

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞAFTLARDA YANAL TOPRAK BASINÇLARININ SAYISAL  
ANALİZLERLE İNCELENMESİ**

**CİHAN RAMAZAN USLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
GEOTEKNİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. MEHMET BERİLGİN**

**EŞ DANIŞMAN  
ÖĞR. GÖR. DR. MURAT ERGENOKON SELÇUK**

**İSTANBUL, 2016**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞAFTLARDA YANAL TOPRAK BASINÇLARININ SAYISAL  
ANALİZLERLE İNCELENMESİ**

Cihan Ramazan USLU tarafından hazırlanan tez çalışması 21.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Mehmet BERİLGEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman**

Öğr. Gör. Dr. Murat Ergenokon SELÇUK

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Mehmet BERİLGEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Recep İYİSAN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

---

---

---

## ÖNSÖZ

Düşey şaft kazıları, metro inşaatları, maden ocakları, pompalama istasyonları, köprü ayaklarının temelleri gibi birçok mühendislik uygulamalarında geçici ve kalıcı dayanım yapıları olarak sık sık kullanılmaktadır. Şaftı destekleyen düşey destekleme elemanlarına etkiyen toprak basınçlarının hesaplanmasında, çoğunlukla silindirik şaft durumu gözardı edilerek düzlem şekil değiştirme durumu için çıkarılan klasik toprak basıncı teorileri kullanılmaktadır. Bu teoriler sonsuz uzun bir istinat duvarı için basit göçme yüzeyleri kullanarak yanal toprak basınçlarının hesaplanmasını sağladığından silindirik şaftların düşey destekleme elemanlarına gerçek değerlerden daha yüksek yanal toprak basıncı değerleri vermektedir. Gerçeğinden daha büyük toprak basınçlarına göre tasarlanan şaft destekleme elemanlarının daha büyük kesitlere sahip olacağı ve dolayısı ile ekonomik olmayacağı açıktır. Bu sebeple çok sayıda araştırmacı şaftları destekleyen düşey elemanlara gelen toprak basınçlarını hesaplamak için yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda yeni yaklaşımların kullanılması önermiştir. Diğer yandan günümüzde yaygınlaşan bilgisayar olanakları ile yapılan sayısal analizler şaftların hızlı ve ideal bir şekilde çözümlerinin yapılmasını sağlamıştır. Toprak basıncı teorilerinin hesaplandığı çalışmalar sadece kuvvet dengesine dayalı olarak yapılırken sayısal analizler denge, gerilme-şekil değiştirme davranışı, süreklilik ve sınır koşullarını sağlayarak ideal çözümlerin yapılmasını mümkün kılmıştır. Bu tez çalışmasında dairesel en kesitli şaftlarda düşey iksa elemanlarına gelen toprak basınçlarına etki eden faktörleri göstermek amaçlanmıştır. Bunun için farklı zemin mukavemeti, duvar ve zemin rijitliği göz önüne alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen toprak basınçları literatürde yer alan toprak basıncı teorilerinden elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulguların teorik olarak çalışan, pratikte uygulamalar yapan Geoteknik mühendislerine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca desteği, ilgisi ve sabrı ile benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yol gösteren ve hayatım boyunca kendisini örnek alacağım çok kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet Berilgen'e teşekkürleri ve saygılarımı sunarım. Yine yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli ilgilerini benden esirgemeyen eş danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Murat Ergenokon Selçuk'a teşekkürlerimi sunarım.

Bütün bu zorlukları aşarken hep yanımda olan, bana destek ve güç veren, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili anneme, sevgili ablama, anneanneme, enişteme, en derin ve en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Haziran, 2016

Cihan Ramazan USLU

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
LİTERATÜR ÖZETİ.....	1
1.1 Giriş .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	2
BÖLÜM	
TOPRAK BASINCI TEORİLERİ.....	3
2.1 Rankine Toprak Basıncı Teorisi .....	4
2.2 Sükunet Durumu ( Elastik Denge).....	5
2.2.1 Plastik Denge .....	6
2.3 Aktif Rankine Durumu .....	6
2.4 Coulomb Toprak Basıncı Teorisi.....	8
2.5 Dairesel Enkesitli Şaftlar için Toprak Basıncı Teorileri.....	10
2.5.1 Şaftların Toprak Basınçlarının Hesaplanmasında Limit Denge Yöntemine Dayanan Çalışmalar .....	11
2.5.2 Şaftların Toprak Basınçlarının Hesaplanmasında Kayma Çizgisi Yöntemi'ne dayanan Çalışmalar .....	16
2.6 Toprak Basıncı Teorilerinin ve Analitik Çözümlerin Karşılaştırılması....	20
BÖLÜM 3	
SONLU ELEMANLAR ve ANALİZ ÖZELLİKLERİ .....	24

3.1	Giriş .....	24	
3.2	Sonlu Elamanlar Analizleri.....	24	
3.2.1	Şaft Ortamının Malzeme Modeli.....	31	
BÖLÜM 4			
SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ..... 35			
4.1	Sayısal Analizleri Gerçekleştirilen 6 Ana Model ve 58 Alt Modelin Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması .....	35	
4.2	Plaxis Analizlerinde Düşey Şaft Kazılarında Kazıklı Duvar Arkasına Etkiyen Yanal Kuvvetlerin 6 Ana Model ve 58 Alt Model ile İncelenmesi.....	48	
4.3	Plaxis Analizlerinde Düşey Şaft Kazılarında Kazıklı Duvar Arkasına Etkiyen Yanal Kuvvetlerin 6 Ana Model ve 58 Alt Model ile İncelenmesi ve Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması .....	52	
4.4	Parametrik Çalışma Sonucunda 6 Ana Model ve 58 Alt Model için Kazıklı Duvar Arkasına Gelen Yanal Kuvvetlerin İncelenmesi ve Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması .....	58	
BÖLÜM 5			
SONUÇ ve ÖNERİLER .....			66
KAYNAKLAR .....			68
ÖZGEÇMİŞ .....			70

## SİMGE LİSTESİ

---

a	Şaft yarıçapı
c	Zemin kohezyonu
D	Kazık çapı
$E_{50}$	Sekant modülü
$E_{50}^{ref}$	Standart drenajlı üç eksenli deneyinden elde edilen referans sekant rijitliği
$E_{oed}$	Ödometre deneyinden elde edilen elastisite modülü
$E_{oed}^{ref}$	Ödometre deneyindeki referans tanjant rijitliği
$E_{ur}$	Elastik young modülü
$E_{ur}^{ref}$	Referans gerilme seviyesindeki yükleme boşaltma rijitliği
h	Kazı derinliği
H	Duvar yüksekliği
$K_a$	Aktif toprak basıncı katsayısı
$K_0$	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı
m	Rijitliğin gerilme seviyesine bağlılığının üstel değeri
$m_\sigma$	Normalize toprak basıncı
$n_1$	Normalize akma bölgesi boyutu
$p_{ref}$	Referans gerilme
$P_a$	Aktif bileşke kuvvet
R	Bileşke kuvvet
$R_f$	Deviatorik gerilme
r	Radyal uzunluk
$r_{fs}$	Göçme yüzeyi üzerindeki noktaların radyal koordinatı
q	Deviatorik gerilme
$q_a$	Kayma mukavemetinin asimptotik değeri
$q_f$	Maksimum deviatorik gerilme
W	ABC kamasının ağırlığı
$\alpha$	Göçme yüzeyi eğimi
$\alpha_g$	İstinat duvarı arka yüzeyinin yatay düzlem ile yaptığı açı
$\beta$	Kayan zemin kütesine etkiyen reaksiyon kuvvetinin normal ile yaptığı açı
$\beta_g$	Duvar arkasındaki zeminin yatayla yaptığı açı
$\delta$	Duvar ile zemin daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı
$\phi$	Kayma mukavemeti açısı
$\phi^*$	Azaltılmış kayma mukavemeti açısı
$\lambda$	Teğetsel gerilme katsayısı
$\sigma_1$	Büyük asal gerilme

$\sigma_3$	Küçük asal gerilme
$\sigma_{ref}$	Referans gerilme
$\sigma_0$	Sükunette durumunda yanıl gerilme
$\sigma_h$	Yanal gerilme
$\sigma_v$	Düşey gerilme
$\sigma_r$	Radyal gerilme
$\sigma_\theta$	Teğetsel gerilme
$\varepsilon_1$	Düşey şekil değıştirme
$\gamma$	Zeminin birim hacim ağırlığı
$\Delta L$	Duvarın deplasman değeri
$\nu$	Zeminin poisson oranı



## KISALTMA LİSTESİ

---

SE	Sonlu Eleman
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
2B	İki Boyut
HS	Pekleşen Zemin



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İki boyutlu koşullarda z derinliğinde zemin elemanı .....	4
Şekil 2.2 Sükunetteki yatay toprak itkisi .....	5
Şekil 2.3 Aktif Rankine durumu .....	7
Şekil 2.4 Granüler zeminlerde istinat duvarı arkasında aktif durum oluşması ve yanal zemin basınçlarının dağılımı .....	8
Şekil 2.5 Granüler zeminlerde aktif durum için Coulomb kama teorisi .....	9
Şekil 2.6 Terzaghi'nin ile Tobar ve Meguid (2010) hesaplanan toprak basınçlarının karşılaştırılması .....	13
Şekil 2.7 Prater tarafından kabul edilen göçme yüzeyi .....	14
Şekil 2.8 Şürşarj yükü bulunmayan kohezyonsuz zeminde düşey şaft yüzeylerine etkiyen yanal toprak basınçları dağılımları .....	15
Şekil 2.9 Eksenel Simetrik Denklem Koşulda Silindirik Koordinat Sistemi .....	16
Şekil 2.10 Farklı $\lambda$ değerleri ve Rankine'nin çözümü için elde edilen toprak basınçlarının şaft yarıçapıyla değişimi .....	19
Şekil 2.11 Rankine, Coulomb, Berezantzev ve Liu ve diğerleri toprak basıncı teorilerinin karşılaştırılması .....	22
Şekil 3.1 Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı .....	30
Şekil 3.2 Asal gerilme yüzeyi içerisindeki pekleşen zemin modeli .....	31
Şekil 3.3 Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi .....	32
Şekil 4.1 $\phi=20^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	36
Şekil 4.2 $\phi=25^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	38
Şekil 4.3 $\phi=30^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	40
Şekil 4.4 $\phi=35^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	42
Şekil 4.5 $\phi=40^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	44
Şekil 4.6 $\phi=45^0$ için plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması .....	46
Şekil 4.7 $\phi=20^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri .....	48
Şekil 4.8 $\phi=25^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri .....	49

Şekil 4.9	$\phi=30^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri.....	49
Şekil 4.10	$\phi=35^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri.....	50
Şekil 4.11	$\phi=40^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri.....	50
Şekil 4.12	$\phi=45^0$ için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri.....	51
Şekil 4.13	$\phi=20^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması.....	52
Şekil 4.14	$\phi=25^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.15	$\phi=30^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması.....	54
Şekil 4.16	$\phi=35^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.17	$\phi=40^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması boyutlu.....	56
Şekil 4.18	$\phi=45^0$ için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerleri ile karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.19	$\phi=20^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.20	$\phi=25^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.21	$\phi=30^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.22	$\phi=35^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.23	$\phi=40^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.24	$\phi=45^0$ için rijitlik parametreleri düşürülmüş shaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması.....	64

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1 Zemin cinsine göre $K_0$ değerleri .....	6
Çizelge 2.2 Aktif durum oluşması için gereken duvar hareketleri.....	7
Çizelge 2.3 Duvar malzemesi ile zemin daneleri arasındaki sürtünme açısı .....	10
Çizelge 3.1 Zeminin kayma mukavemeti, rijitlik ve fiziksel özellikleri .....	25
Çizelge 3.2 Kazıkların çapı, rijitlik parametreleri ve eşdeğer perde kalınlığı.....	25
Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 alt model .....	26

# ŞAFTLARDA YANAL TOPRAK BASINÇLARININ SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

Cihan Ramazan USLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN

Eş Danışman: Öğr. Gör. Dr. Murat Ergenokon SELÇUK

Düşey şaft kazıları, metro inşaatları, maden ocakları, pompalama istasyonları, köprü ayaklarının temelleri gibi birçok mühendislik uygulamalarında geçici ve kalıcı dayanım yapıları olarak sık sık kullanılmaktadır. Şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarını hesaplamak için basit ve yaygın olarak bilinmesi nedeni ile günümüzde çoğunlukla klasik toprak basıncı teorileri tercih edilmektedir. Bu teoriler düzlem gerilme koşulları altında bulunan sonsuz uzunluktaki duvarlar için geliştirilmiş olduklarından şaft kazıları için oldukça yüksek basınç değerleri vermektedirler. Bu sebeple dairesel veya elips kesitli şaftlarda yanall toprak basınçlarını plastik denge ile belirlemek için konik göçme yüzeyine dayalı bir çözüme başvurmak gerekmektedir. Bu çözüm yöntemleri karmaşık olduğu ve yaygın olarak bilinmediğinden günümüzde mühendisler çoğunlukla ticari paketlerin kullanıldığı sayısal analiz yöntemlerine başvurmaktadır. Sayısal analizler denge, uygunluk, malzeme bünye davranışı ve sınır koşullarını göz önüne alarak plastik dengeye dayalı yöntemlere göre daha ideal çözüme ulaşılmasını sağlasa da bilinçli kullanılmadığı takdirde gerçekçi olmayan çözümler elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında dairesel en kesitli şaftlarda düşey iksa elemanlarına gelen toprak basınçlarına etki eden faktörleri göstermek amaçlanmıştır. Bunun için farklı zemin mukavemeti, duvar ve zemin rijitliği göz önüne alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden elde edilen toprak basınçları literatürde yer alan toprak basıncı teorilerinden elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda sayısal analizlerde duvar rijitliğinin önemli bir etken olduğu ve şaftlarda oluşan toprak basıncı sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Düşey şaftlar, Plaxis 2D, teğetsel gerilme katsayısı, yanal toprak basınçları,



**NUMERICAL ANALYSIS OF LATERAL EARTH PRESSURE IN  
THE SHAFTS**

Cihan Ramazan USLU

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN

Co-Adviser: Dr. Murat Ergenokon SELÇUK

Vertical shaft excavations have been widely used in engineering applications such as metro systems, mines, pumping stations, bridge pier foundations, etc. for temporary and permanent retaining structures. Earth pressure acting on the shaft wall are generally calculated by classical earth pressure theories because of the simplicity and common-usage. Because the theories were developed for infinite walls under plane stress conditions, these theories usually calculate high pressure values for shaft excavations. Hence, conical collapse surface determination should be used in order to define lateral earth pressures by plastic equilibrium for circular or elliptical shafts. Because of the complexity of these solutions, engineers mostly use commercial software packages developed for numerical analysis methods. While numerical methods provide more favorable results than plastic equilibrium methods based on equilibrium, continuity, material constitutive behavior and boundary conditions, unrealistic solutions may obtain unless they use consciously. In this study, it is aimed to present factors affecting earth pressures on vertical retaining wall members of circular shafts. To achieve this, numerical analyses performed for different strength parameters, wall and soil stiffness, Moreover, the earth pressure results obtained from analyses are compared to classic earth pressure theories. In conclusion, it is determined in numerical analyses that wall stiffness is an important factor and affects earth pressure distribution on shafts significantly.

