

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ZEMİN TİPLERİNDE ŞAFT DAVRANIŞININ NÜMERİK
ANALİZLERLE İNCELENMESİ**

Hüseyin ÜNLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN

Haziran, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ZEMİN TİPLERİNDE ŞAFT DAVRANIŞININ NÜMERİK
ANALİZLERLE İNCELENMESİ**

Hüseyin ÜNLÜ tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGEN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aykut ŞENOL, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Farklı Zemin Tiplerinde Şaft Davranışının Nümerik Analizlerle İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hüseyin ÜNLÜ

İmza

Aileme...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerini esirgemeyip paylaşan, eğitime katkısı büyük olan danışman hocam Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGEN'e, bu tezin yazılmasında büyük katkısı olan Prof. Dr. Mehmet BERİLGEN'e, şahsıma olan güven, inanç ve tam desteklerinden dolayı aileme çok teşekkür ederim.

Hüseyin ÜNLÜ



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTIMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	2
1.4 Tezin İçeriği.....	2
2 ŞAFT İNŞA YÖNTEMLERİ VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	3
2.1 Palplanş Perdeler.....	3
2.2 Çakışan Kazıklar.....	4
2.3 Segmental Kaplama.....	4
2.4 Diyafram Duvarlar.....	5
2.5 Püskürtme Beton.....	6
2.6 Dairesel Şaftlarla İlgili Literatürde Yeralan Çalışmalar.....	7
2.7 Deneysel ve Teorik Yaklaşımlar.....	9
2.8 Dairesel Şaft Duvarına Etkiyen Toprak Basınçlarının Hesaplanmasına Yönelik Farklı Yaklaşımlar.....	21
3 SONLU ELEMAN ANALİZLERİ	26

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	26
3.2 Geometrik Model Oluşturulması	28
3.3 Plaxis Programında Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi.....	32
3.4 Kum ve Kil Zeminlerde İnşa Edilen Şaftlarda İçsel Kuvvet ve Deplasman Değişimlerinin Belirlenmesi	33
3.5 Kum ve Kil Zeminler için Duvar Arkası Zemin Deplasmanlarının Farklı Zemin Durumları ve Şaft Özelliklerine Bağlı Olarak Değerlendirilmesi	49
3.6 Kum ve Kil Zeminler için Duvar Arkası Zemin Deplasmanlarının Literatürde Yeralan Çalışmalarla Kıyaslanması	55
3.7 Kum ve Kil Zeminlerde Şaft Duvarında Meydana Gelen Deplasmanlar için Elde Edilen Analiz Sonuçları.....	56
3.8 Şaft Rijitliğinin Duvar Arkasındaki Deplasmanlara Etkisi	59
3.9 Kumda Maksimum Duvar ve Zemin Deplasmanlarının Kazı Derinliği ve Şaft Çapına Bağlı Değişimi	60
3.10 Kilde Maksimum Duvar ve Zemin Deplasmanlarının Kazı Derinliği ve Şaft Çapına Bağlı Değişimi.....	62
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKÇA	68
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	72

SİMGE LİSTESİ

Φ^*	Azaltılmış Mukavemet Açısı
σ_1	Büyük Asal Gerilme
λ	Çembersel Gerilme Katsayısı
Ψ	Dilatasyon Açısı
S_u	Drenajsız Kayma Mukavemeti
δ	Duvar Deplasmanı
$S_v(d)$	Duvarın "d" Mesafe Gerisindeki Zemin Oturması
σ_v	Düşey Gerilme
σ_z	Düşey Gerilme
Φ'	Efektif Mukavemet Açısı
τ_{zr}	Kayma Gerilmesi
τ_{rz}	Kayma Gerilmesi
γ_{unsat}	Kuru Birim Hacim Ağırlık
σ_3	Küçük Asal Gerilme
Φ	Mukavemet Açısı
σ_r	Radyal Gerilme
K_0	Sükunet Hali Gerilme Katsayısı
γ_{sat}	Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık
r_0	Şaft Yarıçapı
σ_θ	Teğetsel Gerilme
α	Zemin Koşullarına ve İnşa Yöntemine Bağlı Ampirik Katsayı

KISALTMA LİSTESİ

2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı
d	Duvar arkası mesafe
D	Şaft Çapı
E	Elastisite Modülü
FE	Sonlu Elemanlar (Finite Elements)
FD	Sonlu Farklar (Finite Difference)
H	Kazı Derinliği
M	Eğilme Momenti
m	Metre
mm	Milimetre
N_z	Çevre Eksenel Kuvvet
N	Normal Kuvvet
OCR	Aşırı Konsolidasyon Oranı
Q	Kesme Kuvveti

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Çelik palplanşların zemine penetrasyonu.....	3
Şekil 2.2 Çakışan kazık uygulaması.....	4
Şekil 2.3 Segmental kaplama uygulaması.....	5
Şekil 2.4 Diyafram duvar şaft.....	6
Şekil 2.5 Püskürtme beton şaft.....	6
Şekil 2.6 Arazi ölçüm sonuçları (Muramatsu ve Abe, 1996; New ve Bowers, 1994; Wong ve Kaiser, 1988).....	10
Şekil 2.7 Analitik formüllerin karşılaştırılması (New ve Bowers 1994, Geotechnical Consulting Group 2007, Pairaudeau 2011).....	12
Şekil 2.8 Arazi gözlem ve analitik hesap yöntemlerinin karşılaştırılması (Muramatsu ve Abe, 1996; New ve Bowers,1994; Geotechnical Consulting Group, 2007; Pairaudeau, 2011).....	13
Şekil 2.9 Won ve Kaiser (1988) arazi gözlem sonuçları ile New ve Bowers(1994), Geotechnical Consulting Group (2007), Pairaudeau (2011) değerlerinin karşılaştırması (Schwamb,2014).....	14
Şekil 2.10 Santrifüj deneyi ile ampirik korelasyonların kıyaslaması (Schwamb,2014).....	15
Şekil 2.11 Kusakabe (1982) santrifüj deneyi (Schwamb,2014).....	16
Şekil 2.12 Cabarkapa ve diğ. (2003) sonlu eleman analizi ve arazi gözlem sonuçları (Schwamb,2014).....	17
Şekil 2.13 Anagnostopoulos ve Georgiadis (2001) sonlu eleman analizi ve arazi gözlem sonuçları (Schwamb,2014).....	19
Şekil 2.14 Marten ve Bourgeois (2005) deformasyon şekli (Schwamb,2014).....	20
Şekil 2.15 Ariizumi ve diğ. (2000) iki diyafram duvar paneline ait deplasman ölçümleri ve analiz sonuçları (Schwamb,2014).....	21
Şekil 2.16 Silindirik koordinat sisteminde zemin gerilmeleri.....	22
Şekil 3.1 15 ve 6 düğüm noktalı zemin elemanları.....	27
Şekil 3.2 Sonlu elemanlara ayrılmış model.....	32
Şekil 3.3 Farklı şaft çaplarında elde edilen eğilme momenti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	34
Şekil 3.4 Farklı şaft çaplarında elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	34
Şekil 3.5 Farklı şaft çaplarında elde edilen çevre aksenal kuvveti (N_z) değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	35

Şekil 3.6	Farklı şaft çaplarında elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	35
Şekil 3.7	Farklı şaft çaplarında elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	36
Şekil 3.8	Farklı şaft çaplarında elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	37
Şekil 3.9	Farklı şaft çaplarında elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m).....	37
Şekil 3.10	Farklı şaft çaplarında elde edilen eğilme momenti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	39
Şekil 3.11	Farklı şaft çaplarında elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	39
Şekil 3.12	Farklı şaft çaplarında elde edilen çevre eksenel kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	40
Şekil 3.13	Farklı şaft çaplarında elde edilen kesme kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	40
Şekil 3.14	Farklı şaft çaplarında elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	41
Şekil 3.15	Farklı şaft çaplarında elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m).....	41
Şekil 3.16	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eğilme momenti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	42
Şekil 3.17	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	43
Şekil 3.18	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen çevre eksenel kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	43
Şekil 3.19	Farklı kazı Derinliklerinde elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	44
Şekil 3.20	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	44
Şekil 3.21	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m).....	45

Şekil 3.22	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eğilme momenti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	46
Şekil 3.23	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	46
Şekil 3.24	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen çevre aksenal kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	47
Şekil 3.25	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen kesme kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	47
Şekil 3.26	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	48
Şekil 3.27	Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m).....	48
Şekil 3.28	Kum zeminde duvar arkası deplasmanların duvara uzaklığına bağlı değişimi (D=6m, H=6m).....	49
Şekil 3.29	Kil zeminde duvar arkası deplasmanların duvara uzaklığına bağlı değişimi (D=6m, H=6m).....	50
Şekil 3.30	Kum zeminde şaft çapına bağlı olarak duvar arkası deplasmanların değişimi ($\phi'=32$, H=6m).....	51
Şekil 3.31	Kil zeminde şaft çapına bağlı olarak duvar arkası zemin deplasmanların değişimi ($c_u=200$ kPa, H=6m).....	52
Şekil 3.32	Kum zeminde artan kazı derinliği ile duvar arkası zemin deplasmanların değişimi ($\phi'=32$, D=6m).....	53
Şekil 3.33	Kil zeminde artan kazı derinliği ile duvar arkası deplasmanların değişimi ($C_u=200$ kPa, D=6m.....	54
Şekil 3.34	Duvar arkası deplasmanların analitik verilerle karşılaştırması.....	55
Şekil 3.35	Farklı kayma mukavemeti açlarına sahip kum zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan şaft çapına bağlı değişimi.....	57
Şekil 3.36	Farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerine sahip kil zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan şaft çapına bağlı değişimi.....	57
Şekil 3.37	Farklı kayma mukavemetine açlarına sahip kum zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan kazı derinliğine bağlı değişimi.....	58
Şekil 3.38	Farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerine sahip kil zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan kazı derinliğine bağlı değişimi.....	59

Şekil 3.39 Artan duvar rijitliği ile zemin deplasmanlarının değişimi.....	60
Şekil 3.40 Kum zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek deplasmanlar.....	61
Şekil 3.41 Kum zeminde farklı geometrilerdeki şaft kazısında zeminde meydana gelebilecek maksimum deplasmanlar.....	62
Şekil 3.42 Kil zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek maksimum deplasmanlar.....	63
Şekil 3.43 Kil zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek maksimum deplasmanlar.....	64



TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Analiz Modelleri.....	29
Tablo 3.2 Yapısal eleman parametreleri.....	29
Tablo 3.3 Kum zemin için parametreler.....	30
Tablo 3.4 Kil zemin için parametreler.....	31



Farklı Zemin Tiplerinde Şaft Davranışının Nümerik Analizlerle İncelenmesi

Hüseyin ÜNLÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN

Derin kazı problemleri Geoteknik Mühendisliğinin önemli araştırma alanlarından biridir. Derin kazı destek sistemlerine gelen toprak basıncının hesabı ve çevre zemindeki oturmalar pek çok araştırmacının ilgisinin çekmiş ve bu konularda pek çok çalışmalar yapılmıştır. Derin kazıların davranışını incelemek adına literatürde; analitik çözümlere, ampirik yaklaşımlara ve nümerik analizlere dayanan çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmaların geneli düzlem şekil değiştirme kabulü esasına dayadığından aksel simetrisinin söz konusu olduğu düşey dairesel şaft kazılarının analizinde bu yöntemlerden yararlanmak tutucu sonuçlar bulmamıza neden olmaktadır. Dairesel kazılar, istinat yapısında oluşacak kemerlenme etkisinin sonucu olarak yapısal avantajlar sağlamaktadır. Kemerlenme etkisi yatay destek elemanlarına olan ihtiyacı azalttığı gibi istinat yapısının gömülü derinliğini de azaltabilmektedir. Düşey dairesel şaft kazıları ile ilgili çalışmaların sınırlı olması nedeniyle tasarımcılar sonlu elemanlar yöntemini kullanan ticari yazılımları sıklıkla kullanmaktadır. Bu çalışmada dairesel şaft kazıları ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve zemin parametrelerindeki değişimin şaftın davranışına etkisi incelenmiştir. Kazı derinliği ve şaft çapındaki değişimin çevre zeminde ve şaft duvarında meydana getirdiği değişimler yapılan parametrik analizlerle

incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar yardımıyla zeminde ve şaft duvarında beklenebilecek deplasmanların tahminine yönelik formüller önerilmiştir. Destek sisteminin yapısal rijitliğindeki artışın çevre zeminde ve şaft duvarında meydana getireceği deplasmanlar incelenmiştir. Duvar arkasında meydana gelen deplasmanlar hesaplanıp literatürde bulunan analitik verilerle kıyaslanarak grafik üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dairesel şaft, aksel simetri, sonlu elemanlar yöntemi, plaxis



Numerical Analysis of Shafts in Different Soil Types

Hüseyin ÜNLÜ

Department of Civil Engineering

MSc Thesis

Advisor: Assoc. Proff. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN

Deep excavation problems are one of the major problems in Geotechnical Engineering. The calculation of earth pressures acting on excavation support system and ground movements around the excavation attracted the attention of many researchers. Hence there are numerous studies on the behavior of deep excavations. In order to examine the behavior of deep excavations; there are studies based on analytical solutions, empirical approaches and numerical analysis in the literature. However most of these studies are based on plane strain assumption and utilizing this studies in circular shaft construction where axial symmetry situation takes place may lead to conservative results. Circular excavations provides structural benefits as a result of arching effect in the lining. Arching effect may decrease the need to lateral bracing and reduce the embedment length of the retaining structure. As the studies on circular shafts are limited and complex, designers often utilize the commercial softwares which uses finite element method. In this study, a general literature investigation is done and the effect of changes in soil parameters on the behavior of shaft is examined. Ground displacements behind the wall are determined and compared with the analytical approaches in the literature. The effect of excavation depth and shaft diameter on the soil movement and the structural behaviour is investigated with parametric

analysis and new formulas are developed to predict the displacement of the shaft wall and the soil at the excavation bottom. The effect of the increase in the rigidity of the excavation support system on the soil displacement is numerically investigated.

Keywords: Circular shaft, axisymmetry, finite elements method, plaxis



1.1 Literatür Özeti

Artan şehir nüfusu ve kentleşmenin sonucu olarak etkili ve sürdürülebilir altyapı tesislerine olan ihtiyaçta artmaktadır. Bu tesislerin imalatı için derin kazı uygulamalarına sıklıkla başvurulmaktadır. Yapılan kazının stabil kalmasını sağlayan dayanma yapılarına şaft denmektedir. Eksenel simetri durumunun söz konusu olduğu dairesel kazılar sağladığı yapısal avantajlar nedeniyle uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Düşey dairesel şaftlar maden ocaklarında, tünel inşaatlarında, atık su pompalama istasyonu kazılarında, karayolu ve demiryolu sanat yapılarının temel kazılarında kullanılmaktadır. Dairesel şaftların uygulanmasının en önemli nedeni sağladığı yapısal avantajlardır. Düzlem şekil değiştirme kabulüyle tasarlanan dikdörtgen şeklindeki kazıda derinliğe ve zemin koşullarına bağlı olarak iç desteklere ihtiyaç duyulabilirken; dairesel şaftlarda dayanma yapısında meydana gelen çembersel kuvvetler sayesinde yatay destek elemanlarına ihtiyaç azalmaktadır. Dairesel geometriden kaynaklanan kemerlenme etkisinin sonucu olarak dayanma yapısına gelen zemin yükü düzlem şekil değiştirme durumuna göre daha düşük olmaktadır (Wong ve Kaiser, 1988). Bunun sonucu olarak daha ekonomik tasarımlar elde edilebilmektedir. Yapısal rijitliğin fazla olması ve iç destekleri minimize etmesine karşın dairesel şaftlar hakkında literatürde pek fazla vaka analizi bulunmamaktadır. Bu nedenle tasarımcılar tutucu yaklaşımları kullanarak gerçekte olabilecekte fazla oturma değerleri bulmaktadır ve bu durum alınan koruyucu önlemleri dolayısıyla inşaat maliyetini artırmaktadır. Literatürde yer alan önemli bir çalışma olan New ve Bowers (1994), tasarımcıların yararlandığı iyi belgelenmiş bir vaka analizidir. Ancak New ve Bowers (1994)' in şaft çevresinde oluşan oturmaların hesabı için önerdiği formül spesifik bir geometri ve zemin koşulu için belirlendiğinden farklı koşullar altında uygulanabilirliği pek mümkün olmamaktadır. Bu çalışmanın amacı

kazı çevresindeki oturmaları ve yapısal davranışları göz önünde bulundurarak dairesel şaftların davranışını incelemektir.

1.2 Tezin Amacı

Yüksek lisans tezi olarak yapılan bu çalışmada dairesel şaftlarla ilgili literatür taraması yapılmış, zemin mukavemeti ve rijitliğindeki değişim ile istinat yapısına ait yapısal parametrelerdeki değişimin çevre zemindeki deplasman ve yapısal eleman iç kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Kazı geometrisinin şaft davranışı üzerindeki etkisini incelemek adına şaft çapı ve kazı derinliği arttırılarak analizler tekrarlanmış, şaft duvarında ve çevre zeminde meydana gelen deplasmanlar nedeniyle gelişen iç kuvvet değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Zemin özelliklerinde meydana gelen değişiklikler ve kazı geometrisi şaftın davranışı üzerinde etkilidir ve farklı zemin koşullarında şaftların davranışı sonlu eleman nümerik analizleri ile incelenebilir.

1.4 Tezin İçeriği

Dairesel şaftların davranışının incelendiği bu tez çalışmasında literatür özeti olarak hazırlanan Bölüm 2'de dairesel kazılarla ilgili literatürde bulunan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 2.1'den 2.5'e kadar olan bölümlerde şaft inşa yöntemlerine, Bölüm 2.6'de dairesel kazılarla ilgili analitik çalışmalara ve Bölüm 2.7'te deneysel ve teorik yaklaşımlara değinilmiştir. Bölüm 2.8'de ise şaft duvarına etkiyen toprak basınçlarından bahsedilmiştir.

Yapılan sonlu eleman analizler ile ilgili bilgiler Bölüm 3'te anlatılmıştır. Bölüm 3.1'de sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 3.2'de Plaxis2D programında oluşturulan model hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3.3'ten 3.10'a kadar olan bölümlerde ise yapılan analizlerin sonuçları sunulmuştur.

Bölüm 4'te ise yapılan analizler değerlendirilmiş ve gelecekte şaftlarla ilgili yapılacak çalışmalar için yol gösterilmiştir.

ŞAFT İNŞA YÖNTEMLERİ VE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Derin kazıların stabilitesini sağlamak adına istinat yapılarında yararlanılmaktadır. Eksenel simetrik şaft inşaatlarında destek yapısının belirlenmesindeki en önemli kriterler yer altı suyunun durumu, civar yapıların zemin hareketlerine duyarlılığı, zemin koşulları ve şaft boyutlarıdır (Schwamb, 2014). Şaft inşasında en çok kullanılan yöntemler maddeler halinde sıralanmıştır (Puller, 2003);

2.1 Palplanş Perdeler

Palplanş perdelerin zemine penetrasyonu yoluyla inşa edilir. Ankrajlı veya konsol olarak çalışabilirler. Penetrasyonu zorlaştırabilecek kaya türü zeminlerde uygulaması zordur. Ayrıca zemin ortamında titreşimlere neden olacağından çevre zeminde meydana gelebilecek oturmalar göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak su geçirimsizliği sağlaması ve yüksek derinliklerde imal edilebilmesi avantajlı yanları olarak gösterilebilir. Şekil 2.1'de palplanş perdelerin inşa aşaması gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Çelik palplanşların zemine penetrasyonu (SPI Piling Ltd.)

2.2 Çakışan Kazıklar

Çakışan kazıklar (Secant Piles), yerinde dökme fore kazıkların birbiri ile çakıştırılması suretiyle inşa edilirler. Su geçirimsizliği sağladığından yer altı suyu seviyesi altındaki kazıların desteğinde kullanılırlar. Şekil 2.2'de çakışan kazıklar ile inşa edilmiş bir şaft görölmektedir.



Şekil 2.2 çakışan kazık uygulaması (Zakladani Staveb Co., 2004-2006)

2.3 Segmental Kaplama

Segmental kaplamalar Şekil 2.3'te görüldüğü gibi prekast betonarme panellerin kazı duvarına montajı ile inşa edilir. Panel arkası ile kazı yüzeyi arası enjeksiyon malzemesi ile doldurularak zemin hareketlerinin kontrolü sağlanır. Zemin koşullarının duvar elemanı montajı için kendini stabil tutamadığı durumlarda şaft, zemin içine batırılarak inşa edilebilir. Yumuşak zeminlerde ve yeraltı suyu olması koşullarında uygulamada kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 2.3 Segmental kaplama uygulaması (FP McCann LTD.)

2.4 Diyafram Duvarlar

Diyafram duvarlar kazıdan önce imal edilirler. Konvansiyonel yöntemlerle 50 metre derinliğe ulaşabilmektedir. Diyafram duvar imalatında ilk olarak kılavuz duvar inşa edilir. Kılavuz duvar, diyafram duvarın fiziki konumunu belirlemede referans olarak kullanılmaktadır. Kazı esnasında donatı montajı için kendini bir süre stabil tutamayan zeminlerde geçici stabiliteyi sağlamak adına bentonit çamurundan yararlanır. Kazısı tamamlanan panel içerisine donatı kafesi projede belirtilen kota kadar indirilir. Ardından aşağıdan yukarıya olacak şekilde beton dökümü gerçekleştirilir. Diyafram duvar paneller arası boşluklu imal edilip daha sonra aralara ikincil paneller imal edilerek sıklık sağlanır. Kazı derinliğinin artması ile diyafram duvar panelinin dikeyliğinin kontrolü daha büyük önem kazanmaktadır. Dikeyliğin sağlanması duvar panelleri arasındaki bindirmeyi doğrudan etkilediğinden büyük öneme sahiptir. Yeterli bindirme sayesinde çembersel kuvvetlerin transferi ve su geçirimsizliği sağlanır (Schwamb 2014). Şekil 2.4'te diyafram duvar yöntemi ile inşa edilmiş dairesel shaft görünmektedir.



Şekil 2.4 Diyafram duvar şaft (Bencor Global)

2.5 Püskürtme Beton

Betonun kazı duvarına yüksek basınçla püskürtülmesi ile imal edilir. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi çekme mukavemeti kazanmak adına donatı ağı ile uygulanabilir. Sadece kuru koşullarda ve kendi başına stabil olarak durabilen zeminlerde uygulanabilmesi olumsuz yanlarıdır.



Şekil 2.5 Püskürtme beton şaft (Multibase Holdings PTE LTD, 2013)

2.6 Dairesel Şaftlarla İlgili Literatürde Yeralan Çalışmalar

2.6.1 Deneysel Yaklaşımlar

Tasarım sürecindeki ilk adım yapılan vaka incelemesi çalışmalarındaki verilerden yararlanarak duvar yer değiştirmesi ve zemin hareketini tahmin ederek duvar tipinin ve inşaat yönteminin uygunluğunun kontrol edilmesidir.

Long (2001) çalışmasında destekli ve konsol olarak çalışan 300'den fazla kazıyı inceleyerek kapsamlı bir veri tabanı oluşturmuştur. Ancak bu çalışmada dairesel kazıların sayısı sınırlıdır. Bu durum tasarımcıların duruma uygun boyut, zemin koşulu ve inşaat yöntemi seçmesine imkân tanımamaktadır. Londra'da inşa edilen tünel şaftında yapılan incelemelerin derlendiği New ve Bowers (1994), İngiltere'de tasarımcılar tarafından referans olarak kullanılmaktadır. New ve Bowers (1994), çalışmasında şaft geometrisi ve zemin koşulları gibi parametrelerdeki değişikliklerin hesaba katılmaması farklı durumlar için referans olarak kullanılmasını kısıtlamıştır.

2.6.2 Limit Denge Yaklaşımı

Limit denge yaklaşımı, sadece en olumsuz tasarım yükü kombinasyonu durumunda yapının stabilitesinin incelendiği nihai sınır durumunda (ULS) kullanılabilir. Lineer bir yanal gerilme dağılımı ve göçme durumundaki zeminde kayma mukavemetinin tamamının mobilize olduğunu varsayar. Yapının göçmeye yakın, deformasyonların fazla olduğu hizmet edebilirlik limit durumunda (SLS) uygulanamaz.

