TOP-DOWN YAPIM SİSTEMLERİNDE DİYAFRAM DUVARLARIN FARKLI ZEMİN KOŞULLARINDAKİ DEFORMASYON VE İÇ KUVVETLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF DIAPHRAGM WALL DEFORMATIONS AND INTERNAL FORCES IN TOP-DOWN CONSTRUCTION SYSTEMS UNDER DIFFERENT SOIL CONDITIONS

İnş. Müh. Muhamet Enes BAŞ[1], Dr. Öğr. Üyesi Gözde SEZGİN TUNÇAY[2]

ÖZET

Derin kazı projelerinde çevre yapıların korunması ve yanal zemin hareketlerinin sınırlandırılması, uygun destek sistemlerinin seçimiyle doğrudan ilişkilidir. Top-Down yapım yöntemi, sağladığı yüksek sistem rijitliği ve yanal deformasyonları minimumda tutma kabiliyeti nedeniyle kentsel alanlardaki derin kazılarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sistemlerde diyafram duvarlar, kazı stabilitesinin sağlanması ve yapısal yüklerin taşınmasında temel bileşen olarak görev yapar. Bu çalışmada, aynı geometrik ve yapısal özelliklere sahip Top-Down yapım sistemlerindeki diyafram duvarların davranışı, tek tabakalı ve çok tabakalı iki farklı zemin profili dikkate alınarak PLAXIS 2D yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak incelenmiştir. Analizlerde aşamalı kazı süreci, yeraltı suyu etkileri ve zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, farklı zemin profillerinin diyafram duvarda meydana getirdiği kazı aşamalarına bağlı yatay deplasmanlar, maksimum deplasmanların derinlik boyunca değişimi ile duvar boyunca oluşan eğilme momenti, kesme kuvveti ve eksenel kuvvet dağılımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, zemin tabakalarının mühendislik özelliklerinin, rijitliklerinin ve taşıma kapasitelerinin diyafram duvarların deformasyon davranışı ve iç kuvvetleri üzerindeki kritik etkisini ortaya koyarak, derin kazı tasarımlarında zemin koşullarına bağlı yapısal performans değişimlerinin önemini göstermektedir. Bu kapsamda elde edilen sonuçların, benzer derin kazı projelerinde diyafram duvar tasarımına ve zemin profiline bağlı davranışın öngörülmesine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Top-Down Yapım Yöntemi, Diyafram Duvar, Deformasyon, İç Kuvvetler, PLAXIS 2D*

ABSTRACT

Ensuring the protection of surrounding structures and limiting lateral soil movements in deep excavation projects are directly related to the selection of appropriate support systems. The Top-Down construction method is widely preferred for deep excavations in urban areas due to its high system stiffness and ability to minimize lateral deformations. In such systems, diaphragm walls serve as key structural components for maintaining excavation stability and carrying structural loads. In this study, the behavior of diaphragm walls in Top-Down construction systems with identical geometric and structural characteristics was numerically investigated under two different soil profiles, namely single-layered and multi-layered profiles, using the finite element method in PLAXIS 2D. The analyses considered the staged excavation process, groundwater effects, and soil–structure interaction. Within the scope of the study, excavation-stage-dependent horizontal displacements of the diaphragm wall, the variation of maximum displacement along the depth, and the distributions of bending moment, shear force, and axial force along the wall were comparatively evaluated for the two soil profiles. The results reveal the critical influence of the engineering properties, stiffness, and bearing capacity of the soil profiles on the deformation behavior and internal forces of diaphragm walls, demonstrating

[1] İnşaat Mühendisi, Murat Çilesiz İnş. Taah. San. ve Tic. A.Ş., enesbas61@gmail.com
[2] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, gozdesezgin.tuncay@nisantasi.edu.tr (Sorumlu yazar)

the significance of soil-condition-dependent variations in structural performance in deep excavation design. The results obtained within this scope are expected to contribute to diaphragm wall design in similar deep excavation projects and to the prediction of behavior depending on the soil profile.

Keywords: *Top-Down Construction Method, Diaphragm Wall, Deformation, Internal Forces, PLAXIS 2D*

1. GİRİŞ

Hızlı kentleşme, nüfus artışı ve şehir merkezlerinde kullanılabilir alanların kısıtlanması, yapıların yer altına doğru genişlemesini zorunlu hale getirmiştir. Bu durum; metro istasyonları, yer altı otoparkları, alışveriş merkezleri ve çok katlı bodrum yapıları gibi derin kazı uygulamalarının her geçen gün yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Derin kazılarda sistem güvenliğinin sağlanması, çevre yapıların korunması ve zemin deformasyonlarının sınırlandırılması, uygun destek sistemlerinin seçilmesi ve performans analizlerinin hassasiyetle yapılmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Top-Down (yukarıdan aşağıya) yapım yöntemi; kazı ve üstyapı imalatlarının eş zamanlı yürütülmesine olanak tanıması, yüksek sistem rijitliği sunması ve çevre yapılarda meydana gelebilecek deformasyonların sınırlandırılmasına katkı sağlaması nedeniyle kentsel alanlardaki derin kazılarda sıklıkla tercih edilen bir mühendislik çözümüdür. Bu yöntemde diyafram duvarlar, kazı stabilitesinin korunması, yanal zemin hareketlerinin kontrol altında tutulması ve yapısal yüklerin güvenli şekilde taşınması açısından temel taşıyıcı bileşenlerden biri olarak işlev görmektedir (Ou et al., 1993; Ou, 2014). Diyafram duvarların davranışı; zemin profili, yeraltı suyu koşulları, zemin–yapı etkileşimi, duvar ve destek sistemi rijitliği ile aşamalı yapım süreci gibi birçok parametreden etkilenmektedir (Clough & O'Rourke, 1992; Ou, 2014). Bu nedenle, duvar davranışının gerçeğe yakın biçimde modellenmesi hem güvenli hem de ekonomik bir tasarım açısından kritik öneme sahiptir (Ou, 2014).