**Keywords:** Vertical shafts, Plaxis 2D, tangential stress coefficient, lateral earth pressure



---

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

### LİTERATÜR ÖZETİ

#### 1.1 Giriş

Düşey shaft kazıları, metro inşaatları, maden ocakları, pompalama istasyonları, köprü ayaklarının temelleri gibi birçok mühendislik uygulamalarında geçici ve kalıcı dayanım yapıları olarak sık sık kullanılmaktadır. Düşey shaftların desteklenmesi için genellikle betonarme kazık veya diyafram perde şeklinde oluşturulan düşey destekleme ile halka kuşaklarla oluşturulan yatay desteklemeden oluşan bir iksa sistemi tercih edilmektedir. Bu şekilde oluşturulan shaft iksa sisteminin tasarımı için etkiyen toprak basınçlarının belirlenmesine ihtiyaç vardır. İstinat yapılarına etkiyen toprak basınçlarının belirlenmesi gereksinimi toprak basıncı teorilerinin doğmasına yol açmıştır. Güvenli bir duvar inşa edebilmek için ona arkasındaki geri dolgudan etkiyen toprak basınçlarının hesaplanmasını sağlayan ilk teorik çalışma 18. yy'da Coulomb [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. Rankine [2], Coulomb Toprak Basıncı teorisini basitleştirerek mühendislerin istinat yapılarının tasarımını daha kolay yapılmasını sağlamıştır. Her iki teoride de toprak basınçları düzlem şekil değiştirme durumu gözönüne alınarak istinat yapısının hareket etmesi ile arkasında oluşan göçme durumu başka bir deyişle plastik denge oluşması dolayısı ile istinat yapısına gelen yanal toprak basıncının hesaplanması düşünülmüştür. İstinat yapısı arkasında oluşan göçme durumu için Coulomb Toprak Basıncı Teorsisi en büyük toprak basıncını sağlayan kayma (göçme) kamasını göz önüne alırken Rankine [2] toprak basıncı teorisinde bu kamanın yatayla  $45^\circ + \phi/2$  açı yaptığı kabul edilmektedir. İstinat yapılarının düzlem şekil değiştirme durumunda olmadığı silindirik ve eliptik shaftlar için bu teorilerin geçerli olmadığı açıktır.

Shaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarını belirlemek adına plastik denge durumu için konik göçme yüzeyi kabulü ile toprak basınçlarının hesaplandığı teoriler geliştirilmiştir.



Berezantev [3] ile başlayan ilk silindirik şaft toprak basıncı teorisi daha sonra başka araştırmacılar tarafından daha ideal sonuçların elde edilebildiği teorilere ulaşılmasını sağlamıştır. Bugün silindirik şaftlara etkiyen toprak basınçlarının belirlenmesinde Liu ve diğerleri [4], Cheng ve diğerleri [5] tarafından geliştirilen silindirik şaft toprak basıncı teorileri kullanılabilir. Bu teorilerin ayrıntılı açıklamaları Bölüm 2.4'de verilmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasında dairesel en kesitli şaftlarda düşey iksa elemanlarına gelen toprak basınçlarına etki eden faktörleri göstermek amaçlanmıştır. Bunun için farklı zemin mukavemeti parametreleri, duvar ve zemin rijitliği göz önüne alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden elde edilen toprak basınçları literatürde yer alan toprak basıncı teorilerinden elde edilenler ile karşılaştırılmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Dairesel şaftlara etkiyen toprak basınçlarına etki eden faktörlerin bilinmesi bu yapıların güvenli ve ekonomik tasarımı için gereklidir. Düşey şaftlara etkiyen toprak basınçlarına etki eden faktörler iki boyutlu (2B) sonlu elemanlar (SE) analizleri ile belirlenebilir

## BÖLÜM 2

### TOPRAK BASINCI TEORİLERİ

Aktif toprak basıncı literatürde kapsamlı bir şekilde araştırılmış klasik bir geoteknik problemidir. Zemin ortamı sükûnet durumunda iken elastik dengededir. Uygulanan düşey yükler altında meydana gelen yanal gerilmeler ve bunların derinlikle değişimi elastisite teorisi kullanılarak bulunabilmektedir [6]. Dayanma yapısı kazı yönüne doğru hareket etmeye başladığında zemin elastik dengeden plastik denge haline geçmeye başlar ve bunun sonucunda da aktif toprak basıncı oluşur.

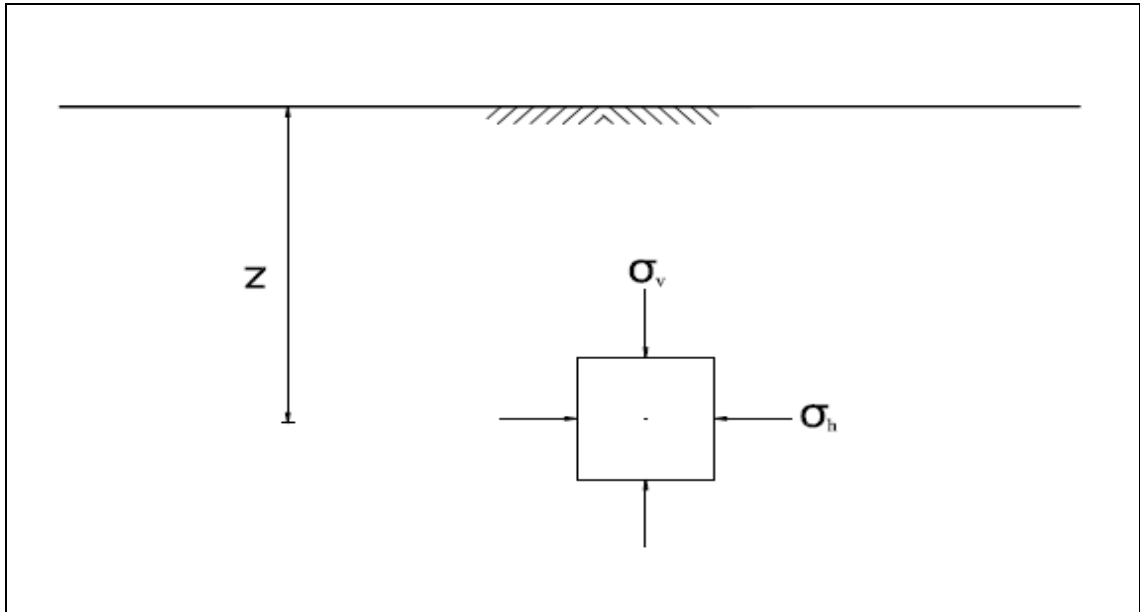
Coulomb [1] ve Rankine [2] iki boyutlu (2B) toprak basınçları teorilerini oluştururken sırasıyla limit denge ve kayma çizgisi yöntemlerini kullanmışlardır. Her iki yöntemde plastik dengeyi baz almasına karşın sonucun elde edilmesi yolunda farklılık göstermektedir [7]. Limit denge yöntemi uygun bir göçme yüzeyi kabulü yapar ve toprak basıncını elde etmek için temel denge eşitliklerinden faydalanır. Kayma çizgisi yöntemi, göçme sınırında olan zemin kütlesi kabulü yapar ve çözüm plastik dengeyi baz alan bir takım diferansiyel denklemler aracılığıyla elde edilir.

Dairesel veya elips en kesite sahip shaft duvarlarına etkiyen toprak basınçları değerleri incelenirken, düzlem gerilme kabulü yapan klasik toprak basınçları teorileri kullanıldığında gerçekçi olmayan toprak basınçları elde edilmektedir. Bu nedenden dolayı dairesel en kesitli shaft duvarlarına etkiyen toprak basınçları farklı araştırmacıların ilgi alanına girmiş ve klasik toprak basıncı teorilerini yeni model problemler için yeni parametreler ekleyerek ve yeni kabuller yaparak geliştirmelerini gerektirmiştir. Zemin içindeki bir noktada ortaya çıkan gerilmeleri üç boyutlu bir ortamda incelemek için daha gelişmiş yöntemlerin (sonlu elemanlar yöntemi gibi) kullanılması mümkündür, fakat genellikle zemin özelliklerinin gerçeğe yakın seçiminde karşılaşılan güçlükler

hesap yönteminden daha fazla sonuçları etkilediği için, uygulamada elastisite teorisine dayanan iki boyutlu (2B) çözümler daha çok kabul görmektedir [6]. Literatür araştırması olarak hazırlanan bu bölümde, klasik toprak basıncı teorilerine değinilecek ve dairesel en kesitli şaft duvarı uygulamalarının artmasıyla beraber bir gereksinim olarak ortaya çıkan, analitik çözümler ile ifade edilen yeni toprak basıncı çözümlerini incelenecek ve son olarak da bu teoriler birbirleriyle karşılaştırılacaktır.

## 2.1 Rankine Toprak Basıncı Teorisi

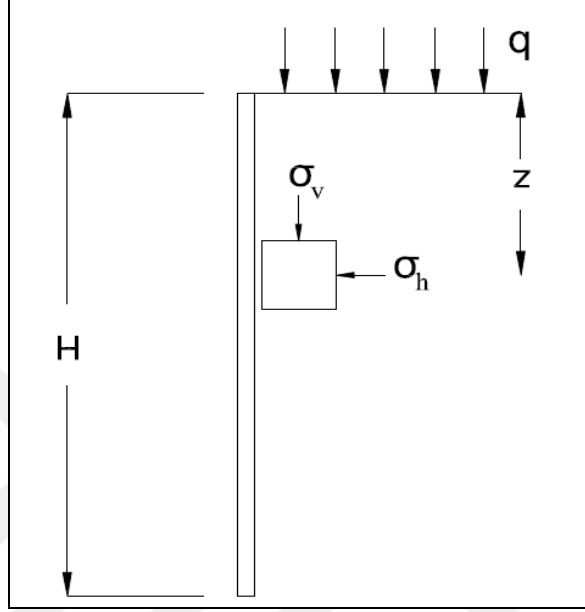
Rankine [2] düzlem gerilme koşulları altında iki boyutlu (2B) toprak basıncı teorisini ortaya koyarken kayma çizgisi analizi yöntemini kullanmıştır. Başlangıçta düzlem gerilme koşulları altında kohezyonsuz zeminler için oluşturulan Rankine Teorisi, daha sonraları kohezyonlu zeminler ve diğer durumlar için geliştirilmiştir [8]. Rankine Teorisi, zemin ortamının plastik denge durumuna ulaştığı andaki gerilmeleri dikkate alır. Zemin ortamının her noktasında deplasmandan dolayı kırılma varsa böyle bir duruma plastik denge denilir. İki boyutlu koşullarda, Şekil 2.1 'de örnek verildiği üzere, yarı sonsuz ortamda  $z$  derinliğindeki bir zemin elemanı baz alındığında, zemin elemanının yatay ve düşey yüzeylerinde kayma gerilmeleri sıfır olup, elemana sadece asal gerilmeler etkimektedir. Yarı sonsuz ortamda teorik olarak iki farklı durum söz konusu olabilir.



Şekil 2.1 İki boyutlu koşullarda  $z$  derinliğinde zemin elemanı [9]

## 2.2 Sükûnet Durumu ( Elastik Denge)

Zemin ortamında herhangi bir deformasyonun olmadığı duruma sükûnet durumu denilir. Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi düşey ve sürtünmesiz bir eleman zemine sokulur ve yer değiştirme olmaksızın önü boşaltılırsa bu elemana etkiyen yanıl gerilmeler sükûnetteki yanıl zemin gerilmesi adını alır [10].



Şekil 2.2 Sükûnetteki yatay toprak itkisi [10]

Sükûnet durumunda, yanıl gerilme değeri

$$\sigma_0 = \sigma_h = K_0 \sigma_v \quad (2.1)$$

Burada;

$\sigma_0$  = Sükûnet durumunda yanıl gerilme

$\sigma_h$  = Yanıl gerilme

$\sigma_v$  = Düşey gerilme

$K_0$  = Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı

Sükûnetteki toprak basıncı

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2.2)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2.3)$$

$\nu$ : Zeminin poisson oranı

$\phi$  = Kayma mukavemeti açısı

Bazı zemin tipleri için tipik  $K_0$  değerleri Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Zemin cinsine göre tipik  $K_0$  değerleri [11]

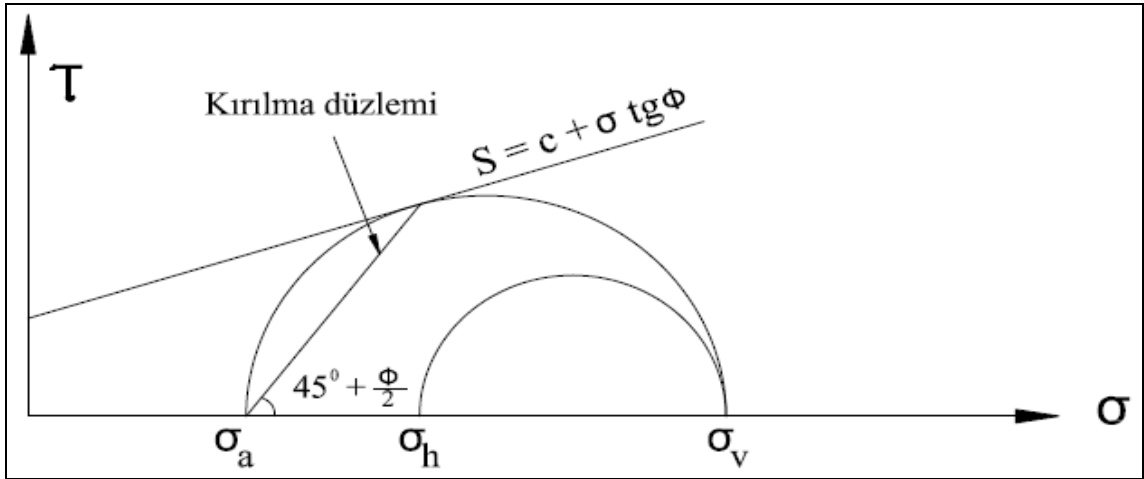
Zemin Cinsi	$K_0$
Yumuşak kil	0,6
Katı kil	0,5
Gevşek kum ve çakıl	0,6
Sıkı kum ve çakıl	0,4
Aşırı konsolide kil	0,6 – 1
Sıkıştırılmış yarı doymuş	0,4 – 0,7

### 2.2.1 Plastik Denge

Yarım sonsuz zemin ortamının elastik dengeden plastik durumuna geçilebilmesi için zemin ortamının sıkışma veya genişlemeye maruz kalması yani zemin ortamının deplasman sonucunda her noktasında kırılma meydana gelmesi gerekmektedir [9]. Plastik denge koşulu altında zeminin genişlemeye tabi tutulması ile meydana gelen aktif durum aşağıda açıklanmaktadır.

### 2.3 Aktif Rankine Durumu

Şekil 2.3 'de gösterilen duvar yanal olarak dışa doğru ötelenir veya alt ucu etrafında öne doğru dönerse gösterilen zemin elementinde düşey gerilmeler değişmezken yanal gerilmeler giderek azalır. İncelenen noktadaki düşey gerilmeye göre giderek azalan yanal gerilmeler en az düşük değerine ulaştığında Şekil 2.3 'de gösterildiği gibi zeminde göçme oluşur ve ulaşılan bu değere aktif toprak basıncı adı verilmektedir [10].



Şekil 2. 3 Aktif Rankine durumu [10]

Zemin malzemesinin aktif duruma ulaşması için duvar hareketi değerleri Çizelge 2.1 'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Aktif durum oluşması için gereken duvar hareketleri [11]

Zemin Türü	$\Delta L/H$
Gevşek kum	0,001- 0,02
Sıkı kum	0,00005 – 0,001
Yumuşak kil	0,02
Sert kil	0,01

$\Delta L$  = Duvarın deplasman değeri

H = Duvar yüksekliği

Aktif durumda, düşey ve yanal gerilmeler arasında bağıntılar;

$$\sigma_h = K_a \sigma_v \quad (2.4)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (2.5)$$

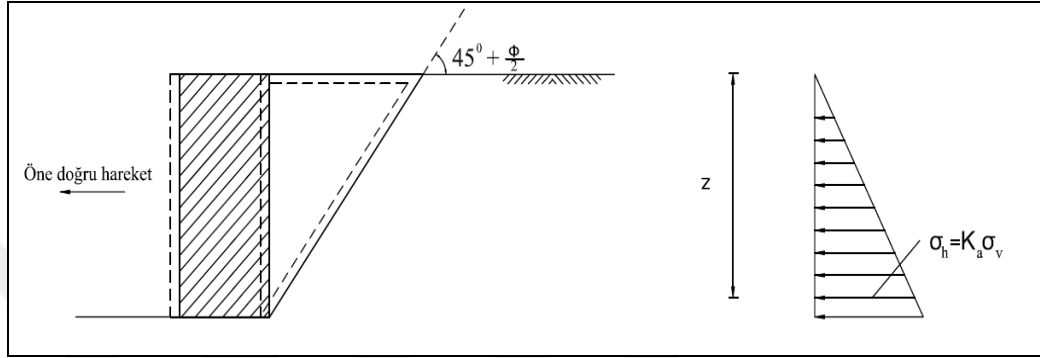
$K_a$ : Aktif toprak basıncı katsayısı

$\sigma_v =$  Düşey gerilme

$\phi =$  Kayma mukavemeti açısı değeri

$\sigma_h =$  Yanal gerilme

Bu durumda duvara Şekil 2.4 'de görüldüğü gibi duvara aktif yanal toprak basınçları etkir. Denklem 2.1 'den anlaşılacağı üzere aktif yanal toprak basıncı dağılımı derinlikle doğrusal olarak artmaktadır.



