemen@harran.edu.tr

Geliş Tarihi: 09.12.2018

Kabul Tarihi: 29.12.2018

### Özet

Derin kazılarda çökmelere neden olabilecek önemli yer değiştirmeler oluşabilmektedir. Yapılması planlanan projelerin birçoğunda, kazıya bağlı oluşacak deformasyonlar kaygı uyandırmaktadır. Derin kazı sistemlerinde temel oturmasının yanıl deplasmanlar ile beraber oluşması komşu binalara zarar verebilir. Bu tip sistemlerde oluşabilecek deformasyonları öngörmek için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi (3B SE) kullanılabilir. Bu çalışmada daha önce literatürde verilmiş derin kazı sisteminin 3B SE analizi sunulmaktadır. Diğer çalışmalardan farklı olarak kazı öncesi durum dikkate alınmış ve kazı aşamaları modellenmiştir. Görüntü işleme tekniği kullanılarak sistemin 3B SE modellemesi yapılmıştır. Bu çalışmayla sunulan nümerik modelleme tekniği kullanılarak, kazı aşamalarının da dikkate alınmasıyla derin kazı sistemlerinin daha etkin tasarımına olanak sağlanmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi, Kazı aşamaları, Derin kazı sistemi, Görüntü işleme.

## Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavation Systems Considering Excavation Stages

### Abstract

Deep excavation resulting a significant displacement may lead to collapse. In most the project planning, the excessive deformations due to deep excavation arise concerns. Ground settlement associated with lateral displacements can cause damage to adjacent buildings. Three-dimensional finite element analysis can be used to predict deformations that may occur in such systems. This study presents a three-dimensional finite element (3D FE) analysis of deep excavation system previously reported as a case study in the literature. The post-construction process and the stages considered prior to the excavation have been included into the modelling and the analysis stages. In this paper, 3D FE modeling of the entire excavation process including the underpinning foundation system adaptation promoting the passive resistance of diaphragm walls have been performed by using the novel image processing technique presented by the authors previously. The paper concludes that the numerical modeling technique presented in this study provides an efficient design tool for the deep excavation systems.

**Keywords:** Three dimensional finite element analysis, Excavation stages, Deep excavation system, Image processing.

### 1. Giriş

Derin kazı uygulamalarının küresel anlamda yaygınlaşması sonucunda bu alanda yapılan çalışmalar artış göstermiş olup derin kazı sistemleri günümüzde önemli bir yer kaplamaktadır. Diyafram duvarlar, ankraj sistemleri, kazık duvarlar temel zemininin kazılması durumunda mevcut yapıları korumak için geliştirilmiş sistemlerdir. Kazı işlemine bağlı olarak oluşan deformasyonlar bazı durumlarda büyük problemlere neden olabilmektedir. Metro istasyonlarının inşası gibi çeşitli kazı destek sistemlerinin kullanıldığı uygulamalar literatürde sunulmuştur [1-2]. Ayrıca derin bodrum kazıları

konusunda da bazı çalışmalar literatürde mevcuttur. [3-5].

Son zamanlardaki bazı çalışmalarda ise [3,5,6,7] kazı destek sistemlerinin, komplike bir yapı-zemin etkileşimi problemi olduğuna rastlanmaktadır. Derin kazı sistemleri ile ilgili Peck [8], derin kazılarda oturma etki bölgesi uzunluğunun, kazı derinliğinin 2-3 katı olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmalarda kazı kaynaklı zemin deformasyonunun doğada üç boyutlu olduğu gösterilmiştir. Algin vd. [9] kazı aşamalarını dikkate almadan bir derin kazı sistemini 3B SE yöntemi ile analiz etmiştir. Hou ve ark. [10] aktif kullanımdaki metro hatlarına komşu olan Shanghai Kuzey Meydanı yeraltı alışveriş merkezinin karmaşık yapıdaki derin kazı sistemini 3B SE metodunu

kullanarak analiz etmiştir. Duvar deformasyonları üzerinde, anizotropik zemin rijitliğinin, komşu kazının ve bölge kazısının etkileri araştırılmıştır. 3B SE analizi sonucunda anizotropik zemin rijitliğinin izotropik zemin rijitliğine kıyasla duvar deformasyonları üzerinde daha makul sonuçlar meydana getirdiği görülmüştür. Kazıların yapım sıralaması, iki kazı arasındaki diyafram duvarların deformasyonu üzerinde etkili olmuştur. Birinci kazı aşamasında sadece bölge kazısının duvarlar üzerinde önemli bir deformasyona sebep olduğu ifade edilmiştir. Kazı derinliğinin artmasıyla bölge kazısının diyafram duvarlar üzerindeki etkisinin düşük seviyede olacağı Hou ve ark. [10] tarafından belirtilmiştir. Dong ve ark. [11] Shanghai güney demiryolu istasyonundaki büyük ölçekli derin kazı sistemini 3B SE metodu ile analiz etmiştir. Kazının, mevcut ve yapım aşamasında olan metro hatlarına yakın vaziyette bulunduğu ve komşu kazılardan etkilendiği Dong ve ark. [11] tarafından bildirilmiştir. Ayrıca kazının yüksek ölçüde düzensiz geometrisinden dolayı 3B SE modeli karmaşık bir problem teşkil etmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen sonuçların sahadan alınan verilerle yüksek bir seviyede uyumluluk gösterdiği belirtilmiştir. Whittle ve ark. [12] tarafından yapılan çalışmada Boston şehrindeki yedi katlı yeraltı otoparka ait derin kazı sistemi 3B SE metodu ile incelenmiştir. Sahadan alınan veriler ile öngörüler kıyaslanarak parametrik olarak modifiye edilmiş bir analiz yapılmıştır. Bu analizden elde edilen sonuçların, diğer analizlere göre arazi verileri ile uyumluluğu konusunda büyük ölçüde bir iyileşme sağlandığı saptanmıştır.