Limit denge yaklaşımının temeli aktif gerilme basıncı dağılımına dayanmaktadır. Bu durum yatay ve düşey kemerlenmenin söz konusu olduğu eksenel simetrik kazılarda hesabı zorlaştırmaktadır. Ayrıca duvar deplasmanı ile birlikte değişen yanal toprak basınçlarının yeniden dağılımı hesaba katılmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı limit denge yaklaşımı yerine yanal gerilmelerin yeniden dağılımının hesaba katıldığı yapı zemin etkileşimi yöntemleri tercih edilmektedir (Schwamb, 2014).

2.6.3 Yapı Zemin Etkileşimini Dikkate Alan Yöntemler

Yapı zemin etkileşimi dikkate alan yöntemlerden ilki "Yatak Katsayısı Yöntemi"dir. Bu yöntemde zemin lineer, yatay yaylarla temsil edilmektedir. Düzlem şekil değiştirme durumunda sonlu eleman programlarına benzer eğilme momenti değerleri vermektedir (Powrie, 2011). Dairesel shaft tasarımı için yatak katsayısı yöntemini kullanan tasarımcılar düzlem şekil değiştirme durumuna göre rijitliklerin fazla olacağını hesaba katmalıdır.

Diğer bir yöntem ise; "Pseudo Sonlu Eleman Yöntemi" olup bu yöntemde zeminin sürekli ve elastik bir ortam olduğu varsayılır (Simpson ve Powrie, 2001). Yanal toprak basıncının yeniden dağılımını gerçeğe yakın şekilde hesaplamaktadır.

Hem yatak katsayısı yönteminde hem de pseudo sonlu elemanlar yönteminde başlangıç aktif gerilmelerin, pasif gerilmelerin ve gerilmelerin deplasmanlar nedeniyle yeniden dağılımı düzlem şekil değiştirme teorisi kabulüne göre hesaplandığından sonuçlar güvenli ancak tutucu tarafta kalmaktadır.

Her iki yöntem içinde sonuçların dikkatlice incelenmesi ve iyi dökümente edilmiş vaka analizi verileriyle kalibre edilmesi önem taşımaktadır.

Yapı zemin etkileşimini dikkate alan yöntemlerden üçüncüsü ise "Sonlu Eleman ve Sonlu Farklar Yöntemleri"dir. Sonlu eleman ve sonlu farkları kullanan paket programlar en çok kullanılan tasarım metotlarıdır. Kompleks zemin modeli davranışı, inşaat aşamaları, yapı ve destek detayları, konsolidasyon, yer altı suyu davranışı, zemin hareketi gibi durumları hesaba katabilmektedir. Elde edilen sonuçların kalitesi uygun zemin modeli seçimi ve tasarım parametrelerine bağlıdır. En çok kullanılan paket programlar PLAXIS, SAFE, FLAC, ABAQUS, ANSYS, DYNA'dır.

2.6.4 Mobilize Olmuş Mukavemet Tasarım Yöntemi (MSD)

Mobilize olmuş mukavemet tasarımı yöntemi, limit denge yönteminin konseptini genişleten ve yumuşak zeminlerdeki derin kazı problemlerinde karmaşık sonlu eleman/sonlu farklar yöntemine alternatif sunan performansa dayalı bir tasarım yöntemidir. Enerjinin korunumu esasına dayanır. Kazı çukurunun oluşumuyla

meydana gelen potansiyel enerji kaybının, dayanma yapısı ve zemindeki deformasyonlarla karşılaşmasını esas alır (Schwamb, 2014). Bu yöntem ilk olarak Powrie ve Bolton (1988) tarafından rijit konsol bir duvara uygulanmıştır. Ardından Osman ve Bolton (2006) kazı destek elemanlarını da hesaba katarak çalışmayı genişletmişlerdir.

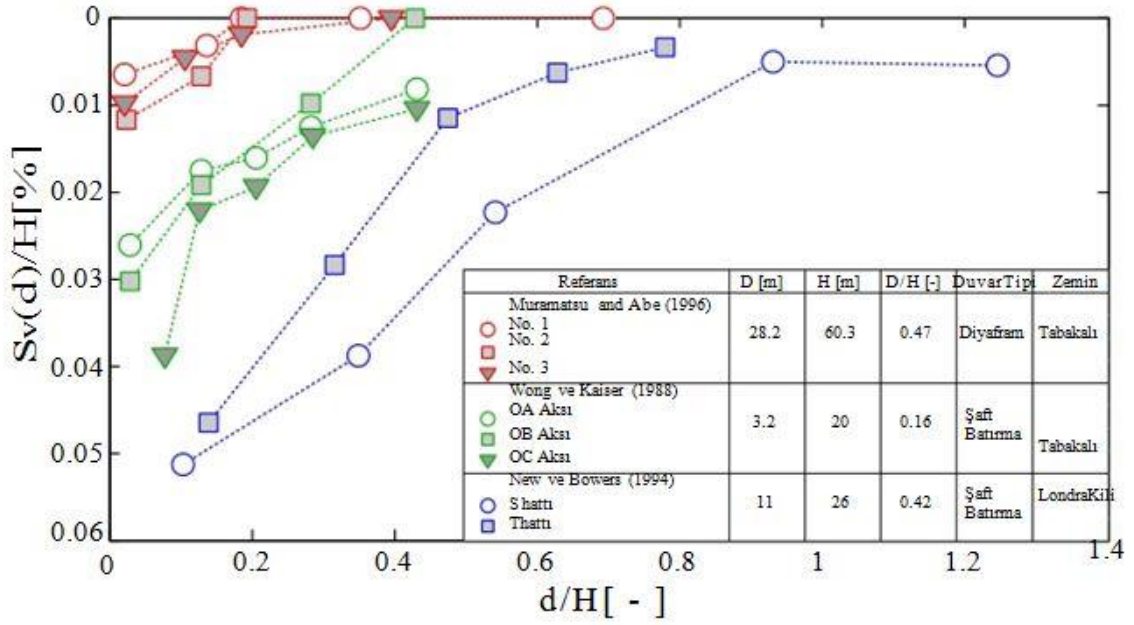
Kompleks zemin modelleri için çok fazla sayıda tasarım parametresi isteyen nümerik analizlere kıyasla mobilize olmuş mukavemet tasarımı yöntemi daha az parametre ile zeminin doğrusal olmayan davranışını da hesaba katarak servis edebilirlik limit durum (SLS) ve nihai sınır durumu (ULS) hesapları yapabilmektedir.

2.7 Deneysel ve Teorik Yaklaşımlar

Düzlem şekil değiştirme durumundaki kazıların aksine dairesel kesite sahip kazılarla ilgili literatürde az sayıda çalışma ve vaka analizi olması tasarımı güçleştirmektedir. Duvar deplasmanı ve zemin hareketi hesabında benzer parametrelere (şaft çapı, zemin koşulları, inşa yöntemi) sahip çalışmalardan yararlanılması Eurocode7 tarafından önerilmektedir.

2.7.1 New ve Bowers (1994) Vaka Analizi ve Oturma Tahmini

Londra'da yapılan dairesel şaft kazısına ait aletsel gözlem sonuçlarının değerlendirildiği bu çalışma iyi belgelenmiş bir vaka analizi olarak literatürdeki yerini almıştır. 26 metre derinlik ve 11 metre çapa sahip şaft kazısı süresince duvar arkasından "d" kadar mesafedeki oturmalar $S_v(d)$ kaydedilmiştir ve kazı derinliği H ile normalize edilerek yine kazı derinliği H ile normalize edilmiş d ile grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2.6). Kazı çalışması Londra kilinde gerçekleştirilmiştir ve şaft inşa yöntemi olarak şaft batırma yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2.6 Arazi ölçüm sonuçları (Muramatsu ve Abe, 1996; New ve Bowers, 1994; Wong ve Kaiser, 1988)

Oluşturulan eğrilerden elde edilen ampirik formülde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_v(d) = \frac{\alpha x (H-d)^2}{H} \quad (1.1)$$

α = Zemin koşullarına ve inşa yöntemine bağlı ampirik sabit

H = Kazı derinliği

d = Oturması hesaplanan noktanın duvara mesafesi

Şaft çapının hesaplarda göz önüne alınmaması ve α 'nın belirlenmesindeki belirsizlik bu çalışmanın olumsuz yanlarıdır. New Bowers (1994) çalışmasında α için 6×10^{-4} değerini kullanmıştır.

Geotechnical Consulting Group (2007), Crossrail Londra metro çalışmasında şaft çapının da etkisini göz önünde bulundurarak (1.2) formülünü önermiştir.

$$S_{v,maks} = \alpha x H x \frac{D}{10m} \quad (1.2)$$

D > 25 m ise;

$$S_{v,maks} = 15 \times 10^{-4} x H \quad (1.3)$$

Düşey deplasmanların sıfırlandığı E_t mesafesinin ise $D < 10\text{m}$ için $1H$, $D > 25$ için $2H$ olarak alınması, 10m ile 25m arasındaki çap değerleri içinse interpolasyonla bulunması önerilmiştir.

$$S_v(d) = S_{v,\max} \exp(0,5) \exp\left(-\frac{\left(d + \frac{2Et}{3}\right)^2}{8Et^2/9}\right) \quad (1.4)$$

Geotechnical Consulting Group (2007) çalışmasında maksimum yatay deplasmanın maksimum düşey deplasmana eşit olduğu varsayılmıştır. ($S_{h,\max}/S_{v,\max} = 1$)

2.7.2 Pairaudeau(2011) 1 g Model Deneyleleri ile Oturma Tahmini

Pairaudeau (2011) kuru kum zeminde şaft etrafındaki oturmaların D şaft çapı ile ilişkisini belirlemek için 1 g küçük model testlerinden yararlanmıştır. Model şaftların derinliği 500 mm , çapları ise 100 mm ve 400 mm arasında değişmektedir.

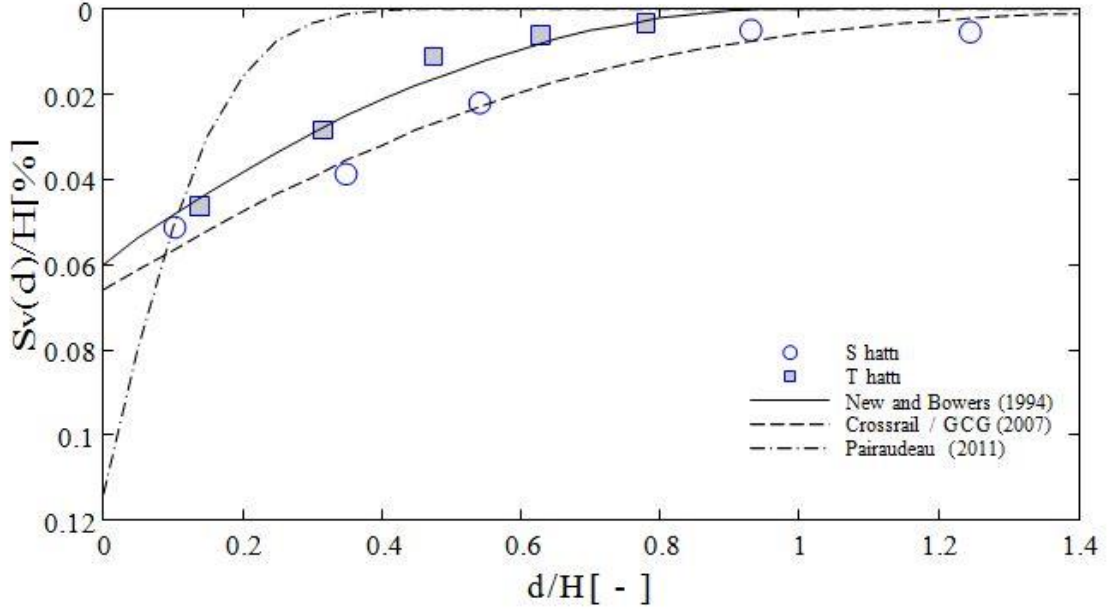
$$\frac{S_{v,\max}}{H} = 0,0008x\frac{D}{H} + 0,0008 \quad (1.5)$$

$$\frac{Et}{H} = 0,3\frac{D}{H} + 0,12 \quad (1.6)$$

$$S_v(d) = S_{v,\max} \exp(0,5) \exp\left(-\frac{\left(\frac{d}{H} + \frac{2Et}{H}\right)^2}{(8Et/9)^2}\right) \quad (1.7)$$

2.7.3 Ampirik Korelasyonlarla Arazi Verilerinin Kıyaslanması

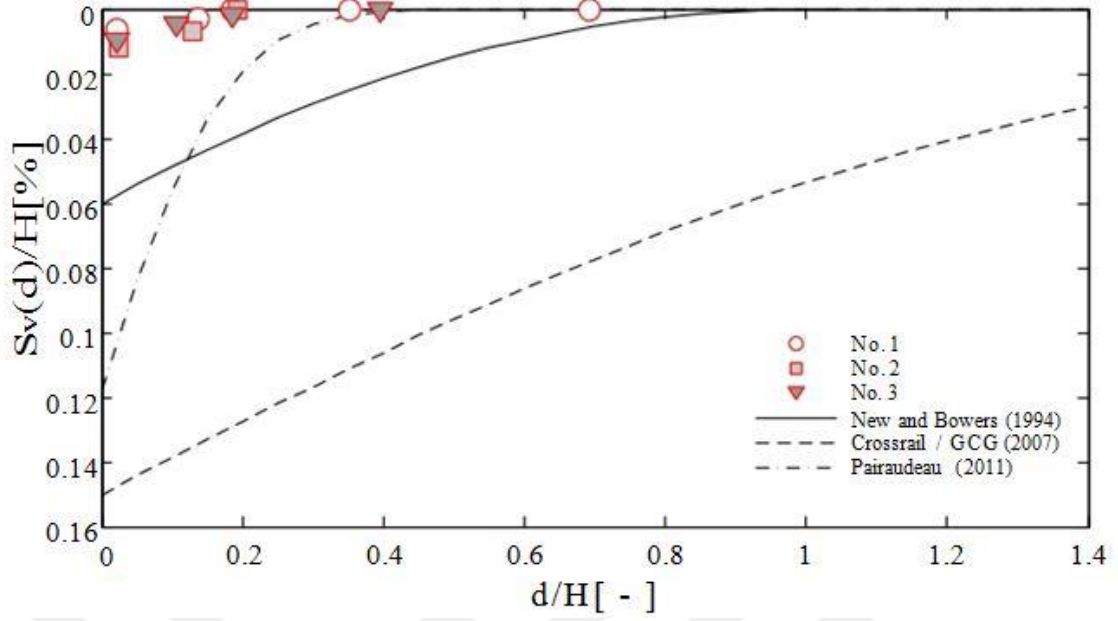
2.7.1 ve 2.7.2 bölümlerinde oturma tahmini için üç farklı yöntem önerilmiştir. (New ve Bowers 1994, Geotechnical Consulting Group 2007, Pairaudeau 2011). Bu üç çalışmada oturma miktarlarının belirlenmesi için tariflenen denklemler yardımıyla elde edilen sonuçları New ve Bowers (1994) çalışmasındaki boyutlar kullanılarak Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Schwamb,2014).



Şekil 2.7 Analitik formüllerin karşılaştırılması (New ve Bowers 1994, Geotechnical Consulting Group 2007, Pairaudeau 2011)

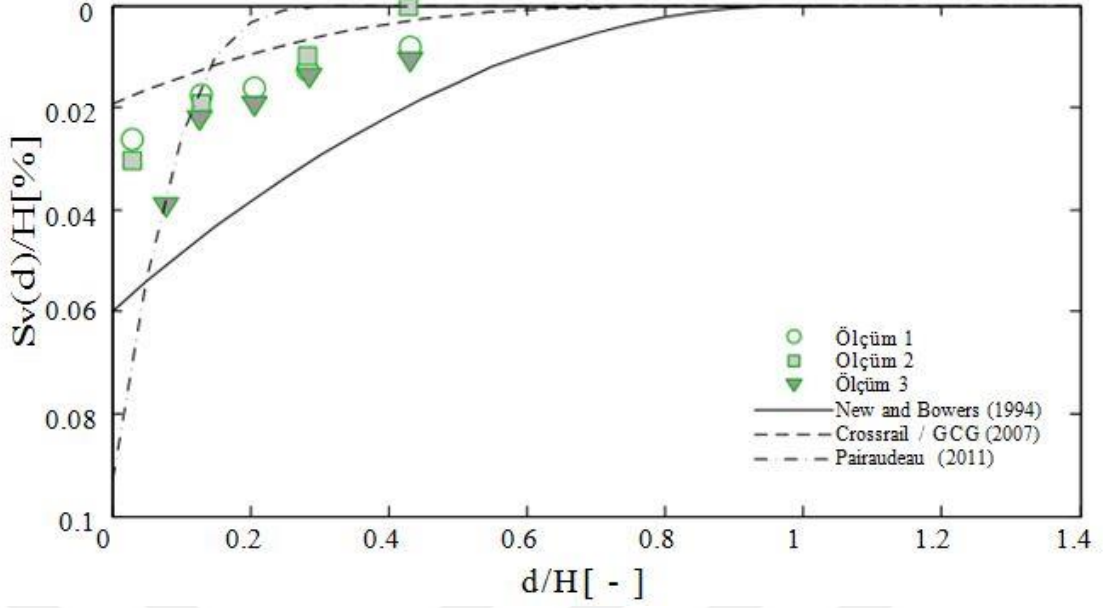
Şekil 2.7'de Pairaudeau (2011)'in maksimum oturma tahmininin New ve Bowers (1994) tahmininin yaklaşık iki katı olduğu görülmektedir. Geotechnical Consulting Group (2007)'deki verilerin, New ve Bowers (1994) yaklaşımından daha tutucu olmasına rağmen arazi verileri ile benzer olduğu görülmektedir. Pairaudeau (2011)'deki oturma verilerinin uyuşmazlığının zemin koşullarının farklılığı ve çalışmada kullanılan model şafttan elde edilen verilerin gerçek ölçeğe uyarlanmasındaki sıkıntılardan kaynaklandığı söylenebilir.

Dairesel şaftlarla ilgili yapılmış bir diğer çalışma ise Tokyo'da tabakalı zeminde inşa edilen 60 metre derinliğe ve 28 metre çapa sahip şaftın değerlendirmesini yapan Muramatsu ve Abe (1996)'dır. Diyafram duvar imalat ve kazı süresince çevre zeminde yatay ve düşey hareketler kaydedilmiştir. Büyük geometriye rağmen şaftın hemen yanında 4 mm ile 7 mm arasında zemin oturması kaydedilmiştir. Şekil 2.8'de bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerin üç farklı ampirik yöntemle (New ve Bowers,1994; Geotechnical Consulting Group, 2007; Pairaudeau, 2011) kıyaslaması görülmektedir (Schwamb,2014).



Şekil 2.8 Arazi gözlem ve analitik hesap yöntemlerinin karşılaştırılması (Muramatsu ve Abe, 1996; New ve Bowers, 1994; Geotechnical Consulting Group, 2007; Pairaudeau, 2011)

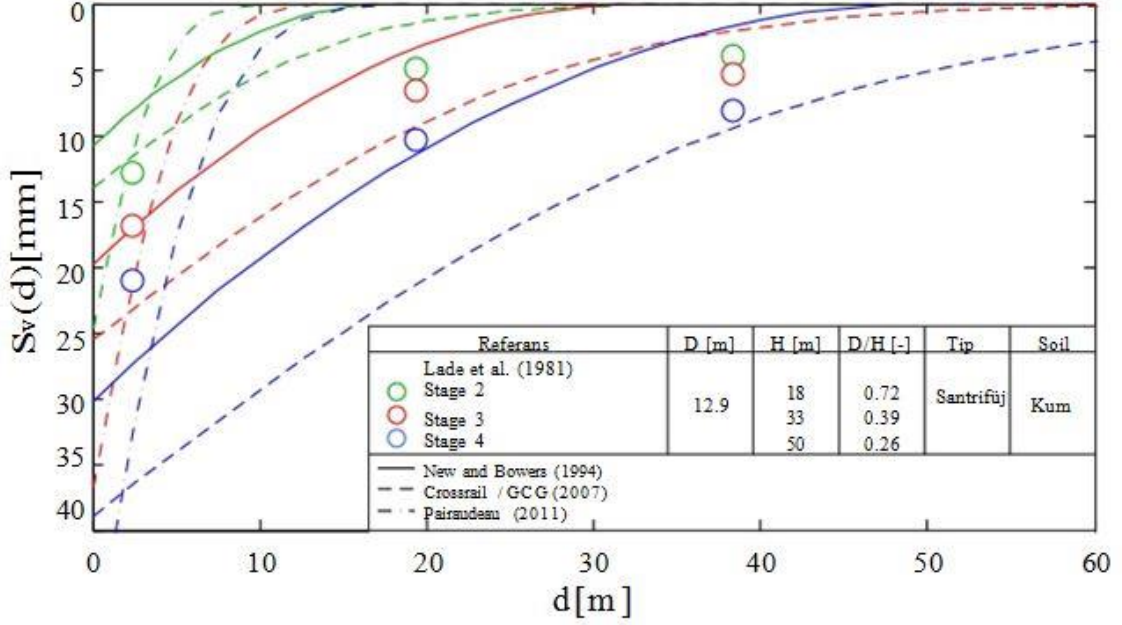
Wong ve Kaiser (1988) çalışmalarında kum ve kil içeren tabakalı zeminde iyi enstrümante edilmiş 20 metre derinlik ve 3,2 metre çapa sahip shaftın davranışını incelemiştir. İnşa yöntemi olarak shaft batırma yöntemi seçilmiştir. Kaydedilen zemin oturmaları Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Oturmaların yaklaşık olarak New ve Bowers (1994) ile Muramatsu ve Abe (1996) değerlerinin arasında olduğu görülmektedir. New ve Bowers (1994) ile benzer derinliğe sahip olmasına rağmen shaft çapının daha küçük olduğu Wong ve Kaiser (1988)'in çalışmasında oturma değerleri daha düşüktür. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere shaft çapının etkisini de hesaba katan Geotechnical Consulting Group (2007) formülü uygulandığında hesaplanan tahmini oturmaların arazi ölçümlerinin az miktarda altında olduğu ve New ve Bowers (1994) ve Pairaudeau (2011) 'in oturmaları daha yüksek hesapladığı görülmektedir.



Şekil 2.9 Won ve Kaiser (1988) arazi gözlem sonuçları ile New ve Bowers(1994), Geotechnical Consulting Group (2007), Pairaudeau (2011) değerlerinin karşılaştırması (Schwamb,2014)

2.7.4 Santrifüj Deneyleri ile Arazi Verilerinin Kıyaslanması

Lade ve diğ. (1981) çalışmasında kuru kum zeminde şaft davranışını incelemek için santrifüj deneyleri yapmıştır. Deney modeli 450 mm derinliğe ve 115 mm çapa sahiptir. 111,8g seviyesinde model 12,9 m çap ve 50,3 m derinliğe sahip şaft prototipine karşılık gelmektedir. Duvar arkasında üç farklı noktadaki oturma ($S_v(d)$) farklı kazı derinliklerinde ($H=18$ m, $H=33$ m, $H=50$ m) kaydedilmiş ve Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



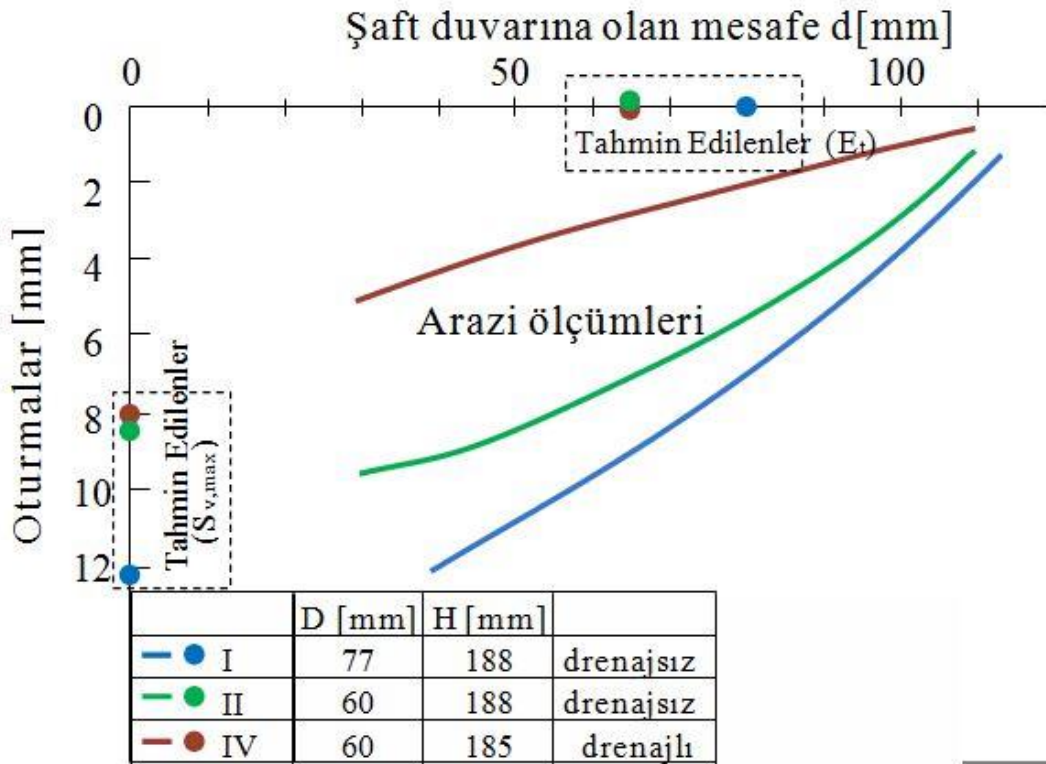
Şekil 2.10 Santrifüj deneyi ile ampirik korelasyonların kıyaslaması (Schwamb,2014)

Şekil 2.10'da görüldüğü üzere oturmaların çoğu Stage 2' de gerçekleşmiştir ($S_v(2,5\text{ m})=13\text{ mm}$). Stage 3 ve 4'te oturmalarda az miktarda artış meydana gelmiştir (sırasıyla $S_v(2,5\text{ m})=17$ ve $S_v(2,5\text{ m})=21\text{ mm}$). Ayrıca şekilde daha önce anlatılan ampirik yaklaşımlarla (New ve Bowers(1994), Geotechnical Consulting Group (2007), Pairaudem (2011)) kıyaslama da görülmektedir.