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı nümerik analiz yazılımları, karmaşık zemin–yapı etkileşimini ve aşamalı kazı döngülerini yüksek doğrulukla simüle edebildikleri için derin kazı projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Top-Down yapım sisteminde kullanılan diyafram duvarların yapısal performansı PLAXIS 2D programı kullanılarak nümerik olarak incelenmiştir. Aynı geometrik ve yapısal özelliklere sahip Top-Down yapım sistemlerinin nümerik modellerinde, tek tabakalı (Sakarya) ve çok tabakalı (Üsküdar) zemin profilleri tanımlanmış; zemin tabakalarının mühendislik özellikleri, rijitlikleri ve taşıma kapasitelerindeki farklılıkların diyafram duvarlarda meydana gelen yatay deplasmanlar, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. TOP-DOWN YAPIM SİSTEMLERİNİN TEORİK TEMELLERİ

2.1. Yanal Toprak Basıncı ve Destekli Kazılar

Derin kazı projelerinde diyafram duvarların tasarımını ve kesit tesirlerini belirleyen temel dinamik etken, kazı ve işletme aşamalarında oluşan yanal toprak basıncıdır. Klasik geoteknik mühendisliği yaklaşımlarında bu basınçlar Rankine ve Coulomb teorileri ile aktif, pasif ve sükûnet durumları için tanımlanmaktadır. Ancak rijit yapılı destekli kazı sistemlerinde diyafram duvar deformasyonlarının sınırlandırılmış olması nedeniyle, aktif basınç koşulları çoğu zaman tam olarak oluşmamaktadır (Das ve Sivakugan, 2018).

Bu nedenle, destek elemanları içeren derin kazılarda saha gözlemlerine ve ölçülen kuvvetlere dayalı olarak geliştirilen görünür toprak basıncı (apparent earth pressure) yaklaşımları yaygın şekilde kullanılmaktadır. Peck tarafından geliştirilen bu zarf basınçları, sisteme gelen yük aktarım mekanizmasını ve gerçek davranışı daha doğru temsil etmekte olup günümüzde derin kazı tasarımında temel bir mühendislik yaklaşımı olarak kabul edilmektedir (Terzaghi, Peck ve Mesri, 1996).

Bununla birlikte, iki farklı zemin profilinde diyafram duvarın derinlik boyunca sergileyeceği eğilme momenti, kesme kuvveti, eksenel kuvvet ve deplasman değişimlerini sadece klasik veya görünür toprak basıncı teorileriyle tam olarak açıklamak mümkün değildir. Modern tasarım anlayışında; zemin–yapı etkileşimini, ardışık kazı kademelerini, yeraltı suyu değişimlerini ve diyafram duvarın kendi rijitliğini birlikte simüle eden sonlu elemanlar yöntemine dayalı nümerik analizler tercih edilmektedir (Ou, 2014).

2.2. Top-Down Yapım Sistemi ve Diyafram Duvar Davranışı

Top-Down yapım sistemi diyafram duvarların ve taşıyıcı elemanların ilk aşamada imal edilmesi, ardından bodrum döşemelerinin yukarıdan aşağıya doğru inşa edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem sayesinde üstyapı ve kazı imalatları eş zamanlı yürütülebilmekte, yapım süresi kısalmakta ve özellikle yoğun şehirleşmiş bölgelerde çevresel etkiler önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Kazı ilerledikçe sisteme dâhil edilen her döşeme seviyesi, diyafram duvar için rijit birer yatay mesnet (destek) görevi üstlenmektedir. Bu durum, kazı aşamaları boyunca duvarın serbest açıklığını kademeli olarak azaltmakta, sistem rijitliğini artırmakta ve duvarda oluşacak maksimum deformasyonları doğrudan etkilemektedir. Bunun sonucunda yanal deplasmanlar ve yüzey oturmaları önemli ölçüde sınırlandırılmaktadır. Clough ve O'Rourke (1992), destek sisteminin rijitliğinin artmasının deformasyonların kontrolünde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Top-Down yapım sistemlerinde diyafram duvar davranışı; zemin özellikleri, kazı aşamaları, yeraltı su koşulları ve destek sisteminin rijitliği gibi çeşitli geoteknik ve yapısal parametrelerin karşılıklı etkileşiminden etkilenmektedir. Bu nedenle özellikle farklı zemin tabakalarının bulunduğu sahalarda zemin–yapı etkileşiminin dikkate alınması, kazı destek sistemlerinin davranışının gerçekçi biçimde değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Bowles ve Guo, 1996).

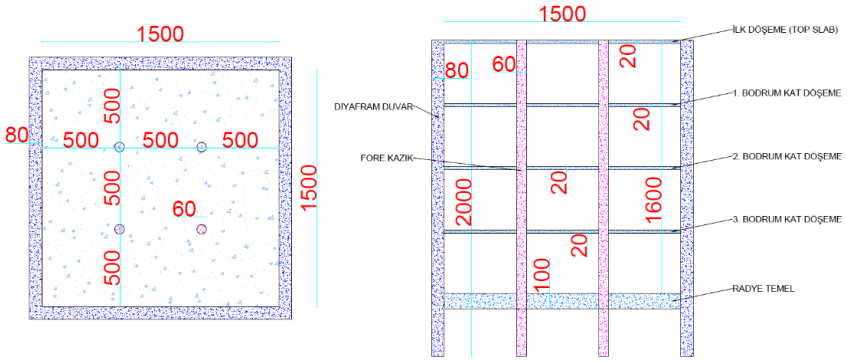
Günümüzde PLAXIS 2D gibi sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen nümerik analizler sayesinde aşamalı kazı süreci, doğrusal olmayan zemin davranışı ve yapısal elemanların sisteme katılımı gerçek saha koşullarına yakın şekilde modellenebilmekte; diyafram duvarlarda oluşan deplasmanlar, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir (Yang vd., 2022; Zhu vd., 2022).