Yoo ve ark. [13], çalışmalarında derin kazı sistemlerinin sebep olduğu zemin yüzey hareketlerini incelemiştir. İki boyutlu SE metodu kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yatay ve düşey zemin hareketinin makul bir doğruluk derecesi ile birleştirilmesi sonucu nihai zemin yüzeyi hareket profillerinin oluşturulabileceği gösterilmiştir. Zemin yüzey hareket profillerinin tahmininde kullanılacak iki aşamalı bir yaklaşım Yoo ve ark. [13] tarafından önerilmiştir. Hashash ve ark. [14] derin bir kil katmanındaki kazıda duvar gömülme derinliğinin ve destek koşullarının etkilerini incelemek, diyafram duvar bölgesindeki drenajsız deformasyonların gerilme geçmişi profilini gözlemlemek için 3B SE analizini kullanmıştır. Analizlerde kil davranışının önemli durumlarını yansıtmak için kapsamlı bir efektif gerilme zemin modeli Hashash ve ark. [14] tarafından kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tahmin edilen zemin hareketleri ve duvar deformasyonları üzerinde kilin etkisinin önemli ölçüde olduğunu göstermiştir. Ou ve ark. [15]

çalışmalarında derin kazı sisteminin analizi için nonlineer 3B SE tekniğini kullanmıştır. Analizleri gerçekleştirmek adına uygunluğu gözetilmiş bir bilgisayar kodu Ou ve ark. [15] tarafından yazılmıştır. Analizin doğruluğuna yönelik olumsuz bir etki oluşması engellenerek 3B SE analizini makul, basit ve ekonomik hale getirmek için eleman ve düğüm noktası sayısını azaltmak amacıyla bir takım yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Bir dizi parametrik çalışma sonucunda iki boyutlu (2B) SE analizleri baz alınarak bir kazının 3B maksimum duvar deformasyonunun tahmin edilebilmesi için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sonuç olarak, karmaşık bir kazıda sahadaki duvar deformasyon ölçümleri incelenmiş olup analiz sonuçları saha ölçümleriyle uyumluluk göstermiştir. Zhao ve ark. [16] derin kazı çalışmalarına yönelik zemin parametrelerinin geri analizinde diferansiyel gelişim algoritmasının uygulamalarını sunmuştur. Python tabanlı bir bilgisayar kodu geliştirilerek bu kodlama Abaqus programına dahil edilmiştir. Bu şekilde SE analizi paralel bir hesaplama tekniği ile birleştirilerek çözüm süresi kısaltılmıştır. Önerilen geri analiz kapasitesini göstermek için SE analizi ile gerçek bir durum karşılaştırılmıştır. Geri analiz edilecek toplam dokuz parametresi bulunan gerçek durum için son üç aşamadaki duvar deformasyonları ile ilgili göreceli hataların sırasıyla % 2.2, % 1.1 ve % 1.0 düzeylerinde olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, doğrusal olmayan durumlar için çok sayıda zemin parametresinin diferansiyel gelişim algoritması ile iyi bir şekilde tanımlanabildiğini göstermiştir.

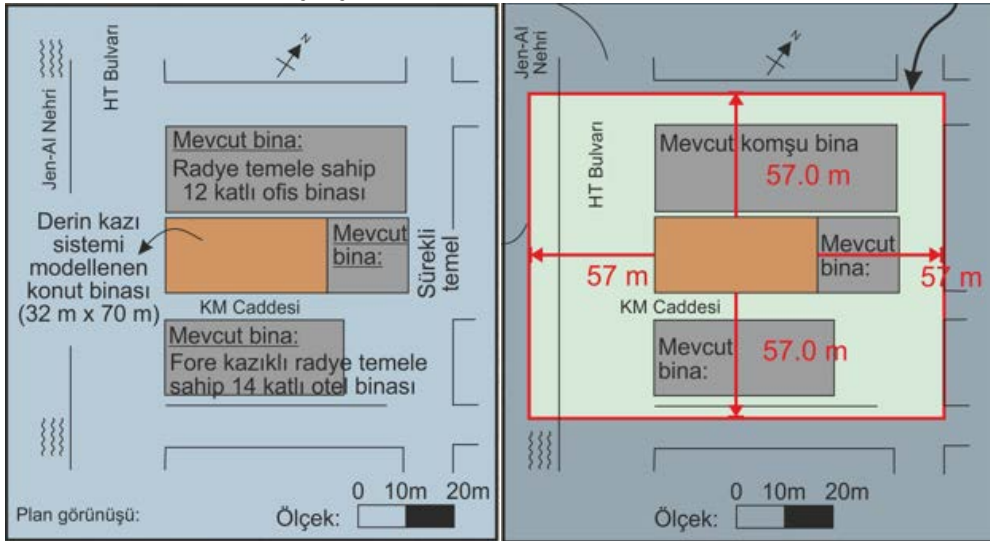
Shao ve Macari [17] derin kazıların genellikle bitişik yapılarla yer değiştirmelere neden olduğunu ve bu nedenle, bu tür olumsuzlukları en aza indirmek için gerekli önlemlerin alınması gerektiğini belirtmiştir. Alınması gereken önlemlerin, bir kazı sırasında yer hareketinin etkili ve güvenilir tahminine dayandığı Shao ve Macari [17] tarafından bildirilmiştir. Çalışmada, sahadaki bilgilerinin toplanması yoluyla kazı kaynaklı deformasyonun tahmin edilmesinde kullanılan geri besleme analizi olarak adlandırılan bir sistematik sunulmuştur. Optimizasyon algoritmaları kanalıyla zemin parametreleri en uygun hale getirilerek analizlere yansıtılmıştır. Tekrarlı şekilde hesaplanan zemin parametreleri güncellenerek sisteme girildiğinden, daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek adına analizler aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. 2B SE metodu kullanılarak analizler tamamlanmıştır. Önerilen yaklaşımın geleneksel metoda göre en az iki avantaj sağladığı belirtilmiştir. Xu ve ark. [18] tarafından derin kazı sürecindeki birçok faktörün destek yapıları üzerinde

aşırı deformasyonlara ve iç kuvvetlerin oluşumuna sebep olabileceği belirtilmiştir. Bu yüzden derin kazı tasarımının gerçek zamanlı takip edilen verilere göre ayarlanması gerektiği ifade edilmiştir. Xu ve ark. [18] tarafından SE yöntemi kullanılarak kazı deformasyonlarının dinamik kontrolüne yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımda, fore kazıkların kullanıldığı üç katlı betonarme sistem ve istinat duvarı mevcutken son tasarımda inşa süresini kısaltmak adına sadece iki kattan oluşan destek sistemi kullanılmıştır. Son tasarım projenin güvenlik derecesini bir ölçüde azaltmış ve kazının olağanüstü bir vaziyete gelmesine sebebiyet vermiştir. Fakat tasarımcıların gözlemlenen verilerden geri besleme baz alınarak kazı aşamalarını düzenlediği belirtilmiştir. Çalışma sonunda izlenen kazı performansı, iyileştirici önlemlerin kazı kaynaklı deformasyonların kontrol edilmesi ve ilgili risklerin en aza indirilmesi için etkili olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, literatürde kazı aşamalarını da dikkate alarak derin kazıların 3B SE analizini sunan sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada kazı

aşamaları da dikkate alınarak mevcut tasarım yöntemlerindeki eksikleri giderebilecek ve komşu temel sistemleri de içeren bir tasarım yapılmıştır. Oluşturulan model, 3B SE analizi ile çözülebilecek bir sistem sunmakta olup Algin [19-23] tarafından tanıtılan görüntü işleme tekniğiyle bu modellemenin yapılabileceği bu çalışmada açıklanmaktadır.