New ve Bowers(1994) ve Geotechnical Consulting Group (2007) Stage 2' de ölçümlere yakın olmasına rağmen artan kazı derinliği ile oturmaları fazla hesapladıkları görülmüştür.

Farklı çalışmalarda elde edilen verilerin kıyaslanması göstermektedir ki farklı zemin koşulu ve inşa tekniği durumunda ampirik korelasyonlardan yararlanmak tutarsız sonuçlar vermektedir (Schwamb (2014)). Ampirik formüllerin; zemin koşullarının etkisi, su seviyesi düşürülmesi, inşa yöntemi ve işçilik gibi sonuçları önemli derecede etkileyebilecek parametreleri hesaba katmadığı açıkça görülebilmektedir. Dairesel kazıların davranışı ilgili daha iyi tahminler yürütmek için farklı koşullarda gerçekleştirilmiş daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Kusakabe (1982) çalışmasında göçme durumunda olan yumuşak kil zemindeki desteksiz aksenal simetrik kazının davranışını analitik, nümerik ve santrifüj yöntemleriyle kıyaslamıştır. Bu çalışmada 188 mm derinlik ve 60 mm ile 77 mm arasında değişen çaplardaki model şaft ile 2 drenajsız 1 drenajlı santrifüj deneyi yapılmıştır. Şekil 2.11'de santrifüj deney sonuçları üst sınır tahminleri ile kıyaslanarak verilmiştir. Drenajlı deneyde kaydedilen oturmalar tahmin edilen değerlerle uyuyorken, drenajsız deneylerde elde edilen verilerin tahminler ile uyuşmadığı görülmektedir. Kusakabe (1982)'nin gözlemlediği bir diğer husus ise yatay zemin hareketinin düşey oturmalara kıyasla daha düşük olduğudur.

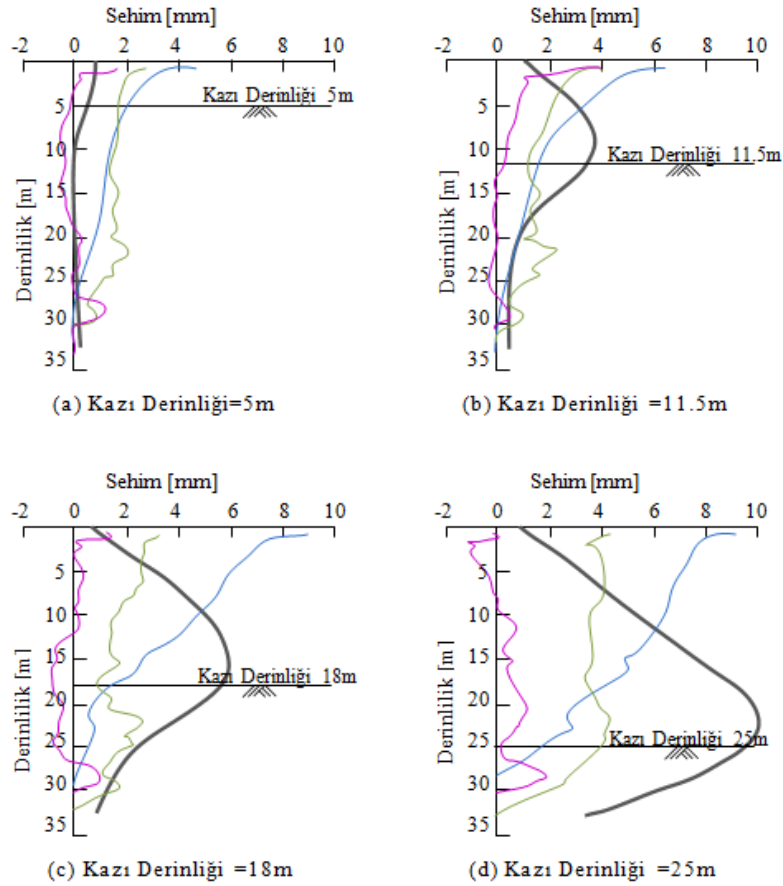


Şekil 2.11 Kusakabe (1982) santrifüj deneyi (Schwamb,2014)

2.7.5 Yapısal Duvar Davranışı

Cabarkapa ve diğerleri, (2003) çalışmalarında 28 metre derinlik ve 56,6 metre çapa sahip şaft kazısına ait arazide ölçülen ve tahmin edilen duvar deplasmanı değerlerini incelemiştir. Diyafram duvar olarak seçilen destek sisteminde üç farklı panelde çeşitli kazı aşamaları için deplasman değerlerini hem sonlu eleman

yazılımı ile tahmin edip hem de arazide aletsel gözlem ile belirlemeye çalışmışlardır. Sonuçları grafik üzerinde göstermişlerdir (Şekil 2.12).

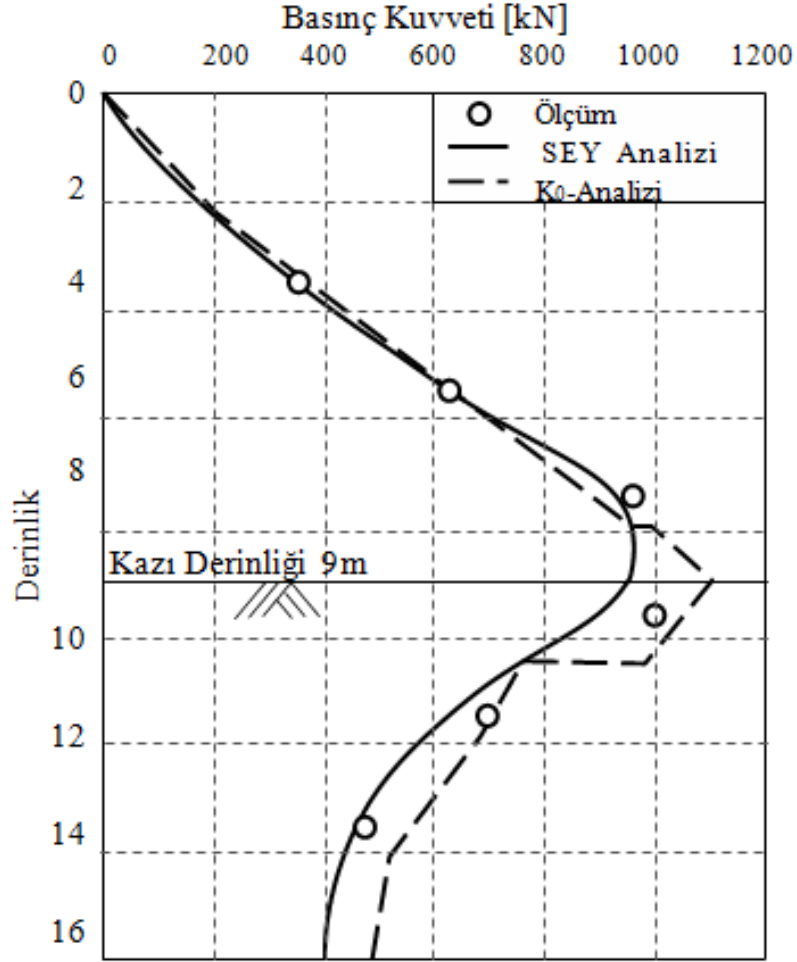


Şekil 2.12 Cabarkapa ve diğ. (2003) sonlu eleman analizi ve arazi gözlem sonuçları (Schwamb,2014)

Şekil 2.12' de görüldüğü üzere Imperial College Finite Element Program (ICFEP) sonlu eleman yazılımı ve ölçülen deplasmanlar arasında uyumsuzluklar görülmektedir. Bu uyumsuzluklar zemin ve shaftın çembersel rijitliği ile ilgili tasarım parametrelerinin belirsizliği ile ilişkilendirilebilir. Diyafram duvarlar birbirine joint denilen bağlantı noktaları ile bağlandığından çembersel doğrultuda süreklilik göstermemektedir. Bu süreksizliği sonlu eleman analizlerinde hesaba katmak için çembersel doğrultuda rijitlik azaltılmalıdır. Ancak bu azaltmanın derecesi şu an için büyük bir belirsizliktir. Cabarkapa ve diğ. (2003) 1 ile 10 arasında değerleri deneyerek mantıklı sonuçlar elde etmeye çalışmıştır. Ardından geçmiş tecrübelerle dayanarak 2 değerinde bir faktörde karar kılmışlardır. Şekil 2.12' ye bakılarak 2

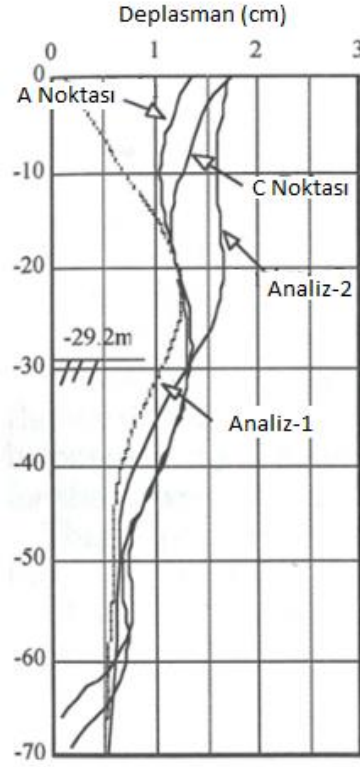
değerinin büyük olduğu ve ölçülen verilerle uyuşmadığı söylenebilir. Ancak inklinometre verilerinin sorgulanabilir olduğu unutulmamalıdır.

Dairesel shaftlarla yapılmış bir diğer çalışma olan Anagnostopoulos ve Georgiadis (2001) kumlu zeminde inşa edilen enstrümante edilmiş 9 metre derinlik ve 20,8 metre çapa sahip shaftın analiz sonuçlarını sunmuştur. 60 cm kalınlıktaki diyafram duvarda çembersel doğrultuda ölçülen çembersel kuvvetler aksel simetrik sonlu eleman analizi (PLAXIS) ve K_0 toprak basıncı katsayısını kullanan el hesapları ile karşılaştırılmıştır. Hesaplarda diyafram duvar panellerinin süreksizliği göz önüne alınmamıştır. Sonuçlar Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca son kazı aşamasında az miktarda eğilme momenti ve yok denecek kadar az duvar deplasmanı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla böyle kısa duvarlarda panel birleşimleri iyi yapıldığında çembersel gerilmelerin kazının ilk aşamalarında mobilize olduğu ve yapının rijitliğine önemli katkı sağladığı söylenebilir. Meydana gelen küçük deplasmanlar aktif toprak basıncını mobilize etmeye yeterli olmadığı için K_0 sükunetteki toprak basıncı katsayısı sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir.



Şekil 2.13 Anagnostopoulos ve Georgiadis (2001) sonlu eleman analizi ve arazi gözlem sonuçları (Schwamb,2014)

Marten ve Bourgeois (2005) çalışmalarında 15 m derinlik ve 46,3 m çapa sahip kazıyı destekleyen 0,8 m kalınlıktaki diyafram duvarın davranışını incelemiştir. Çalışma killi silt ve kilden oluşan tabakalı zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Duvar başı hareketi ve yer değiştirmeler izlenmiştir. Simetrik yükleme ve zemin koşulları olmasına rağmen asimetric şekilde bir deformasyon gözlemlenmiştir (Şekil 2.14). Üç boyutlu sonlu eleman simülasyonu (CESAR-LCPC) yardımıyla asimetric inşaat sırasının deformasyon şekli için önemli bir faktör olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.15 Ariizumi ve diğ. (2000) iki diyafram duvar paneline ait deplasman ölçümleri ve analiz sonuçları (Schwamb,2014)

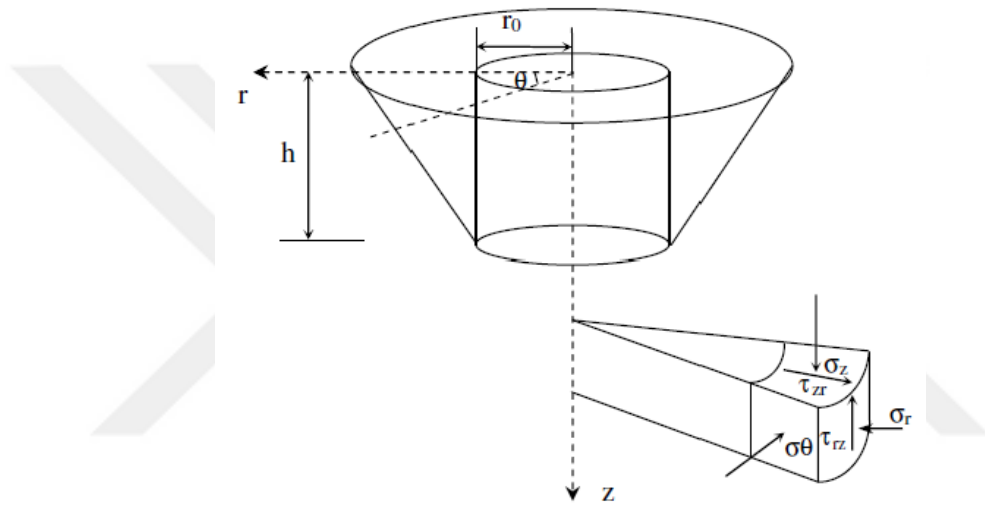
2.8 Dairesel Şaft Duvarına Etkiyen Toprak Basınçlarının Hesaplanmasına Yönelik Farklı Yaklaşımlar

2.8.1 Teorik Çalışmalar

Zeminde meydana gelecek kemerlenme etkisi nedeniyle dairesel şaft duvarına etkiyecek olan aktif toprak basıncının düzlem şekil değiştirme durumundaki aktif toprak basıncından farklı olacağı daha önce belirtilmişti. Dairesel kazı duvarına etkiyen toprak basıncının hesabı için pek çok araştırmacı limit denge, limit analiz ve kayma çizgisi yöntemlerinden yararlanarak çözümler üretmiştir. Dairesel kazı alanı çevresinde oluşacak gerilmelerin hesabını ilk olarak kaplamasız sondaj deliği çevresindeki mobilize olmuş zemin kamasının dengesini göz önüne alarak Westergaard (1940) incelemiştir.

Düzlem gerilme durumunda Rankine veya Coulomb çözümleri kullanılarak hesaplanan toprak basıncı dağılımının aksine eksenel simetrisinin söz konusu

olduğu durumlarda hesaplanan toprak basıncı dağılımları seçilen hesap yöntemine bağlı olarak birbirinde çok farklı değerler çıkabilmektedir. Bu durumun ana sebebi hesaplarda varsayılan göçme yüzeyinin şeklinin farklı oluşudur. Şaftların dairesel geometrisinden dolayı limit ve plastik dengeye dayalı konik bir göçme yüzeyi oluşmaktadır. Dolayısıyla model artık düzlem gerilme şekil değiştirme koşullarına uymamaktadır. Çözüm için modeli silindirik koordinat sisteminde incelediğimizde Şekil 2.16'da görüldüğü gibi düşey gerilmeler (σ_v) ve radyal gerilmeler (σ_r) ortaya çıkmaktadır (Uslu,2016).



Şekil 2.16 Silindirik koordinat sisteminde zemin gerilmeleri

r_0 : shaft yarıçapı

h : kazı derinliği

$\sigma_z = \sigma_v$: düşey gerilme

σ_θ : teğetsel gerilme

σ_r : radyal gerilme

$\tau_{zr} = \tau_{rz}$: kayma gerilmeleri

Terzaghi (1943), Westergaard (1940) teorisini genişleterek daha büyük çaplı ve kaplamalı shaft duvarlarına etkiyecek yanal toprak basıncının hesabına yönelik yeni bir yöntem önermiştir. Terzaghi (1943) çalışmasında plastik bölge içerisinde kalan zemin elemanında teğetsel gerilme ve düşey gerilmenin büyük asal gerilmeye eşit olduğu ($\sigma_{\theta} = \sigma_v = \sigma_1$) ve radyal gerilmenin de küçük asal gerilmeye eşit olduğu ($\sigma_r = \sigma_3$) kabulü ile Mohr-Coulomb göçme kriteri uygulanarak kayan zemin kütlelerinin gerilmesini belirlemiştir. Ayrıca Terzaghi (1943) sıfır olmayan kayma gerilmelerinin etkisini göz önüne almak için kum zeminin kayma mukavemeti açısından azaltmaya gitmiştir. ($\varphi^* = \varphi - 5$).

Berezantzev (1958) kayma çizgisi yöntemini geliştirerek silindirik duvarlara gelen yanal toprak basıncını hesaplamıştır. Terzaghi (1943)' nin çalışmalarında olduğu gibi ($\sigma_{\theta} = \sigma_v = \sigma_1$) ve ($\sigma_r = \sigma_3$) kabullerini yapmıştır. Teğetsel gerilmenin düşey gerilmeye oranına λ (çembersel gerilme katsayısı) adı verilmiş ve hesaplarda (1)'e eşit olduğu kabulü yapılmıştır.

Prater (1977) ise Coulomb kamasının limit dengesini aksenal simetri durumu için uyarlamıştır. λ değerinin ise aktif ve sükunetteki toprak basıncı katsayılarının arasında bir değer olduğu Terzaghi (1943) ve Berezantzev (1958) kabullerinde olduğu gibi bire eşit olmadığını belirtmiştir.

Cheng ve Hu (2005) ise Berezantzev (1958) teorisini değişken λ değerleri kullanarak daha genel bir çözüm üretmişlerdir. $\lambda=K_0$ (K_0 , sükunetteki toprak basıncı katsayısı) için maksimum gerilme değerini $\lambda=1$ içinse minimum gerilme değerinin elde edildiğini belirtmişlerdir.

2.8.2 Deneysel Çalışmalar

Fujii ve diğ. (1994) santrifüj testleriyle duvar sürtünmesinin ve zemin deplasmanın rijit shaft etrafındaki toprak basıncı dağılımına etkisini incelemiştir. Sıkı kum için bulunan deney sonuçları Berezantzev (1958) ile yakınlık göstermiştir.

Chun ve Shin (2006) yaptıkları deneylerle duvar deplasmanı ve shaft boyutlarının toprak basıncı dağılımına etkisini incelemiştir. Deney sonucunda atran duvar

deplasmanın toprak basıncını azalttığını ve duvar yüksekliğinin %0.25 ine karşılık gelen duvar deplasmanı değerinde toprak basıncının minimum olduğunu belirlemişlerdir.

Tobar ve Meguid (2011) geliştirdikleri şaft geometrisinin tamamının modellenmesine ve radyal deplasmanlara imkân veren model ile şaft kaplamasındaki radyal deplasmanların yanal toprak basıncı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Yukarıdaki çalışmalara dayanarak eksenel simetrik kazılarda, teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda silindirik duvarlardaki toprak basıncının düzlem şekil değiştirme durumundaki düşey duvarlarda olduğu gibi derinlikle lineer olarak artmadığı sonucuna varılmaktadır.

Wong ve Kaiser (1988) çalışmalarında ortaya koydukları "convergence and confinement method" (CCM) yönteminde yerçekimsel kuvvetleri de hesaba katarak yatay ve düşey kemerlenmenin derecesini belirlemeye çalışmışlardır. Önerdikleri yeni yöntemle şaftta etkiyen yanal toprak basıncını ve deplasman değerlerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca Wong ve Kaiser (1988) önerdikleri yöntem ile arazi gözlem sonuçlarını karşılaştırmış ve sonuçlarda benzerlikler elde etmişlerdir.

2.8.3 Nümerik Analizlere Dayanan Çalışmalar

Ampirik ve analitik tekniklerin düzlem şekil değiştirme kabulüne dayanması ve yapısal fayda sağlayan çembersel kuvvetlerin hesaba katılmaması nedeniyle uygulamada sonlu elemanlar (FE) veya sonlu farklar (FD) yöntemlerine dayanan iki boyutlu (2D) eksenel simetrik veya üç boyutlu (3D) nümerik yazılımlar sıklıkla kullanılmaktadır.

Cabakarba ve diğ. (2003) Dublin' de inşa edilen 56 m çapa ve 28 m derinliğe sahip şaftın sonlu elemanlar analizini inklinometre verileriyle birlikte değerlendirmişlerdir.

Anagnostopoulos ve Georgiadis (2001) ise enstrümante edilmiş 20.8 m çapa 9 m derinliğe ve 0.6 m duvar kalınlığına sahip şaftın davranışını sonlu eleman analizleri incelemiş ve arazi ölçüm sonuçları ile benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Parashar ve diğ. (2007) Singapur' da inşa edilen üç şaftın inklinometre ve gerilme ölçer verilerini sonlu eleman analiz sonuçlarıyla değerlendirmiştir.

Schwamb ve Soga (2015) ise Londra'da yapılan bir şaft inşaatında enstrümante edilen şaftın ölçülen deplasman ve moment değerleri Flac2D yazılım sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Kusakabe ve diğ. (2007) üç boyutlu (3D) sonlu eleman analiz sonuçları ile zemin hareketi ve gerilmeleri incelemişlerdir.

Meftah ve diğ. (2018) çalışmalarında granüler zeminde deplasmana maruz bırakılan şaftın davranışını sonlu farklar yöntemi ile incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre yanal toprak basıncı dağılımının derinlikle lineer olarak artmadığını tespit etmişlerdir.

Yun (2004) ise Singapur'da inşa edilen bir şaftın deplasman ve moment ölçümlerini yer altı suyu durumunu da göz önüne alarak sonlu eleman yazılımı PLAXIS ile incelemiştir. Yaptığı parametrik çalışmalar sonucu zemin mukavemeti ve rijitliği, hidrolik geçirgenlik, aşırı konsolidasyon oranı (OCR) değerlerindeki değişimin şaft davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi; stabilite problemleri, gerilme-şekil değiştirme problemleri ve zemin içinde su hareketi gibi geoteknik mühendisliği konularında denge, uygunluk, malzeme bünye davranışı ve sınır koşullarını göz önüne alarak çözüm bulmamıza yarayan matematiksel hesap yöntemidir.

Sayısal analizin avantajları;

- Uygun bir şekilde kullanıldığında, zemin mekaniği problemleri için gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir.
- Karmaşık geometri, malzeme davranışı, yükleme ve sınır koşullarını modellemek mümkündür.
- İnşa adımları gözönüne alınabilir.
- Analizlerde bilgisayar kullanıldığından hızlı sonuçlar elde edilebilir.
- Parametrik analizler yapılabilir ve tasarımda optimizasyon sağlanabilir.

Geoteknik problemlerin sayısal analizine etki eden faktörler;

- Model geometrisi ve sınır koşulları
- Malzeme bünye davranışı
- Doğrusal olmayan çözüm yaklaşımı
- Drenajlı-drenajsız analiz
- Malzeme (Zemin) parametreleri
- Kullanıcı alışkanlıkları

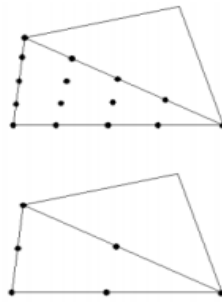
(Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu, M. Berilgen, 2016)

Sayısal analizlerle geoteknik mühendisliği problemlerinde zemin gerilmeleri, deformasyonlar, yatay ve düşey yer değiştirmeler, boşluk suyu basınçları ve zemin içi su akımları ile ilgili bilinmeyenler elde edilebilir. Zemin malzemesinin bünye

davranışı (yüklemeler altında gerilme-şekil değiştirme davranışı) doğrusal olmadığından uygulanan yükler altında oluşacak gerilme ve şekil değiştirme değerleri ancak zemin ortamının doğru tanımlanmasıyla mümkündür.