3. TOP DOWN YAPIM SİSTEMİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ

Bu çalışmada, Top-Down yapım sistemlerinde kullanılan diyafram duvar destek yapısının farklı zemin profilleri altındaki davranışı, sonlu elemanlar yöntemine dayalı nümerik analizlerle incelenmiştir. Derin kazılarda zemin–yapı etkileşimi, doğrusal olmayan zemin davranışı ve aşamalı kazı süreçleri nedeniyle analitik yöntemler sistem davranışını tam olarak yansıtamadığından, analizlerde geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan

PLAXIS 2D yazılımı tercih edilmiştir. Programın Staged Construction (Aşamalı Yapım) özelliği kullanılarak kazı aşamaları, yapısal elemanların sisteme dâhil edilme sırası ve zemin–yapı etkileşimi gerçek saha koşullarına uygun şekilde modellenmiştir (Brinkgreve, 2002).
Analizlerde, geometrik ve yapısal özellikleri ile yükleme koşulları aynı tutularak iki farklı zemin profili modellenmiştir. Birinci model, Sakarya iline ait geoteknik veriler esas alınarak oluşturulan tek tabakalı zemin profilini, ikinci model ise İstanbul ili Üsküdar ilçesine ait geoteknik veriler kullanılarak oluşturulan çok tabakalı zemin profilini temsil etmektedir. Bu yaklaşım ile zemin profilindeki farklılıkların, Top-Down yapım sisteminde diyafram duvarın deformasyon ve iç kuvvet davranışı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde, oluşturulan sayısal modellere ait geometrik özellikler, zemin parametreleri, yapısal elemanlar, sınır koşulları ve aşamalı yapım modeli açıklanmıştır.

3.1. Model Geometrisi ve Sistem Tanımı



Şekil 1. Analizlerde Esas Alınan Plan Görünüşü ve Sistem Kesiti

Analizlerde, Top-Down yapım sisteminde diyafram duvarın farklı zemin profilleri altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırmanın sağlıklı biçimde yapılabilmesi için geometrik özellikler, yapısal sistem ve yükleme koşulları sabit tutulmuş; modeller arasındaki temel değişken zemin profili olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda, tek tabakalı (Sakarya) ve çok tabakalı (Üsküdar) zemin koşullarında diyafram duvarın deformasyon ve iç kuvvet davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 1). Bu karşılaştırma ile farklı zemin koşullarının diyafram duvar tepkisi üzerindeki etkileri doğrudan değerlendirilmiştir.

Analizlerde, 16 m kazı derinliğine sahip, 15 × 15 m plan boyutlarında ve dört bodrum katlı bir Top-Down (yukarıdan aşağıya) yapım sistemi modellenmiştir. Destek sistemini oluşturan diyafram duvarlar 20 m toplam uzunluğa ve 0,80 m kesit kalınlığına sahip olup duvarların 4 m'lik kısmı kazı tabanının altında (gömülü) kalmaktadır. Yapı içi düşey yükleri taşımak amacıyla modelde iç kolon altı fore kazıklar, döşemeler ve radye temel yer almaktadır (Şekil 1). Analizler PLAXIS 2D ortamında düzlem şekil değiştirme (plane strain) yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Sınır etkilerini önlemek adına model genişliği 80 m, toplam derinliği ise 60 m olarak seçilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi, zemin yüzeyinden 4,5 m aşağıda bulunmaktadır. Nümerik analizlerde kullanılan temel proje özellikleri, geometrik boyutlar ve modele ilişkin genel bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Nümerik Analizlerde Kullanılan Genel Proje Bilgileri

Parametre	Değer
Kazı Derinliği	16 m
Diyafram Duvar Kalınlığı	0.8 m
Diyafram Duvar Toplam Boyu	20 m
Diyafram Duvar Gömülme Derinliği	4 m
Bodrum Kat Sayısı	4
Kat Yüksekliği	4.0 m
Yapı Plan Boyutları	15 m × 15 m
Döşeme Kalınlığı	0.2 m
Radye Temel Kalınlığı	1.0 m
Fore Kazık Çapı	0.6 m
Fore Kazık Aks Aralığı	5.0 m
Yeraltı Suyu Seviyesi	Zemin yüzeyinden 4.5 m aşağıda
Model Genişliği	80 m
Model Derinliği	60 m
Zemin Modeli	Tek Tabakalı (Sakarya) ve Çok Tabakalı (Üsküdar)

3.2. Zemin Modelleri ve Parametreleri

Bu çalışmada, Top-Down yapım sistemiyle gerçekleştirilen derin kazıda diyafram duvarın farklı zemin koşullarındaki davranışını değerlendirmek amacıyla tek tabakalı (Sakarya) ve çok tabakalı (Üsküdar) olmak üzere iki farklı zemin modeli oluşturulmuştur. Zemin profilleri, ilgili sahalara ait sondaj logları ve mevcut geoteknik veriler esas alınarak tanımlanmış ve her bir zemin birimine ait mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Analizlerde zemin davranışı, gerilmeye bağlı rijitlik değişimini dikkate alan Hardening Soil modeli ile temsil edilmiştir (Vermeer, Schanz ve Bonnier, 1999).