## 2. Model Detayları

Bu çalışmada, Hsieh ve diğ. [5] tarafından literatürde sunulan derin kazı uygulaması dikkate alınmıştır. Bu kapsamda 35 kattan oluşan altı katlı bodruma sahip 2003 yılında inşa edilmiş bir yapının derin kazı sistemi kazı aşamaları dikkate alınarak modellenmiş olup bu kazının komşu mevcut binalara muhtemel deformasyon etkisi analiz edilmiştir. Şekil 1’de modellenen derin kazı sisteminin plan görünüşü verilmiştir.



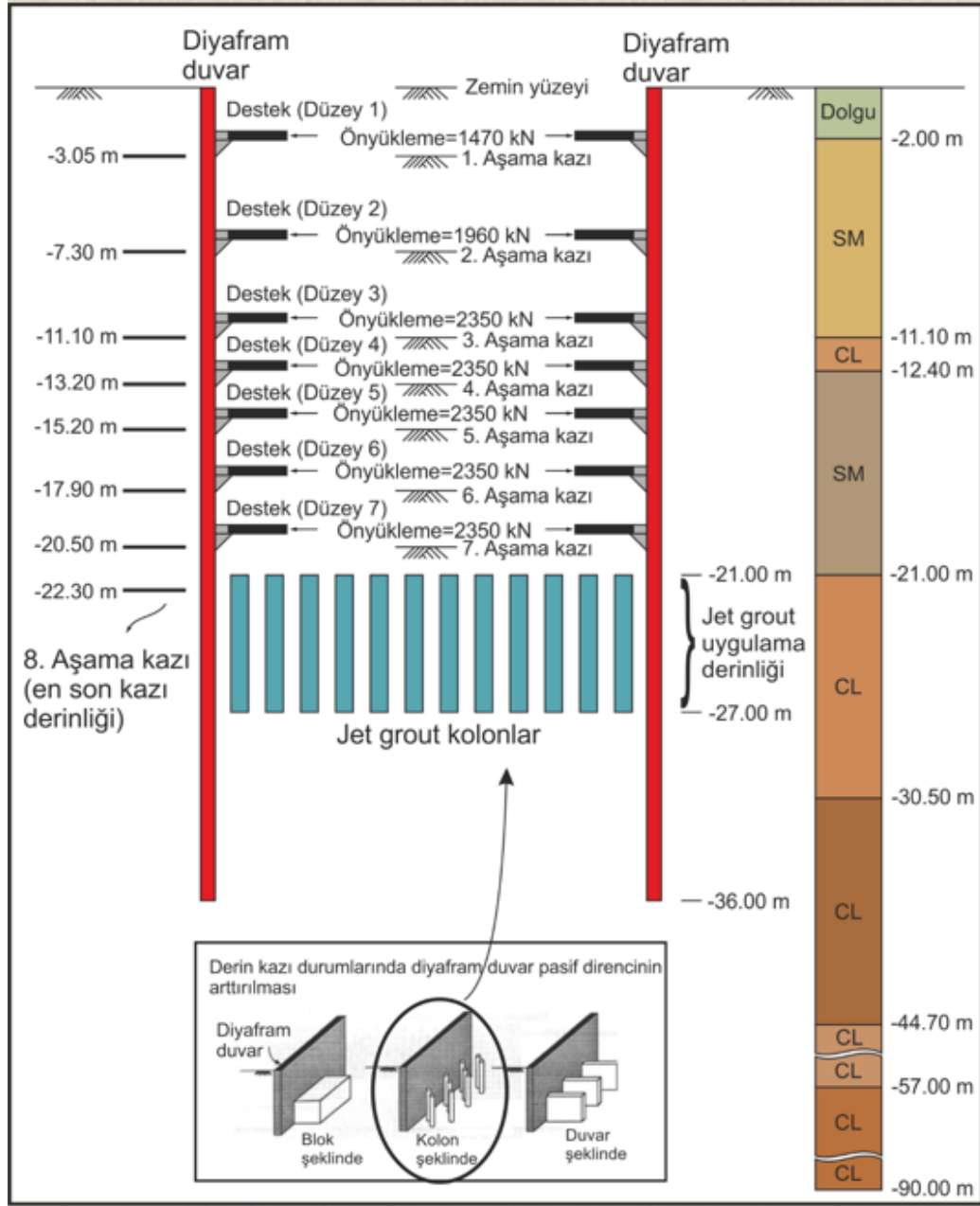
Şekil 1. Modellenen derin kazı sisteminin plan görünüşü

Derin kazı bölgesinin tabanı Hsieh ve diğ. [5] tarafından belirtildiği gibi jet grout kolonlar ile güçlendirilmiş ve kazıyı desteklemek için diyafram duvarlar inşa edilmiştir. 3B SE modeli oluşturulurken bu projenin geometrik özellikleri ve malzeme verileri dikkate alınmıştır. Üzerinde çalışılan bina 2240 m<sup>2</sup>’lik (32 m x 70 m) bir alan kaplamaktadır ve mevcut binalar ile arasındaki mesafe 0.2 ile 12 m arasında değişmektedir. Belirtilen binanın kazı derinliği ise Şekil 2 ‘de gösterildiği gibi 22.3 m’dir. Diyafram duvarlar zemin yüzeyinden 36 m derinliğe kadar uzanmakta olup kalınlıklar 1 m’dir (Şekil 2). Yaklaşık olarak 0.6 m çaplı jet grout kolonları Şekil 2’de gösterildiği gibi kazı tabanı boyunca 2 m aralıklarla

oluşturulmuştur. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan sistem elemanlarının malzeme özellikleri verilmiştir [5]. Tablo 2’de ise zemin profili ile ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır [5].