PLAXIS 2D Yazılımı;

Plaxis2D zemin ve kaya mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir nümerik analiz programıdır. Program, model geometrisinin oluşturulduğu, modele ait zemin parametrelerinin girildiği, yapı mukavemet özelliklerinin tanımlandığı, varsa dış yüklerin atandığı, yer altı su seviyesinin programa tanıtıldığı, sonlu eleman ağının (mesh) oluşturulduğu ve aşamalı inşaat kademelerinin belirlendiği veri girişi (input) ve mevcut zemin koşulları ve tanımlanan diğer parametreler doğrultusunda oluşacak gerilme, deformasyon ve deplasman değerlerinin sunulduğu veri çıkışı (output) pencelerlerinden oluşmaktadır. Problemin çözümünden önce sürekli zemin ortamı 15 veya 6 düğüm noktalı üçgen elemanlar şeklinde sonlu sayıda parçaya (mesh generation) bölünür. Çözümde 15 düğüm noktalı elemanların kullanılması daha detaylı sonuçlar verirken bu durum 6 düğüm noktalı elemanlara göre analiz süresinin uzamasına neden olmaktadır. Analiz sonucunda incelenen yer değiştirmeler düğüm noktalarında, gerilmeler ise birleşim (gerilme) noktalarında hesaplanır. Şekil 3.1' de görüldüğü üzere 15 düğüm noktasına sahip üçgen elemana ait 12 gerilme noktası bulunmaktadır.



Şekil 3.1 15 ve 6 düğüm noktalı zemin elemanları

Analiz öncesinde sonlu eleman ağı üzerinde seçilen karakteristik noktalar yardımıyla, analiz sonuçları grafikler üzerinde incelenebilir. Plaxis2D programında gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesinde etkili önemli bir hususta uygun sınır koşullarının belirlenmesidir.

3.2 Geometrik Model Oluşturulması

Plaxis2D programında ele alınan problemin analizi için; ilk olarak geometrik model oluşturulur ve zemin özellikleri tanımlanır. Ardından yapısal elemanların özellikleri ve varsa dış yükler sisteme etkililir. Daha sonra sistem sonlu sayıda elemanlara ayrılır (mesh). Bu aşamadan sonra ise varsa yer altı suyu seviyesi programa atanır. En son olarak da projedeki her bir imalat aşaması, aşama aşama olarak belirlenerek ve analiz tamamlanır.

Bu tez çalışması kapsamında destek sistemi olarak 30 cm kalınlıktaki diyafram duvarın kullanıldığı farklı geometrilerdeki dairesel şaftların nümerik analizleri yapılmıştır. Şaft tabanında 15 cm kalınlığında betonarme taban döşemesi tanımlanmıştır. Kazı geometrisi ve şaft duvarına ait yapısal parametreler sabit tutularak, dört farklı kayma mukavemeti açısı (ϕ') değerlerine sahip kum ve 4 farklı kohezyon (c_u) değerine sahip kil zeminler için analizler tekrarlanmıştır. ϕ' ve c_u parametrelerinin duvar yapısal elemanı iç kuvvetlerine (normal kuvvet (N), kesme kuvveti (Q), çevresel aksenal kuvvet (N_z), eğilme momenti (M)) etkisi ve zemin ve duvarda meydana gelen deplasmanların bu parametrelerle ilişkisi incelenmiştir. Analizler Plaxis'in aksenal simetrik modunda (axisymmetry) 15 düğüm noktalı elemanlarla yapılmıştır.

Şaft çapının duvar ve zemin davranışına etkisini incelemek için kazı derinliği $H=6$ m sabit tutularak $D=6$ m, $D=20$ m, $D=40$ m ve $D=60$ m çap değerleri için hem kum hem de kil zeminde analizler gerçekleştirilmiştir.

Kazı derinliğinin duvar ve zemin hareketine etkisini incelemek içinse şaft çapı $D=6$ m sabit tutularak $H=6$ m, $H=20$ m, $H=30$ m ve $H=40$ m derinlikleri için analizler tekrarlanmıştır. Analizi yapılan modeller Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Analiz Modelleri

Şaft Çapı (D) - m	Kazı Derinliği (H) - m	KUM	KİL
6	6	$\phi' = 28^\circ, 32^\circ, 36^\circ, 40^\circ$	$c_u = 100, 200, 300, 400$ kPa
	20		
	30		
	40		
20	6		
	20		
	30		
	40		
40	6		
	20		
	30		
	40		
60	6		
	20		
	30		
	40		

Yeraltı suyu hesaplarda göz önüne alınmamıştır. Model geometrisinin alt sınırının yatay ve düşey deplasman yapması önlenmişken, yan sınırlarda düşey deplasman hareketi serbest bırakılmıştır.

Hesaplarda kullanılan duvar yapısal elemanına ait parametreler Tablo 3.2'de, zemine ait parametreler ise kum zemin için Tablo 3.3'de, kil için Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.2 Yapısal eleman parametreleri

	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	w (kN/m/m)	v
Betonarme Segment C40/50 / LineerElastik, İzotropik	10500000	78750	4,8	0,2
Taban Döşemesi C16/20 / LineerElastik	4125000	7734	2,4	0,2

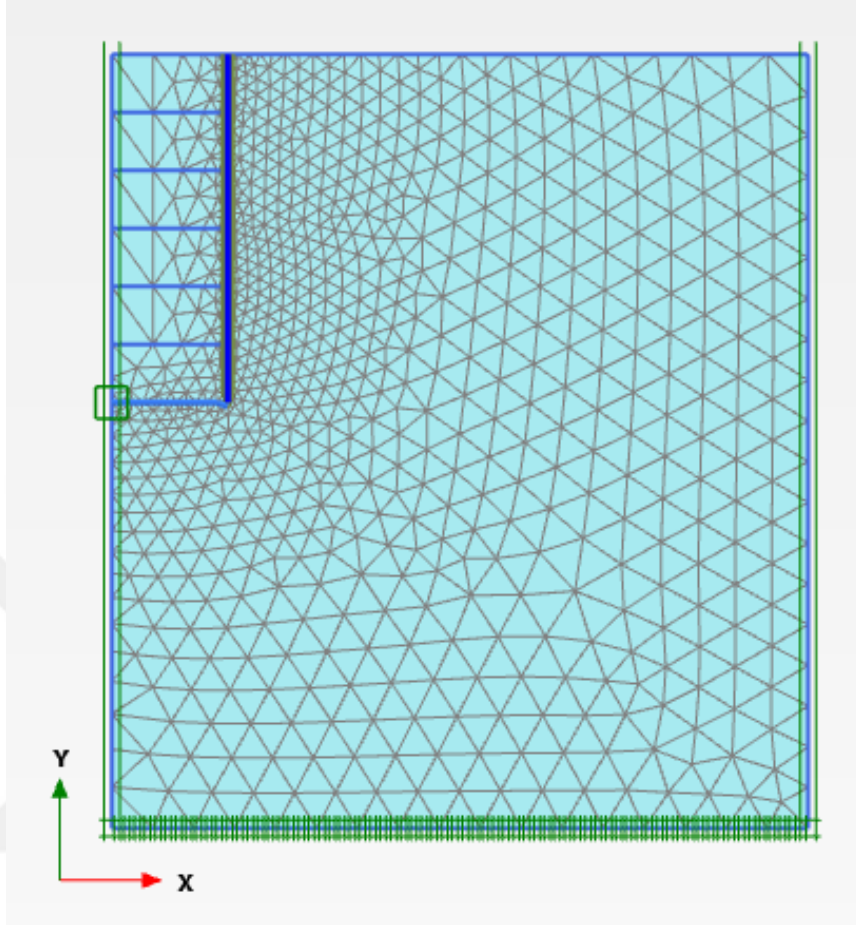
Tablo 3.3 Kum zemin için parametreler

	1. Analiz	2. Analiz	3. Analiz	4. Analiz
Malzeme Modeli	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb
Drenaj Tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
γ_{sat}	19	19	19	19
γ_{unsat}	18	18	18	18
E'	15000	23300	30000	37500
ν'	0,3	0,3	0,3	0,3
c'	0	0	0	0
Φ'	28	32	36	40
ψ	0	0	0	0
Arayüz Mukavemet Azaltma Katsayısı (Rinter)	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid
K_o	Auto.	Auto.	Auto.	Auto.

Tablo 3.4 Kil zemin için parametreler

	1. Analiz	2. Analiz	3. Analiz	4. Analiz
Malzeme Modeli	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb
Drenaj Tipi	Undrained-B	Undrained-B	Undrained-B	Undrained-B
γ_{sat}	19	19	19	19
γ_{unsat}	18	18	18	18
E'	25000	50000	75000	100000
ν'	0,35	0,35	0,35	0,35
c_u (kPa)	100	200	300	400
Φ'	0	0	0	0
Ψ	0	0	0	0
Arayüz Mukavemet Azaltma Katsayısı (Rinter)	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid
K_o	Auto.	Auto.	Auto.	Auto.

Analizi yapılacak geometrinin mesh edilmiş (sonlu sayıda elemanlara parçalanmış) hali Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 Sonlu elemanlara ayrılmış model

3.3 Plaxis Programında Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi

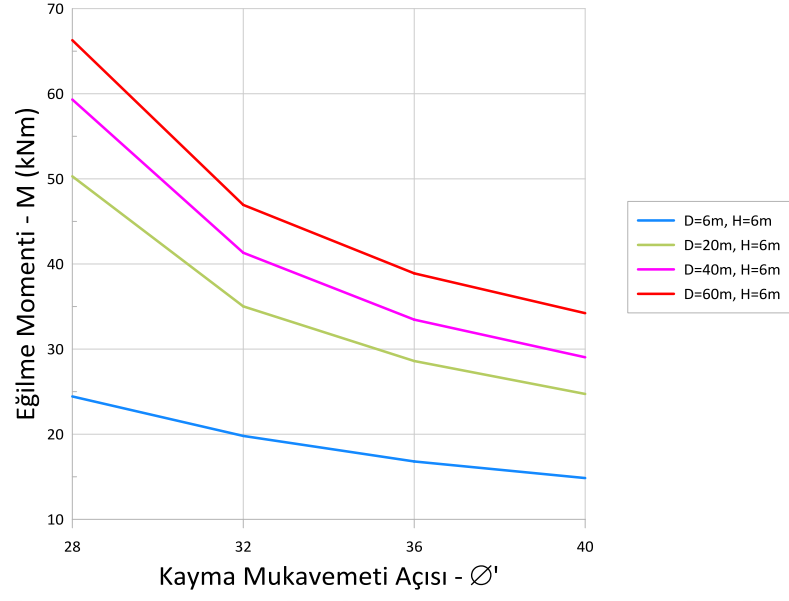
Plaxis2D programında analiz tamamlandıktan sonra ekrana ilk olarak modelin deformasyona uğramış hali gelmektedir. Burada zeminde en fazla deplasmanın hangi noktada meydana geldiği ve deplasman değeri görülür. Duvar elemanı üzerine çift tıklanarak duvar yapısal elemanı ile ilgili detayların verildiği sayfaya geçilir. Bu sayfada üst araç çubuğundaki "Forces" menüsünden yapısal elemana ait normal kuvvet (N), kesme kuvveti (Q) ve eğilme momenti (M) diyagramları elde edilebilir. Eksenel simetri durumunda bu iç kuvvetlere ilave olarak düzlem dışına doğru olan normal kuvvetleri de temsil eden çevresel normal kuvvetler de (hoop

forces-Nz) bu menüden incelenebilir. Aynı araç çubuğundaki "Deformations" menüsünden de duvar elemanına ait deplasman verileri elde edilir.

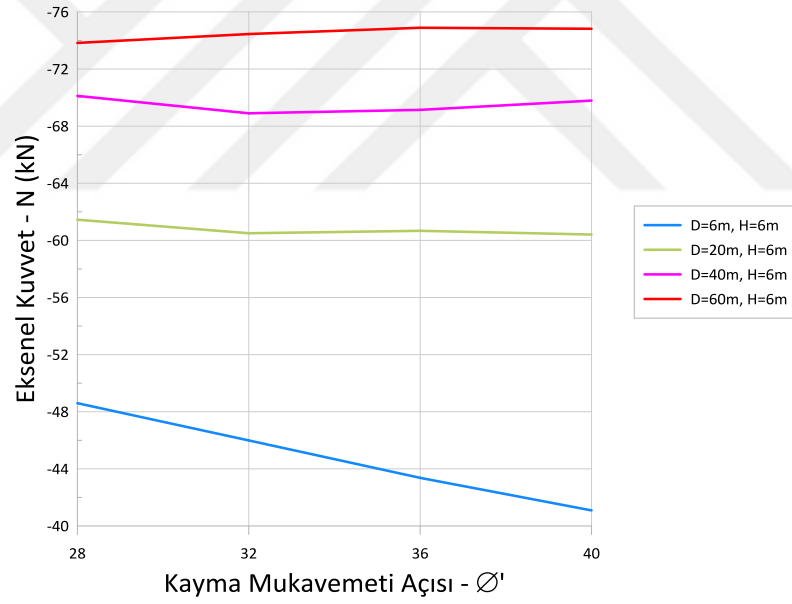
3.4 Kum ve Kil Zeminlerde İnşa Edilen Şaftlarda İçsel Kuvvet ve Deplasman Değişimlerinin Belirlenmesi

3.4.1 Farklı Kayma Mukavemeti Açısına Sahip Kum Zeminlerde Şaft Çapının Şaftta Oluşan İç Kuvvetler, Maksimum Duvar ve Zemin Deplasmanlarına Etkisi

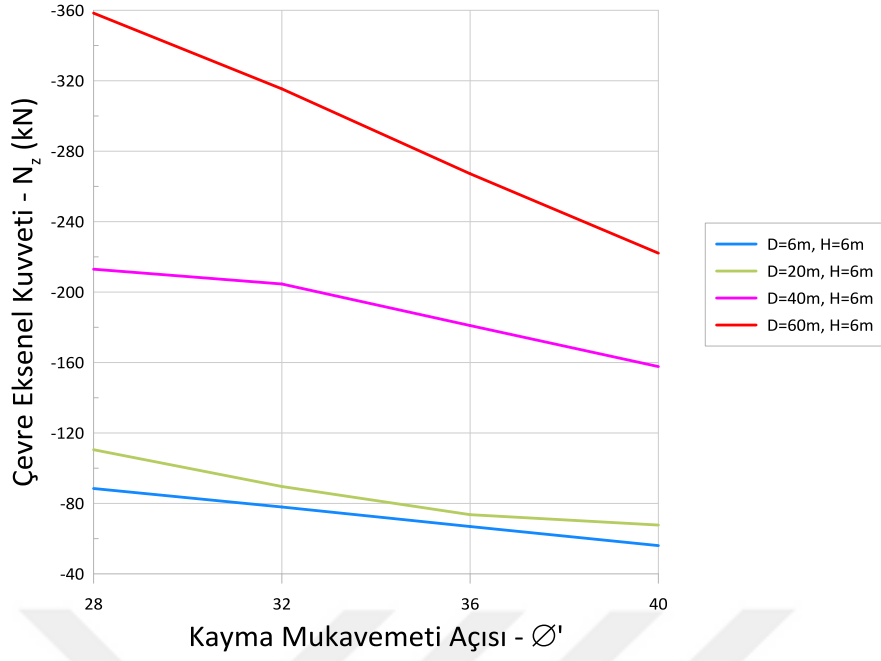
Kum zeminde şaft çapının (D) kazı destek sistemindeki iç kuvvetlerle, duvar ve zeminde meydana gelecek deplasmanlara etkisi sırasıyla D=6m, 20m, 40m, 60m için analizler yapılarak incelenmiştir. Farklı kayma mukavemeti açısına sahip kum zeminlerde (ϕ' =28, 32, 36, 40) örnek sabit şaft derinliğine karşılık (H=6 m) artan şaft çapı değerleri için elde edilen eğilme momenti, aksenal kuvvet, çevre aksenal kuvveti, kesme kuvveti, güvenlik sayısı değişimi ve maksimum toplam duvar ve zemin deplasmanı için elde edilen grafikler Şekil 3.3 - Şekil 3.9 arasında verilmiştir. Şaft çapının destek elemanındaki iç kuvvetlerine etkisi incelendiğinde artan şaft çapıyla birlikte hesaplanan iç kuvvet değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. En düşük iç kuvvet değerleri en küçük çap değerlerinde elde edilmiştir. Bununla birlikte kazı derinliği 20 metreyi geçtiğinde çevre aksenal kuvvetindeki artış ve güvenlik sayılarındaki azalışın çok büyük oranlarda meydana geldiği belirlenmiştir. İç kuvvetlerde meydana gelen artışların ise dairesel simetri nedeniyle zeminde oluşacak kemerlenme etkisinin azalması ile meydana geldiği düşünülmektedir. Bir başka deyişle şaft çapı arttıkça sistem düzlem şekil değiştirme durumuna yaklaşmaktadır. Şekil 3.7'de de görüldüğü üzere yapılan güvenlik analizlerinde -safety analysis- güvenlik sayılarının şaft çapındaki artışla birlikte azaldığı görülmüştür.



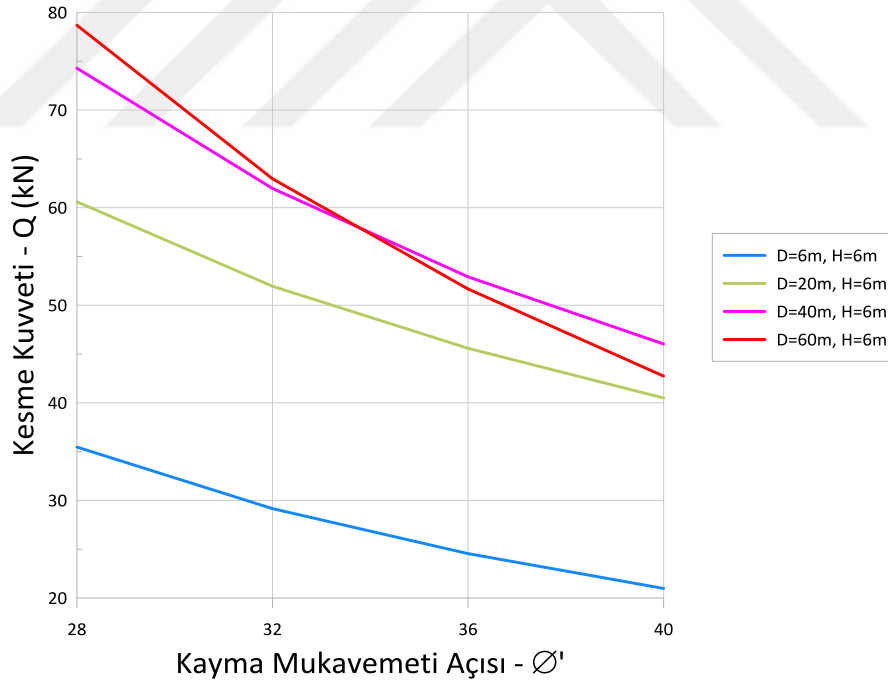
Şekil 3.3 Farklı şaft çaplarında elde edilen eğilme momenti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m)



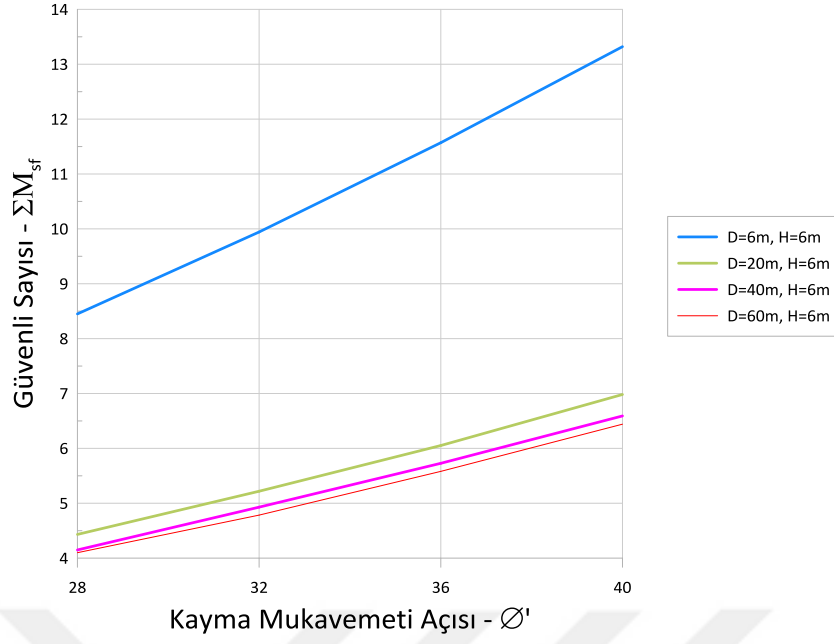
Şekil 3.4 Farklı şaft çaplarında elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m)



Şekil 3.5 Farklı şaft çaplarında elde edilen çevre eksenel kuvveti (N_z) değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi ($H=6m$)

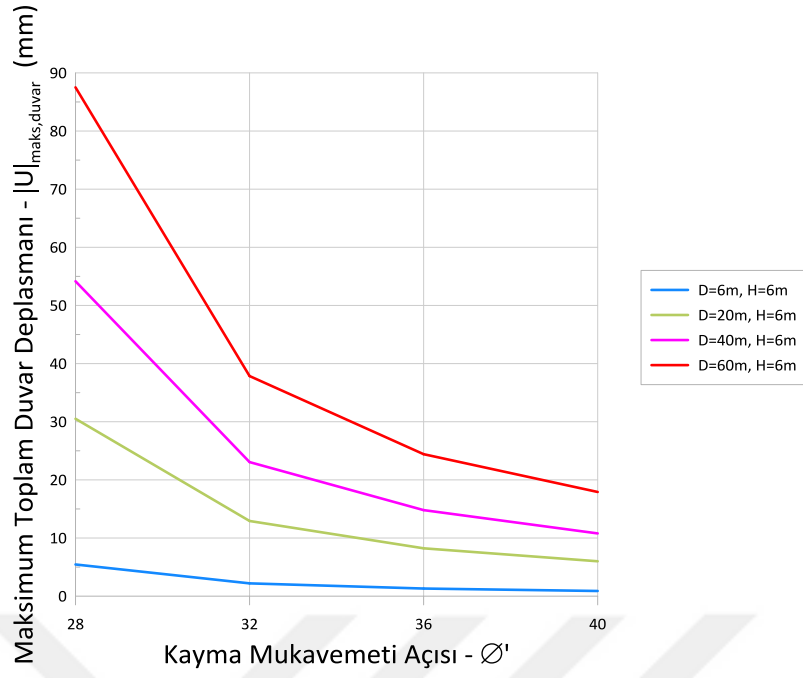


Şekil 3.6 Farklı şaft çaplarında elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi ($H=6m$)

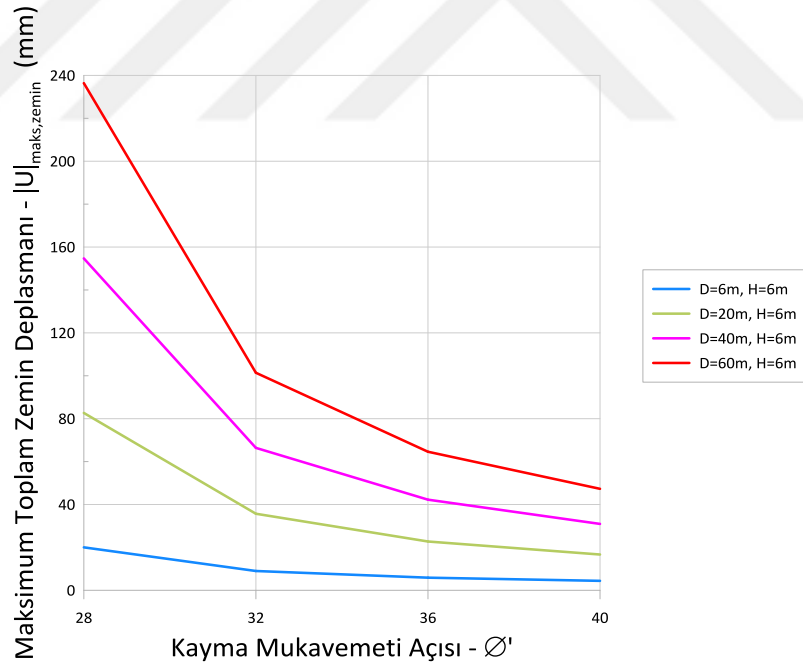


Şekil 3.7 Farklı şaft çaplarında elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m)