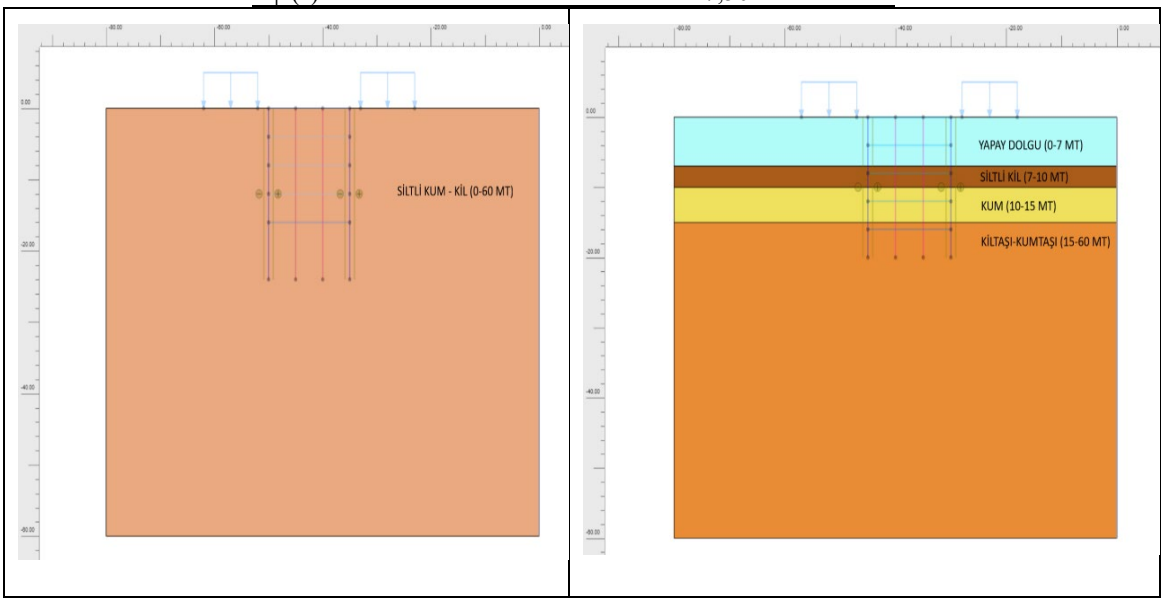
Hardening Soil modelinde; birim hacim ağırlığı (γunsat ve γsat), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ), sekant rijitlik modülü (E50), boşaltma-yeniden yükleme rijitlik modülü (Eur), boşaltma-yeniden yükleme Poisson oranı (νur), başlangıç boşluk oranı (einit) ve başlangıç gözenekliliği (ninit) parametreleri kullanılmıştır. Birim hacim ağırlığı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri mevcut saha ve geoteknik veriler esas alınarak belirlenmiştir. E50 parametresi, zeminlerin rijitlik özelliklerini temsil edecek şekilde zemin türü ve mevcut geoteknik veriler dikkate alınarak tanımlanmış; boşaltma-yeniden yükleme rijitliği için Eur/E50 oranı yaklaşık 3 olarak kabul edilmiştir. νur değeri ise literatürde önerilen yaklaşımlar doğrultusunda 0,20 olarak alınmıştır. Kullanılan zemin parametreleri Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur.

Tek Tabakalı (Sakarya) ve Çok Tabakalı (Üsküdar) Zemin Modelleri

Analizlerde, farklı mühendislik özelliklerine sahip iki ayrı zemin profili dikkate alınmıştır. Bu kapsamda Sakarya zemin modeli homojen siltli kum-kil biriminden oluşan tek tabakalı bir profil olarak, Üsküdar zemin modeli ise yapay dolgu, siltli kil, kum ve kiltaşı-kumtaşı birimlerinden oluşan çok tabakalı bir profil olarak tanımlanmıştır. Buradaki temel karşılaştırma, zemin profillerinin tabaka sayısından ziyade, tabakaların rijitlik, dayanım ve deformasyon özellikleri bakımından farklılık göstermesine dayanmaktadır. Zemin modellerinin geometrik gösterimleri Şekil 2'de, analizlerde kullanılan mühendislik parametreleri ise Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 2. Tek Tabakalı (Sakarya) Zemin Parametreleri

Parametreler	Siltli Kil – Kum Zemin Modeli
γ_{unsat} (kN/m³)	17,50
γ_{sat} (kN/m³)	19,50
e_{init}	0,50
n_{init}	0,33
E_{50} (MPa)	21
E_{ur} (MPa)	63
v_{ur}	0,20
c (kPa)	10,50
φ (°)	27,50



Şekil 2. Tek Tabakalı (Sakarya) ve Çok Tabakalı (Üsküdar) Zemin Modeli

Tablo 3. Çok Tabakalı (Üsküdar) Zemin Parametreleri

Parametreler	Yapay Dolgu Tabakası	Siltli Kil Tabakası	Kum Tabakası	Kiltaşı-Kumtaşı Tabakası
γ_{unsat} (kN/m³)	17,50	18,50	17,50	21,50
γ_{sat} (kN/m³)	19,50	20,50	19,50	23,50
e_{init}	0,50	0,50	0,50	0,50
n_{init}	0,33	0,33	0,33	0,33
E_{50} (MPa)	21	31	26	151
E_{ur} (MPa)	63	93	78	453
v_{ur}	0,20	0,20	0,20	0,20
c (kPa)	10,50	15,50	1	51
φ (°)	27,50	28,50	33,50	34

3.3. Yapısal Elemanlar ve Sonlu Eleman Ağı

Analizlerde yapısal elemanlara ait geometrik ve malzeme parametreleri her iki zemin modelinde de sabit tutulmuştur. Sayısal modelde diyafram duvar, bodrum döşemeleri ve radye temel PLAXIS 2D'de plate elemanlar ile temsil edilmiş; iç kolon altı fore kazıklar ise eşdeğer rijitlik yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir.

Yapısal elemanların rijitlik parametreleri C30 beton sınıfı esas alınarak hesaplanmış; eksenel rijitlik (EA), eğilme rijitliği (EI) ve ağırlık (w) değerleri modele tanımlanmıştır. Diyafram duvar ve fore kazıklarda, betonarme elemanın kendi ağırlığı ile kazı sırasında kaldırılan zemin ağırlığı arasındaki fark dikkate alınarak w = 5 kN/m²; kazı sonrasında sisteme dahil

olan radye temelde ise betonun kendi ağırlığı esas alınarak w = 25 kN/m² alınmıştır. Analizlerde kullanılan yapısal eleman parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Yapısal Elemanların Rijitlik Parametreleri

Yapısal Eleman	Kalınlık / Çap	EA (kN/m)	EI (kNm²/m)	w (kN/m²)
Diyafram duvar	0,8 m	$25{,}6 \times 10^6$	$1{,}365 \times 10^6$	5,0
Bodrum döşemesi	0,2 m	$6{,}4 \times 10^6$	$0{,}021 \times 10^6$	5,0
Radye temel	1,0 m	$32{,}0 \times 10^6$	$2{,}667 \times 10^6$	25,0
Fore kazık	Ø0,6 m	$1{,}81 \times 10^6$	$0{,}041 \times 10^6$	5,0

Nümerik çözümlemede, yüksek doğruluk sağlayan PLAXIS 2D'nin 15 düğümlü (15-node) üçgen sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Geometri sınırlarında ve zemin-yapı ara yüzeylerinde (interface) ağ yapısı sıklaştırılarak hassasiyet artırılmıştır. Çözüm doğruluğu ile hesaplama süresi arasındaki optimum denge gözetilerek seçilmiştir.