Tablo 1. Sistem elemanlarının malzeme özellikleri

Malzeme	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (MPa)	$\nu$	$c'$ (MPa)
Sürekli Temel (LE)	25	33000	0.2	-
Radye Temel (LE)	25	33000	0.2	-
Jet Grout Kolonları (MC)	25	3200	0.19	4
Diyafram Duvar (LE)	25	33000	0.2	-



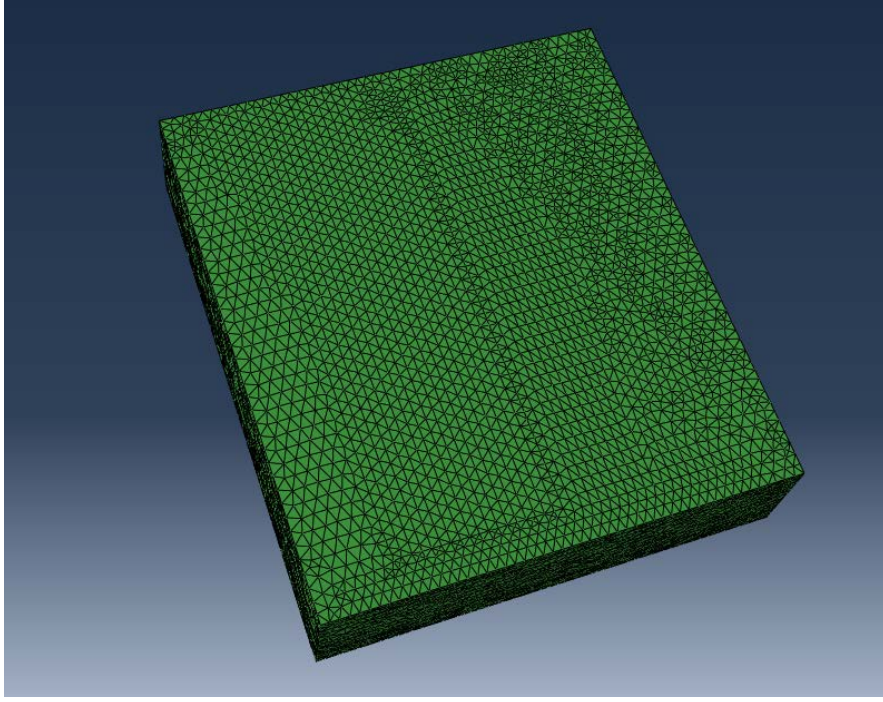
Şekil 2. Zemin profili ve derin kazı sistemi detayları

Tablo 2. Çalışılan zemin profili ile ilgili detaylar

Tabaka	Derinlik (m)	Sınıflama	Ortalama SPT-N	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_n$ (%)	$I_p$ (%)	$q_u$ (kPa)	$\phi$ (°)
1	0-2	Dolgu	3	19.2	23.2	—	—	—
2	2-11.1	SM	7	19.5	27.6	—	—	29
3	11.1-12.4	CL	5	18.7	26.8	12.1	80	—
4	12.4-21	SM	10	18.9	29.1	—	—	28
5	21-30.5	CL	12	19.2	22.4	10	180	—
6	30.5-44.7	CL	12	18.8	29.3	7.3	320	—
7	44.7-57	CL	25	19	28.5	8.4	430	—
8	57-90	CL	30	19.5	25	9.6	—	—

Hsieh ve diğ. [5] tarafından raporlanan bilgiler çerçevesinde derin kazı sistemi 3B olarak

modellenmiştir. Şekil 3'te oluşturulan modelin kazı inşa aşaması önceki durumu gösterilmiştir.

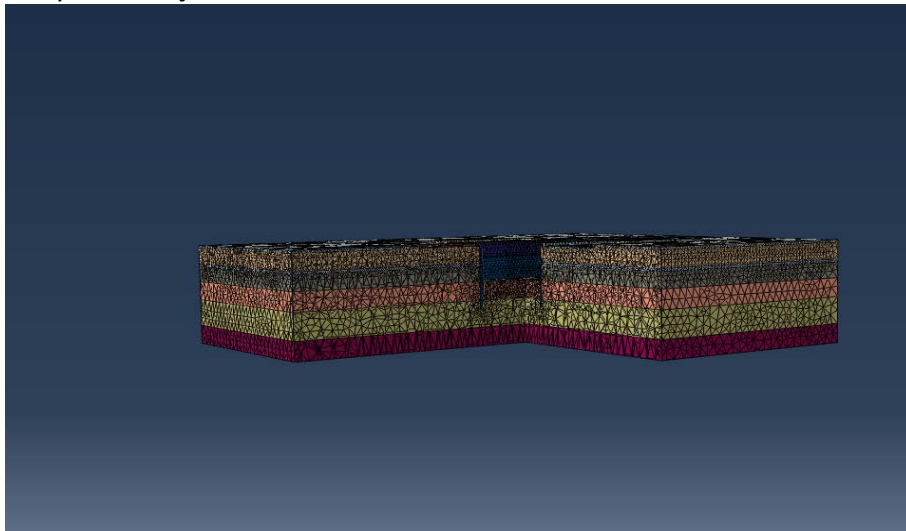


**Şekil 3.** Kazı inşa aşaması öncesi modelin görünümü

### 3. Kazı Aşamasının Modellenmesi

Bu çalışmada kazı aşamasını dikkate almak için hazırlanan 3B SE modeline yükleme aşamasından önce kazı aşaması adımı eklenmiştir. 3B SE çözümü yapılırken başlangıç aşamasında zemin Şekil 3'te görüldüğü gibidir. Başlangıç adımı sonrası eklenen kazı aşamasında ise zamanla yapılan kazı işlemi modele yansıtılmıştır. Kazı aşamasını modele uygun bir şekilde yansıtılabilmek için kazılacak alan modelde ayrı bir veri seti şeklinde tanımlanmıştır. Analiz adımlarında, seçilen bu veri setinin zamana bağlı değişimi tanımlanmış ve bir sonraki yükleme adımı, modelde kazı adımına bağlanmıştır. 3B SE modelinde kazı başladığı andan itibaren kazılacak alandaki zemin, analizde belirlenen zamana bağlı olarak modelde adım adım yok edilmiştir.