Şekil 2.4 Granüler zeminlerde istinat duvarı arkasında aktif durum oluşturulması ve yanal zemin basınçlarının dağılımı [9]

Aktif durumda, aktif yanal toprak basınçları düşey yüzlü duvar arkasına yanal olarak etkir. Diğer bir deyişle duvar arkası ile zemin arasında bir sürtünmenin olmadığı ve duvar arka yüzünün pürüzsüz olduğu kabul edilir. Fakat bütün dayanma yapılarının malzeme özelliklerinden dolayı yüzeyleri pürüzlüdür. Duvar yüzeyinin pürüzlü olması zemine daha çok deplasman toleransı kazandırdığı için aktif toprak basıncı azalmakta ve kendi teorisi özelinde daha küçük toprak basınçları elde ederek güvensiz tarafta kalmaktadır [13].

## 2.4 Coulomb Toprak Basıncı Teorisi

Coulomb [1] iki boyutlu (2B) toprak basınçları teorisini oluştururken limit denge analiz yöntemini kullanmıştır. Coulomb [1], düşey dayanma duvarı öne doğru veya arkaya doğru hareket ederken, duvar arkasında mobilize olan zemin kütesinin dikkate almıştır [8]. Granüler zeminlerde kayan zemin kütlesi üçgen biçimlidir ve bu zemin kütlesi kayma düzlemi üzerinde kayar. Coulomb Toprak Basıncı Teorisinin en önemli kabullerinden birisi duvar ile zemin arasında sürtünmeyi dikkate almasıdır. Normal koşullar altında da duvar arkası pürüzlü olup, duvar ile zemin arasında sürtünme vardır.





$\alpha_g$ : İstinat duvarı arka yüzünün yatay düzlem ile yaptığı açı

$\phi$  = Kayma mukavemeti açısı

• $\delta$ : Duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı

• $\beta_g$ : Duvar arkasındaki zeminin yatay ile yaptığı açı

$\alpha=90^0$ ,  $\delta=0$ ,  $\beta=0$  için denklem 2.7’de verilen aktif durum verilen Rankine aktif toprak basıncı katsayısına eşit olur.

Duvar arkasında duvar malzemesi ile zemin arasındaki sürtünme açısı değerleri Çizelge 2.3 ’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Duvar malzemesi ile zemin daneleri arasındaki sürtünme açısı [10]

	$\delta(^0)$
Temiz çakıl, çakıl kum karışımı, iyi derecelenmiş kaya dolgu	22 – 26
Temiz kum, siltli kum-çakıl karışımı, tek boyutlu sağlam kaya	17 – 22
Siltli kum, çakıl veya siltli yada kille karışmış kum	17
İnce kumlu silt, plastik olmayan silt	14

## 2.5 Dairesel Enkesitli Şaftlar için Toprak Basıncı Teorileri

Dairesel en kesitli shaft duvarlarına etkiyen aktif toprak basıncını belirlemek için kullanılan yöntemler genellikle üç gruba ayrılır ve bu gruplar, limit denge yöntemi, limit analiz ve kayma çizgisi yöntemleridir[4].

Zeminde açılan silindirik bir kazı çukuru çevresinde gerilme durumunu ilk olarak, kaplamasız küçük bir sondaj deliği çevresindeki gerilmeyi mobilize olmuş zemin kamasının dengesini baz alarak Westergaard[12] incelemiştir.

Birçok farklı araştırmacı, kohezyonsuz ortamda düşey şaft duvarlarına etkiyen aktif toprak basınçlarını incelemek için literatürde daha önceden yer alan çalışmalarını geliştirerek kullanma çabası içinde olmuşlardır. Bu araştırmacıların başlıcaları, analitik çözümler öneren Westergaard [12] ve Terzaghi [13], limit denge yöntemini kullanan Prater [14] ve kayma çizgisi yöntemini kullanan Berezantzev [3], Cheng ve Hu [15], Cheng ve diğerleri [5], Liu ve Wang [16], Liu ve diğerleri [4]'dir. Temelinde aynı olan Coulomb ve Rankine çözümleri kullanılarak hesaplanan toprak basınçlarının tersine, aksel simetri koşulları altında elde edilen dağılımlar seçilen yöntemle bağlı olarak birbirinden çok farklı çıkabilmektedir [7]. Bu durumun ana sebebi, klasik toprak basıncı teorilerinde kabul gören göçme yüzeylerinin dairesel en kesitli şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarının elde edilmesinde kullanılmasının olanaksız olmasıdır. Şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarının hesaplamasında, şaftların geometrik özelliklerinden dolayı limit denge ve plastik dengeye dayalı konik göçme yüzeyi tercih edilmektedir. Konik göçme yüzeyi kabulü yapıldığında, modelimiz artık düzlem gerilme koşullarını sağlamamaktadır. Çözüm için aksel simetrik koşullar altındaki model silindirik koordinat sistemine yerleştirildiğinde konik göçme yüzeyine Şekil 2.9 'da görüldüğü üzere düşey gerilme ( $\sigma_v$ ), radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ ) ortaya çıkmaktadır. Teorik olarak, teğetsel gerilmenin ( $\sigma_\theta$ ), büyük asal gerilmeye ( $\sigma_1$ ) oranına, teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) kabulü yapılmıştır. Başlarda birçok araştırmacı, teğetsel gerilme katsayısı için ( $\lambda$ ), Haar & von Karman hipotezini benimsemiş ve radyal gerilmeyi ( $\sigma_r$ ), büyük asal gerilmeye ( $\sigma_1$ ) eşit alarak 1 olarak benimsemiştir [4]. Daha sonra farklı araştırmacılar tarafından teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) için aktif toprak basıncı katsayısı ( $K_a$ ) ve sükûnetteki toprak basıncı ( $K_0$ ) kabulleri yapmıştır.

### **2.5.1 Şaftların Toprak Basınçlarının Hesaplanmasında Limit Denge Yöntemine Dayanan Çalışmalar**

Terzaghi[13], Westergaard[12] teorisini kaplamalı şaftlar için geliştirerek granüler zeminlerde açılmış düşey şaft yüzeylerine etkiyen toprak basınçlarını hesaplayabilen yeni bir çözüm geliştirmiştir. Elastik bölge içerisinde  $\sigma_\theta = \sigma_v = \sigma_1$  ve  $\sigma_r = \sigma_3$  kabulleri yaparak ve Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanarak mobilize olmuş zemin kütlelerinin dengesini veren bir denklem olarak ortaya koymuştur[7]. Terzaghi, şaft kaplamasına etkiyen yanal toprak basıncı için 2.8, 2.9 ve 2.10 numaralı denklemleri elde etmiştir. Terzaghi[13] çözümünde sıfır olmayan kesme gerilmelerinin etkisini dikkate alabilmek

için denklem 2.10'da de belirtildiği gibi azaltılmış kayma mukavemeti açısı ( $\phi^*$ ) değeri kullanılmasını önermektedir.

$$m_\sigma = \frac{h}{a} \frac{N_\phi + 1}{2N_\phi} \frac{N_\phi - (N_\phi - 2)n_1^2}{N_\phi + n_1^{N_\phi+1}} \quad (2.8)$$

$$\tan \phi^* = \frac{n_1^2 - 1}{m_\sigma n_1^{N_\phi}} - \frac{2N_\phi}{N_\phi + 1} \frac{a}{h} \frac{n_1^{N_\phi+1} - 1}{n_1^{N_\phi}} \quad (2.9)$$

$$\phi^* = \phi - 5 \quad (2.10)$$

$m_\sigma = p / \gamma$ , normalize toprak basıncı

$n_1 = r / a$ , normalize akma bölgesi boyutu

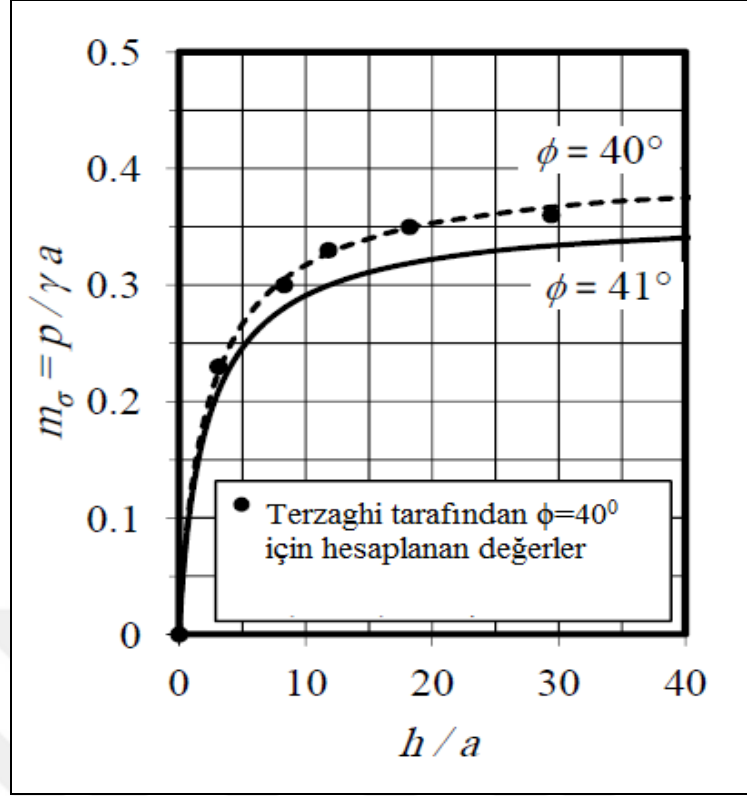
$N_\phi = \tan^2(45 + \phi^*/2)$

$a$  = shaft yarıçapı

$h$  = kazı derinliği

$r$  = radyal uzunluk

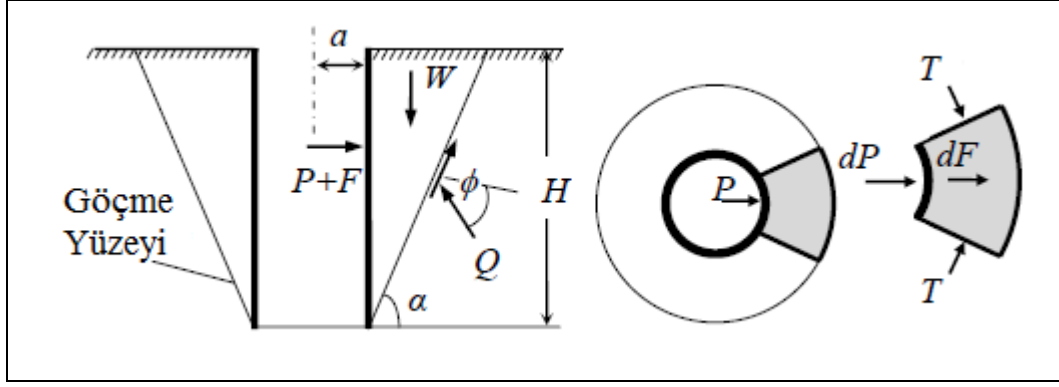
Tobar ve Megiud [7] dairesel shaft yüzeylerine etkiyen toprak basınçlarının hesaplanmasında geçmişten günümüze kadar farklı araştırmacılar tarafından önerilen analitik çözümler, kayma çizgisi ve limit denge yöntemini baz alan birçok teorik çalışmaları ve bununla birlikte deneysel çalışmaları birleştiren shaftlara etkiyen toprak basıncı konusunda kapsamlı bir çalışma ortaya koymuşlardır. Şekil 2.6 'da Tobar ve Megiud [7] tarafından yapılan deneysel çalışmalara dayanarak  $\phi = 40^\circ$  ve  $41^\circ$  için normalize derinlik ve normalize toprak basıncı eğrileri Terzaghi'nin denklem 2.8'de önerilen eşitlikle elde edilen ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.6 Terzaghi'nin ile Tobar ve Meguid (2010) toprak basınçlarının karşılaştırması[7]

Şekil 2.6'da, Tobar ve Meguid [7] tarafından hesaplanan toprak basınçlarının Terzaghi yaklaşımına çok yakın sonuç verdiği görülmektedir. Kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değerinin  $40^\circ$ 'den  $41^\circ$  dereceye yükseltilmesi normalize yanal toprak basıncı değerinde yaklaşık %9'luk bir düşüşe neden olmaktadır. Bu yanal toprak basıncı değerleri Denklem 2.10 'da verilen azaltılmış kayma mukavemeti açısı ( $\phi^*$ ) kullanılarak elde edilmiştir.

Prater [14] konik göçme yüzeyi kabulü yaparak eksenel simetri koşulları için Coulomb toprak basıncı teorsini benimseyerek şaftlardaki yanal toprak basınçlarını hesaplayan bir çözüm geliştirmiştir. Prater analizine Şekil 2.7 'de görülen teğetsel T, ve radyal, F kuvvetlerini tanımlamıştır.



Şekil 2.7 Prater tarafından kabul edilen göçme yüzeyi [14]

Prater [14] tarafından Teğetsel T kuvveti, radyal düzlemdeki  $\lambda = \sigma_\theta / \sigma_v$  olarak tanımlanan teğetsel gerilme oranının bir fonksiyonu olarak dikkate alınmaktadır. Teğetsel gerilme oranı ( $\lambda$ ), aktif toprak basıncı katsayısı ( $K_a$ ) ve sükûnetteki toprak basıncı katsayısı ( $K_0$ ) arasında yer alması gereken ve Terzaghi'nin kabulünde olduğu gibi herhangi birine eşit olmayan belirleyici bir parametredir. Şaft çevresinin birim uzunluğuna etkiyen toprak basıncı,  $P_1$  denklem 2.11 'de, silindirik şaftlar için verilen toprak basıncı katsayısı,  $K_r$  denklem 2.12 'de verilmektedir.

$$P_1 = 0.5K_r \gamma h^2 \quad (2.11)$$

$$K_r = \frac{h}{a \tan \alpha} \tan(\alpha + \beta) \left( \frac{1}{3 \tan \alpha} - \frac{a}{h} \right) - \frac{\lambda}{3} \quad (2.12)$$

$a$  = şaft yarıçapı

$h$  = kazı derinliği

$\alpha$  = göçme yüzeyi eğimi

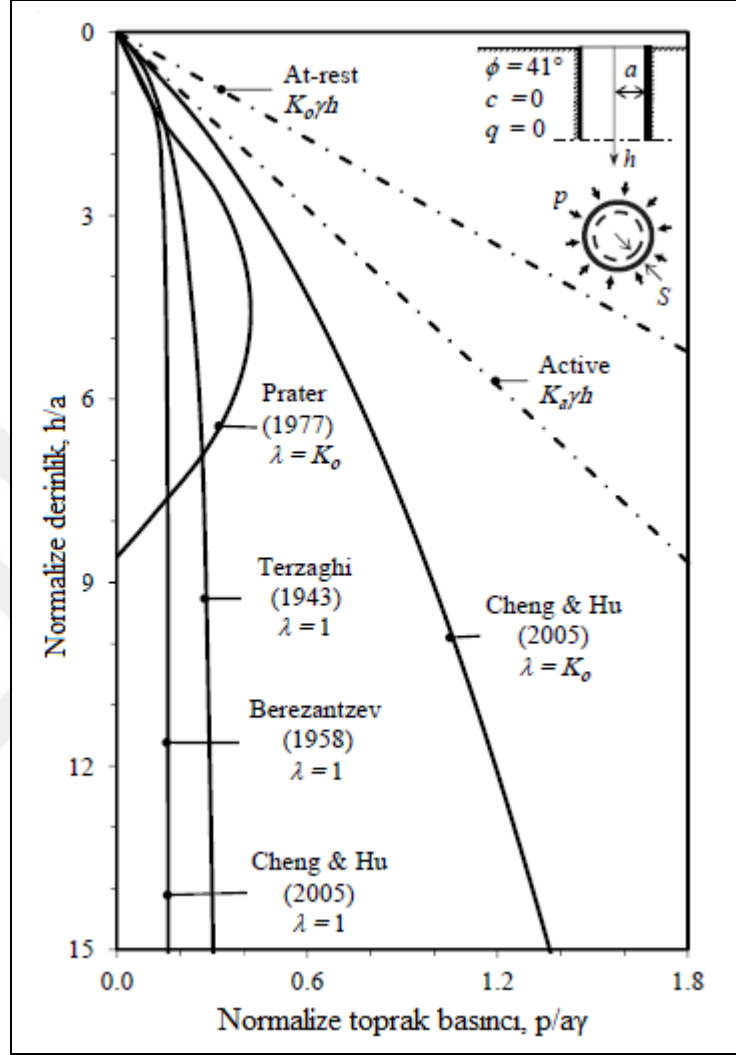
$\beta$  = Normal ile kayan zemin kütlelerine  $Q$  reaksiyon kuvveti arasındaki açı (aktif durum için  $\beta = -\phi$ )

$\lambda$  = teğetsel gerilme katsayısı

Prater[14]  $\lambda$  katsayısı için 1 ve  $K_0 = 1 - \sin \phi$  değerlerini önermiştir.