3.4. Aşamalı Yapım Analizi

Top-Down yapım sisteminin gerçek saha koşullarına uygun şekilde modellenebilmesi amacıyla analizler, PLAXIS 2D yazılımının Staged Construction modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada zeminin başlangıç gerilme durumu oluşturulmuş, ardından diyafram duvar ve fore kazıklar modele tanımlanmıştır. Başlangıç koşullarında yeraltı suyu seviyesi zemin yüzeyinden 4,5 m derinlikte tanımlanmıştır. Kazı işlemi dört aşamada gerçekleştirilmiş ve kazı derinliğinin yeraltı su seviyesinin altına ulaşmasıyla birlikte, saha koşullarını temsil etmek amacıyla Flow Conditions tanımlanarak dewatering koşulları modele dahil edilmiştir. Bu kapsamda, yeraltı suyunun pompaj yoluyla uzaklaştırıldığı ve drenaj sonrasında oluşan kararlı hidrolik durumun (Steady-State Groundwater Flow) geçerli olduğu kabul edilmiştir. Her kazı seviyesinde ilgili bodrum döşemesi sisteme dâhil edilerek diyafram duvarın yatay deplasmanları sınırlandırılmış, nihai kazı derinliğine ulaşıldıktan sonra radye temel aktif hâle getirilmiştir. Son aşama olan statik güvenlik analizinde ise sistemin genel stabilitesi ϕ-c Reduction yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve güvenlik katsayısı belirlenmiştir.

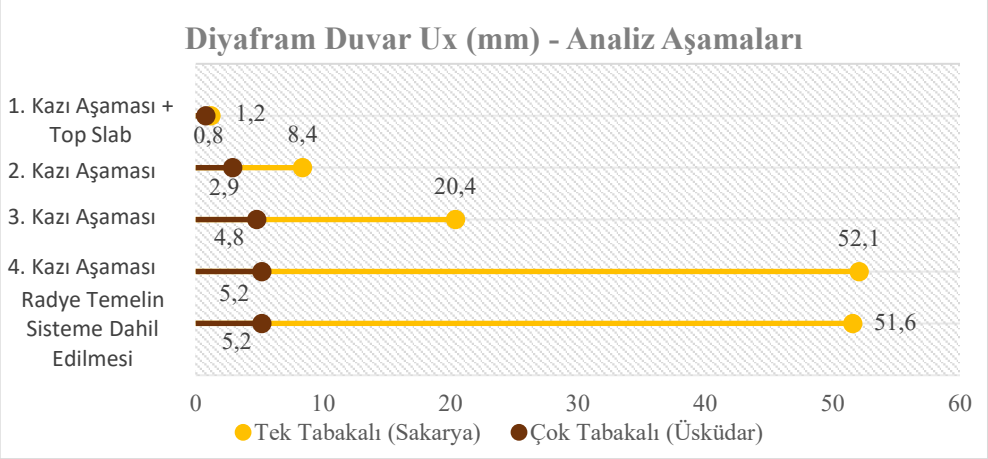
Bu aşamalı modelleme yaklaşımı ile kazı süreci boyunca zeminde oluşan gerilme ve boşluk suyu basıncı değişimleri, diyafram duvarın deplasmanları ve iç kuvvetlerin (eğilme momenti, kesme kuvveti ve eksenel kuvvet) gelişimi zemin–yapı etkileşimi çerçevesinde değerlendirilmiştir.

4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, PLAXIS 2D analizlerinden elde edilen bulgular diyafram duvarın yapısal ve geoteknik davranışı açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında, diyafram duvarın farklı zemin koşullarındaki performansını ortaya koyan temel davranış parametreleri dikkate alınmış ve bu parametrelerin kazı süreci boyunca gösterdiği değişimler incelenmiştir. Bu kapsamda; maksimum yanal deplasmanlar (Ux), eğilme momentleri (M), kesme kuvvetleri (Q), eksenel kuvvetler (N) ve sistem güvenlik katsayısı (ΣMsf) değerlendirilmiş; farklı zemin profillerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Elde edilen veriler, zemin-yapı etkileşimi ve diyafram duvarın genel performansı dikkate alınarak geoteknik ve yapısal mühendislik ilkeleri çerçevesinde yorumlanmıştır.

4.1. Diyafram Duvar Yatay Deplasmanlarının (Ux) Karşılaştırılması

Top-Down yapım sistemi adımları ilerledikçe, diyafram duvardaki yatay deplasmanların (Ux) gelişimi zemin profiline bağlı olarak değişmiştir. Her iki modele ait kazı safhalarına bağlı maksimum yatay deplasman değişimleri Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5. Diyafram Duvar Yatay Deplasmanları (Ux) Grafiği