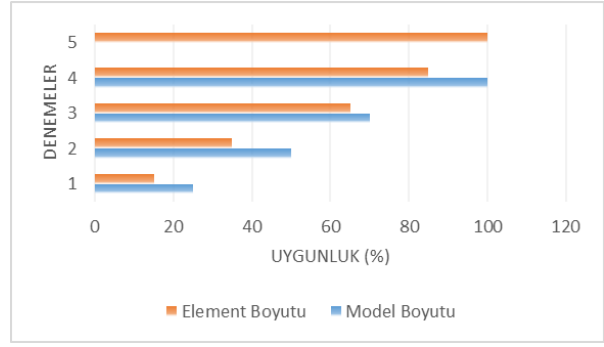
Kazılacak alanın tümüne belirtilen işlem uygulanmıştır. Kazı adımı tamamlandığında kazıya bağlı oluşan deformasyonlar, bir sonraki analiz adımına uyum sağlayacak şekilde aktarılmıştır. Böylece kazı simülasyonu gerçek uygulamaya oldukça yakın bir yöntemle 3B SE modeline yansıtılmıştır. Analizin yükleme adımına geçildiğinde model tamamen kazı aşaması tamamlanmış duruma getirilmiştir. 3B SE modeli üzerinde yapılan analiz adım ayarları menüsünün kullanımı ile yükleme adımında kazı aşamasından gelen deformasyonların bu aşamada oluşan deformasyonlar ile birlikte ele alınması sağlanmıştır. Şekil 4'te 3B SE modelinin başlangıç analiz adımından, kazı analiz adımına geçtiği andaki görüntüsü verilmiştir.



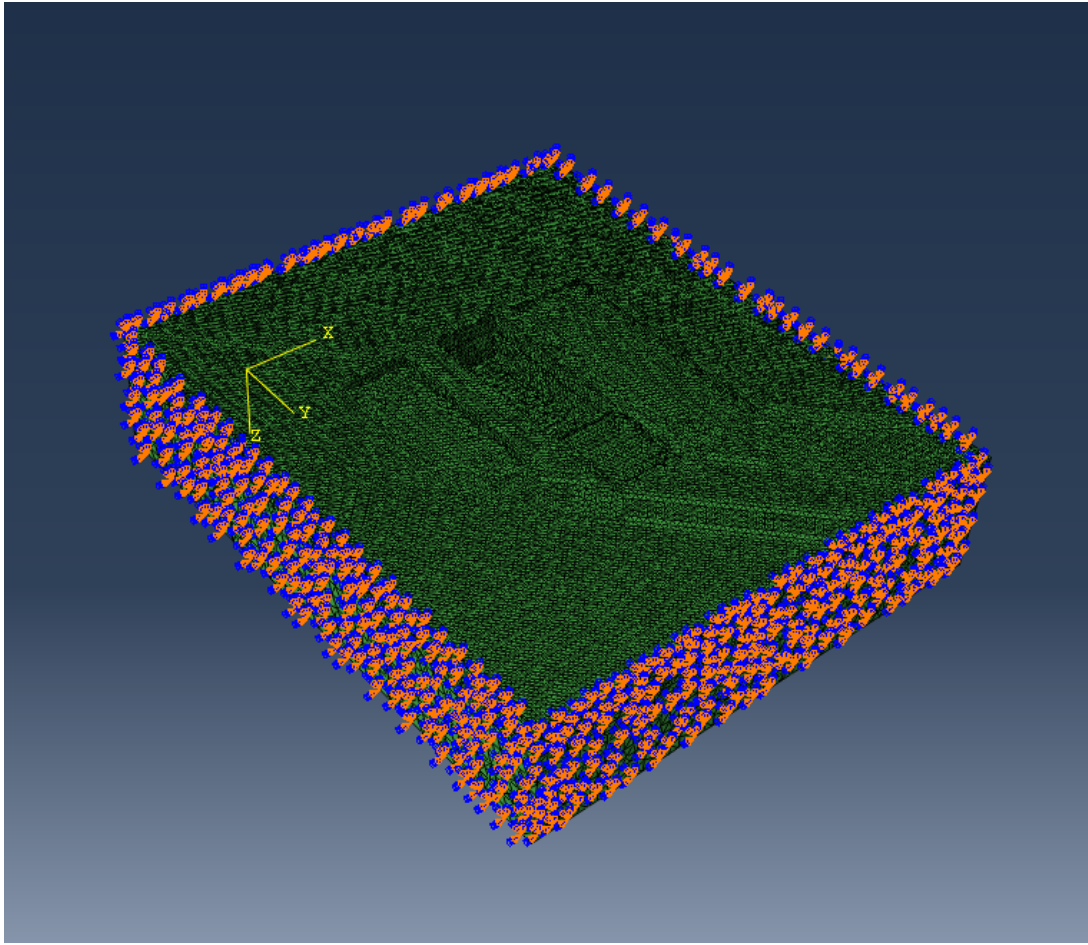
**Şekil 4.** Kazı aşaması

Kazının başladığı durum, modelin çift taraflı kesilmesiyle belirgin hale getirilmiş olup Şekil 4'te gösterilmiştir. Analizin kazı adımı tamamlanana kadar belirlenen kazı bölgesinin model üzerinde yok edilme işlemi devam etmiştir. Model ve element boyutlarının uygunluğu, yapılan yakınsama çalışmaları ile belirlenmiştir. Şekil 5'te model ve element boyutlarını belirlemek için yapılan yakınsama çalışması gösterilmiştir. Model boyutunu belirlemek için 4, element boyutunu belirlemek için 5 farklı deneme yapılmıştır. Yapılan yakınsama çalışmaları sonucunda 3B SE analizi için en uygun boyutlar belirlenmiştir. Yapılan yakınsama çalışmasının ardından model boyutlarının

belirlenmesi ile sınır şartlarının konumu belirlenmiştir. Şekil 6'da modele uygulanan sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 5. Yakınsama çalışması