Duvar elemanında ve zeminde meydana gelecek toplam deplasmanlar incelendiğinde (Şekil 3.8) en büyük deplasman değerlerinin şaft çapının en büyük olduğu (D=60m, H=6m) modelde elde edildiği, artan kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı olarak ulaşılan maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.8 Farklı shaft çaplarında elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m)

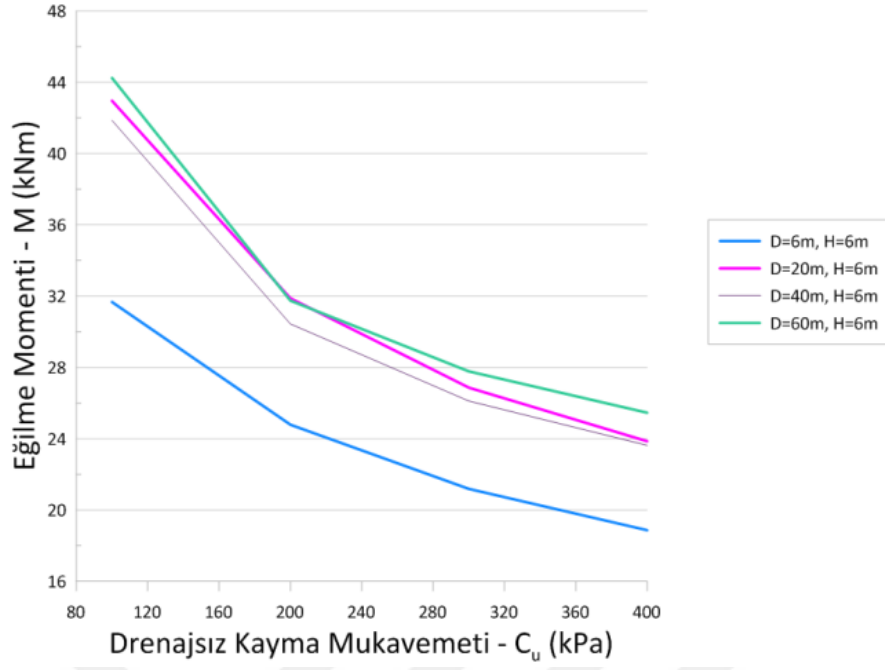


Şekil 3.9 Farklı shaft çaplarında elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (H=6m)

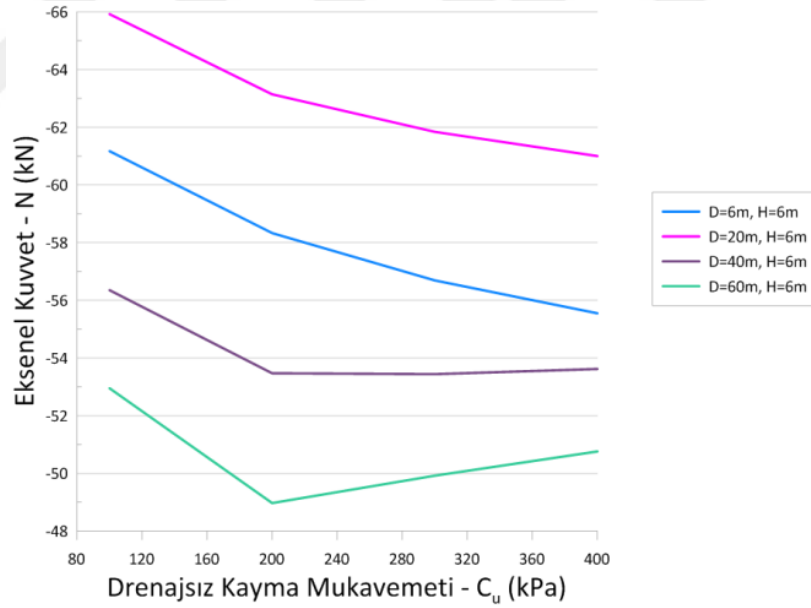
3.4.2 Farklı Drenajsız Kayma Mukavemeti Değerlerine Sahip Kil Zeminlerde Şaft Çapının Şaftta Oluşan İç Kuvvetler, Duvar ve Zemin Deplasmanlarına Etkisi

Kil zeminde inşa edilen şaftta iç kuvvet ve deplasman değerlerinin şaft çapıyla ilişkisini incelemek için $D=6\text{m}$, 20m , 40m , ve 60m çap değerleri için analizler tekrarlanmıştır. Farklı drenajsız kayma mukavemetine (c_u) sahip kil zeminler için yapılan $H=6$ metrelik kazı derinliği için artan şaft çapına karşı elde edilen değerler sırasıyla Şekil 3.10- Şekil 3.16 'da verilmiştir. Diğer şaft çapı ($D=6\text{ m}$, $D=20\text{ m}$, $D=40\text{ m}$ ve $D=60\text{ m}$) ve kazı derinlikleri ($H=6\text{ m}$, $H=20\text{m}$, $H=30\text{m}$ ve $H=40\text{ m}$) için elde edilen değerler ise ilerleyen kısımlarda ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Yapısal eleman iç kuvvetleri kumda olduğu gibi çapla birlikte artarken çevre eksenel kuvvetin (N_z) çap artışına en hassas iç kuvvet olduğu tespit edilmiştir. 6 m şaft çapı için maksimum çevre eksenel kuvvet değeri $c_u=50\text{ kPa}$ için -343 kN iken çapın 20 metreye çıkmasıyla maksimum çevre eksenel kuvvet değerinin %280'lik bir artışla -1307 kN 'a çıktığı görülmüştür. Yapılan güvenlik analizleri sonunda en yüksek güvenlik sayısı 6 m 'lik en düşük şaft çapı değerinde ortaya çıkmıştır ve şaft çapındaki artışla birlikte güvenlik sayıları azalmıştır.

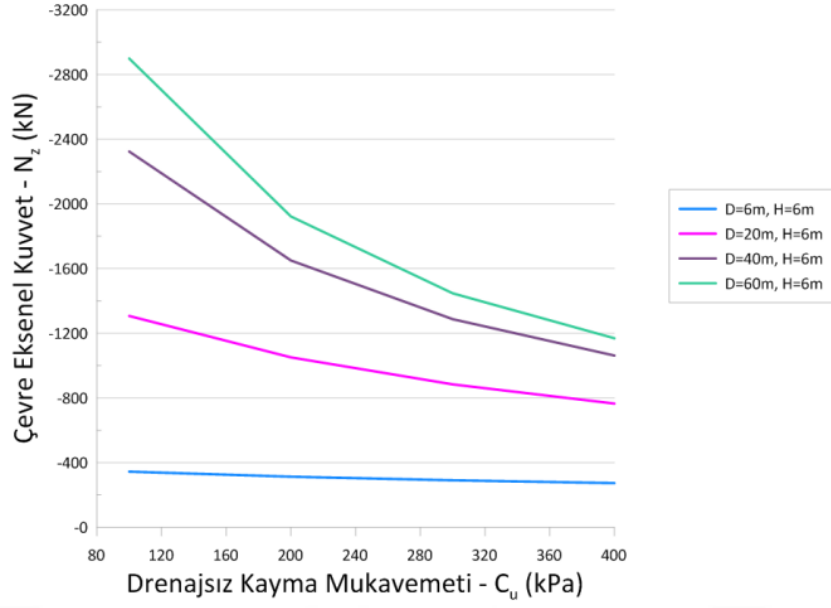
Kazı duvarında ve zeminde meydana gelen deplasmanlar ise şaft çapı ile birlikte artış göstermiştir. En yüksek deplasman değerleri 60m çapa sahip modelde elde edilirken en düşük deplasmanlar ise 6m çaplı şaftta meydana gelmiştir. Şaft çapındaki artışla birlikte deplasmanların da artması zeminde oluşan kemerlenme etkisinin bir sonucu olarak yorumlanmıştır. Artan zemin mukavemetine karşılık zeminde ve kazı duvarında meydana gelen deplasmanlar azalmaktadır (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16). Deplasmanlardaki bu düşüş artan zemin mukavemetine karşılık azalan bir ivme ile gerçekleşmiştir.



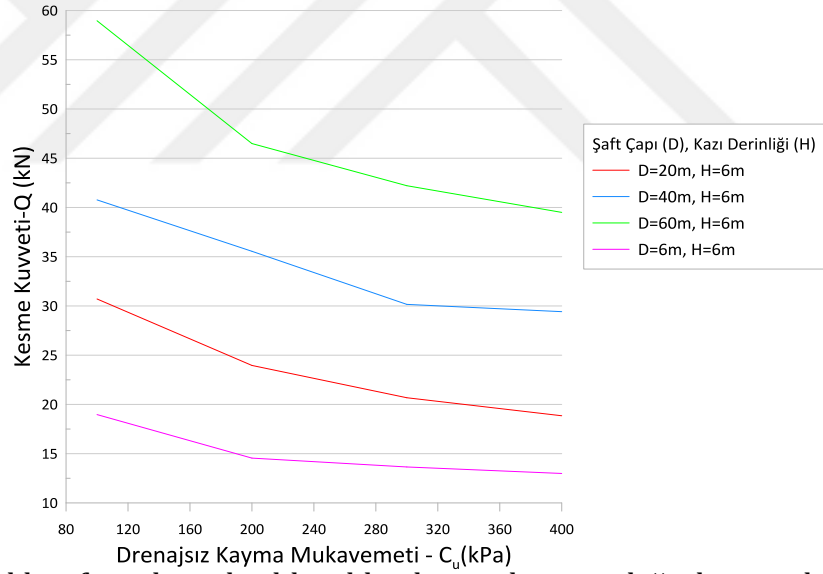
Şekil 3.10 Farklı shaft çaplarında elde edilen eğilme momenti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)



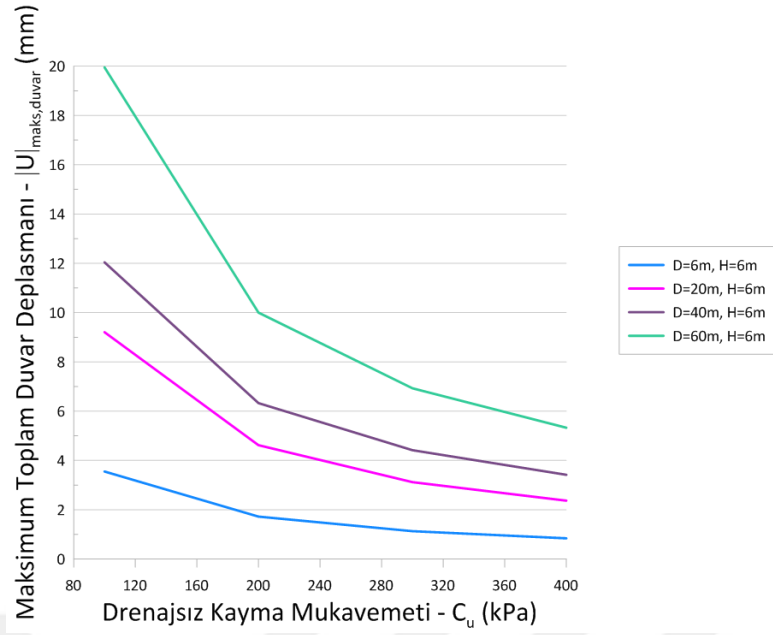
Şekil 3.11 Farklı shaft çaplarında elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)



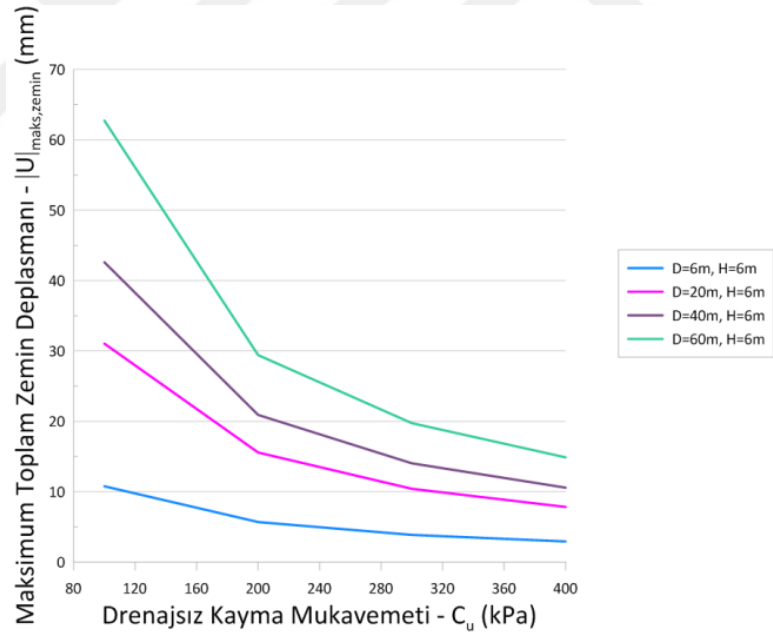
Şekil 3.12 Farklı şaft çaplarında elde edilen çevre eksenel kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)



Şekil 3.13 Farklı şaft çaplarında elde edilen kesme kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)



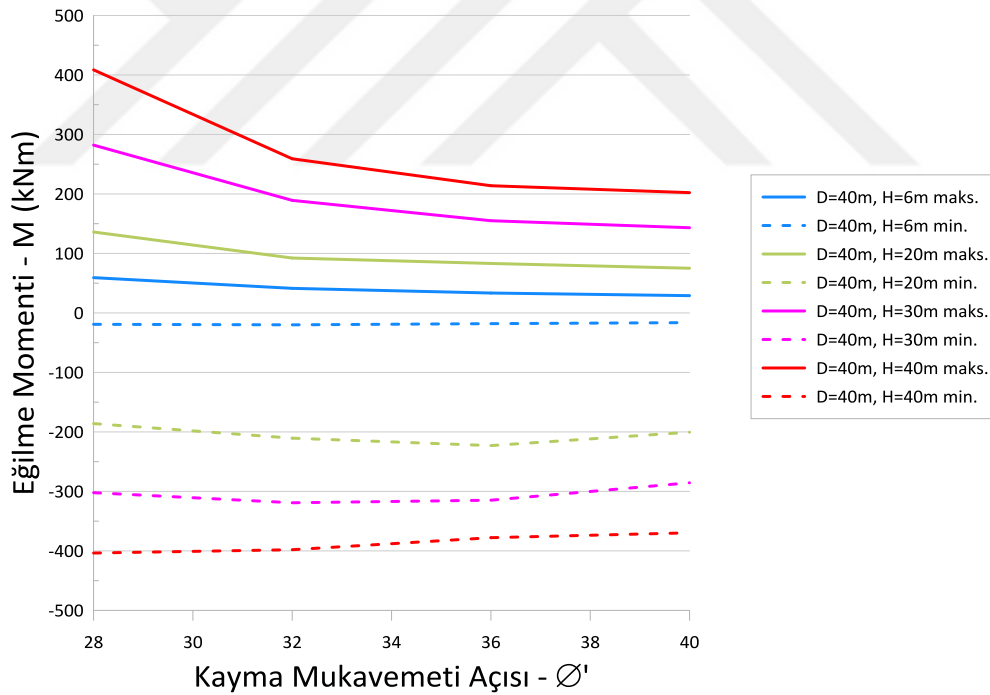
Şekil 3.14 Farklı shaft çaplarında elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)



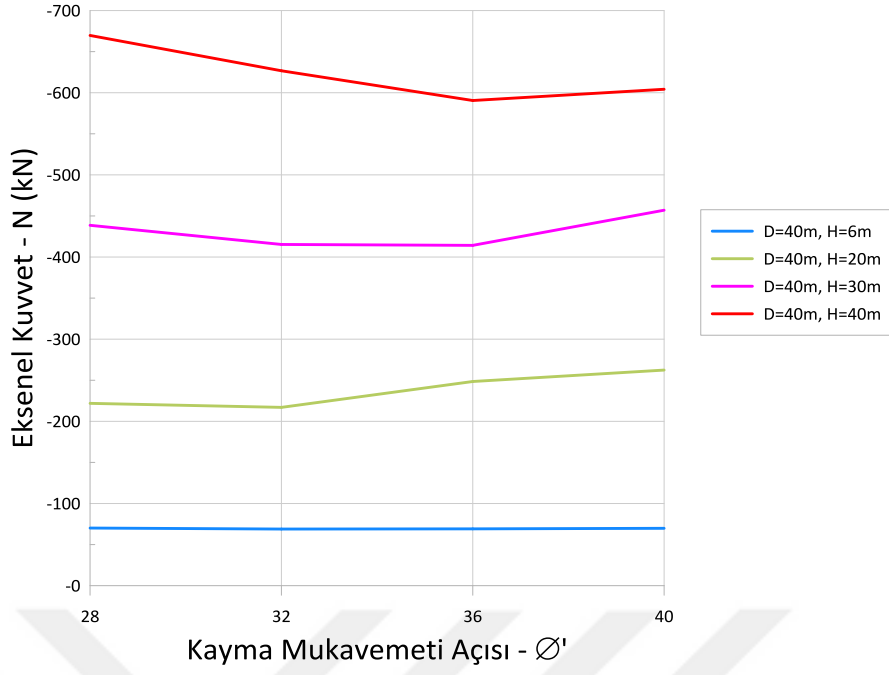
Şekil 3.15 Farklı shaft çaplarında elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (H=6m)

3.4.3 Farklı Kayma Mukavemeti Açısına Sahip Kum Zeminlerde Kazı Derinliğinin Şaftta Oluşan İç Kuvvetler, Duvar ve Zemin Deplasmanlarına Etkisi

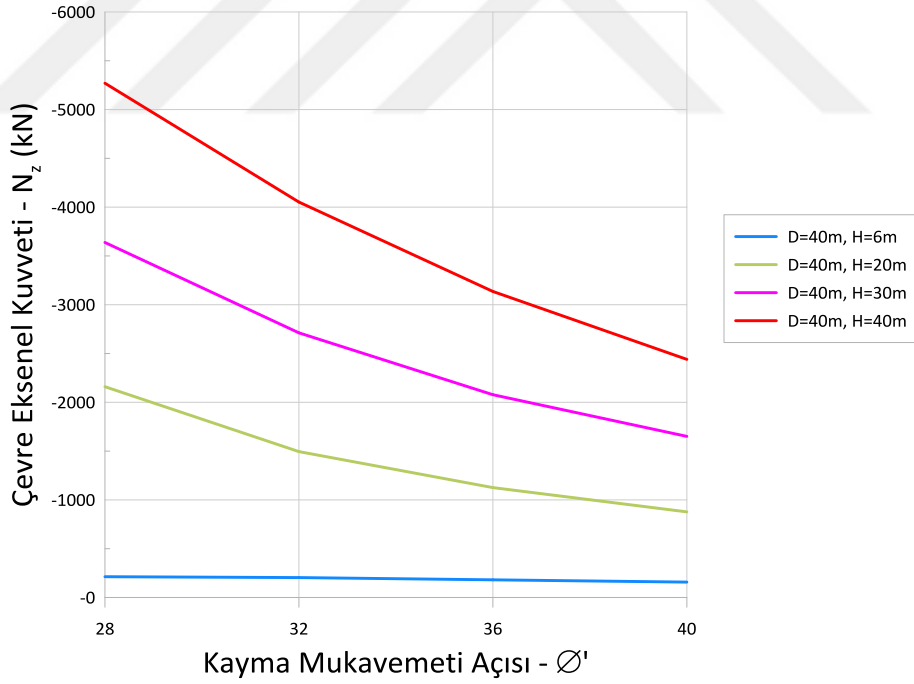
Kazı derinliğinin şaft davranışına etkisini incelemek için şaft çapı ($D=40\text{m}$) sabit tutularak $H=6\text{m}$, 20m , 30m ve 40m kazı derinlikleri için farklı kayma mukavemeti açısı (ϕ') değerleri için analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları grafik haline getirilerek Şekil 3.7'de özetlenmiştir. Artan kazı derinliği ile kazı duvarında meydana gelen iç kuvvetlerde artmıştır. Güvenlik sayılarına bakıldığında ise artan kazı derinliğinin kum zeminde artan kayma mukavemeti açısı değerlerine rağmen beklenenin aksine güvenlik sayılarındaki artış sınırlı olarak gerçekleşmiştir. $H=30\text{m}$ ve $H=40\text{m}$ 'de hesaplanan güvenlik sayıları birbirine çok yakın değerler olarak elde edilmiştir. Kazı duvarında ve zeminde meydana gelen deplasmanlar ise artan şaft yüksekliği ile birlikte artmıştır. Kayma mukavemeti açısıyla birlikte deplasmanlardaki azalışların ivmesi $\phi'=36$ değerinden sonra azalma göstermiştir.



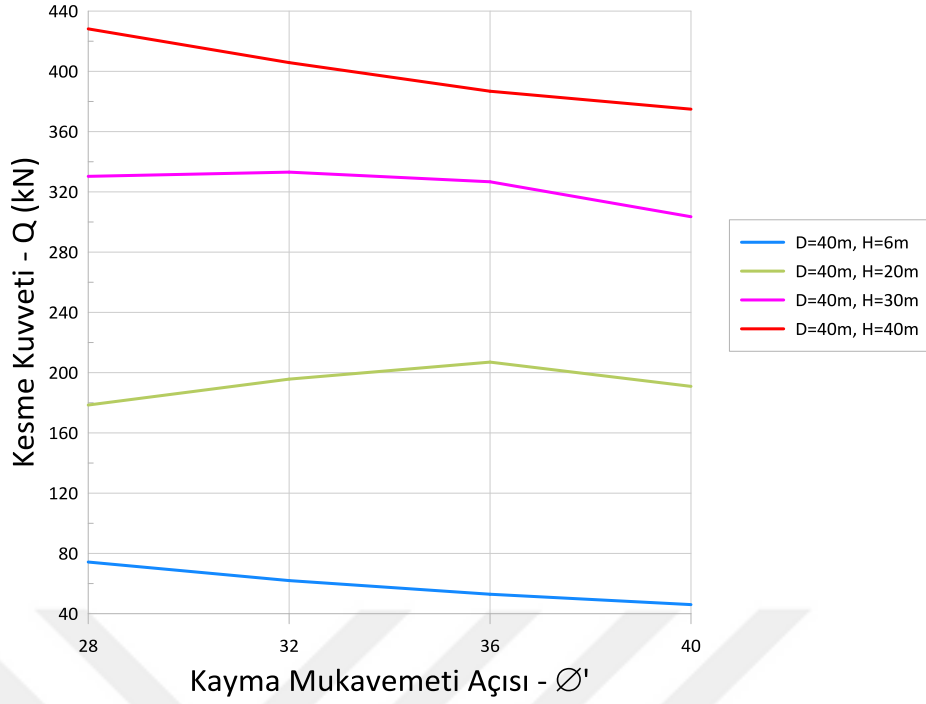
Şekil 3.16 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eğilme momenti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi ($D=40\text{m}$)



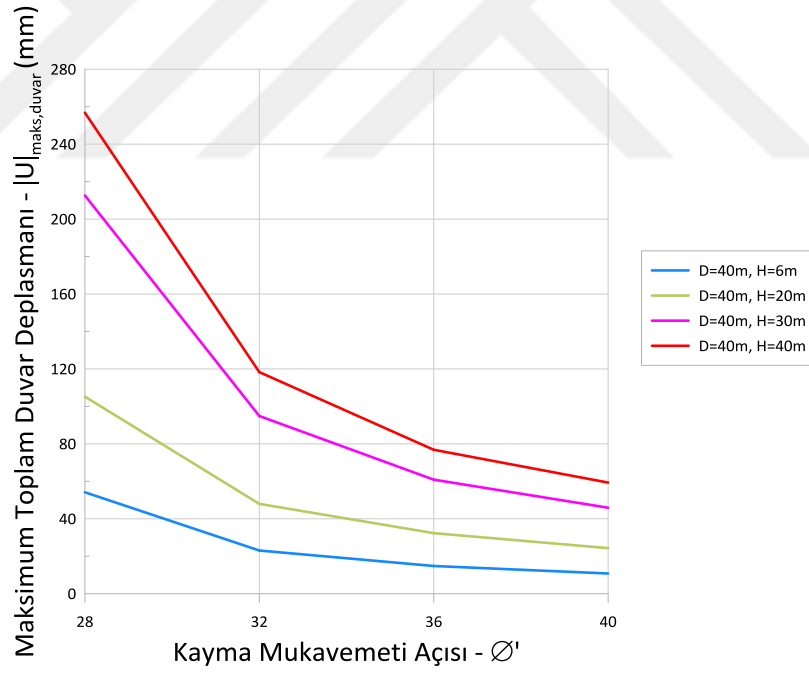
Şekil 3.17 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m)