Şaft düşey iksa elemanlarının tasarımı için elde edilen en yüksek yanal toprak basıncı değeri kullanılmalıdır [14].

Şekil 2.8 'de kayma mukavemeti açısı  $41^\circ$  olan kohezyosuz bir zeminde yer alan  $h$ , yüksekliğine ve  $a$ , şaft yarıçapına ait bir şaft düşey iksa elemanı için bir çok araştırmacılar tarafından hesaplanan toprak basınçları dağılımları verilmiştir.

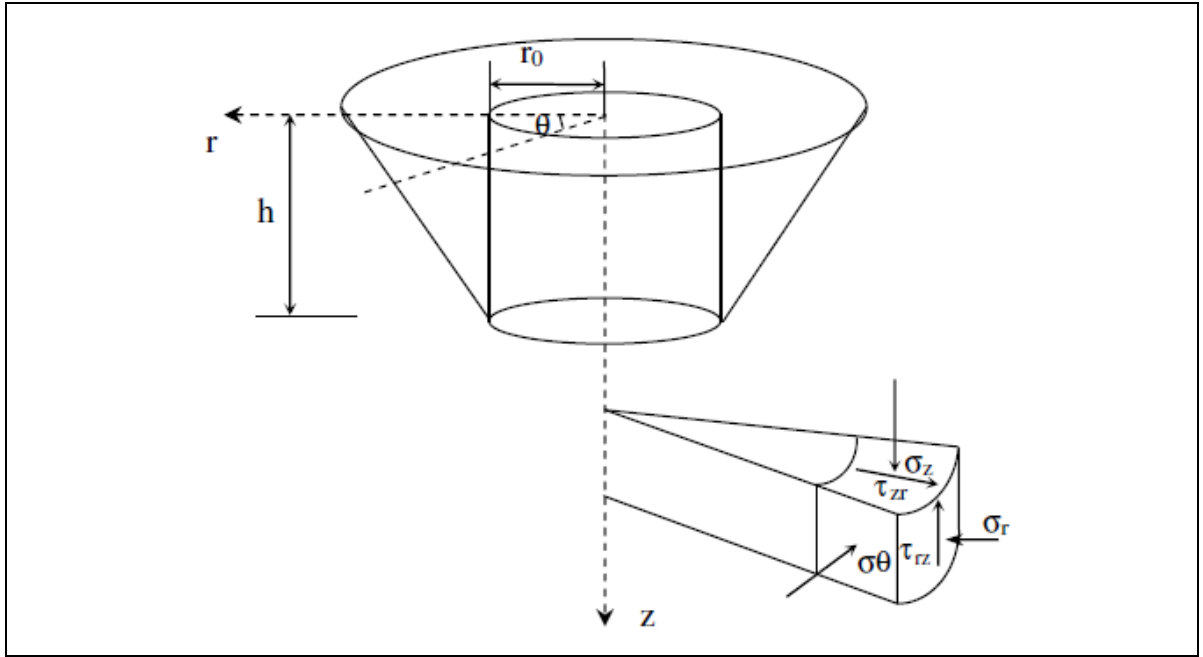


Şekil 2.8 Şürşarj yükü bulunmayan kohezyosuz zeminde düşey şaft yüzeylerine etkiyen yanıl toprak basınçları [7]

Şekil 2.8'de Terzaghi tarafından hesaplanan toprak basıncı dağılımı genellikle derinlikle artmaktadır ve şaft yarıçapının yaklaşık 5 katı derinliğinde, normalize toprak basıncı değerinin %25 değerine ulaşılmaktadır.  $h/a$  değerinin beşin üstüne çıkışıyla, artış çok az meydana gelmektedir ve  $h/a$  değeri yaklaşık 15 olduğunda normalize toprak basıncı değerinin %30'una ulaşmaktadır.

## 2.5.2 Şaftların Toprak Basınçlarının Hesaplanmasında Kayma Çizgisi Yöntemi'ne dayanan Çalışmalar

Berezantzev [3], arkasında geri dolgu ve üzerinde sürşarj yükü bulunmayan şaft duvarına etkiyen yanıl toprak basıncı değerlerini hesaplayabilmek için kayma çizgisi yöntemini geliştirmiştir. Berezantzev'in [3] kullandığı ekşnel simetrik denklem koşuluna ait silindirik koordinat sistemi Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Ekşnel simetrik denklem koşulda silindirik koordinat sistemi [4]

Berezantzev analizinde çevresel gerilmenin büyük ya da küçük asal gerilmeye eşit kabul edildiği Haar&Von Karman hipotezini kullanmıştır [3]. Berezantzev tarafından, plastik bölgede teğetsel ve düşey gerilmenin büyük asal gerilmeye ( $\sigma_\theta = \sigma_v = \sigma_1$ ), küçük radyal gerilmenin ise küçük asal gerilmeye eşit ( $\sigma_r = \sigma_3$ ) olduğu kabulünü yapmıştır [3]. Bu nedenle teğetsel gerilme oranı,  $\lambda = \sigma_\theta / \sigma_v = 1$  olarak benimsemiştir. Berezantzev tarafından analizi basitleştirmek için kayma çizgilerinin düşey doğrultudaki düz çizgilere yaklaştığı kabul edilmiş ve Mohr-Coulomb göçme kriterini benimsemiştir. Geleneksel denklemler, Sokolovski [17] tarafından önerilen adım-adım hesaplama yöntemi kullanılarak çözülen iki adet kısmı diferansiyel denklem formunu almıştır.

Berezantzev [3] aksel simetri koşulu altındaki aktif toprak basınçları için 2.13 eşitliğini önermektedir.

$$P_a = a\gamma \frac{\sqrt{K_a}}{\eta - 1} \left( 1 - \frac{a}{R_b^{\eta-1}} \right) + q \left( \frac{aK_a}{R_b^\eta} \right) + \cot \phi \left[ \left( \frac{a}{r_b^\eta} \right) K_a - 1 \right] c \quad (2.13)$$

$$R_b = 1 + \frac{z}{r_0} \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.14)$$

$$\eta = \lambda \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.15)$$

a: Şaft yarıçapı

$K_a$ : Aktif Toprak

$\lambda$ : Teğetsel gerilme katsayısı

$\phi$ : Kayma mukavemeti açısı

z: Şaft derinliği

c: Zemin kohezyonu

Liu ve diğerleri [4], şaft kazısı boyunca şaft duvarı kazı çukuruna doğru radyel yönde deplase olur ve duvar arkasındaki zemin sıkışacağını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, tanjantiyel gerilme katsayısı,  $\lambda$  büyür ve  $K_0$ ' dan daha yüksek bir değer alacaktır. Bu durumun tersi olarak şaft duvarı radyel düzlemde zemine doğru deplase olduğunda  $\lambda$  değeri  $K_0$ ' dan daha düşük bir değer alacaktır. Söz konusu durum,  $\lambda < K_0$  kabulü ile tahmin edilen toprak basıncı değerlerinin, gerçek toprak basıncı değerlerinden çok daha yüksek elde edildiğini açıklamaktadır. Zeminin deplasmanı duvardan uzaklaştıkça azalmaktadır. Göçme çizgisinin arkasında zemin deplasmanı sıfır iken, eğer zeminde herhangi bir boşluk oluşmuyorsa, şaft duvarının arka yüzünde zemin ile duvar birlikte deplase olurlar. Artan duvar hareketiyle birlikte duvar arkasındaki zemin aniden akarken, kayma çizgisinin arkasındaki zemin elastik dengededir. Duvar arkasındaki zeminin aniden göçmeye başladığı bu duruma başlangıç aktif durumu denilir [4]. Bu durumda duvar arkasındaki zeminde tanjantiyel gerilme katsayısı,  $\lambda=1$ 'dir ve göçme çizgisini geçerken  $K_0$ 'a kadar azalır.



Liu ve diğeri [4], şaft çevresindeki plastik bölgedeki değerinden elasto-plastik ara yüzeydeki  $K_0$  değerine kadar doğrusal bir şekilde azalan bir  $\lambda$  katsayısı kullanarak Berezantzev'in teorisini geliştirmişlerdir. Liu ve diğeri [4],  $\lambda$  katsayısı için 2.16 'daki eşitliği önermiştir.

$$\lambda = 1 - \frac{(r - a)}{(r_{fs} - a)}(1 - K_0) \quad (2.16)$$

$$r = a + \tan(\phi)z \quad (2.17)$$

$$r_{fs} = r + a \quad (2.18)$$

a: Şaft yarıçapı

$\phi$ : Kayma mukavemeti açısı

z: Şaft derinliği

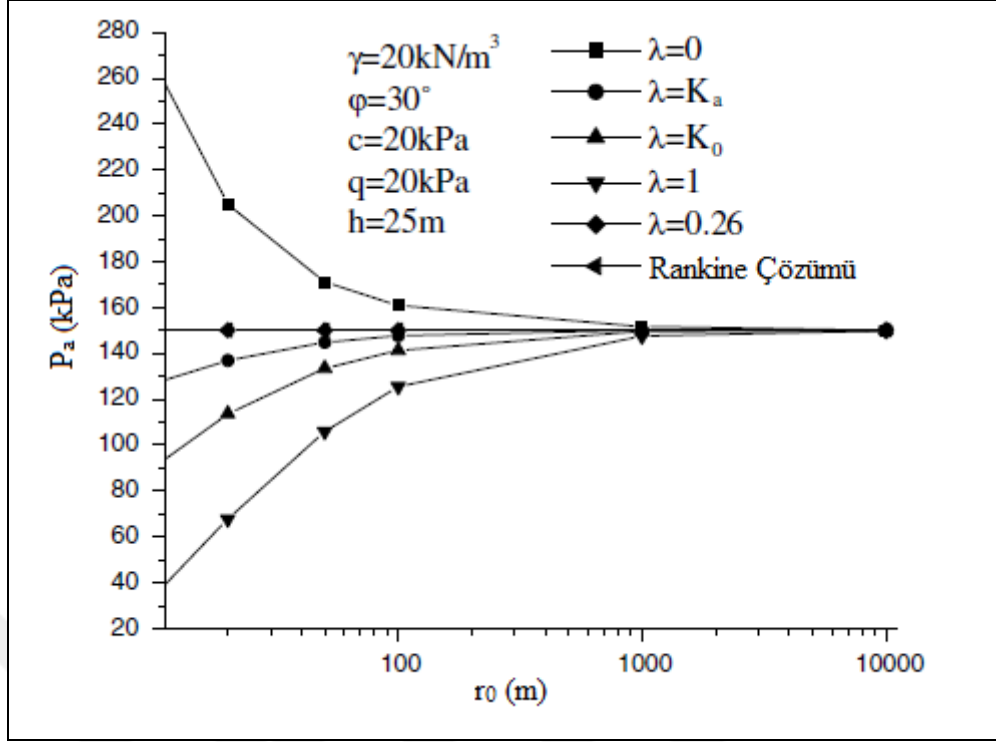
$K_0$ : Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

$r_{fs}$ : Göçme yüzeyi üzerindeki noktaların radyal koordinatı

Şaft duvarı radyel düzlemde, başlangıç aktif durumun başlaması için gereken deplasman değerinden daha yüksek deplasman değerlerine ulaşırsa, plastik bölge büyür ve nihayetinde tam aktif duruma ulaşılır. Bu durumda, şaft duvarının arkasında kayan kamada  $\lambda=1$  sağlanmış olur.

Şaft dayanma yapılarının deplasmanı yapısal özelliklerinin etkisinden dolayı sınırlandırıldığı için tam aktif durum karşılaşılmayan bir durumdur. Bunun yanı sıra, tam aktif durumun meydana gelmesi için gereken duvar hareketine, başlangıç aktif durumu için gereken duvar deplasman değeri daha küçük olduğu için bir çok kez ulaşılır.

Liu ve diğeri [4], Şekil 2.10'da görüldüğü gibi şaftlara etkiyen toprak basıncının şaft yarıçapına bağlı değişimin farklı  $\lambda$  katsayıları için elde ederek Rankine toprak basıncı ile karşılaştırmıştır.



Şekil 2.10 Farklı  $\lambda$  değerlerine göre shaft yanal toprak basınçlarının shaft yarıçapıyla değişimi [4]

Herhangi bir  $\lambda$  değeri için hesaplanan yanal toprak basıncı değerleri shaft yarıçapı yeterince büyük alındığında Rankine [2] yanal toprak basıncı değerlerine yaklaşmaktadır. Liu ve diğerleri [4],  $\lambda$  değeri küçük alındığında (örneğin 0) Rankine aktif toprak basıncından daha büyük çıktığını ve Rankine çözümüne üstten yaklaştığını,  $\lambda$  değeri büyük alındığında (örneğin  $K_a$  ve  $K_0$ ) aktif toprak basıncı değerinin, Rankine'ninkinden daha küçük çıktığını ve Rankine çözümüne alttan yaklaştığını göstermişlerdir. Bu sonuçlara ilave olarak,  $\lambda=0,26$  alındığında toprak basıncının duvar çapından bağımsız olduğu ve Rankine'nin çözümüyle örtüştüğünü belirlemişlerdir.  $\lambda=0,26$  olarak kullanıldığında shaft yüzeyi arkasındaki göçme yüzeyi, eksenel simetri koşullarından bağımsız hale gelip Rankine aktif toprak basıncına eşit olmaktadır. Şekil 2.10 'de görüldüğü üzere teğetsel gerilme oranı ( $\lambda$ ), shaft duvarlarına etkiyen toprak basıncı değerlerinin hesaplanmasında önemli bir parametredir.

Liu ve Wang [16] araştırmalarında shaft duvarı arkasındaki zeminin tamamen göçtüğünde (tam aktif durum) elde edilen toprak basıncının,  $\lambda=1$  kabulü yapılan Haar-Von Karman hipotezine göre elde edilen toprak basıncına eşit olduğunu belirtmişlerdir. Fakat duvar hareketi gerçekte sınırlandırıldığı için duvar arkasındaki zemin kısmi olarak göçebilir hatta hiç göçmeyebilir. Bu sebeple  $\lambda=1$  kabulü şüpheli bir yaklaşımdır.

Cheng ve diğeri [5] ile Liu ve Wang [16] analize ilave parametreler olarak zemin kohezyonu, sürşarj yükleri, geri dolgunun eğimi ve duvar sürtünmesini dikkate almışlardır. Liu ve Wang [16] duvar eğimini dikkate almışlar ve temelinde Cheng ve Hu [15] tarafından elde edilmiş olan basitleştirilmiş çözümle temelde aynı yeni bir çözüm geliştirmişlerdir. Liu ve Wang [16], yatay geri dolgu ve duvar-zemin sürtünmesinin olmadığı bir düşey şaft için Cheng ve Hu [15] tarafından önerilen analitik çözüm ile elde edilen toprak basınçlarının makul olduğunu göstermişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalara göre aktif toprak basıncı etkiyen aksel simetri özelliğine sahip düşey şaft duvarları için iki yatay toprak basıncı katsayısı vardır. Bunlardan birincisi, çevresel düzlemlere etkiyen radyal gerilmelerin oranı,  $K = \sigma_r / \sigma_v$  ve ikincisi radyal düzlemlere etkiyen teğetsel gerilmelerin oranı  $\lambda = \sigma_\theta / \sigma_v$  olarak tanımlanır. Şaft inşaatları boyunca başlangıç gerilmeleri, K değeri  $K_a$  değerine ulaşıncaya kadar azalırken iken  $\lambda$  değeri  $K_a < K_0 < \lambda$  değerine ulaşıncaya kadar yeniden dağılır. Bu nedenle  $\lambda$  katsayısı kazının yapıldığı zeminde yanal kemerlenme etkisinin bir ölçütüdür [7].