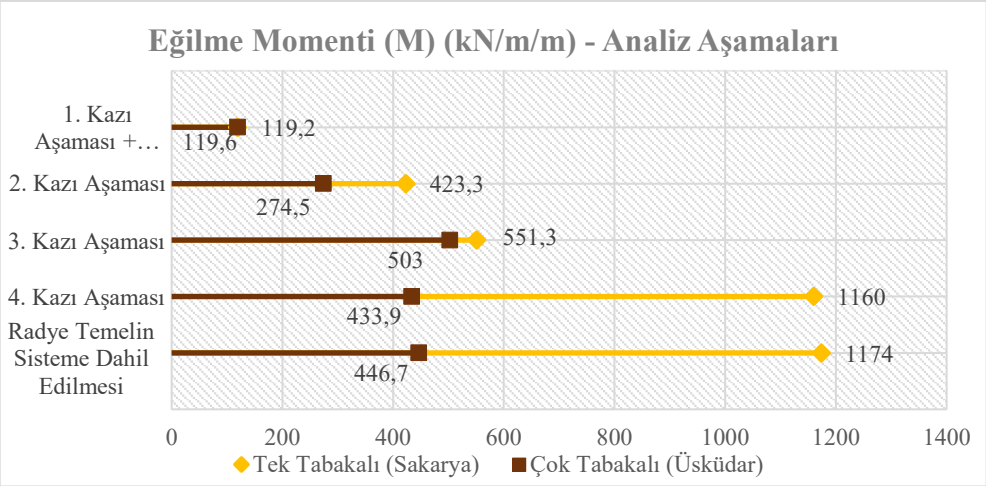
Şekil 5 incelendiğinde, 1. kazı aşaması ve Top Slab imalatı sırasında her iki zemin modelinde de yatay deplasmanların düşük seviyelerde kaldığı (Sakarya: 1,2 mm; Üsküdar: 0,8 mm), ancak kazı derinliğinin artmasıyla modeller arasındaki farkın belirginleştiği görülmektedir. Tek tabakalı Sakarya zemin profilinde yatay deplasmanlar kazı aşamalarına bağlı olarak artmış ve 4. kazı aşamasında 52,1 mm ile maksimum değerine ulaşmıştır. Buna karşılık, çok tabakalı Üsküdar zemin modelinde yatay deplasmanlar daha sınırlı düzeyde kalmış ve nihai aşamada 5,2 mm olarak elde edilmiştir. İki model arasındaki yaklaşık 10 katlık farkın, Üsküdar profilinin alt kotlarında yer alan yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip kiltaşı–kumtaşı tabakasının diyafram duvara sağladığı ilave yanal dirençten kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Sakarya profilinde benzer rijitlikte bir alt tabakanın bulunmaması, duvarın yanal deformasyonlarının daha yüksek seviyelere ulaşmasına neden olmuştur. Radye temelin sisteme dahil edilmesiyle deplasım artışının sınırlandığı ve yatay deplasmanların Sakarya için 51,6 mm, Üsküdar için 5,2 mm seviyesinde kararlı hâle geldiği görülmektedir. Bu durum, alt taşıyıcı sistemin tamamlanmasının diyafram duvarın yanal deformasyonlarını sınırlandırdığını göstermektedir.

4.2. Diyafram Duvar Eğilme Momentlerinin (M) Karşılaştırılması

Top-Down yapım sistemi adımları ilerledikçe diyafram duvarda oluşan maksimum eğilme momentlerinin (M) aşamalara göre değişimi Şekil 6'da sunulmuştur.

Şekil 6 incelendiğinde, 1. kazı aşaması ve Top Slab imalatı sırasında her iki zemin modelinde de benzer ve düşük eğilme momenti değerleri elde edildiği (Sakarya: 119,6 kN·m/m; Üsküdar: 119,2 kN/m/m), ancak 2. kazı aşamasından itibaren modeller arasındaki farkın belirginleştiği görülmektedir. Tek tabakalı Sakarya zemin modelinde eğilme momentleri kazı derinliğinin artmasıyla hızlı bir artış göstermiş, 4. kazı aşamasında 1160 kN/m/m'ye, radye temel aşamasında ise 1174,0 kN/m/m ile maksimum değerine ulaşmıştır. Bu davranışın, Sakarya profilinin daha düşük rijitliği nedeniyle diyafram duvarda gelişen yanal deformasyon ve eğriliklerin artmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Buna karşılık,

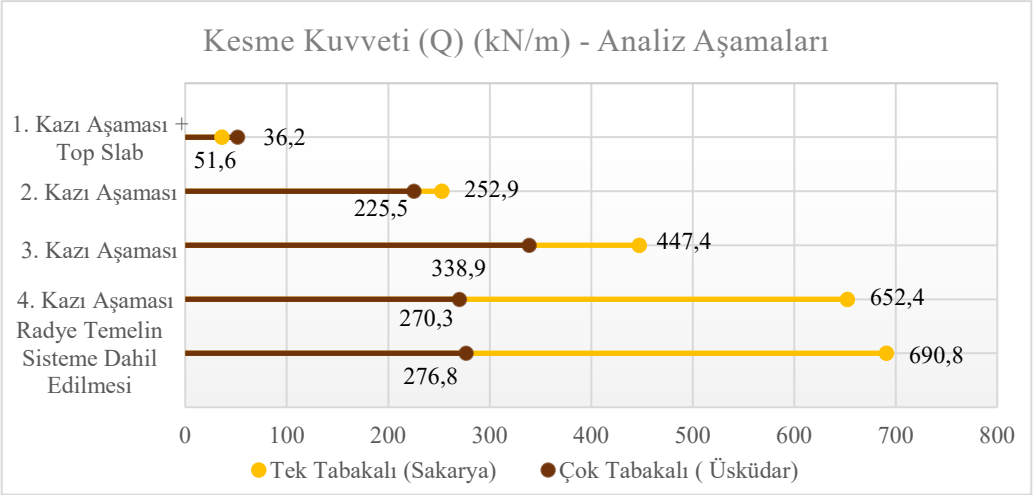
çok tabakalı Üsküdar zemin modelinde eğilme momentleri 3. kazı aşamasında 503,0 kN·m/m ile maksimum değerine ulaştıktan sonra azalarak nihai durumda 446,7 kN·m/m seviyesinde kalmıştır. Bu farkın, Üsküdar profilinin alt kotlarında yer alan yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip kumtaşı–kiltaşı tabakasının duvarın yatay deformasyonlarını sınırlandırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu durum, diyafram duvar gövdesindeki kesit tesirlerinin daha düşük seviyelerde kalmasını sağlamıştır.



Şekil 6. Diyafram Duvar Eğilme Momenti (M) Grafiği

4.3. Diyafram Duvar Kesme Kuvvetlerinin (Q) Karşılaştırılması

Top-Down yapım sistemi imalat aşamaları boyunca diyafram duvarda meydana gelen maksimum kesme kuvvetlerini (Q) ve zemin profillerine göre değişimi Şekil 7'de sunulmuştur.