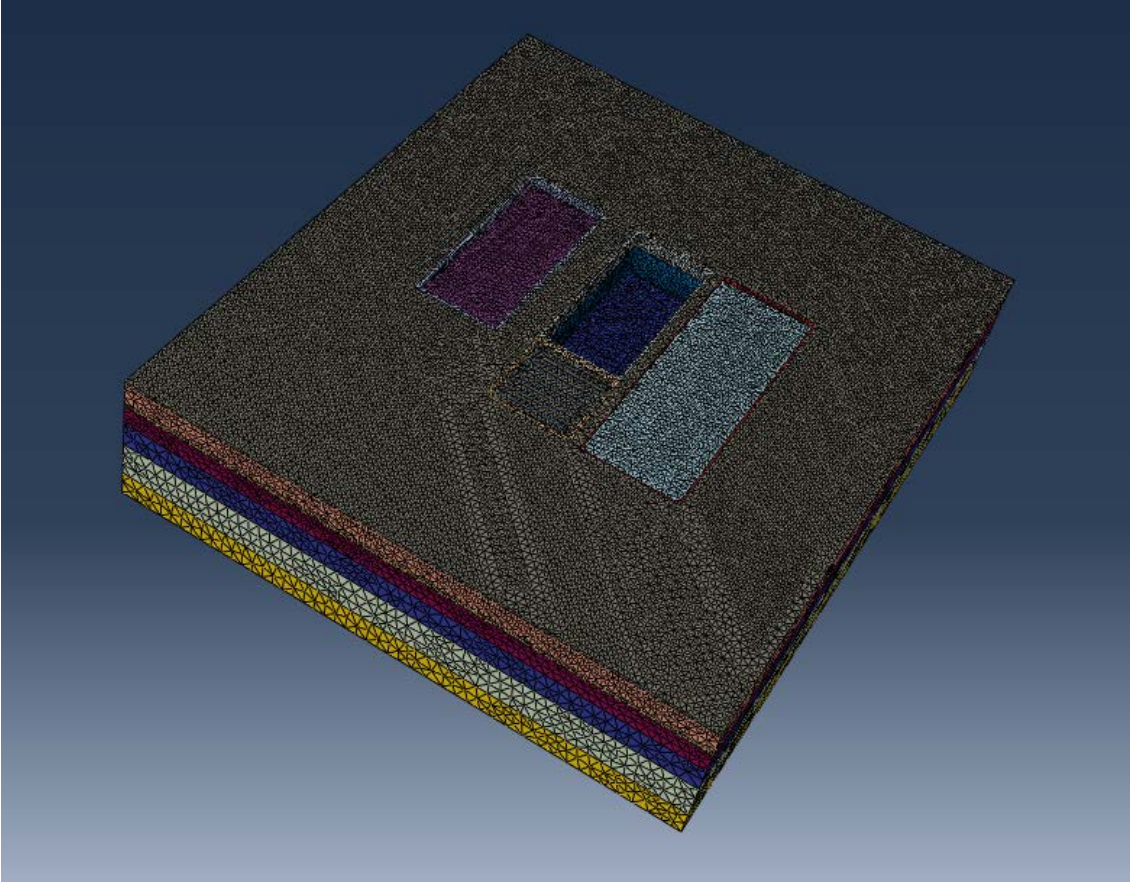


Şekil 6. Modelin sınır şartları

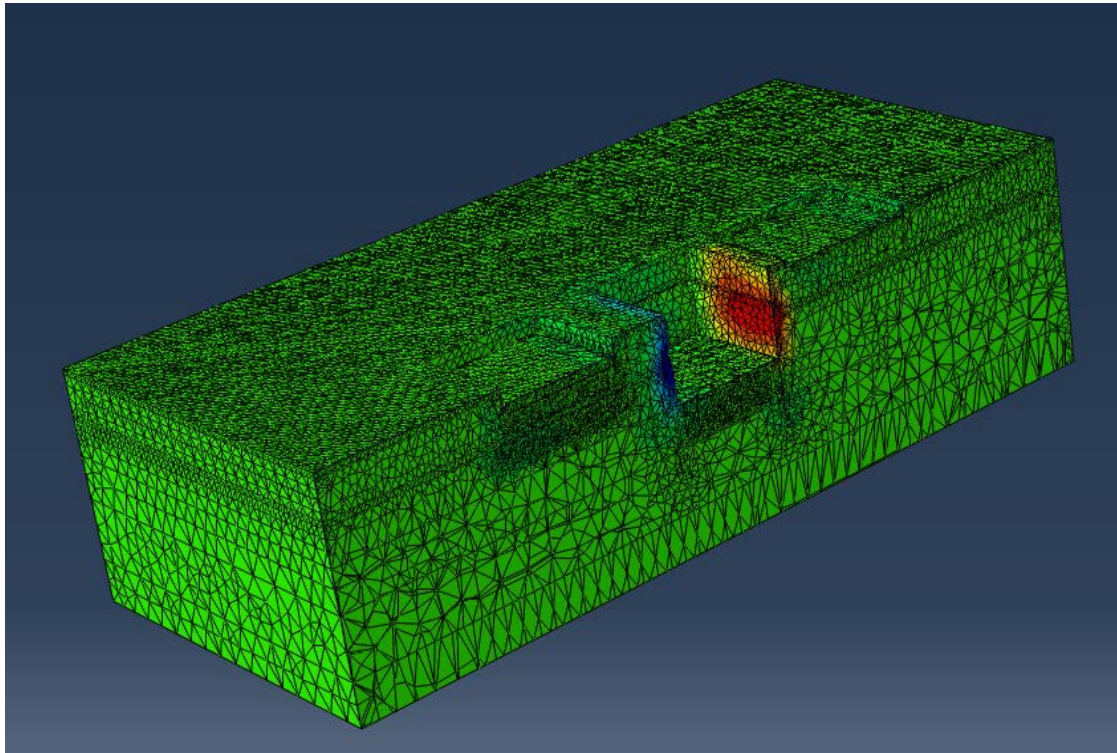
#### 4. 3B SE Analizi

Pek çok derin kazı, düzlem deformasyon durumuna göre analiz edilir. Ancak, bu analiz durumları için bazı hususları belirtmek gerekir. Düzlem deformasyon analizleri, kazı derinliği ortalarında zemin basınçlarını ve duvar deplasmanlarını gerçek değerlerden fazla bulmaktadırlar. Bu kapsamda 3B SE modellemesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Şekil 7'de modelin kazı sonrası oluşan görüntüsü verilmiştir. Kazı adımı sonrası yüklemeye analiz adımına geçiş yapılmıştır. Bu

aşamada kazı sonrası sisteme gelen yükler modele etkilmiştir. Modellenen sistem, kazı inşa aşamaları dikkate alınarak 3B SE analizine tabi tutulmuştur. Tüm sistem için hem oturma hem de yanal deplasman değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 8'de 3B SE analizi sonucu sistemde oluşan yanal deformasyonlar gösterilmiştir. Kazı inşa aşamaları dikkate alınarak yapılan analiz sonucunda uzun kenar için maksimum yanal deformasyon 5.18 cm olarak elde edilmiştir.