## 2.6 Toprak Basıncı Teorilerinin ve Analitik Çözümlerin Karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen limit denge ve limit analiz yöntemlerinde öncelikle kayma yüzeyinin şekli ve kayma yüzeyinin belirlenmesi için kabuller yapılması gerekmektedir. Bununla beraber, kayma çizgisi yöntemi kayma yüzeyini bize otomatik olarak vermektedir [9]. Şaft duvarı arkasındaki yanal toprak basıncı değerinin hassas bir şekilde belirlenmesi için atılması gerek ilk adım, kayma çizgisi yönteminde otomatik olarak elde ettiğimiz doğru bir kayma çizgisi eğimi bulmamızdır. Bu nedenle, kayma çizgisi yöntemi, limit denge ve limit analiz yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu yöntem gerçeğe en yakın aktif toprak basıncı tahmininin yapılmasını sağlamaktadır.

h yüksekliğine, a yarıçapına sahip düşey şaft ve  $\phi$  kayma mukavemeti açısına sahip zeminden meydana gelen sistem için önceki bölümlerde bahsedilen yöntemlerin bir kısmını kullanarak hesaplanan toprak basıncı dağılımı Şekil 2.10 'da görülmektedir. Kullanılan bütün yöntemler ile aktif ve sükûnetteki toprak basıncı değerlerinden daha düşük toprak basıncı tahminleri yapılmıştır. Terzaghi [13] ve Berezantzev [3] yaptıkları  $\lambda$  kabulü en düşük toprak basıncı değerlerini elde etmiştir. Bu durum kayma çizgisi ve plastik denge yöntemleri ile tutarlıdır. Her iki çözümde de elde edilen toprak basıncı dağılımı belirli bir derinlikten sonra sabit ve nihai bir değer almıştır. Prater [14] aynı

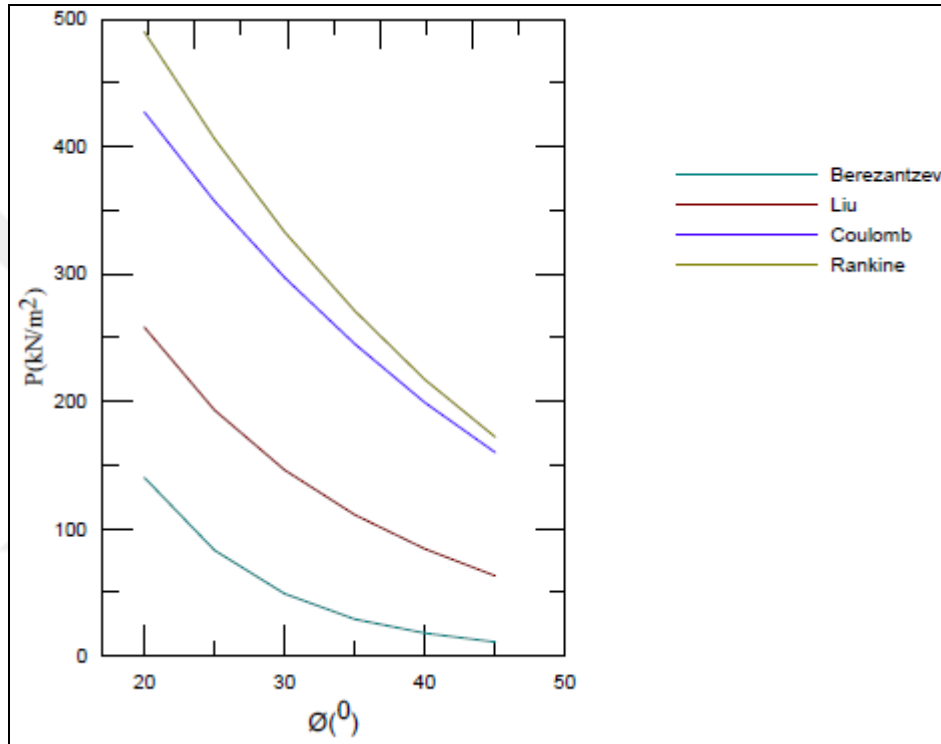
zemin koşulları ve şaft geometrisi için şaft yarıçapının 4,5 katı derinliği boyunca toprak basıncı için hızlı bir artış ve bu derinlikten sonra azalan ve şaft yarıçapının 8,5 katı derinliğine ulaşıldığında da 0 değerine ulaşan bir toprak basıncı tahmini yapmıştır. Bu nedenden dolayı Prater'in çözümünde yaptığı kabuller dışında yer alan herhangi bir modelde önerdiği çözüm kullanılamaz. Cheng ve Hu [15] tarafından önerilen çözüm, sırasıyla  $\lambda=1$  ve  $\lambda=K_0$  değerleri için yanal toprak basıncının en düşük ve en yüksek değerlerini elde etmişlerdir.  $\lambda=1$  değeri için Berezantzev' in yöntemiyle hesaplanan toprak basıncı değeri elde edilmektedir. Terzaghi [13], Berezantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ), 1 olarak alınan çözümlerde belli bir derinlikten sonra toprak basıncı değerinde herhangi bir artış meydana gelmemektedir. Derinlik arttıkça malzemenin gerilme şekil değiştirme davranışı değiştiği için bu çözümler belli bir derinliğe kadar doğru toprak basıncı değerleri elde etmemizi sağlasa da, daha derin noktalarda güvenilir olarak nitelenebilir. Cheng ve Hu [15] ise çalışmalarında teğetsel gerilme katsayısını ( $\lambda$ ) sükunetteki toprak basıncı katsayısına ( $K_0$ ) ve 1 'e eşit almışlardır. Sükunetteki toprak basıncı ( $K_0$ ) değerini kesin olarak belirlemek neredeyse imkansız olduğu halde daha spesifik olan teğetsel gerilme katsayısını ( $\lambda$ ) bu değere eşit almak gerçekçi olan bir yaklaşım değildir.

Şekil 2.7 'de görüldüğü üzere şaft çapının 1 ve 2 katı arasında değişen kazı derinliğine sahip şaftlar için bu çalışmada bahsedilen teorik yöntemlerden elde edilen toprak basıncı değerleri arasında çok büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir.

Liu ve diğerleri [4] Berezantzev [3] tarafından önerilen kayma çizgisi yöntemini kullanarak yaptıkları analitik çözümde, teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) için diğer araştırmacılardan farklı olarak sabit bir değer dikkate almamışlardır. Teğetsel gerilme oranının ( $\lambda$ ), plastik bölgedeki değerinden elasto-plastik ara yüzeydeki  $K_0$  değerine kadar doğrusal bir şekilde azalan  $\lambda$  kabulü yapmışlardır. Eksenel simetri koşulları altında, zemin malzemesinin silindirik koordinat sisteminde, sabit bir değer alması için herhangi bir neden bulunmamaktadır. Bununla beraber Liu ve diğerleri [4] teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) değeri için zeminin derinliği boyunca "1" değerinden sükunetteki toprak basıncı katsayısı ( $K_0$ ) değerine kadar doğrusal bir şekilde azalan bir kabul ortaya koymuşlardır. Araştırmacıların ortaya koydukları çalışmalar incelendiğinde hızlı ve doğru bir şekilde kayma yüzeyini elde edebildiğimiz kayma çizgisi yöntemini kullanan ve teğetsel gerilme katsayısının ( $\lambda$ ) için doğrusal değişmesi gerektiğini savunan Liu ve

diğerleri [4] çalışması şaft yüzeylerine etkiyen aktif toprak basıncılarının belirlenmesinde en makul yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Rankine [2], Coulomb [1], Berezantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] şaft yanal toprak basıncı teorilerini karşılaştırılmıştır. Bunun için 50 m derinliğe sahip şaft kazısı için şaft duvarlarına etkiyen yanal toprak basıncı değerleri, kayma mukavemeti açısına ( $\phi$ ) bağlı olarak Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11 Rankine, Coulomb, Berezantzev ve Liu ve diğerleri toprak basıncı teorilerinin karşılaştırılması

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi şaft duvarına etkiyen en yüksek yanal toprak basıncı Rankine’den elde edilmiştir. Bunun en önemli sebebi Rankine’nin [2], düzlem şekil değiştirme durumunu, zemin kütlelerinin belirli bir yer değiştirme değerinde kazı yönüne hareket etmesi ve duvar-zemin sürtünmesini dikkate almamasıdır.

Coulomb toprak basıncı teorisi[1], mobilize olmuş bir zemin kamasının kuvvet denge denklemlerini yazarak düzlem şekil değiştirme durumundaki istinat duvarlarının yanal toprak basıncı değerini vermektedir. Şaft yapılarında geometrik özelliklerinden dolayı konik bir göçme yüzeyi meydana geldiğinden Coloumb [11] toprak basıncı teorisinden

elde edilen toprak basıncı değerleri şaft yapıları için üretilen teorilerden elde edilenlerden daha yüksek yüksektir.

Berezantzev [3] eksenel simetri koşulları altında konik göçme yüzeyi kabulü yapmasına karşın teğetsel gerilme oranı ( $\lambda$ ) değerini 1 olarak kabul ettiği için diğer araştırmacılara göre çok daha düşük değerler elde etmiştir. Bu kabul, analizi basitleştirmek için yapılmıştır. Teğetsel gerilme katsayısının ( $\lambda$ ) 1 alınması için herhangi bir geçerli neden bulunmamaktadır. Liu ve Wang [16] araştırmalarında düşey şaft yapısı arkasındaki zeminin tamamen göçtüğünde  $\lambda$  katsayısının 1 değerine eşit olduğunu belirtmişlerdir.

Liu ve diğerleri [4] ise teğetsel gerilme katsayısının ( $\lambda$ ), değerinin şaft yapısı çevresindeki plastik bölgedeki değerinden elasto-plastik ara yüzeydeki  $K_0$  değerine kadar doğrusal bir şekilde azalan teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) kabulü yapmışlardır. Zeminin hetorejen yapısından ve malzeme bünye davranışından dolayı şaft çevresindeki tüm derinlik boyunca aynı deplasmanlar ve doğrusal artan bir toprak basıncı meydana gelmeyeceği için değişken bir teğetsel gerilme katsayısı ( $\lambda$ ) değeri yanal toprak basınçları için en gerçekçi sonuçları vereceği düşünölmektedir.

### SONLU ELEMANLAR ve ANALİZ ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Giriş

Klasik toprak basıncı teorilerinin yanı sıra düşey şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarını hesaplayabilmek için geliştiren teorik ve deneysel çalışmalar önceki bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çözüm yöntemleri karmaşık ve yaygın olarak bilinmediğinden günümüzde mühendisler çoğunlukla ticari paketlerin kullanıldığı sayısal analiz yöntemlerine başvurmaktadır. Sayısal analizler denge, uygunluk, malzeme bünye davranışı ve sınır koşullarını göz önüne alarak plastik dengeye dayalı yöntemlere göre daha ideal çözüme ulaşılmasını sağlasa da bilinçli kullanılmadığı takdirde gerçekçi olmayan çözümler elde edilmektedir. Bu bölümde dairesel en kesitli şaftlarda düşey iksa elemanlarına gelen toprak basınçlarına etki eden faktörler incelenerek yukarıda bahsedilen analitik yaklaşımlar ile karşılaştırılmıştır.

#### 3.2 Sonlu Elemanlar Analizleri

Dairesel kesitli şaftların sayısal analizler ile incelenmesinde sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüz mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmakta olup bilgisayar kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada Plaxis 2012 ticari yazılımı kullanılmıştır. Plaxis yazılımı geoteknik mühendisliği problemlerinin analizi için geliştirilmiş olup zemin ve kayaların elasto-plastik malzeme davranışını ideal bir şekilde modelleyebilmektedir.

Şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarına etki eden faktörleri sayısal analizler ile incelemek için farklı kayma mukavemeti ve rijitlik parametrelerine sahip kum

zeminlerde farklı çaplı kazıklar ile desteklenmiş şaftlar için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre değişken parametre olarak kum zeminin kayma mukavemeti ve rijitlik parametreleri ile şaft duvarının rijitlikleri (EA ve EI) dikkate alınmıştır. Şaft ortamının analizlerde gözönüne alınan değişken parametreleri Çizelge 3.1’de farklı kazık çaplarına göre kazık rijitlikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Zeminin kayma mukavemeti, rijitlik ve fiziksel özellikleri

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$E_{50}^{ref}$ (MPa)
19	20	5
		10
		20
19	25	10
		20
		30
19	30	30
		40
		50
19	35	40
		60
		70
19	40	50
		70
		80
19	45	60
		90
		100

Çizelge 3.2 Kazık elemanlarının çapı, rijitlik parametreleri ve eşdeğer perde kalınlığı

D (m)	EA (kN)	EI (kNm <sup>2</sup> )	D (m)
0,2	942477	2356	0,1732
0,5	5890486	92038	0,4330
1,0	23561944	1472621	0,8660

Analizler 2 boyutlu olarak gerçekleştirildiğinden eksenel simetri idealizasyonu gözönüne alınmıştır. Bu durum için dairesel kesitli kazıkların rijitlikleri kazık aralığına bölünerek azaltılmaktadır. Bunun için parametrik çalışmada kazık aralıkları sabit tutulmuş ve eşdeğer perde kalınlığı Çizelge 3.2’de gösterildiği şekilde yazılım tarafından EA ve EI değerlerine göre belirlenerek kullanılmıştır. Analizlerde şaft çapı 10 m ve nihai kazı derinliği olarak 50 m değerleri tercih edilmiştir.



Yapılan sayısal analizlerde kazıkların lineer elastik, kum zeminin elastoplastik davranışı gözönüne alınmıştır. Kum zeminin elasto-plastik davranışı için Hardening Soil Model kullanılmıştır. Bu bünye modelinde yükleme ve boşaltma durumları ile deviyör ve hacimsel gerilme-şekil değiştirme davranışı modellenenbildiğinden kazılarda gerçekçi gerilme-şekil değiştirme sonuçları elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.3' te belirtilen alt model 40 haricindeki tüm alt modellerde Plaxis programında,  $K_0$  sukunetteki toprak basıncı katsayısı programın varsayılan özelliğine uygun olarak Denklem 2.3' ile belirlenmiştir. Bunun yanı sıra alt model 40 analizinde  $K_0=1$  alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.  $K_0$  değerinin 1 alınması yanal gerilme değerinin düşey gerilmeye eşit olarak alınması anlamına gelmektedir. Alt model 40 analizi bu şekilde gerçekleştirilerek analitik ve nümerik yöntemlerden elde edilen toprak basınçları değerleri bir arada incelenecektir.