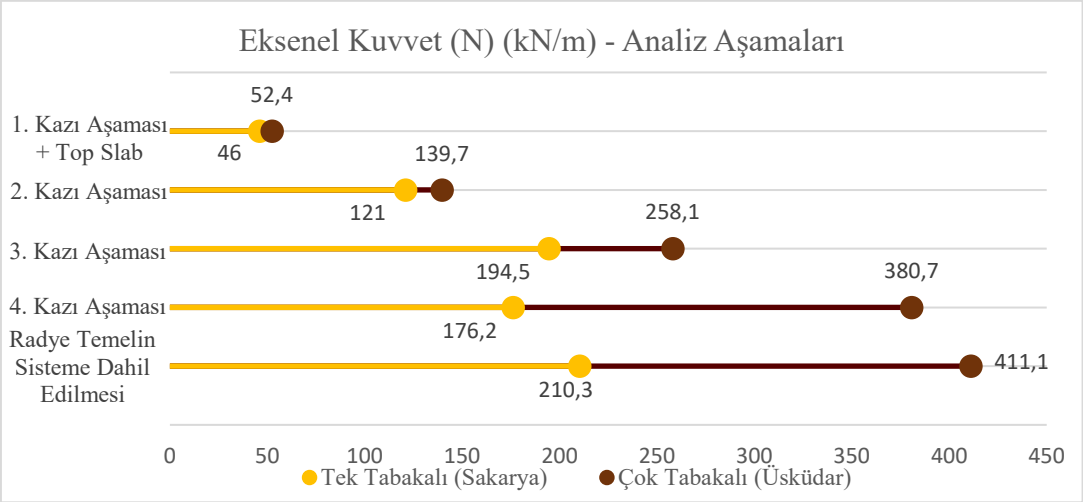
Şekil 7. Diyafram Duvar Kesme Kuvveti (Q) Grafiği

Şekil 7 incelendiğinde, 1. kazı aşaması ve Top Slab imalatı sırasında her iki zemin profilinde de kesme kuvvetlerinin düşük seviyelerde kaldığı (Sakarya: 51,6 kN/m; Üsküdar: 36,2 kN/m), ancak kazı derinliğinin artmasıyla modeller arasındaki farkın belirginleştiği görülmektedir. Tek tabakalı Sakarya zemin modelinde kesme kuvvetleri kazı aşamalarına bağlı olarak hızlı bir artış göstermiş, 4. kazı aşamasında 652,4 kN/m'ye, nihai aşamada ise

690,8 kN/m ile maksimum değerine ulaşmıştır. Buna karşılık, çok tabakalı Üsküdar zemin modelinde kesme kuvvetlerindeki değişim daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiş; 3. kazı aşamasında 338,9 kN/m ile maksimum değerine ulaştıktan sonra sonraki yapım aşamalarında azalarak nihai durumda 276,8 kN/m seviyesinde kalmıştır. Nihai aşamada iki model arasında gözlenen yaklaşık 2,5 katlık farkın, Üsküdar profilinin alt kotlarında yer alan yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip kumtaşı–kiltaşı tabakasının duvarın yatay deformasyonlarını sınırlandırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

4.4. Diyafram Duvar Eksenel Kuvvetlerinin (N) Karşılaştırılması

Top-Down yapım sistemi aşamaları boyunca diyafram duvarda meydana gelen maksimum eksenel kuvvetlerin (N) zemin profillerine göre değişimi Şekil 8'de sunulmuştur. Eksenel kuvvetler, aşamalı yapım sürecinde döşemelerden aktarılan düşey yükler ve zemin-yapı etkileşimi sonucunda oluşmaktadır.



Şekil 8. Diyafram Duvar Eksenel Kuvvet (N) Grafiği

Şekil 8 incelendiğinde, 1. kazı aşaması ve Top Slab imalatı sırasında her iki zemin profilinde de benzer ve düşük eksenel kuvvet değerleri elde edildiği (Sakarya: 46,0 kN/m; Üsküdar: 52,4 kN/m), ancak kazı aşamalarının ilerlemesi ve döşemelerin sisteme dahil edilmesiyle eksenel kuvvetlerin arttığı görülmektedir. Diğer iç kuvvet bileşenlerinden farklı olarak, çok tabakalı Üsküdar zemin modelinde eksenel kuvvet artışı daha belirgin gerçekleşmiş ve nihai aşamada 411,1 kN/m değerine ulaşmıştır; tek tabakalı Sakarya zemin modelinde ise nihai değer 210,3 kN/m seviyesinde kalmıştır. Nihai aşamadaki yaklaşık iki katlık farkın, zemin tabakalarının rijitlik ve dayanım özellikleri ile zemin–duvar etkileşiminin düşey yük aktarım mekanizmasına etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Üsküdar profilindeki yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip kumtaşı–kiltaşı tabakası, düşey yüklerin diyafram duvar boyunca aktarılma biçimini değiştirerek daha yüksek eksenel sıkışma kuvvetlerinin oluşmasına katkı sağlarken, Sakarya profilindeki daha düşük rijitlikli siltli kum–kil biriminde eksenel kuvvetler daha düşük seviyelerde kalmıştır.

4.5. Statik Güvenlik Analizi ve Güvenlik Katsayısının (ΣMsf) Karşılaştırılması

Kazı işlemlerinin tamamlanmasının ardından gerçekleştirilen ϕ-c Reduction analizi sonucunda, Tek Tabakalı (Sakarya) zemin modelinde güvenlik katsayısı ΣMsf = 5,755, Çok

Tabakalı (Üsküdar) zemin modelinde ise ΣMsf = 6,295 olarak elde edilmiştir. Üsküdar modelindeki daha yüksek güvenlik katsayısının, alt kotlarda yer alan yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip kiltaşı–kumtaşı tabakasının sistemin genel stabilitesine katkısından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Buna karşın, Sakarya modelinde daha yüksek yatay deplasman ve iç kuvvetler oluşmasına rağmen sistemin genel stabilitesinin korunduğu görülmektedir.