**Şekil 7.** Kazı sonrası modelin görünümü

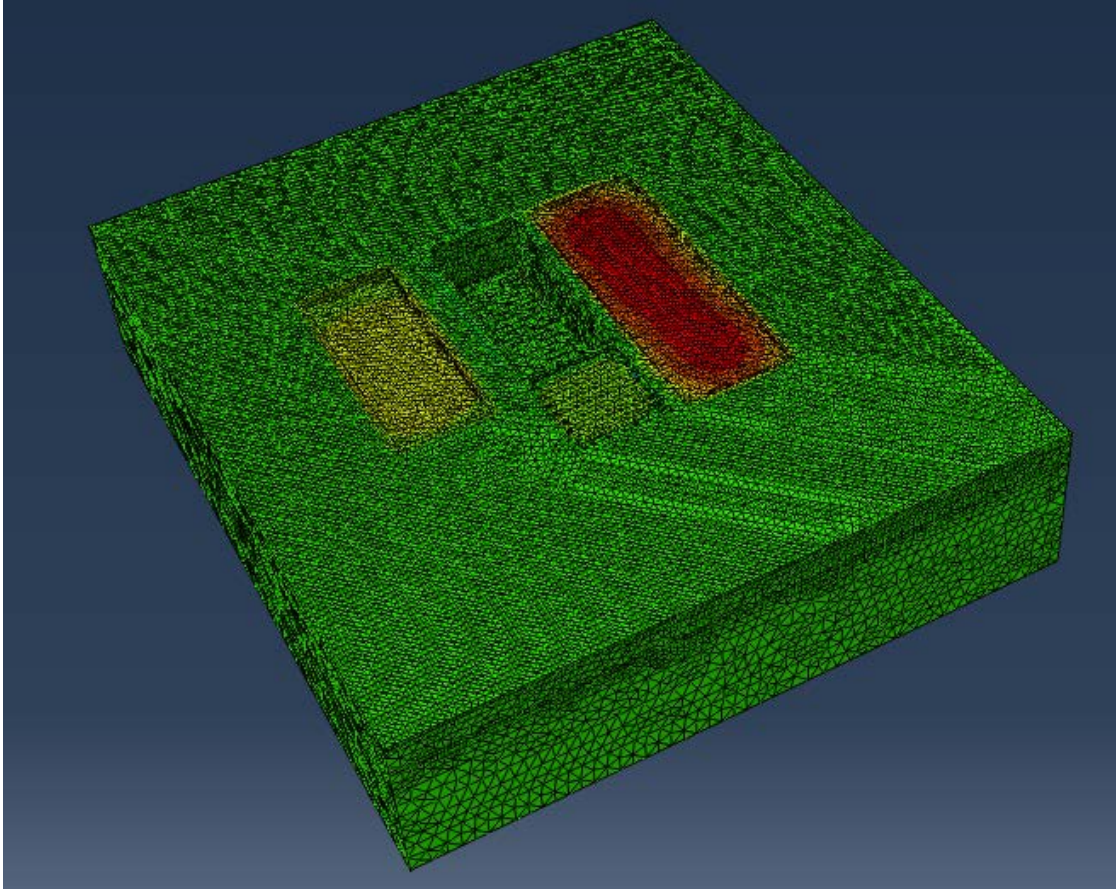


**Şekil 8.** 3B SE sonucu elde edilen yanıl deformasyonlar

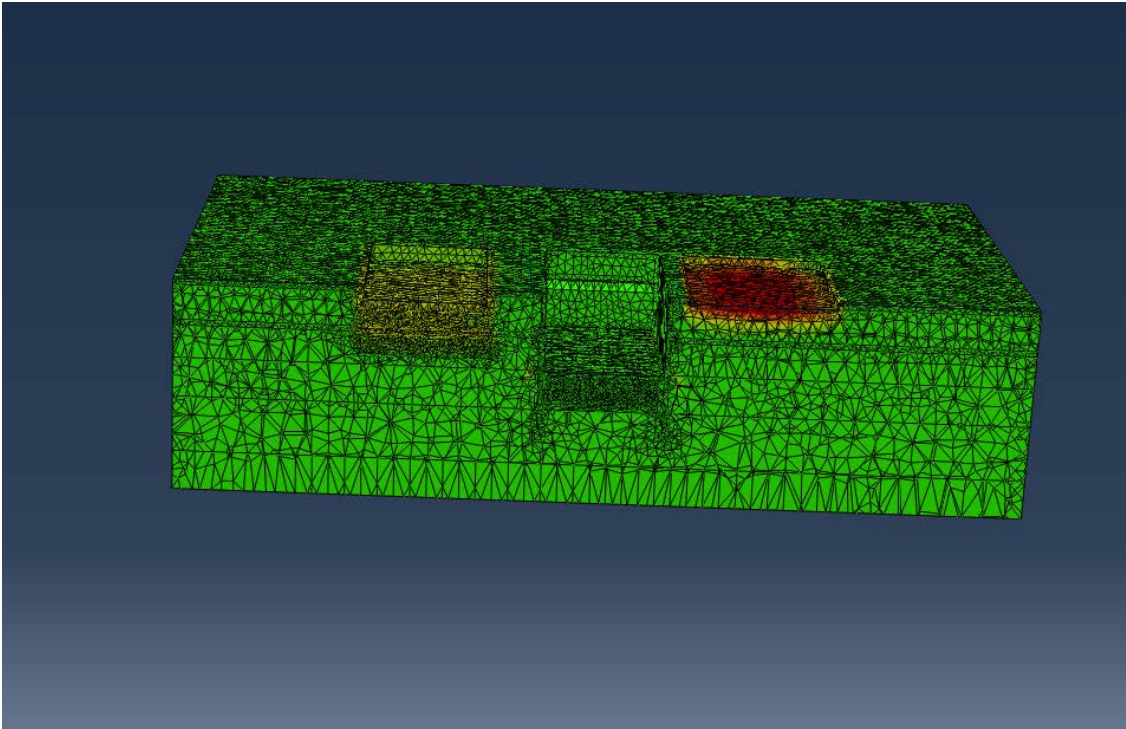
Şekil 9 ve 10’da 3B SE analizi sonucu sistemde oluşan oturmalar gösterilmiştir. Maksimum oturma

ofis binası altında oluştuğu ve 5.92 cm olarak elde edildiği belirlenmiştir.