Kazı taban deplasmanlarının yanal toprak basınçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için  $\phi=30^0$ ,  $E_{50}^{ref}=30$  MPa özelliklerine sahip granüler zemin ve kazık çapı  $D=0,5$  m çapa sahip fore kazıklar ile oluşturulan düşey shaft dikkate alınmıştır. Bu analizlerde kabarma modülü  $E_{ur}^{ref}$ ,  $E_{50}^{ref}$  olarak tanımlanan mukavemetin %50 deviyör gerilme ve buna karşılık şekil değiştirme değeri ile hesaplanan elastisite modülünün 5 ve 10 katları ile kazı tabanının şekil değiştirmedeği durum dikkate alınmıştır. Parametrik analizler Çizelge 3.3' te belirtilen 6 farklı ana model ve 58 alt model ile gerçekleştirilmiştir

Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 adet alt model

Ana Model 1			
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^0$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)
1	20	5	0,20
2		5	0,50
3		5	1,00
4		10	0,20
5		10	0,50

Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 adet alt model (devamı)

6	20	10	1,00
7		20	0,20
8		20	0,50
9		20	1,00
Ana Model 2			
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)
10	25	10	0,20
11		10	0,50
12		10	1,00
13		20	0,20
14		20	0,50
15		20	1,00
16		30	0,20
17		30	0,50
18		30	1,00
Ana Model 3			
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)
19	30	30	0,20
20		30	0,50
21		30	1,00
22		40	0,20

Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 adet alt model (devamı)

23	30	40	0,50	
24		40	1,00	
25		50	0,20	
26		50	0,50	
27		50	1,00	
Ana Model 3				
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)	( $E_{ur}^{ref}$ ) (MPa)
28	30	30	0,50	5 * $E_{ref}$
29		30	0,50	10 * $E_{ref}$
30		30	0,50	3 * $E_{ref}$
Ana Model 4				
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)	
31	35	40	0,20	
32		40	0,50	
33		40	1,00	
34		60	0,20	
35		60	0,50	
36		60	1,00	
37		70	0,20	
38		70	0,50	

Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 adet alt model (devamı)

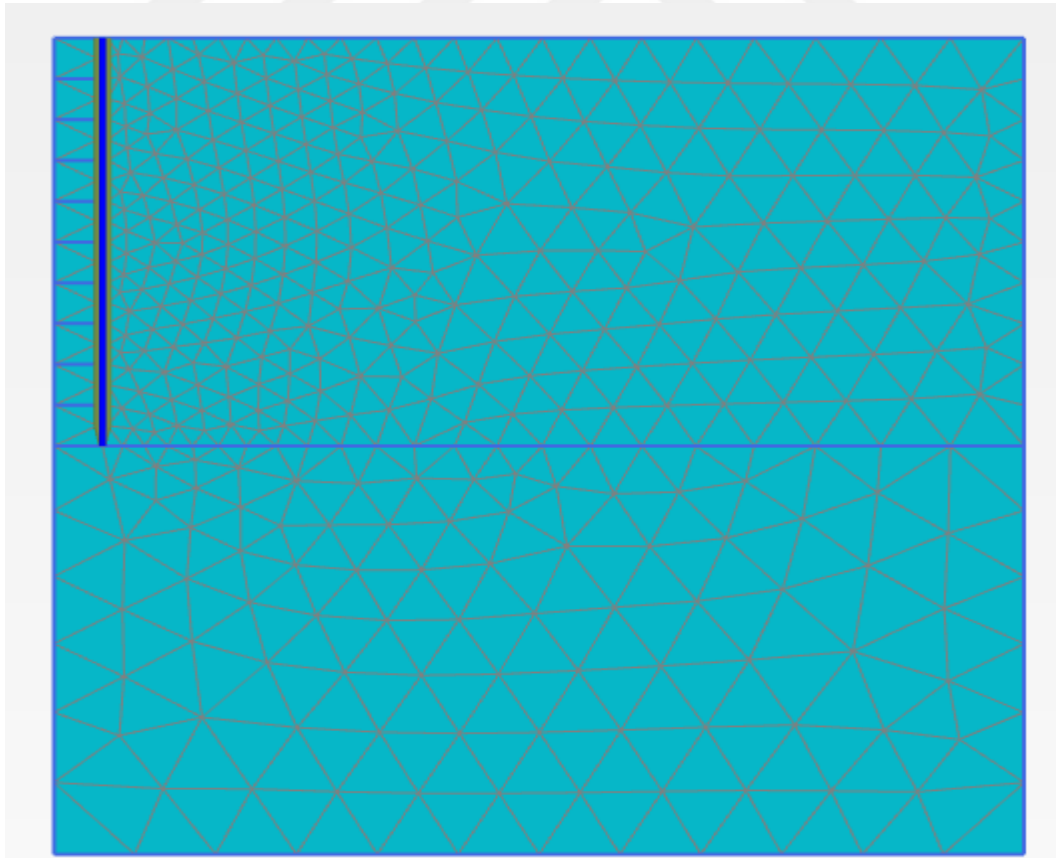
39	35	70	1,00
40 ( $K_0=1$ )		70	1,00
Ana Model 5			
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)
41	40	50	0,20
42		50	0,50
43		50	1,00
44		70	0,20
45		70	0,50
46		70	1,00
47		80	0,20
48		80	0,50
49		80	1,00
Ana Model 6			
Alt Model No	İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )	Elastisite Modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) (MPa)	Kazık Çapı (D) (m)
50	45 $^{\circ}$	60	0,20
51		60	0,50
52		60	1,00
53		90	0,20
54		90	0,50
55		90	1,00

Çizelge 3.3 6 ana model ve 6 ana modele ait 58 adet alt model (devamı)

56	45	100	0,20
57		100	0,50
58		100	1,00

58 farklı alt model Plaxis 2D programında modellenerek kazılar gerçekleştirilmiştir. Kazı adımları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde shaft çevresine yerleştirilen plak elemanlara etkileyen yanal toprak basınçları farklı rijitlik ve kayma mukavemeti durumları için belirlenmiş ve derinlikle değişimleri grafiklerle verilmiştir.

Sayısal analizler için oluşturulan iki boyutlu (2B) sonlu elemanlar ağı Şekil 3.1 'de verilmiştir. Bu modelde zemin ortamı için 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar, shaft kazıkları için 5 düğüm noktalı plak elemanlar kullanılmış olup modeldeki eleman sayısı 2 ve düğüm noktası sayısı 20 'dir.

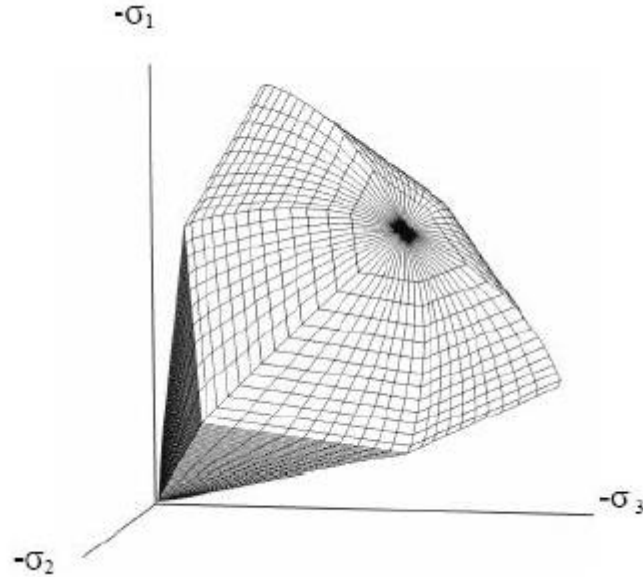


Şekil 3.1 Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı

Şekil 3.1’de verilen sayısal modelin sınırları yatay ve düşey yönlerde kazık boyunun 2 katı olarak dikkate alınmıştır. Sayısal modelin sınır koşulları yer değiştirmelere göre alt sınırdan yatay ve düşey yönde tutulu, düşey sınırları ise x yönünde tutulu y yönünde serbesttir.

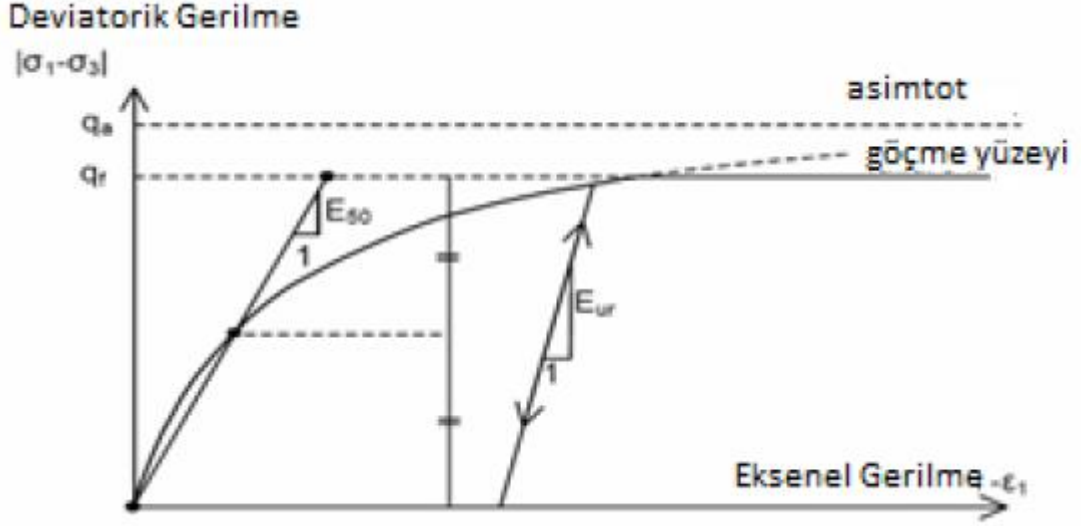
### 3.2.1 Şaft Ortamının Malzeme Modeli

Zeminin gerçekte sergilediği gerilme – şekil değiştirme davranışını modelleyebilmemiz için en önemli etken uygun bir malzeme modeli kullanmaktır. Bu tez kapsamında zemin için, zeminin hiperbolik elasto-plastik davranışına izin veren Hardening Soil (Pekleşen Zemin) malzeme modeli kullanılmıştır. Pekleşen zemin (HS) modelinde plastisite teorisi kullanılmaktadır. Pekleşen zemin (HS) modelinde bünye davranışı modellenirken üç eksenli yükleme deneyi ve bu deneyden elde edilen sonuçlar baz alınmıştır. Drenajlı üç eksenli yükleme deneyinde düşey şekil değiştirme ( $\epsilon_1$ ) ile deviatorik gerilme arasında hiperbolik bir ilişki vardır. Pekleşen zemin (HS) modelinde akma yüzeyi asal gerilmelerin sınırlarını oluşturduğu hacimle sınırlı kalmayıp Şekil 3.2 ’de görüldüğü üzere plastik şekil değiştirmeler ile genişleyebilmekte ve zeminin davranışını daha hassas incelememize olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.2 Asal gerilme yüzeyi içerisindeki pekleşen zemin modeli [18]

Drenajlı üç eksenli yükleme deneylerinde düşey eksenel düşey şekil değiştime ile deviatorik gerilme grafiğinde deney sonuçlarından elde edilen veriler ile ikisi arasında çizilen eğrinin hiperbolik duruma yaklaştığı Şekil 3.3 'de görülmektedir [19].



Şekil 3.3 Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen hiperbolik gerilme - şekil değiştirme ilişkisi [19]

$q < q_f$  durumunda;

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3.1)$$

Maksimum deviatorik gerilme durumunda;

$$q_f = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} (p + c \cot \phi) \quad (3.2)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3.3)$$

$q_a$  = kayma mukavemetinin asimptotik değeri

$q_f$  = maksimum deviatorik gerilme

$c$  = zemin kohezyonu

$\phi$  = kayma mukavemeti açısı

$R_f$  = göçme oranı

Yukarıda bahsedilen gerilme - şekil değiştime meydana gelen hiperbolik ilişki denlem 3.1 ile formülize edilebilmektedir.

İlk yükleme esnasında zemin malzemesi non-lineer bir davranış sergiler. Sekant modülü ( $E_{50}$ ), ilk yüklemede karşımıza çıkan küçük şekil değiştirmeler için, başlangıç elastisite modülünün ( $E_i$ ) yerine kullanılır.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cot \phi} \right)^m \quad (3.4)$$

$E_{50}^{ref}$  = referans sekant rijitliği

$E_{50}$  = sekant modülü

$\sigma_{ref}$  = referans gerilme

$c$  = zemin kohezyonu

$\phi$  = kayma mukavemeti açısı

$\sigma_3$  = küçük asal gerilme

$m$  = rijitliğin gerilme seviyesine bağlılığının üstel değeri

Rijitliğin gerilme bağımlılığının üstel değeri ( $m$ ), kumlarda 1'den küçük killerde yaklaşık 1 olarak alınması rijitlik hesaplamaları uygun bir tercih olmaktadır.

Zemin malzemesinin kabarma modüllerinin hesaplanmasında elastik young modülü  $E_{ur}$  kullanılmaktadır ve bu rijitlik parametresi referans gerilmeye bağlı olarak ( $\sigma_{ref}$ ) denklem 4.5 yardımıyla elde edilmektedir.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cot \phi} \right)^m$$

$E_{ur}^{ref}$  = yükleme boşaltma rijitliği

$E_{ur}$  = elastik young modülü

$\sigma_{ref}$  = referans gerilme

$c$  = zemin kohezyonu

$\phi$  = kayma mukavemeti açısı



$\sigma_3$  = küçük asal gerilme

$m$  = rijitliğin gerilme seviyesine bağlılığının üstel değeri

Ödometre deneyindeki referans tanjant rijitliği ( $E_{oed}^{ref}$ ) ise denklem 3.5 kullanılarak kolayca elde edilebilir.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{\sigma_1 + c \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cot \phi} \right)^m$$

$E_{oed}^{ref}$  = Ödometre deneyindeki referans rijitlik

$E_{oed}$  = ödometre deneyi rijitliği

$\sigma_{ref}$  = referans gerilme

$c$  = zemin kohezyonu

$\phi$  = kayma mukavemeti açısı

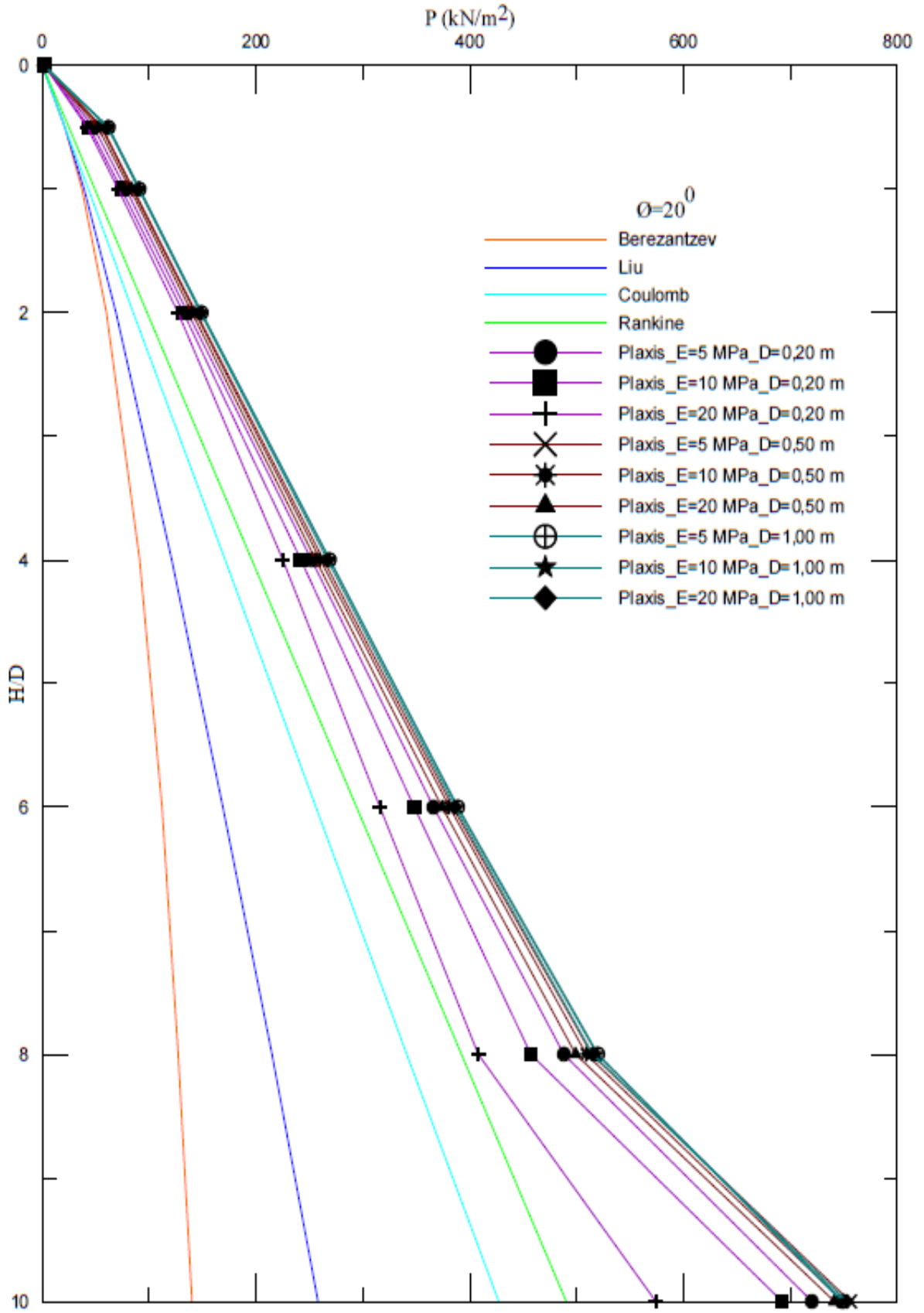
$\sigma_1$  = büyük asal gerilme

$m$  = rijitliğin gerilme seviyesine bağlılığının üstel değeri

### SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

#### 4.1 Sayısal Analizleri Gerçekleştirilen 6 Ana Model ve 58 Alt Modelin Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması

Sayısal analizler farklı kazı derinlikleri dikkate alınarak adım adım yapılmıştır. Elasto-plastik zemin davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için başvurulan bu adımsal analiz yaklaşımında nihai kazı derinliği sonunda kazıklı duvar arkasında oluşan toprak basıncı dağılımı belirlenmiştir. Bu bölümde sayısal analizler ile belirlenen şaft yanal toprak basıncı dağılımlarının derinlikle değişimi analitik yöntemlerle elde edilenler ile karşılaştırılması incelenmiştir. Aşağıda değişen parametrelere göre elde edilen yanal toprak basınçlarının, Rankine [2], Coulomb [1], Berezantzev [3] ve Liu vd.'den [4] hesaplananlar ile karşılaştırılması irdelenecektir.