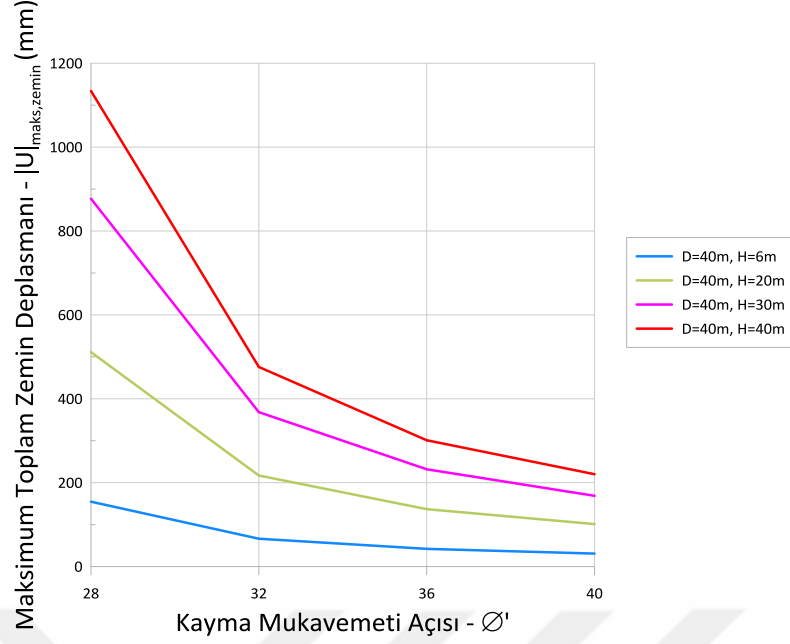
Şekil 3.18 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen çevre eksenel kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m)



Şekil 3.19 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m)



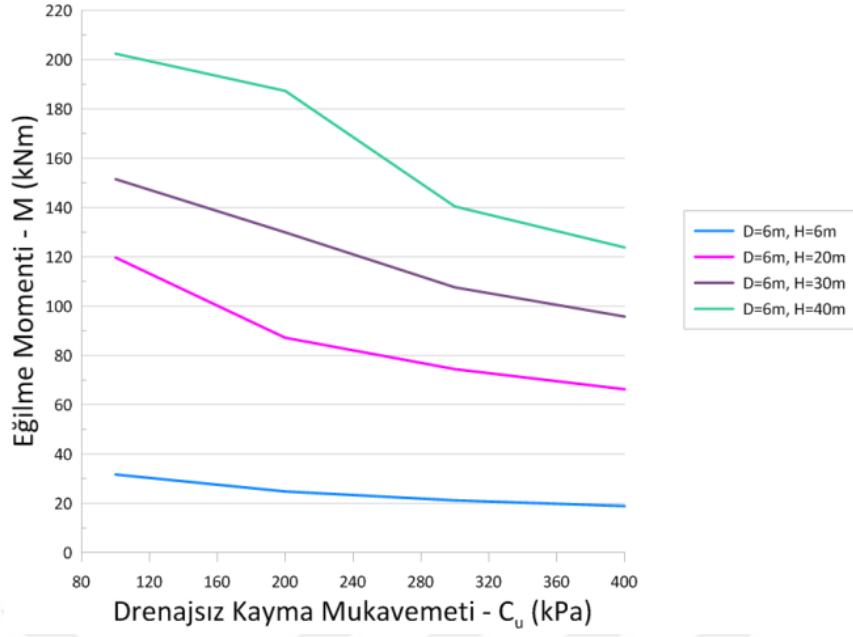
Şekil 3.20 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m)



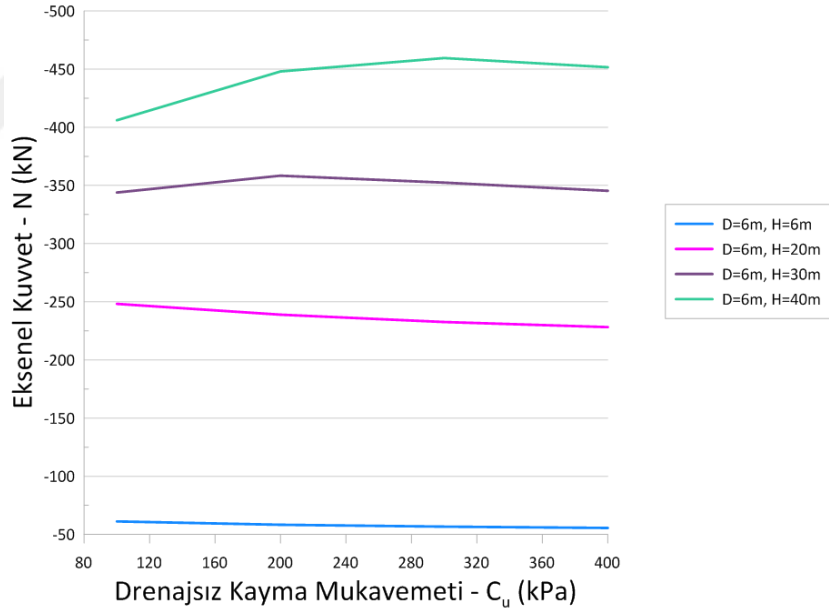
Şekil 3.21 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin kayma mukavemeti açısı değerlerine bağlı değişimi (D=40m)

3.4.4 Farklı Drenajsız Kayma Mukavemetine Sahip Kil Zeminlerde Kazı Derinliğinin Şaftta Oluşan İç Kuvvetler, Duvar ve Zemin Deplasmanlarına Etkisi

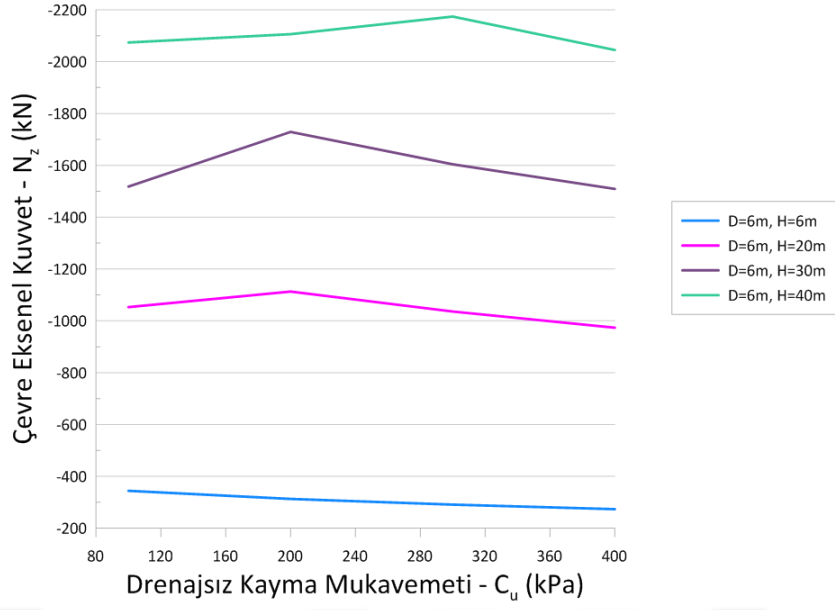
Farklı kazı derinliklerinde kil zeminde inşa edilen şaftın davranışı yine şaft çapı sabit tutularak (D=6m); H=6m, 20m, 30m ve 40m kazı derinlikleri için analizler yapılarak incelenmiştir. Farklı drenajsız kayma mukavemetine sahip kil zeminde yapılan analizlerle zemin mukavemetinin ve kazı derinliğinin birlikte irdelenmesi sağlanmıştır. Artan kazı derinliğinin sonucu olarak iç kuvvetler ve moment değerlerinde artışlar olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.22-Şekil 3.25). Çevre aksel kuvvet, (N_z) kazı derinliğine en hassas iç kuvvet olarak karşımıza çıkmıştır. Güvenlik sayılarına bakıldığında ise artan derinlikle birlikte azalmalar görülmüştür. H=30m ve H=40m derinliklerinde güvenlik sayıları birbirlerine yakın değerler olarak ortaya çıkmıştır. Kazı duvarında ve zeminde meydana gelen deplasmanlar ise kazı derinliği ile birlikte artış göstermiştir (Şekil 3.26-Şekil 3.27).



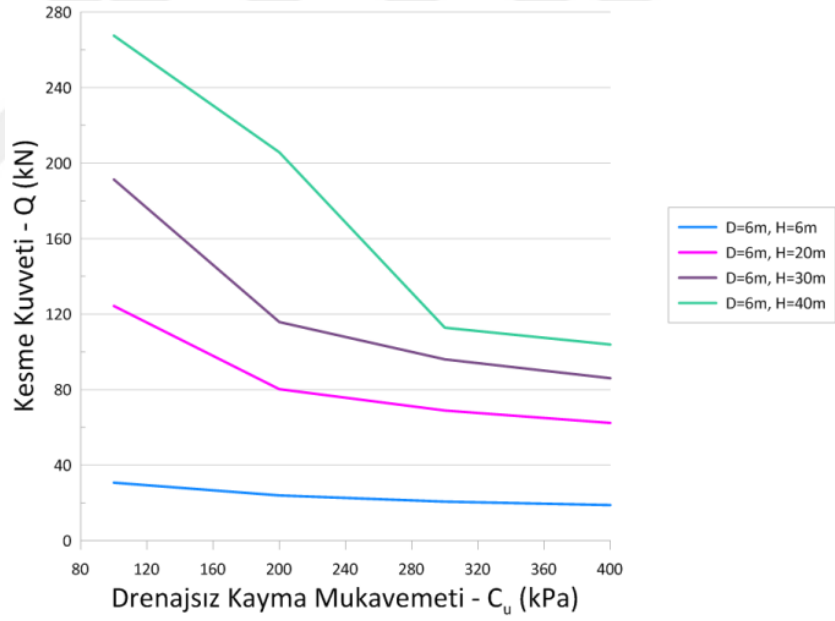
Şekil 3.22 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eğilme momenti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)



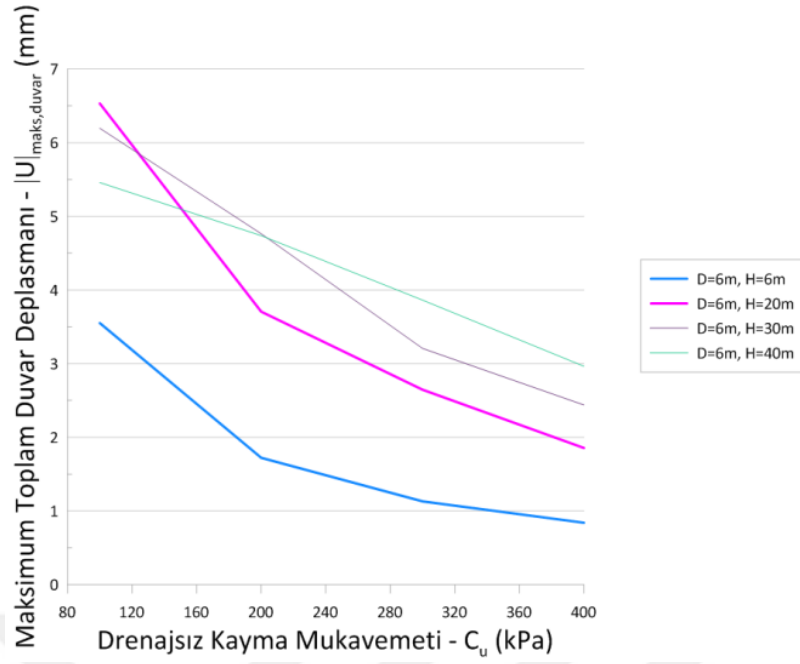
Şekil 3.23 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)



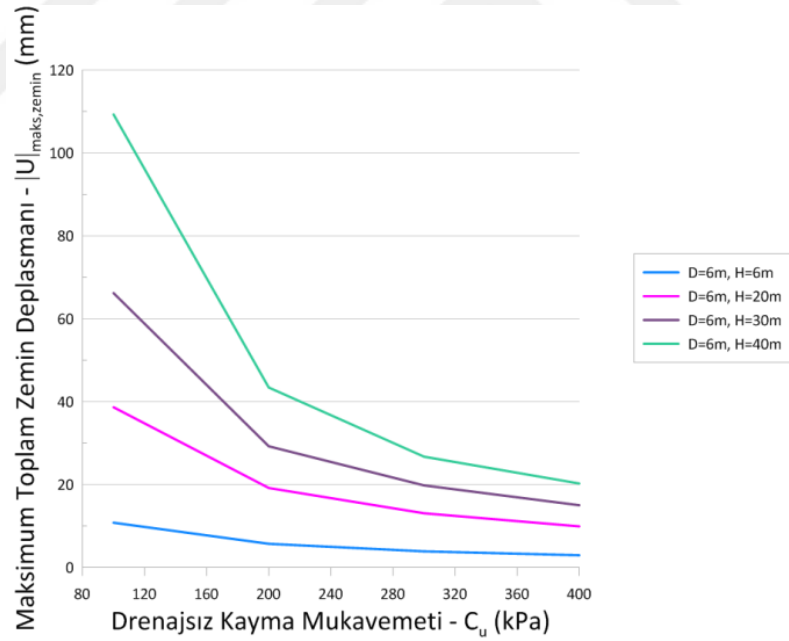
Şekil 3.24 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen çevre eksenel kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)



Şekil 3.25 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen kesme kuvveti değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)



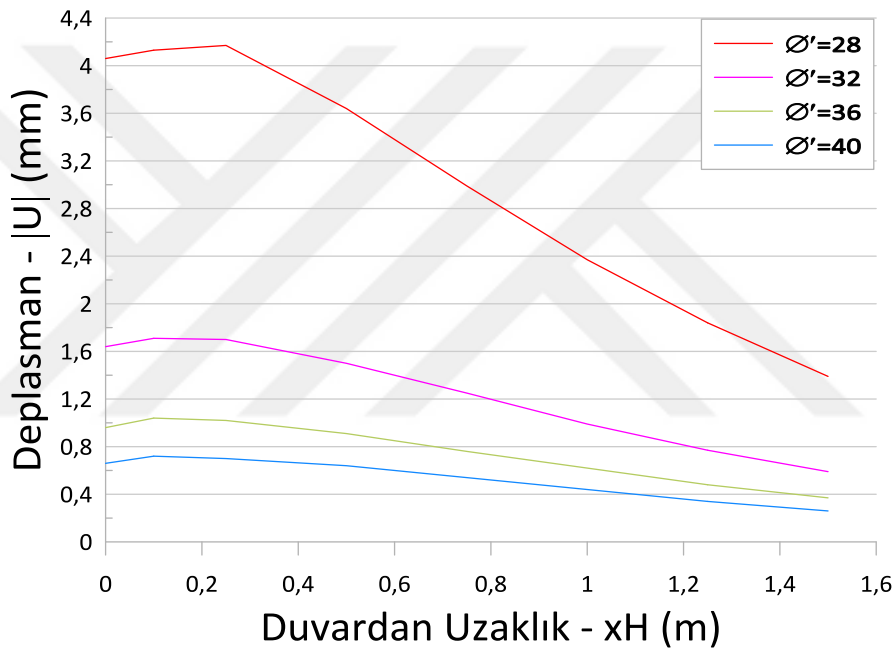
Şekil 3.26 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam duvar deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)



Şekil 3.27 Farklı kazı derinliklerinde elde edilen maksimum toplam zemin deplasmanı değerlerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı değişimi (D=6m)

3.5 Kum ve Kil Zeminler için Duvar Arkası Zemin Deplasmanlarının Farklı Zemin Durumları ve Şaft Özelliklerine Bağlı Olarak Değerlendirilmesi

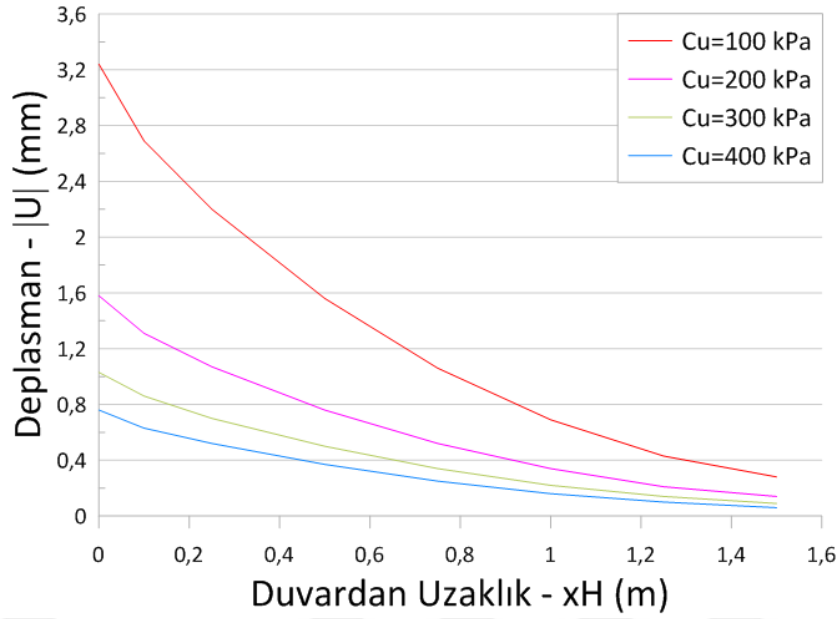
Kum zeminde şaft çapı ve şaft yüksekliğinin 6 metre olduğu durum için farklı kayma mukavemeti açısı değerlerinde şaft duvarının arkasında zemin yüzünde meydana gelen deplasmanlar Şekil 3.28’de gösterilmiştir. Deplasman değerlerinin düşük mertebelerde olması eksenel simetri durumunun bir avantajı olarak karşımıza çıkmıştır. Artan mukavemet açısı değerine karşılık duvar arkasındaki zemin deplasmanlarında azalmalar görülmüştür.



Şekil 3.28 Kum zeminde duvar arkası deplasmanlarının duvara uzaklığına bağlı değişimi (D=6m, H=6m)

Kazı derinliğinin %20'sine denk gelen mesafeye kadar deplasmanlar artarken bu mesafeden sonra azalmaya başlamaktadır.

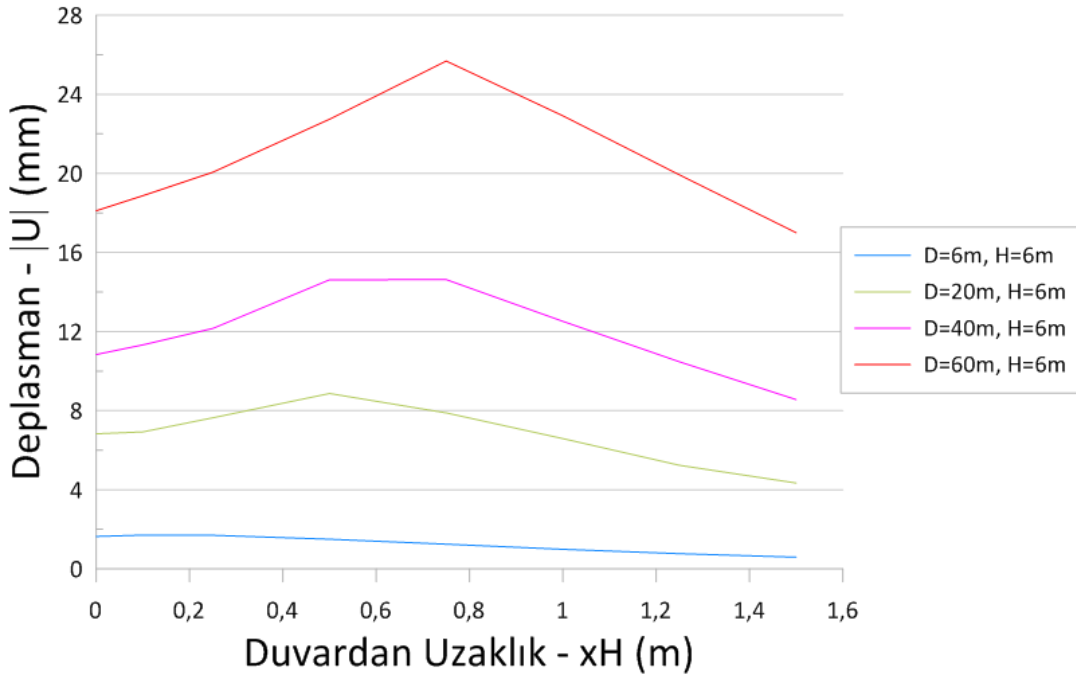
Kil zeminde farklı drenajsız kayma mukavemeti değerleri için (D=6 m ve H=6 m) analizler yapılarak duvar arkasında zemin yüzünde meydana gelen deplasmanlar Şekil 3.29’da özetlenmiştir.



Şekil 3.29 Kil zeminde duvar arkası deplasmanların duvara uzaklığına bağlı değişimi (D=6m, H=6m)

Kil zeminde duvar arkasında meydana gelen deplasmanlar şaft kenarında pik değerine ulaşmakta ve duvardan uzaklaştıkça azalmaktadır. Hem kumda hemde kilde meydana gelen duvar arkası deplasmanlarının zemin kabarması şeklinde meydana geldiği ve maksimum deplasman değerlerinin büyüklüğünün ise $0,05xH$ (mm) mertebelerinde olduğu belirlenmiştir.

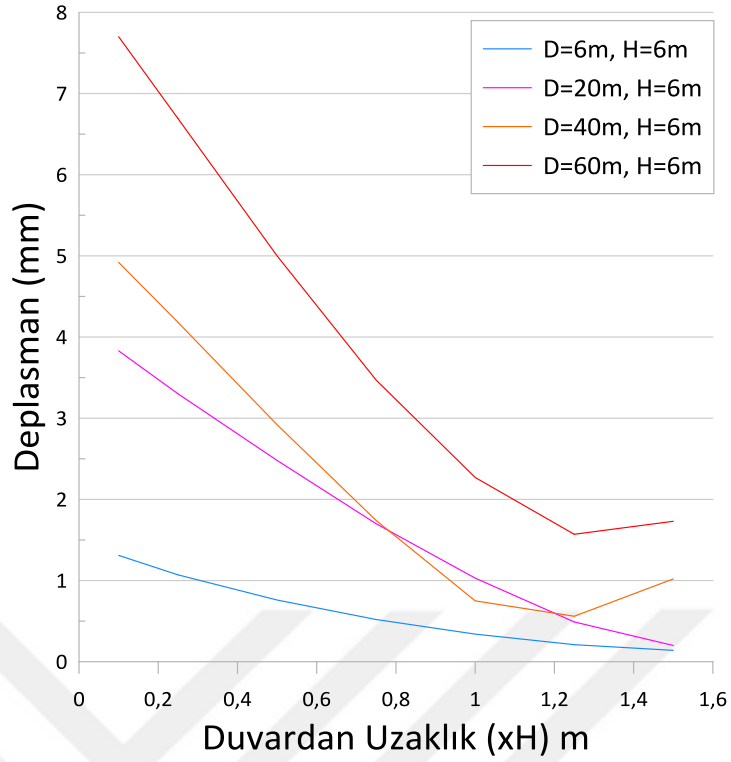
Kum zeminde duvar arkasında meydana gelen deplasmanlara şaft çapının etkisi kayma mukavemeti açısının $\phi'=32$ olduğu kum zemin için H=6 metrelik sabit şaft yüksekliği dikkate alınarak farklı şaft çapları için Şekil 3.30'da gösterilmiştir



Şekil 3.30 Kum zeminde şaft çapına bağlı olarak duvar arkası deplasmanların değişimi ($\phi'=32$, $H=6m$)

Kayma mukavemeti açısının $\phi'=32$ olduğu kum zeminde yapılan analizler sonucunda artan şaft çapı değerlerine bağlı olarak duvar arkasında meydana gelen deplasman değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Kazı derinliğinin yarısı kadar mesafede ($0.5H$) pik değerine ulaşan zemin deplasman değerleri bu mesafeden sonra azalmaya başlamaktadır. Hesaplanan en yüksek deplasman değerinin 60 metrelik şaft çapı için $0,4xH$ (mm) metrelerinde olduğu belirlenmiştir.