4.6. Farklı Zemin Koşullarının Diyafram Duvar Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi

Nümerik analizler, zemin profilinin ve derinliğe bağlı rijitlik değişimlerinin diyafram duvar davranışı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Tek tabakalı Sakarya modelinde maksimum yatay deplasman 52,1 mm, eğilme momenti 1174,0 kN·m/m ve kesme kuvveti 690,8 kN/m olarak elde edilirken, çok tabakalı Üsküdar modelinde bu değerler sırasıyla 5,2 mm, 503,0 kN·m/m ve 338,9 kN/m seviyesinde kalmıştır. Buna karşılık, eksenel kuvvet Üsküdar modelinde daha yüksek elde edilmiş ve 411,1 kN/m değerine ulaşmıştır. Bu farklılıkların, zemin rijitliği ile zemin–duvar etkileşiminin yatay ve düşey yük aktarım mekanizmaları üzerindeki etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Tek Tabakalı (Sakarya) ve Çok Tabakalı (Üsküdar) zemin modellerine ait analiz sonuçları Tablo 5'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5. Tek Tabakalı (Sakarya) ve Çok Tabakalı (Üsküdar) Zemin Modellerine Ait Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Parametre	Tek Tabakalı (Sakarya)	Çok Tabakalı (Üsküdar)
Maksimum Diyafram Duvar Ux (mm)	52,1	5,2
Maksimum Eğilme Momenti (kN·m/m)	1174	503,0
Maksimum Kesme Kuvveti (kN/m)	690,8	338,9
Maksimum Eksenel Kuvvet (kN/m)	210,3	411,1
Güvenlik Katsayısı (ΣMsf)	5,755	6,295

Tablo 5 incelendiğinde, Üsküdar modelinde yatay deplasmanların yaklaşık 10 kat, maksimum eğilme momentinin %57 ve kesme kuvvetinin %51 oranında azaldığı; buna karşılık maksimum eksenel kuvvetin yaklaşık iki kat arttığı görülmektedir. Statik güvenlik analizi sonucunda ise ΣMsf değerleri Sakarya ve Üsküdar modelleri için sırasıyla 5,755 ve 6,295 olarak elde edilmiş olup, Üsküdar modelinde daha yüksek güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Genel olarak, derin kotlarda bulunan yüksek rijitlikteki tabakaların diyafram duvarın yanal deformasyon ve kesit tesirlerini sınırlandırırken düşey yük aktarımını farklılaştırdığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, aynı geometrik ve yapısal özelliklere sahip Top-Down yapım sistemlerinin nümerik modellerinde farklı zemin koşullarının diyafram duvar davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Sakarya zemin profili tek tabakalı, Üsküdar zemin profili ise çok tabakalı bir zemin modeli olarak ele alınmış; farklı mühendislik özelliklerine sahip bu zemin koşullarında diyafram duvarlarda meydana gelen yatay deplasmanlar, eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, zemin profilindeki farklılıkların Top-Down kazı sistemi ve diyafram duvar davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Analiz sonuçları, farklı zemin koşullarının Top-Down yapım sistemlerinde diyafram duvarın deformasyon ve iç kuvvet davranışı üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermiştir. Tek tabakalı Sakarya zemin modelinde yatay deplasman, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri daha yüksek seviyelerde gerçekleşirken, çok tabakalı Üsküdar modelinde özellikle alt kotlardaki daha rijit ve dayanımlı tabakaların sağladığı ilave yanal direnç sayesinde bu büyüklükler önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. Bu bulgular, zemin profilinin tabakalanma, rijitlik ve dayanım özelliklerinin diyafram duvarın yanal deformasyonları ile iç kuvvet dağılımı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Eksenel kuvvetlerin ise çok tabakalı Üsküdar modelinde daha yüksek olması, zemin–duvar etkileşimi ve düşey yük aktarım mekanizmasının farklı zemin koşullarına bağlı olarak değişmesiyle ilişkilendirilmektedir.

Sonuç olarak, zemin tabakalarının mühendislik özellikleri, Top-Down yapım sistemlerinde diyafram duvarın deformasyonu ve iç kuvvet dağılımı üzerinde belirleyicidir. Özellikle yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip tabakaların bulunduğu modelde yatay deplasman, eğilme momenti ve kesme kuvvetlerinin belirgin ölçüde azalması, zemin koşullarının sistem davranışını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, gerçek zemin stratigrafisi ile mühendislik parametrelerinin nümerik modellere doğru şekilde aktarılması, diyafram duvar davranışının güvenilir biçimde öngörülmesi ve gerçekçi, ekonomik bir tasarımın oluşturulması açısından kritik önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Bowles, J. E. ve Guo, Y. (1996). *Foundation analysis and design* (Vol. 5, p. 127). New York: McGraw-hill.

Brinkgreve, R. B. J. (2002). Plaxis, finite element code for soil and rock analyses. *RBJ Brinkgreve Delft, Netherlands.*

Clough, G. W., & O'Rourke, T. D. (1992). Closure to "Construction Induced Movements of Insitu Walls" by GW Clough and Thomas D. O'Rourke (June 18–21, 1990, No. 25). *Journal of Geotechnical Engineering, 118*(4), 665-666.

Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.

Ou, C. Y. (2014). *Deep excavation: Theory and practice*. Crc Press.

Ou, C. Y., Hsieh, P. G. ve Chiou, D. C. (1993). Characteristics of ground surface settlement during excavation. *Canadian geotechnical journal*, 30(5), 758-767.

Vermeer, P. A., Schanz, T. ve Bonnier, P. G. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in computational geotechnics*, 281-297.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John wiley & sons.

Yang, Z., Chen, Y., Azzam, R., & Yan, C. (2022). Performance of a top-down excavation in shanghai: Case study and numerical exploration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26*(15), 7932-7957.

Zhu, Y., Sun, F., Liu, M., Liu, Q., Li, X. ve Ge, G. (2022). Numerical Simulation Study on Construction Effect of Top-Down Construction Method of Suspended Diaphragm Wall for Deep and Large Foundation Pit in Complex Stratum. *Advances in Civil Engineering*, *2022*(1), 8201726.