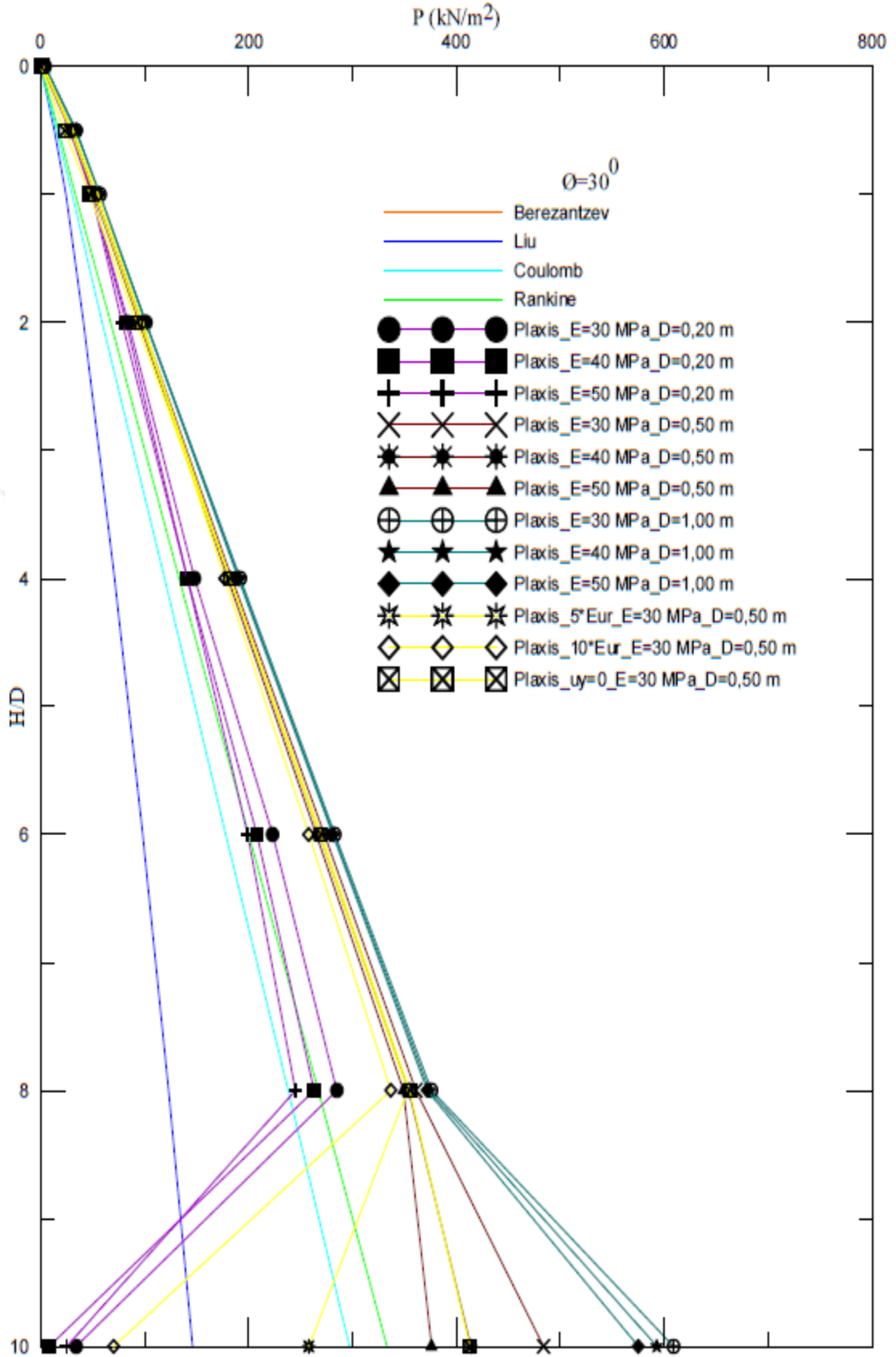
Şekil 4.1  $\phi = 20^\circ$  için Plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması

$\phi=20^0$  için oluşturulan 9 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal toprak basınçları değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basınçları değerleri incelendiğinde, nümerik sonuçların birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Kazık çapı arttıkça sistemin rijitliği arttığı için elde edilen yanal toprak basınçları değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber parametrik çalışmalar sonucunda Plaxis sonlu elemanlar (SE) programından elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinin hepsi analitik çözümlerden daha yüksektir. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.





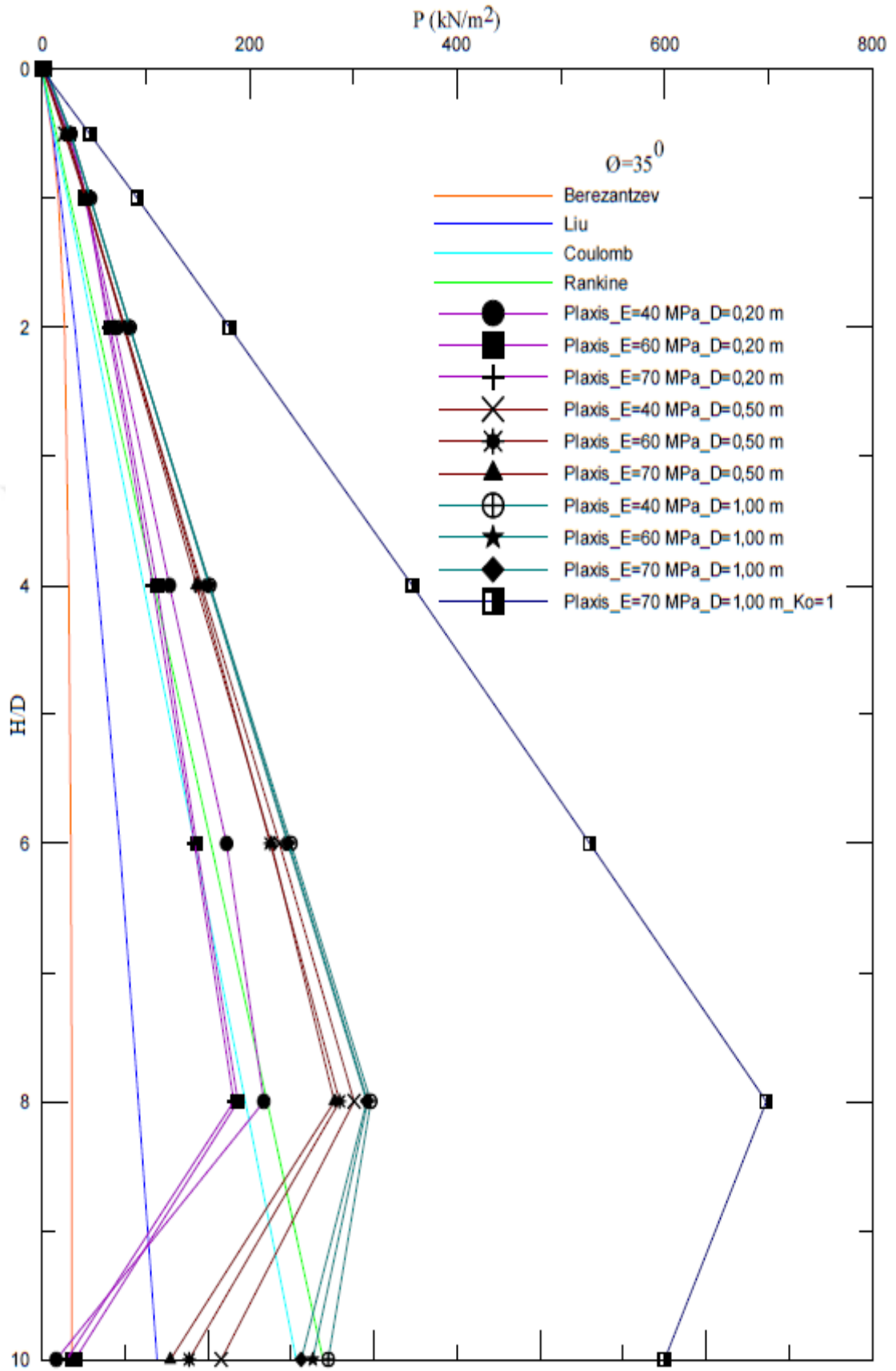
$\phi=25^0$  için oluşturulan 9 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal toprak basıncı değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen toprak basınçları değerleri incelendiğinde, nümerik analizlerden elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinin 40 m derinliğe kadar birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu yanal toprak basıncı değerleri aynı zamanda analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinden daha yüksek değerlerdedir. Bu derinlikten kazı sonu olan 50 m derinliğe kadar ise  $D = 0,2$  m için analizi gerçekleştirilen 3 alt modelde yanal toprak basıncı değerleri, 40 m'deki değerlerinden daha düşük ve analitik çözümlerden elde edilen değerler arasında kaldığı görülmektedir.  $D=0,5$  m ve  $D=1$  m için gerçekleştirilen analizlerde ise yanal toprak basıncı değerinin 40 m - 50 m arasında doğrusallıktan uzak bir artış şeklinde olduğu belirlenmiştir. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3  $\phi=30^{\circ}$  için Plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanıl toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması

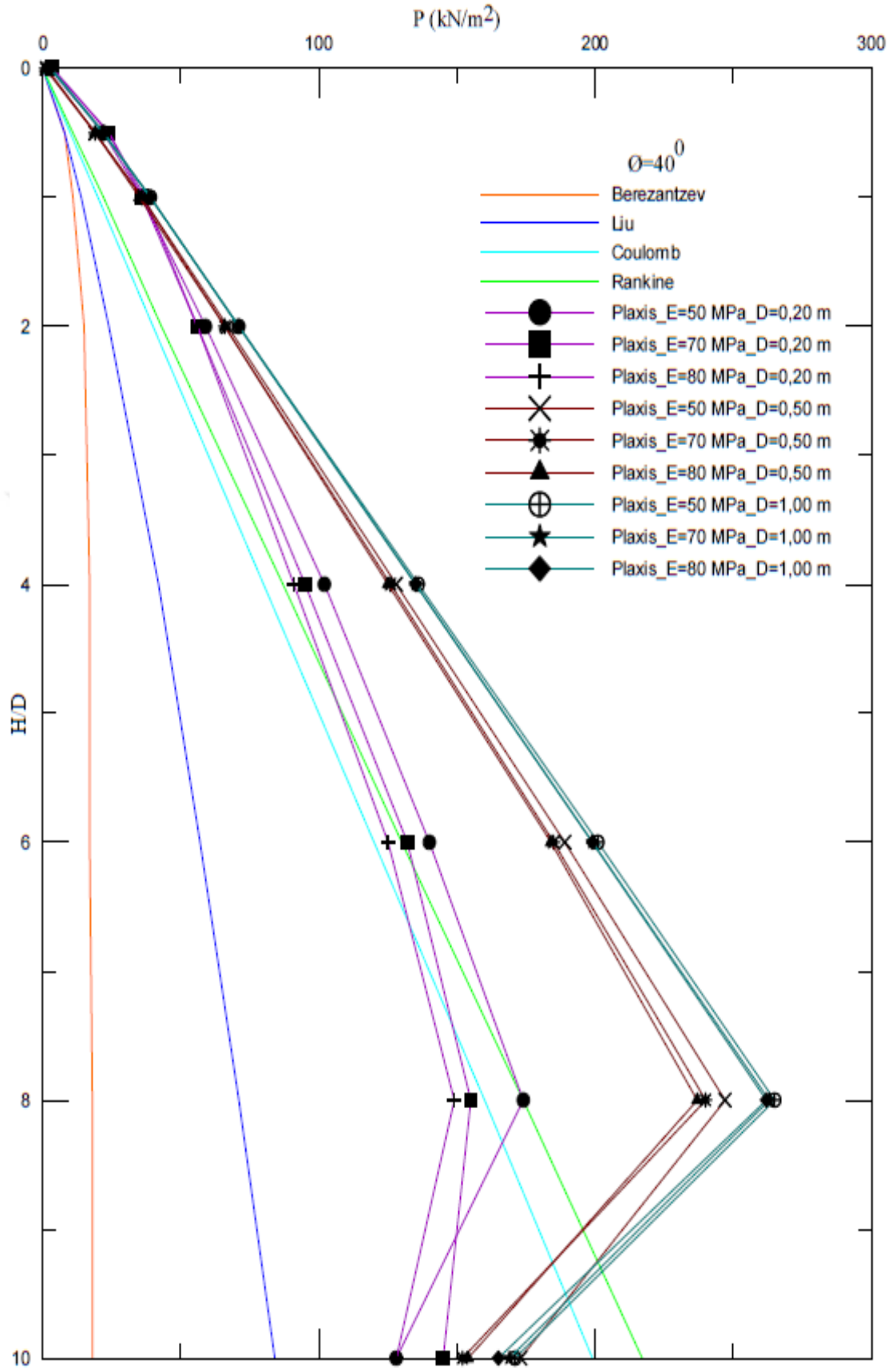
$\phi=30^0$  için oluşturulan 12 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal yanal toprak basıncı değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basınçları değerleri incelendiğinde, nümerik analizlerden elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinin,  $D=0,2$  m için yapılan analizlerde, 40 m derinliğe kadar yanal toprak basınçları değerlerinin Rankine ve Coulomb çözümleriyle örtüşmektedir. 40 m – 50 m derinlikte toprak basıncı değerlerinde çok büyük düşüş olduğu ve neredeyse sıfıra yaklaştığı gözlemlenmiştir.  $D = 0,5$  m ve  $D = 1$  m için analizi gerçekleştirilen 6 alt model için elde edilen yanal toprak basıncı değerlerinin 40 m derinliğe kadar tüm analitik çözümlerden daha yüksek çıkmıştır. 40 – 50 m arasında yanal toprak basınçları artmaya devam etmektedir. Kazı taban deplasmanlarının etkisini incelemek için gerçekleştirilen 3 alt modelde ise yanal toprak basıncı değerlerinin 40 m derinliğe kadar kazı taban deplasmanlarının izin verildiği alt modeller ile örtüşen bir dağılım izlenmiştir. 40 m – 50 m derinlik arasında ise yanal toprak basıncı değerlerinin 40 m'deki değerlerinden daha düşük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.