**Şekil 9.** 3B SE sonucu elde edilen oturmalar

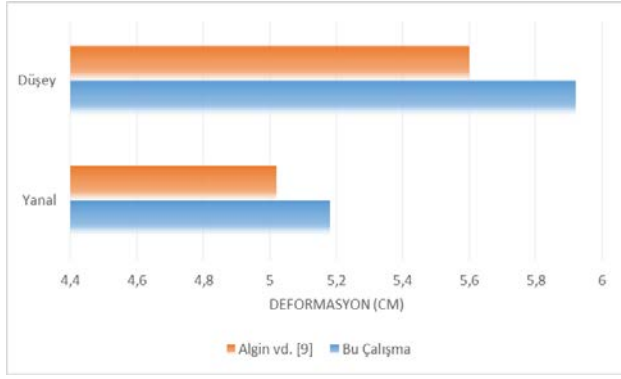


**Şekil 10.** 3B SE sonucu elde edilen oturmaların kesit görünümü

Hsieh ve diğ. [5] tarafından raporlanan sonuçların, bu çalışmada kazı inşa aşamaları dikkate alınarak yapılan analiz sonucunda elde edilen değerler ile uyduğu görülmüştür. Ayrıca Algın ve ark. [9] tarafından bu sistem için kazı aşamaları dikkate alınmadan yapılan

analizlere kıyasla, bu çalışmada elde edilen deformasyonlar gerçek ölçüm sonuçlarına [5] daha yakın olarak elde edilmiştir. Şekil 11’de bu çalışma ile literatürdeki bu sistem için kazı aşamaları dikkate alınmadan yapılan bir diğer çalışmadaki [9] yanal ve

düşey deformasyonların karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 11. Deformasyonların karşılaştırılması

Bu durum 3B SE analizinde kazı aşamalarının da dikkate alınmasıyla elde edilen sonuçların hassasiyetini ve geçerliliğini göstermektedir.

## 5. Sonuçlar

Komşu temellerle etkileşim dikkate alınarak bu derin kazı projesinin analizi literatürde karmaşık bir zemin-yapı etkileşim problemi olarak tanımlanmıştır [5]. Ancak, bu çalışma kapsamında bu karmaşık 3B SE analizi, görüntü işleme tekniği kullanarak geliştirilen 3B SE modellemeleriyle yapılabilmiş ve arazi ölçüm sonuçları ile çok yakın bir örtüşme elde edilmiştir. Bu çalışma ile derin kazı sistemlerinin kazı aşamalarını da dikkate alarak görüntü işleme tekniği ile 3B SE modellemesi yapılabileceği ve kullanılan tekniğin bu problem gibi karmaşık tasarımların analiz edilmesi için geçerli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Finno, Richard J., and L. Sebastian Bryson. "Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay." *Journal of performance of constructed facilities* 16.1 (2002): 10-20.
- [2] Koutsoftas, Demetrios C., et al. "Deformations during cut-and-cover construction of Muni Metro Turnback project." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126.4 (2000): 344-359.
- [3] Ou, Chang-Yu, Bor-Yuan Shiau, and I-Wen Wang. "Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history." *Canadian Geotechnical Journal* 37.2 (2000): 438-448.
- [4] Ng, Charles Wang Wai. An evaluation of soil-structure interaction associated with a multi-propped excavation. Diss. University of Bristol, 1992.
- [5] Hsieh, Hsui-Sheng, Chien-Chih Wang, and Chang-Yu Ou. "Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 129.2 (2003): 146-157.
- [6] Lin, D. G., T. C. Chung, and N. Phien-Wej. "Quantitative evaluation of corner effect on deformation behavior of multi-strutted deep excavation in Bangkok subsoil." *Geotechnical Engineering* 34.1 (2003): 41-57.
- [7] Zdravkovic, L., D. M. Potts, and H. D. St John. "Modelling of a 3D excavation in finite element analysis." *Stiff Sedimentary Clays: Genesis and Engineering Behaviour: Géotechnique Symposium in Print 2007*. Thomas Telford Ltd, 2011.
- [8] Peck, Ralph B. "Deep excavations and tunneling in soft ground." *Proc. 7th ICSMFE, 1969 (1969)*: 225-290.
- [9] Algin, Halil Murat, et al. "Derin Kazılarda Jet Grout Grup Kolonlarla Pasif Direnci Arttırılmış İç Destekli Diyafram Duvar Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi."
- [10] Hou, Y. M., J. H. Wang, and L. L. Zhang. "Finite-element modeling of a complex deep excavation in Shanghai." *Acta Geotechnica* 4.1 (2009): 7-16.
- [11] Dong, Yuepeng, et al. "Advanced finite element analysis of a complex deep excavation case history in Shanghai." *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 8.1 (2014): 93-100.
- [12] Whittle, Andrew J., Youssef MA Hashash, and Robert V. Whitman. "Analysis of deep excavation in Boston." *Journal of geotechnical engineering* 119.1 (1993): 69-90.
- [13] Yoo, Chungsik, and Dongyeob Lee. "Deep excavation-induced ground surface movement characteristics—A numerical investigation." *Computers and Geotechnics* 35.2 (2008): 231-252.
- [14] Hashash, Youssef MA, and Andrew J. Whittle. "Ground movement prediction for deep excavations in soft clay." *Journal of geotechnical engineering* 122.6 (1996): 474-486.
- [15] Ou, Chang-Yu, Dar-Chang Chiou, and Tzong-Shiann Wu. "Three-dimensional finite element analysis of deep excavations." *Journal of Geotechnical Engineering* 122.5 (1996): 337-345.
- [16] Zhao, B. D., et al. "Inverse analysis of deep excavation using differential evolution algorithm." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 39.2 (2015): 115-134.
- [17] Shao, Yong, and Emir Jose Macari. "Information feedback analysis in deep excavations." *International Journal of Geomechanics* 8.1 (2008): 91-103.
- [18] Xu, Changjie, et al. "Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30.4 (2015): 04015071.
- [19] Algin, Halil Murat. "Optimised design of jet-grouted raft using response surface method." *Computers and Geotechnics* 74 (2016): 56-73.

- [20] Algin, Halil Murat, ve Ekmen, Arda Burak. "Natm Tüneli İle Köprü Temel Etkileşiminin Üç Boyutlu Sayısal Analizi." 6. Geoteknik Sempozyumu 26-27 Kasım (2015): S.20-27.
- [21] Algin, Halil Murat, ve Ekmen, Arda Burak. "Dtkk Grupları Üzerindeki Radyelerin Tepki Yüzey Metodu İle Optimizasyonu." Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi 13-14 Ekim (2016).
- [22] Algin, Halil Murat. "Jet-Grout Kolon-Zemin Etkileşiminin Realistik Modellemesi ve Arayüz Geometrisinin Geoyapısal Sistemin Davranışına Etkisi." 5. Geoteknik Sempozyumu 5-7 Aralık (2013): S.40-47.
- [23] Algin, Halil Murat. "Optimised Design Of Jet-Grouted Rafts Subjected To Nonuniform Vertical Loading." Ksce, Korean Society Of Civil Engineers (2017): 1-15.