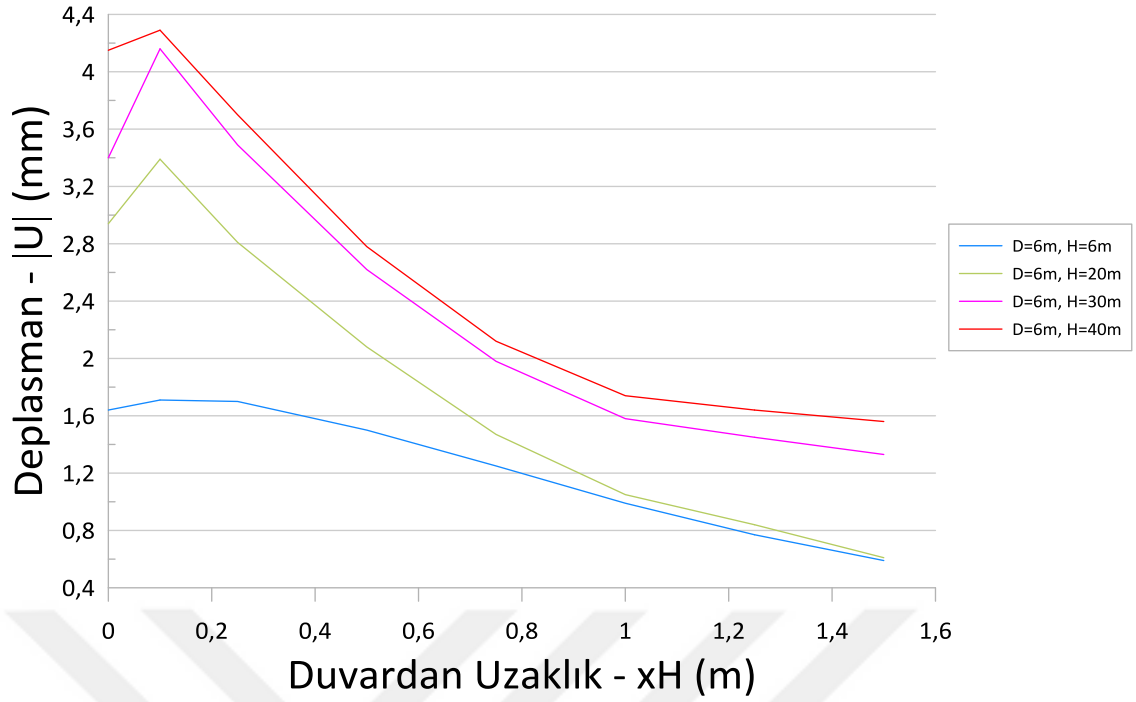
Drenajsız kayma mukavemeti (c_u) 200 kPa olan kil zemin için şaft çapının duvar arkası deplasmanlara etkisi Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31 Kil zeminde şaft çapına bağlı olarak duvar arkası zemin deplasmanlarının değişimi ($c_u=200$ kPa, $H=6$ m)

Kil zeminde duvar arkasındaki deplasmanlar, duvarın hemen yanında pik değere ulaşarak duvara olan mesafe arttıkça azalmaktadır. Şaft çapının 40 metre ve 60 metre olduğu durumlarda duvardan $1,2xH$ (m) uzaklıktaki mesafeden sonra meydana gelen deplasmanlar zemin kabarması yerine oturma şeklinde olmuştur. Belirlenen en yüksek deplasman değerleri ise şaft çapının 60 m olarak alınması durumunda gerçekleşmiştir.

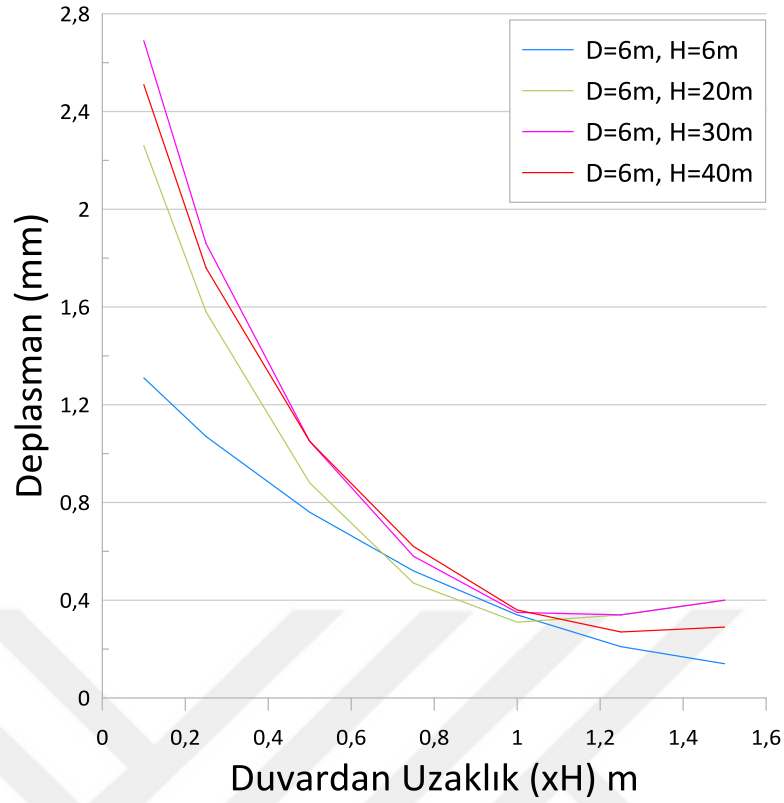
Kum zeminde kazı derinliğinin duvar arkasında zemin yüzünde meydana gelen deplasmanlara etkisi Şekil 3.32’de özetlenmiştir.



Şekil 3.32 Kum zeminde artan kazı derinliği ile duvar arkası zemin deplasmanlarının değişimi ($\phi'=32$, $D=6m$)

Artan kazı derinliğiyle birlikte deplasman değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir. Şaft duvarından $0,1xH$ (m) kadar mesafede nihai değerine ulaşan zemin deplasman değerleri bu mesafeden sonra azalmaktadır. En yüksek deplasman değeri ise 40 m kazı derinliği için hesaplanmış olup $0,01xH$ (mm) mertebelerinde gerçekleşmiştir.

Kil zeminde kazı derinliği ile duvar arkası zemin deplasmanları arasındaki ilişki Şekil 3.33'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33 Kil zeminde artan kazı derinliği ile duvar arkası deplasmanların değişimi ($C_u=200$ kPa, $D=6$ m)

Drenajsız kayma mukavameti 200 kPa olan kil zemin için kazı derinliğinin 20m, 30m ve 40m olması durumları için hesaplanan deplasman değerleri birbirine oldukça yakın değerler olarak belirlenmiştir. Bu derinlikler için duvardan H (m) mesafe kadar uzaklığa kadar zeminde kabarma, bu mesafeden sonra ise oturmalar görülmüştür. Kazı derinliği 6m olduğunda ise hesaplanan deplasmanlar daha düşük mertebelerde gerçekleşmiştir.

3.6 Kum ve Kil Zeminler için Duvar Arkası Zemin Deplasmanlarının Literatürde Yeralan Çalışmalarla Kıyaslanması

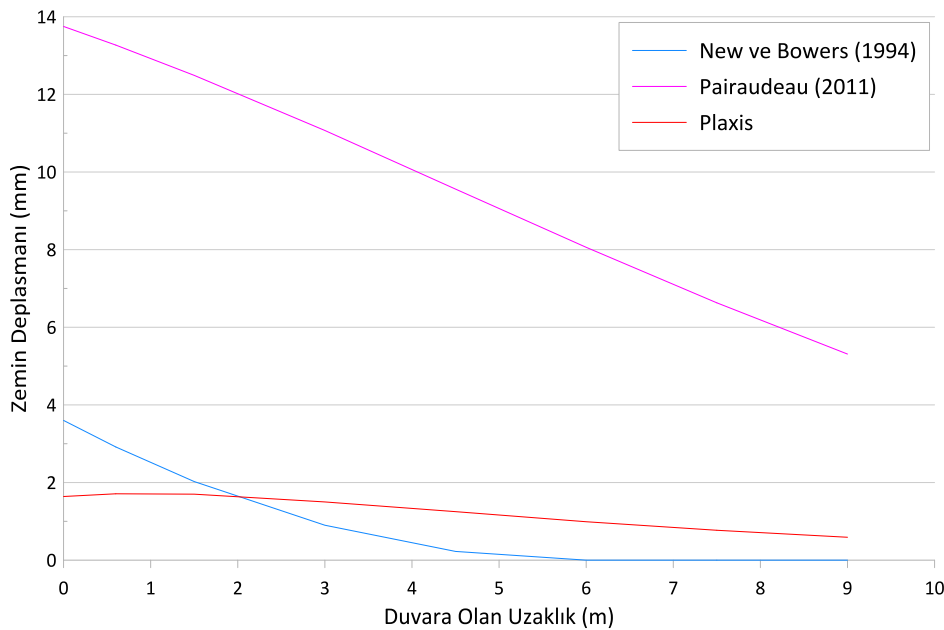
Bu bölümde şaft duvarı arkasında zemin yüzeyinde bulunan deplasmanların tahmini için 2. Bölümde anlatılan ampirik yöntemlerden yararlanılmıştır. Sonuçlar Plaxis2D programıyla yapılan sonlu eleman analizleriyle kıyaslanmıştır. Dairesel şaftlarla ilgili literatürde önemli yeri olan New ve Bowers (1994) ile Pairaudeau (2011) çalışmasında yer alan model deneylerden elde edilen analitik formüllerle elde edilen sonuçlar ile (formül (3.1) , (3.2), (3.3) ve (3.4)) bu çalışmada gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçları Şekil 3.34'te birlikte verilmiştir .

$$\text{New ve Bowers (1994); } S_v(d) = \frac{\alpha x(H-d)^2}{H} \quad (3.1)$$

$$\text{Pairaudeau (2011); } \frac{S_{v,max}}{H} = 0,0008x \frac{D}{H} + 0,0008 \quad (3.2)$$

$$\frac{Et}{H} = 0,3 \frac{D}{H} + 0,12 \quad (3.3)$$

$$S_v(d) = S_{v,max} \exp(0,5) \exp\left(-\frac{\left(\frac{d}{h} + 2Et/H\right)^2}{(8Et/9)^2}\right) \quad (3.4)$$

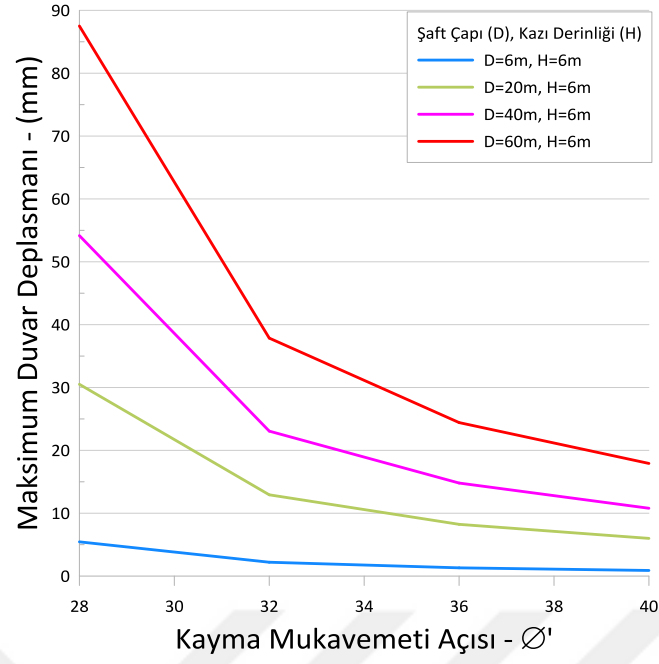


Şekil 3.34 Duvar arkası deplasmanlarının analitik verilerle karşılaştırması

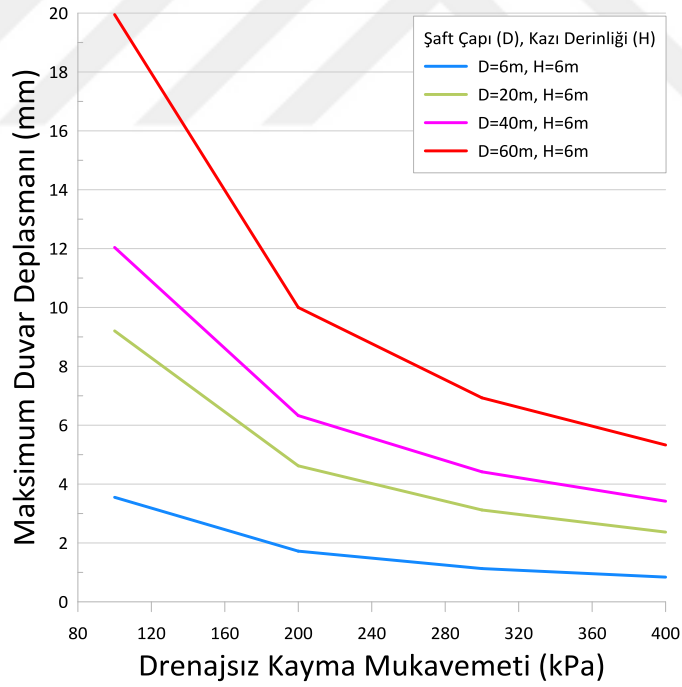
Şekil 3.34'te verilen zemin deplasman değerleri kum zeminde 6 metrelik şaft çapı ve 6 metrelik kazı derinliği olması durumu içindir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde New ve Bowers (1994) deplasman bağıntısı ile bu çalışma kapsamında sonlu eleman analizleriyle elde edilen verilerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Pairaudeau (2011) bağıntısı ile elde edilen deplasmanların ise diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlarla tutarsızlık gösterdiği görülmektedir.

3.7 Kum ve Kil Zeminlerde Şaft Duvarında Meydana Gelen Deplasmanlar için Elde Edilen Analiz Sonuçları

Hem kum hem de kil için farklı zemin mukavemeti ve şaft geometrisi durumları için elde edilen analiz sonuçlarına ait grafikler bu bölümde verilmiştir. Farklı kayma mukavemeti açısına (ϕ') sahip kum ve farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerine sahip kil zeminler için sabit duvar yüksekliğinde ($H=6$ m) artan şaft çapı değerleri için ($D=6$ m, 20 m, 40 ve 60 m) için yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler sırasıyla Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da verilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde artan zemin mukavemeti parametrelerine bağlı olarak kazı duvarında meydana gelen deplasmanların azaldığı görülmektedir (Şekil 3.35). Hesaplanan deplasmanların düşük mertebelerde kalması eksenel simetri durumunun bir avantajı olarak karşımıza çıkmıştır. Düzlem dışı eksenel gerilmeleri temsil eden çevre eksenel gerilmeler (hoop forces) şaft duvarı stabilitesini arttırmada önemli bir rol oynamıştır.



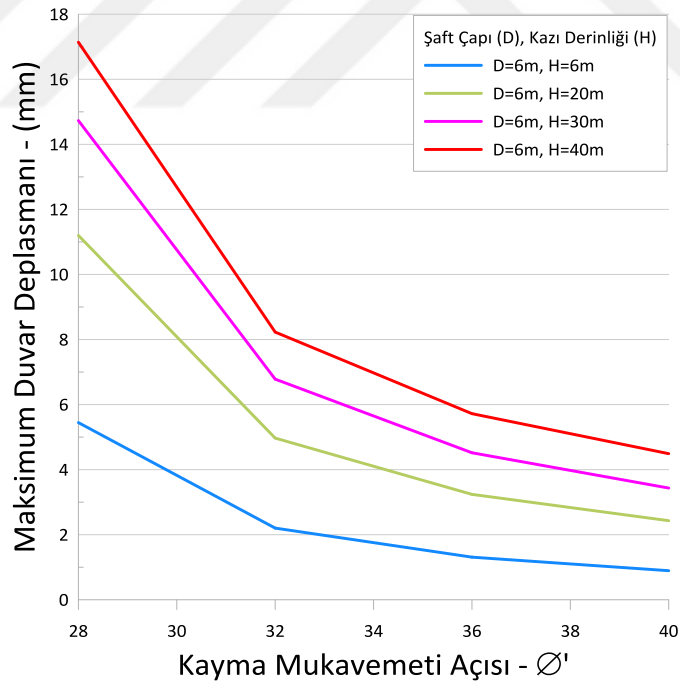
Şekil 3.35 Farklı kayma mukavemeti açlarına sahip kum zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan şaft çapına bağlı değişimi



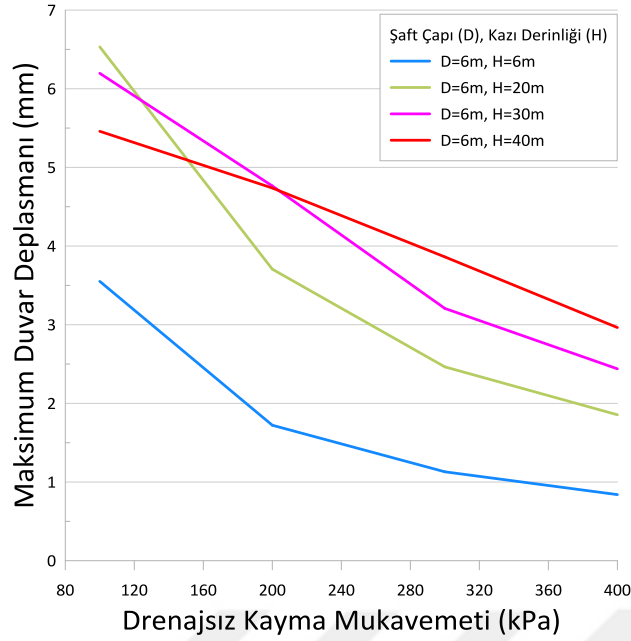
Şekil 3.36 Farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerine sahip kil zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan şaft çapına bağlı değişimi

Farklı şaft çapı değerleri için kazı duvarında meydana gelen deplasmanlara bakıldığında ise artan şaft çaplarıyla birlikte deplasmanların büyüklüğünün de arttığı görülmektedir. Kum zemin için elde edilen maksimum duvar deplasmanı değerleri kil zemin için elde edilen değerlerden ortalama dört kat büyük değerler olarak elde edilmiştir. Elde edilen maksimum duvar deplasmanı değerlerinin yaklaşık olarak şaft çapının binde 1.5'i olarak gerçekleştiği belirlenmiştir.

Kil zemin için maksimum değerleri şaft çapının on binde 3.5-6 'sı arasında değişen küçük değerler olarak elde edilmiştir. Ayrıca kil zeminde elde edilen en yüksek deplasman değerleri ise şaft çapının maksimum değeri (60 metre) için gerçekleşmiştir. Kazı derinliğinin duvar deplasmanlarına etkisini incelemek için 6 metrelik sabit şaft çapı alınarak yapılan analizlerde ise kum ve kil zeminler için elde edilen sonuçlar incelendiğinde (Şekil 3.37 ve Şekil 3.38), 200 kPa kayma mukavemeti (c_u) değerine ne kadar deplasmanların kazı derinliğinden bağımsız olduğu, bu değerden sonra kazı derinliği arttıkça deplasman değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.



Şekil 3.37 Farklı kayma mukavemeti açlarına sahip kum zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan kazı derinliğine bağlı değişimi



Şekil 3.38 Farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerine sahip kil zeminlerde maksimum duvar deplasmanlarının artan kazı derinliğine bağlı değişimi

3.8 Şaft Rijitliğinin Duvar Arkasındaki Deplasmanlara Etkisi

Analizlerde göz önüne alınan yapısal eleman rijitliğinin zeminde meydana gelen deplasman değerlerine etkisini incelemek için diyafram duvar kalınlığı 30 cm den 60 cm ye çıkarılarak analiz tekrarlanmıştır. Analiz edilen model H=40 metre derinlik ve D=40 metre çapa sahiptir. Analiz $c_u=200$ kPa drenajsız kayma mukavemetine sahip kil zemin için yapılmıştır. 60 cm kalınlığındaki diyafram duvar için göz önüne alınan yapısal parametreler aşağıda verilmiştir;

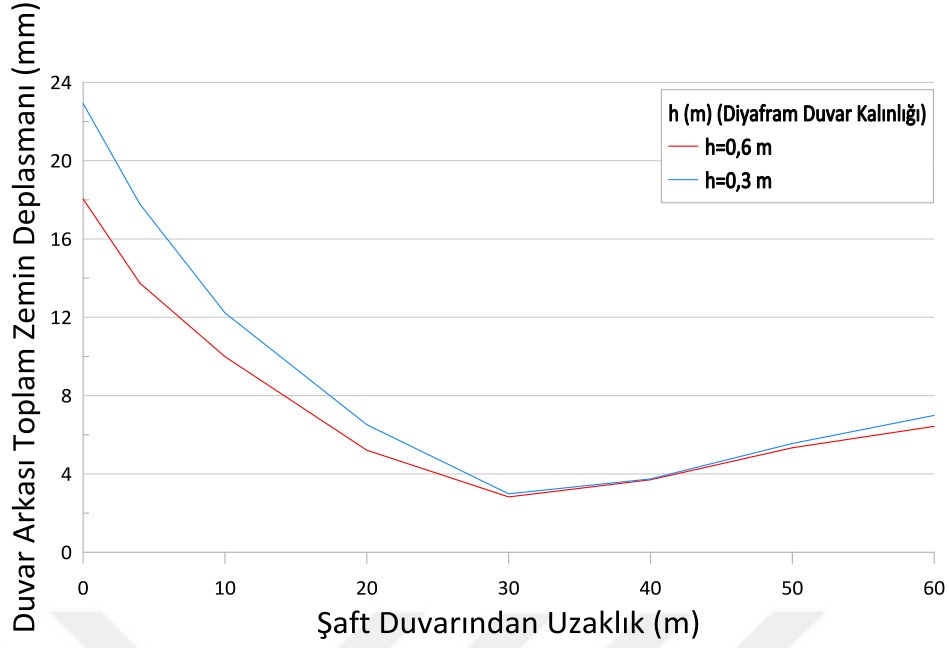
$$EI= 630\ 000\ \text{kNm}^2/\text{m},$$

$$EA= 21\ 000\ 000\ \text{kN}/\text{m},$$

$$W=9\ \text{kN}/\text{m}/\text{m},$$

$$v=0,2$$

Şekil 3.39'da her iki duvar kalınlığı için hesaplanan zemin deplasmanı birlikte verilmiştir.



Şekil 3.39 Artan duvar rijitliği ile zemin deplasmanlarının değişimi

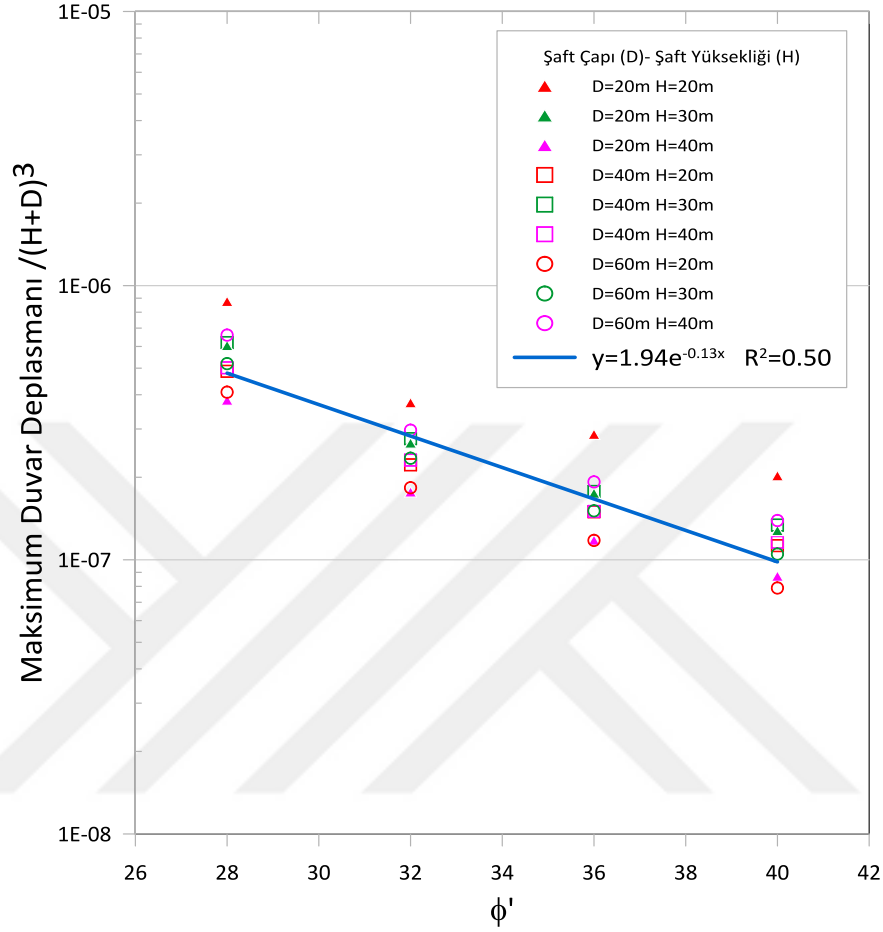
Şekil 3.39’da görüldüğü gibi duvar rijitliğindeki artış zemin deplasmanlarında bir miktar azalmaya neden olmuştur. Hesaplanan zemin deplasmanları duvardan 30 metre uzaklığa kadar kabarma 30 metrenin ötesinde ise oturma şeklinde gerçekleşmiştir.

3.9 Kumda Maksimum Duvar ve Zemin Deplasmanlarının Kazı Derinliği ve Şaft Çapına Bağlı Değişimi

Kum zeminde yapılan analizler sonucunda elde edilen maksimum duvar ve zemin deplasmanı değerleri kullanılarak kazı geometrisi ve zemin mukavemeti ile şaft duvarında ve çevre zeminde beklenebilecek deplasmanların tahmini için formüller önerilmiştir. Şekil 3.40’ta 20 m’den büyük çapa sahip dairesel şaftlar için hazırlanmış, duvar deplasmanlarının tahminine yönelik çizilen grafik görülmektedir. Grafikteki verilerden yola çıkılarak kum zeminde şaft duvarındaki deplasmanların tahminine yönelik aşağıdaki formül elde edilmiştir.

$$|U|_{\text{duvar, maks.}} = 1,94 \times e^{-0,13 \times x} \quad (\text{m}) \quad (3.5)$$

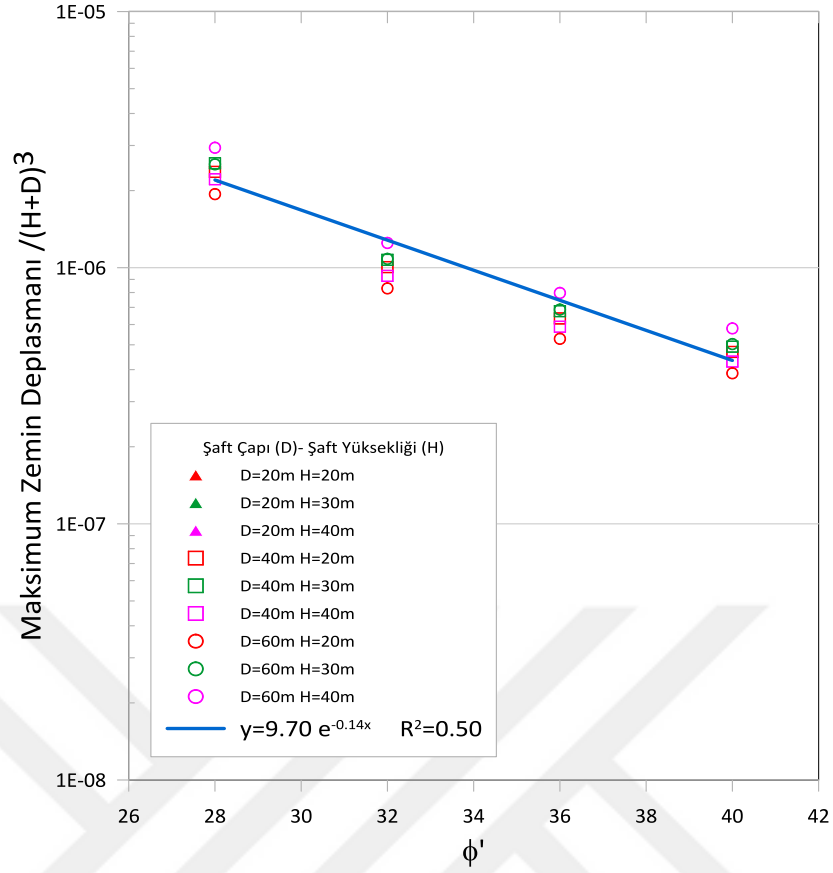
Şekil 3.40'ta yatay eksen kum zeminin mukavemet açısını temsil ederken düşey eksen duvar deplasmanının kazı derinliği (m) ve şaft çapının (m) toplamının 3. dereceden kuvveti ile normalize edilmiş halini göstermektedir.



Şekil 3.40 Kum zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek deplasmanlar

Kum zeminde inşa edilen 20 m'den fazla çaptaki dairesel şaftta zeminde beklenecek maksimum deplasmanın tahmini için Şekil 3.41'deki grafik hazırlanmıştır. Grafikteki verilerden yola çıkılarak kazı tabanında zemin kabarması suretiyle gerçekleşen maksimum zemin deplasmanlarının tahmini için aşağıdaki formül elde edilmiştir.

$$|U|_{\text{zemin, maks.}} = 9,7 \times e^{-0,14 \times x} \quad (\text{m}) \quad (3.6)$$

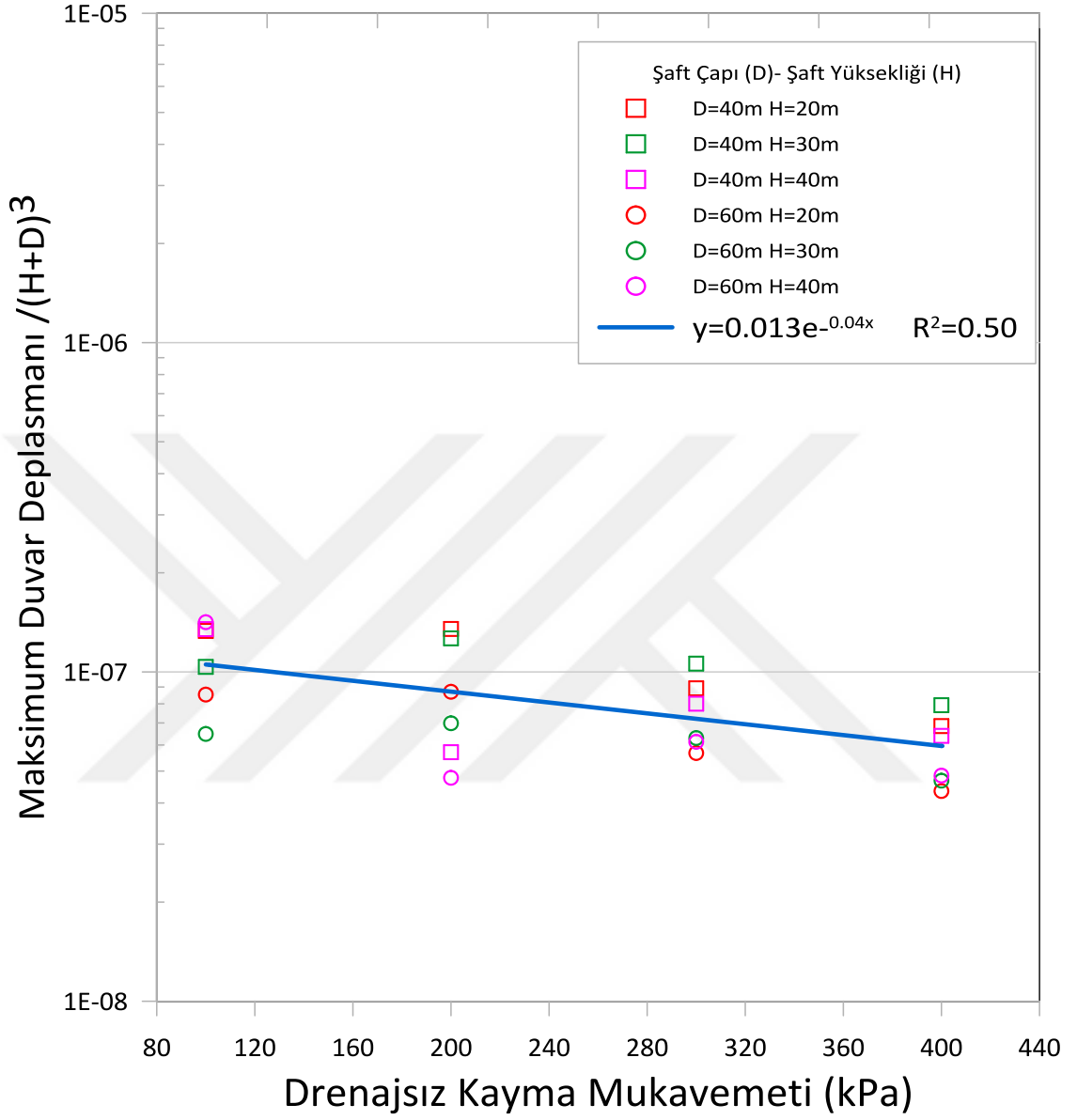


Şekil 3.41 Kum zeminde farklı geometrilerdeki şaft kazısında zeminde meydana gelebilecek maksimum deplasmanlar

3.10 Kilde Maksimum Duvar ve Zemin Deplasmanlarının Kazı Derinliği ve Şaft Çapına Bağlı Değişimi

Kil zeminde yapmış olduğumuz analizlerden elde edilen verilerle zeminin sahip olduğu drenajsız kayma mukavemeti (c_u) ve farklı şaft çapı ve kazı derinlikleri için Şekil 3.42’de duvar deplasmanlarını tahminine yönelik Şekil 3.43’te ise maksimum zemin deplasmanlarının tahminine yönelik grafikler hazırlanmıştır. Yatay eksen zeminin sahip olduğu drenajsız kayma mukavemetini temsil ederken, düşey eksen beklenen deplasman değerinin kazı derinliği (m) ve şaft çapının (m) toplamının 3. dereceden kuvveti ile normalize edilmiş hali gösterilmiştir. Şekil 3.42’deki grafikten yola çıkılarak kil zemindeki 20 m’den büyük çapa sahip şaftlarda beklenebilecek maksimum duvar deplasmanı için 3.3 formülü elde edilmiştir.

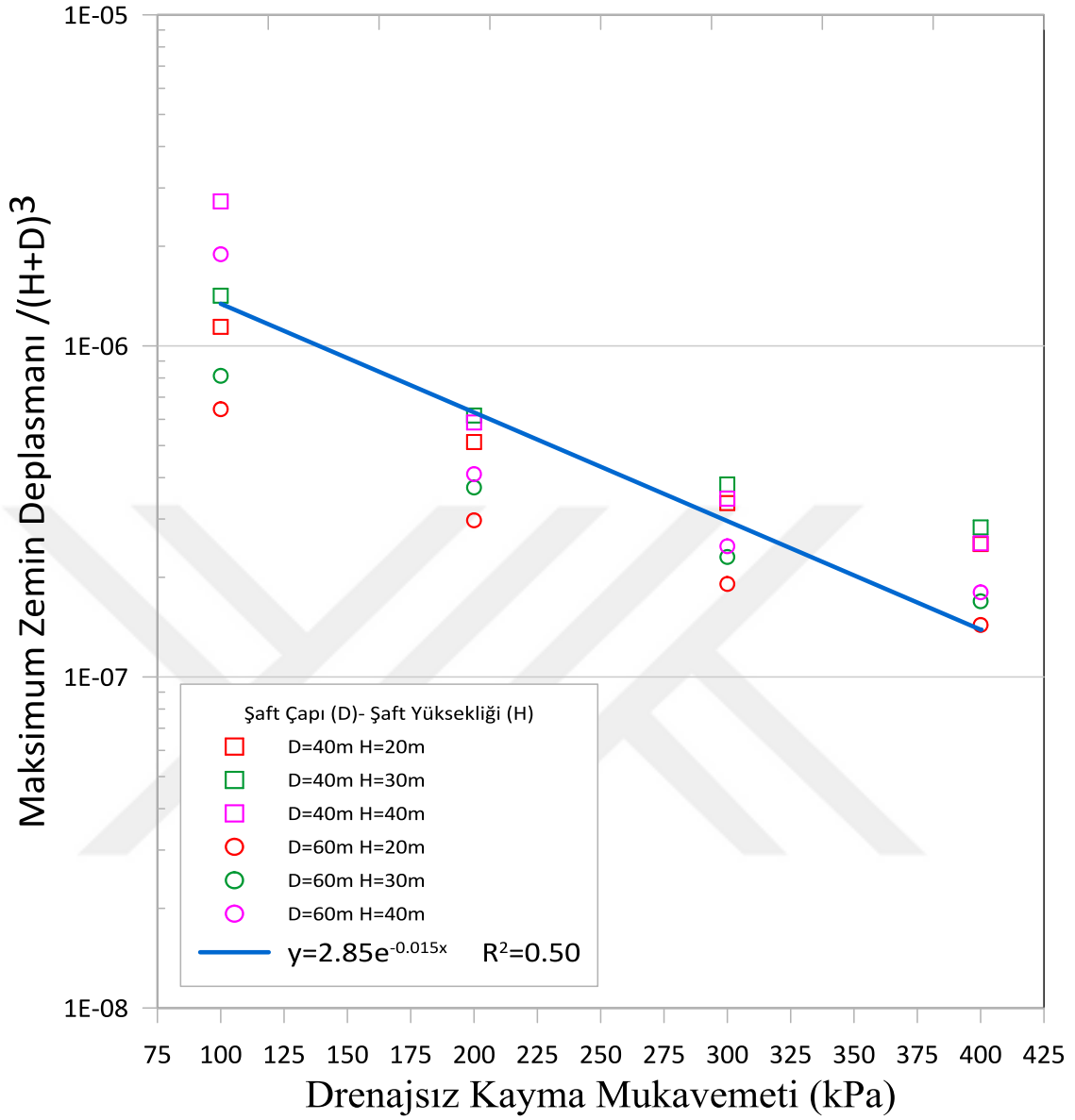
$$|U|_{\text{duvar, maks.}} = 0,013 \times e^{-0,04 \times x} \quad (\text{m}) \quad (3.7)$$



Şekil 3.42 Kil zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek maksimum deplasmanlar

Şekil 3.43'teki verilerden yola çıkılarak kil zeminde 20 m'den büyük çapa sahip şaft kazısında beklenecek maksimum deplasman değerinin tahmini için 3.4 formülü elde edilmiştir.

$$|U|_{\text{zemin, maks.}} = 2,85 \times e^{-0,015 \times x} \quad (\text{m}) \quad (3.8)$$



Şekil 3.43 Kil zeminde farklı geometrilerdeki şaft duvarında beklenebilecek maksimum deplasmanlar

Bu tez çalışması kapsamında farklı mukavete sahip zeminlerde inşa edilen dairesel şaftların davranışı incelenmiştir. Farklı kayma mukavemeti açısına sahip kum ve farklı drenajsız kayma mukavemetine sahip kil zeminler için düşey destek elemanında meydana gelen iç kuvvet değişimleri ve civarda oluşacak deplasmanlar incelenmiştir.

Dairesel geometriden dolayı aksel simetri durumunun söz konusu olduğu şaft inşaatlarında zeminde oluşan kemerlenme etkisinin stabiliteye olan katkısı görülmüştür. Stabiliteyi arttıran kemerlenme etkisinin sonucu olarak herhangi bir yatay destek elemanına ihtiyaç olmaksızın genel stabilite sağlanmıştır. Ayrıca şaft duvarının kazı tabanı altında gömülü derinliği olmadan analizin gerçekleştirilebilmesi dairesel kazıların ekonomik bir uygulama yöntemi olduğunu göstermiştir.

Şaft çapının ve kazı derinliğinin iç kuvvet ve deplasmanlara olan etkisini araştırmak için farklı çap ve derinlik değerleri için analizler tekrarlanmıştır. Şaft duvarı arkasında zemin yüzünde, şaft duvarında ve kazı tabanında gerçekleşen deplasmanlar incelenmiştir. Duvar arkasında zemin yüzeyinde meydana gelen deplasmanlar literatürde bulunan analitik verilerle kıyaslanmıştır. New ve Bowers (1994) oturma formülü ile bu çalışmada bulunan Plaxis2D analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. En büyük zemin deplasmanının kazı tabanında zemin kabarması şeklinde meydana geldiği görülmüştür.

Şaft çapındaki artışın, zemindeki kemerlenme etkisinin azalmasıyla ilgili olarak yapısal elemana ait iç kuvvetlerde, çevre zeminde ve duvarda meydana gelen deplasmanlarda artışa neden olduğu görülmüştür. Artan kazı derinliklerinde ise şaft duvarına etkiyen yanal toprak basınçlarının artmasıyla hem yapısal elemana

ait iç kuvvetlerde hem de zemin ve duvarda meydana gelen deplasmanlarda artış görülmüştür.

Kum zeminde farklı kayma mukavemeti açısı (ϕ'), kil zeminde ise farklı drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerleri kullanılarak yapılan analizlerle zemin mukavemetindeki artışın deplasmanlarda ve eleman iç kuvvetlerinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

Şaft duvarına ait yapısal eleman parametrelerinin zemin hareketine etkisini araştırmak için destek sistemi olarak seçilen diyafram duvarın kalınlığı arttırılarak analizler tekrarlanmıştır. Artan duvar rijitliği karşısında şaft duvarında ve zeminde oluşan deplasmanların azaldığı görülmüştür.

Duvar arkasında meydana gelen zemin deplasmanları ortalama 40-50 mm aralığında hesaplanmıştır. Analizlerde en yüksek zemin hareketi 60 m çap ve 40 m derinlikte $\phi'=28$ kayma mukavemeti açısına sahip kum zeminde 186 mm olarak bulunmuştur. Bu değer kazı derinliğinin (H) yaklaşık %0,5H katına denk gelmektedir. Kil zemin için ise en yüksek zemin deplasmanı yine 60 m çap ve 40 m derinlikteki şaft için 100 kPa drenajsız kayma mukavemetine sahip zeminde 120 mm olarak bulunmuştur. Bu değer ise kazı derinliğinin (H) yaklaşık %0,3H katına denk gelmektedir.

Şaft duvarında gerçekleşen en yüksek deplasman değerleri ise yine 60 m çap ve 40 m derinlik olması durumunda kum zeminde 0,2927 m, kil zeminde ise 0,1416 m olarak elde edilmiştir. Kum zemindeki deplasman değeri %0,7H, kil zemindeki deplasman değeri ise %0,3H mertebelerinde kalmıştır. Bu değerler %1H sınır değerinin altında kalmıştır. (ÇŞB Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Hakkında Yönetmelik, 2018)

Hem kum zeminde hem de kilde 20 m'den büyük çapa sahip şaftlarda kazı tabanında ve şaft duvarında beklenebilecek deplasman değerlerinin tahminine yönelik formüller önerilmiştir.

Dairesel şaftların nümerik analizinde daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için arazi ve laboratuvar deneylerine, aletsel gözlemlere ve bunların nümerik

modellerinin geri analizlerle karşılaştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması kapsamında amaç dairesel geometrinin kazı davranışına etkisinin araştırılması olduğundan sürşarj, yeraltı suyu ve arazideki zeminin tabakalı olması gibi durumlar göz önüne alınmamıştır.

Sürşarj etkisi, yeraltı suyu bulunması, tabakalı zemin olması durumu, şaft duvarında çeşitli nedenlerden ötürü süreksiz kesitlerin oluşturulması (tünel eksenine bağlantı yapılması gibi) ayrı birer araştırma konusu olup bu çalışmanın dairesel şaftlarla ilgili Türkçe literatürde bir temel teşkil edip yukarıda bahsedilen gelecek araştırma konularına ışık tutması hedeflenmiştir.



- Anagnostopoulos, C. ve Georgiadis, K. (2001). "Behaviour of an instrumented circular diaphragm wall." 15. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul.
- Ariizumi ve diğ. (2000). "Behavior of large-scale cylindrical earth retaining wall." *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Syf. 481-486. Balkema, Rotterdam.
- Bencor Global, "www.bencorinc.com"
- Berezantzev, V. G. (1958). "Earth Pressure on the Cylindrical Retaining Walls." *Conference on Earth Pressure Problems*, Volume 2 Syf. 21-27, Brüksel.
- Cabarkapa ve diğ. (2003). "Design and Performance of a Large Diameter Shaft in Dublin Boulder Clay." *Proceedings of British Geotechnical Association International Conference on Foundations*, Syf. 175-185, Dundee.
- Cheng, Y. M. ve Hu, Y. Y. (2005). "Active Earth Pressure on Shaft Lining." *Canadian Geotechnical Journal*, 19(7):91-106.
- Chun, B. ve Shin, Y. (2006). "Active Earth Pressure Acting on the Cylindrical Retaining Wall of a Shaft." *South Korea Ground Environmental Engineering Journal* 7(4):15-24.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2018) "Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler Hakkında Yönetmelik"
- FP McCann LTD. "<https://fpmccann.co.uk/>"
- Fujii ve diğ. (1994). "Experiment and analysis of earth pressure on an axisymmetric shaft in sand." *Proceedings of the International Conference Centrifuge 94*, Syf. 791-796. Balkema, Rotterdam.

- Geotechnical Consulting Group, (2007). *1D0101-G0G00-01004 Crossrail Settlement Estimation Procedure: Box Excavations & Shafts*, Technical report. Crossrail, Londra.
- Kusakabe, O. (1982). "Stability of excavations in soft clay." PhD thesis, University of Cambridge.
- Kusakabe ve diğ. (2008). "A Numerical Study on Ground Displacement and Stress During and After the Installation of Deep Circular Diaphragm Walls and Soil Excavation." *Computers and Geotechnics*, Syf. 791-807.
- Lade ve diğ. (1981). "Modelling of Deep Shafts in Centrifuge Tests." *Proceedings of the 10th Internatioa Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Syf. 683-691. Balkema, Rotterdam.
- Long, M. (2001). "Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations." *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3):203-224.
- Marten, S. ve Bourgeois, E. (2005). "Three-dimensional behaviour of a circular excavation in Nantes, France." *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Syf. 867-872. Balkema, Rotterdam.
- Meftah ve diğ. (2013). "Numerical Study of the Earth Pressure Distribution on Cylindrical Shafts." *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Syf. 283-292. Sakarya Üniversitesi Kültür ve Kongre Merkezi.
- Multibase Holdings PTE LTD "multibase.com.sg/construction"
- Muramatsu, M. ve Abe, Y. (1996). "Considerations in shaft excavation and peripheral ground deformation." *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Syf. 173-178. Balkema, Rotterdam.
- New, B. M. ve Bowers, K. H. (1994). "Ground movement model validation at the Heathrow Express trial tunnel." *Proceedings of the 7th International Symposium, Tunnelling'94*, Syf.301-329. Maden ve Metalurji Enstitüsü, Londra.

- Osman, A. S. ve Bolton, M. D. (2006). "Ground movement predictions for braced excavations in undrained clay." *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(4):465-477.
- Pairaudeau, H. (2011). "Construction and Performance of Shafts." MEng thesis, University of Cambridge.
- Parashar ve diğ. (2007). "Performance Monitoring of Deep Shafts at Changi WRP Project," Singapore. ASCE.
- Powrie, W. ve Bolton, M. D. (1988). "Behaviour of diaphragm walls in clay prior to collapse." *Geotechnique*, 38(2):167-189.
- Prater, E. G. (1977). "An Examination of Some Theories of Earth Pressure on Shaft Linings." *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 14, Syf. 91-106.
- Puller, M. (2003). "*Deep Excavations: A Practical Manual.*" Thomas Telford, London, 2nd Edition.
- Schwamp, T. (2014). "Performance monitoring and numerical modelling of a deep circular excavation." PhD thesis, University of Cambridge.
- Schwamp, T. ve Soga, K. (2015). "Numerical Modeling of a Deep Circular Excavation at Abbey Mills in London." *Geotechnique* 65. Syf. 604-619.
- Simpson, B. ve Powrie, W. (2001). "Embedded retaining walls: theory, practice and understanding." *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Syf. 2505-2524. Balkema, Rotterdam.
- Terzaghi, K. (1943). "*Theoretical Soil Mechanics.*" John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Tobar, T. ve Meguid, M. A. (2011). "Experimental Study of the Earth Pressure Distribution on Cylindrical Shafts." *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11):1121-1125.

Uslu, C. R. (2016). "Şaftlarda yanal toprak basıncının sayısal analizlerle incelenmesi." (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanından elde edildi. (Tez no: 432074)

Westergaard, H. M. (1940). "Plastic State of Stress Around a Deep Well." *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, Volume 27. Syf. 1-5.

Wong, R. C. K. ve Kaiser, P. K. (1988). "Design and Performance Evaluation of Vertical Shafts: Rational Shaft Design Method and Verification of Design Method." *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 25. Syf. 320-337.

Yun, T. R. (2004). "Numerical Study of a Large Diameter Shaft in Old Alluvium." MSc. Thesis, National University of Singapore.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

huseyinunlu94@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Ünlü, H., Berilgen, S. A. (2019). "Farklı Zemin Tiplerinde Şaft Davranışının Nümerik Analizlerle İncelenmesi". UBAK2019, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.