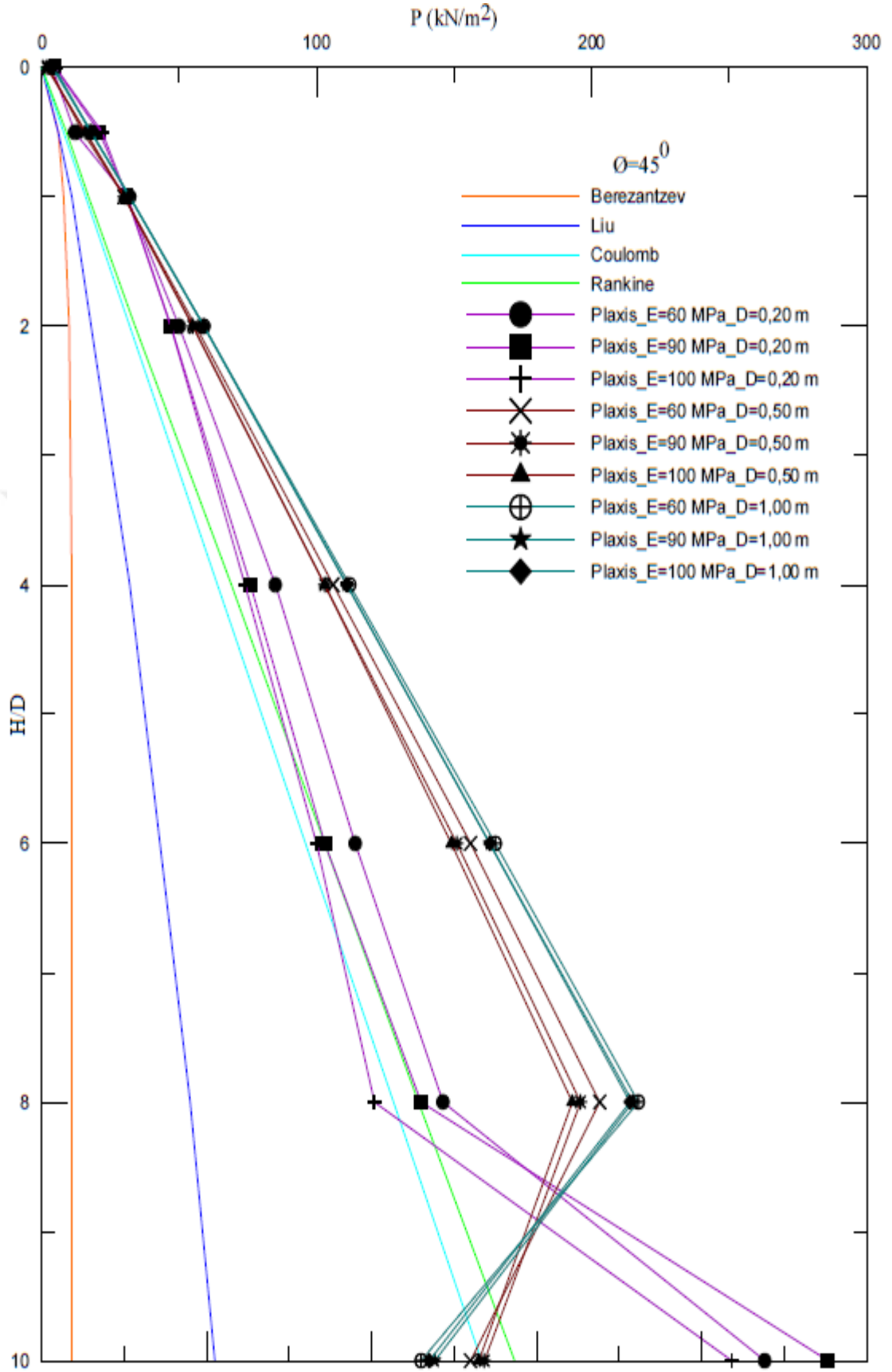
Şekil 4.4  $\phi=35^0$  için Plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması

$\phi=35^0$  için oluşturulan 9 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal toprak basıncı değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak toprak basınçları değerleri incelendiğinde, nümerik sonuçların  $D=0,20$  m için yapılan analizlerde 40 m derinliğe kadar Coulomb ve Rankine'nin çözümünüyle örtüşmektedir. 40 – 50 m derinlik arasında yanal toprak basıncı değerlerinde düşüş olduğu ve sifıra yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.  $D = 0,5$  m ve  $D = 1$  m için analizi gerçekleştirilen alt modellerde elde edilen toprak basınçları 40 m derinliğe kadar neredeyse doğrusal bir artış göstermiştir. Kazı sonu olan 50 m derinliğinde ise 40 m'de aldığı değerden daha düşük ve analitik çözümlerin arasında kalan değerler elde edilmiştir. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.  $K_0$  değerinin 1 olarak alınması, analizlerde yanal gerilmeleri düşey gerilmelere eşit olduğu anlamına geldiği ve düşey gerilemeler yanal gerilmelerden çok daha büyük olduğu için  $K_0=1$  olarak gerçekleştirilen analizlerde elde edilen toprak basınçları tüm çözümlerden çok daha yüksek olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.5  $\phi=40^{\circ}$  için Plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması

$\phi=40^0$  için oluşturulan 9 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal toprak basıncı değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basıncı değerleri incelendiğinde, nümerik sonuçların  $D=0,20$  m için yapılan analizlerde 40 m derinliğe kadar Coulomb ve Rankine'nin çözümünüyle örtüşmektedir. 40 – 50 m derinlik arasında yanal toprak basıncı değerlerinde düşüş gerçekleşmiş ve Coulomb ile Liu çözümleri arasında yer aldığı gözlemlenmiştir.  $D = 0,5$  m ve  $D = 1$  m için analizi gerçekleştirilen alt modellerde elde edilen toprak basınçları değerleri 40 m derinliğe kadar tüm analitik çözümlerden daha yüksek değerler elde edilmiş ve neredeyse doğrusal bir artış göstermiştir. Kazı sonu olan 50 m derinliğinde ise 40 m'de aldığı değerden daha düşük değerler ile Coulomb ile Liu ve diğerleri çözümleri arasında elde edilmiştir. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6  $\phi=45^{\circ}$  için Plaxis analizlerinde düşey kazıklı duvar arkasında meydana gelen yanal toprak basınçlarının dağılımı ve analitik çözümler ile karşılaştırılması

$\phi=45^0$  için oluşturulan 9 farklı alt modelde yapılan analizlerden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkileyen yanal toprak basıncı değerleri ve analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basınçları değerleri incelendiğinde, nümerik sonuçların  $D=0,2$  m için yapılan analizlerde 40 m derinliğe kadar Coulomb ve Rankine'nin çözümünüyle örtüşmektedir. 40 – 50 m derinlik arasında yanal toprak basıncı değerlerinde doğrusallıktan uzak bir artış ile tüm analitik çözümlerden daha yüksek değerlere ulaşmıştır.  $D = 0,5$  m ve  $D = 1$  m için analizi gerçekleştirilen alt modellerde elde edilen toprak basınçları değerleri 40 m derinliğe kadar, tüm analitik çözümlerden daha yüksek değerler elde edilmiş ve neredeyse doğrusal bir artış göstermiştir. Kazı sonu olan 50 m derinliğinde ise 40 m'de aldığı değerlerden daha düşük değerler ile Coulomb çözümüne çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Nümerik analizlerde elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değeri arttıkça elde edilen toprak basıncı değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.

Plaxis sonlu elemanlar (SE) programında parametrik çalışmalar kapsamında modellenen 58 alt model ve analitik çözümler yardımıyla elde edilen yanal toprak basınçları incelenip karşılaştırıldığında, aktif toprak basınçlarını kontrol eden en önemli parametrelerin zeminin kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ), zeminin elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) ve dayanma yapısını oluşturan kazığın çapı ( $D$ ) olduğu anlaşılmaktadır.

İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) arttıkça yanal toprak basınçlarının beklendiği üzere önemli derecede azaldığı ve aktif toprak basınçlarının en önemli parametresinin, kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) olduğu görülmektedir.

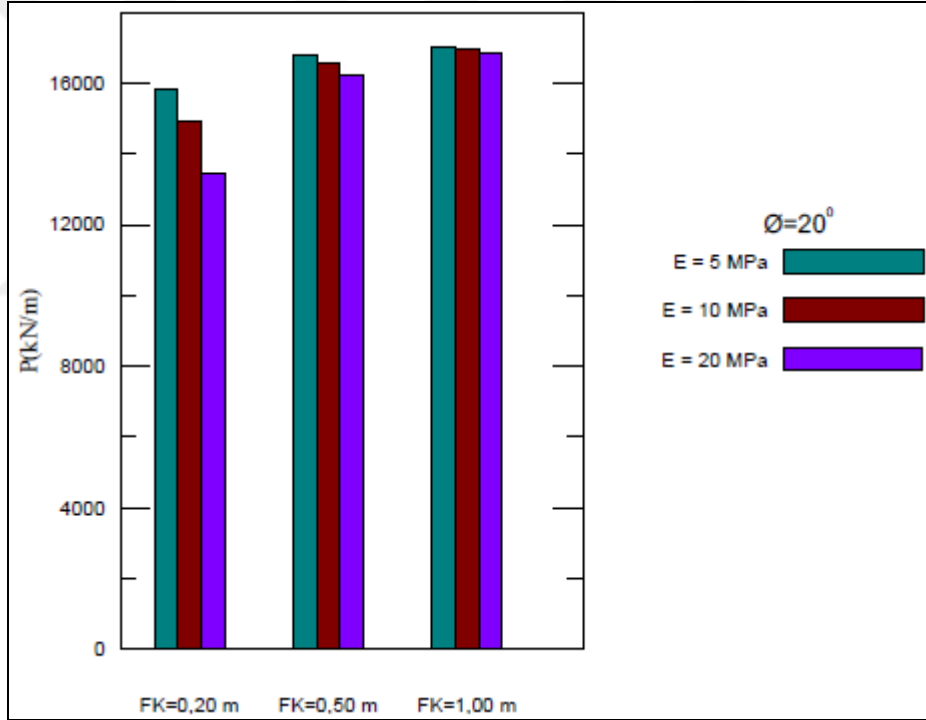
Plaxis programından elde edilen yanal toprak basınçları değerleri aynı kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değeri ve aynı kazık çapı ( $D$ ) için yapılan analizlerde, toprak basıncını etkileyen parametrenin, elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) olduğu anlaşılmaktadır. Zeminin elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) arttıkça zemin dayanımı artmakta ve yanal toprak basıncı değerleri az da olsa düşmektedir.

Plaxis programından elde edilen toprak basınçları değerleri aynı kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değeri ve aynı, zeminin elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) için yapılan analizlerde, toprak basıncını etkileyen parametrenin, kazık çapı ( $D$ ) olduğu anlaşılmaktadır. Kazık çapı arttıkça dayanımı artmakta ve yanal toprak basıncı değerlerinin önemli derecede arttığı görülmektedir. Bunun nedeni kazık çaplarıyla birlikte kazığın EA ve EI rijitlik parametrelerinin artması ve zeminin deplasmanının sınırlandırılmasından dolayı zeminin yanal gerilme değerinin azalamamasıdır.

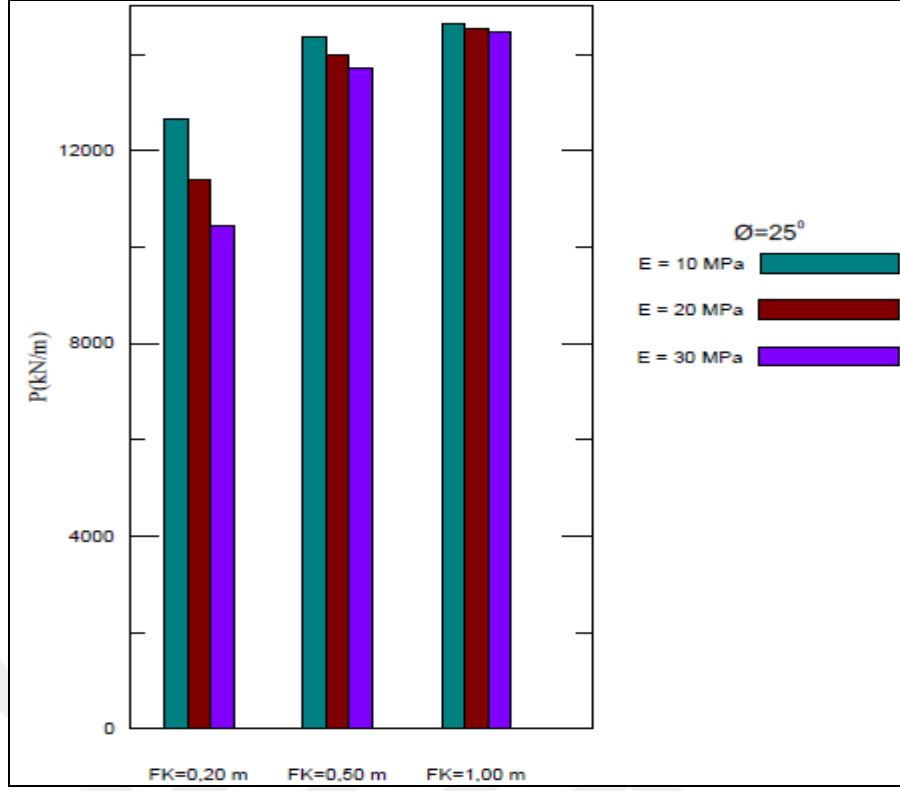
Nümerik ve analitik sonuçların karşılaştırıldığı şekillerde de görüldüğü üzere analitik çözümlere en yakın değerlerin elde edildiği alt modeller tüm analizlerde en küçük kazık çapında sahip olan modellerde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi kazığın rijitliğinin azalmasıyla sisteminin rijitliğinin azalması, zeminin deplasman toleransının artması ve bununla birlikte yanal toprak basınçlarının azalmasıdır. Kazık çapı arttıkça sistemin rijitliği arttığı için, analitik çözümlerde en yüksek yanal toprak basıncı değeri veren Coulomb çözümünden bile daha yüksek değerler elde edilmiştir.

#### 4.2 Plaxis Analizlerinde Düşey Şaft Kazılarında Kazıklı Duvar Arkasına Etkiyen Yanal Kuvvetlerin 6 Ana Model ve 58 Alt Model ile İncelenmesi

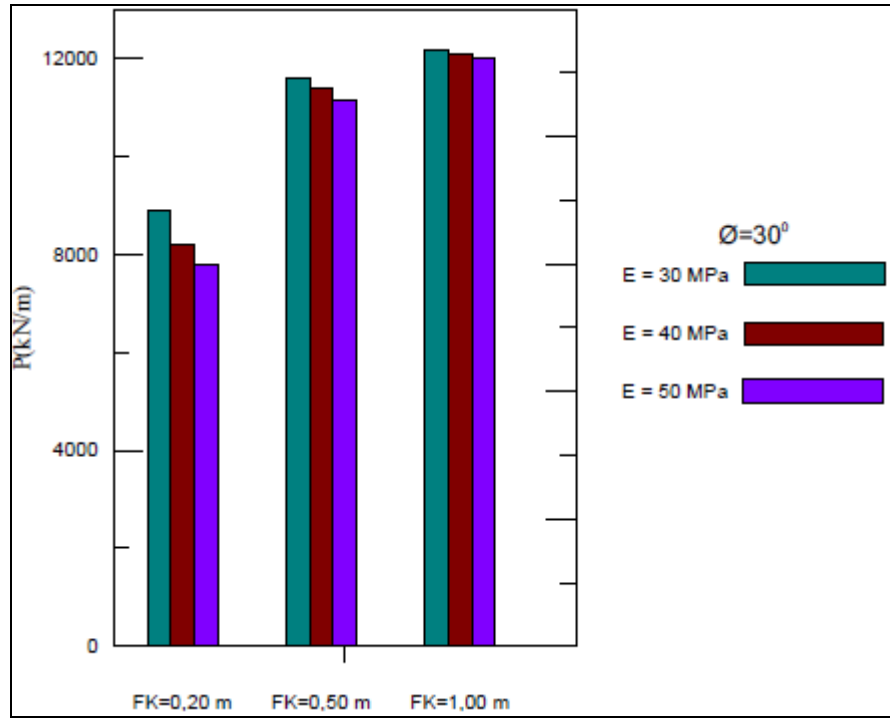
Plaxis 2D sonlu elemanlar (SE) programında, nümerik bazlı parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri irdelenecektir.



Şekil 4.7  $\phi=20^\circ$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri

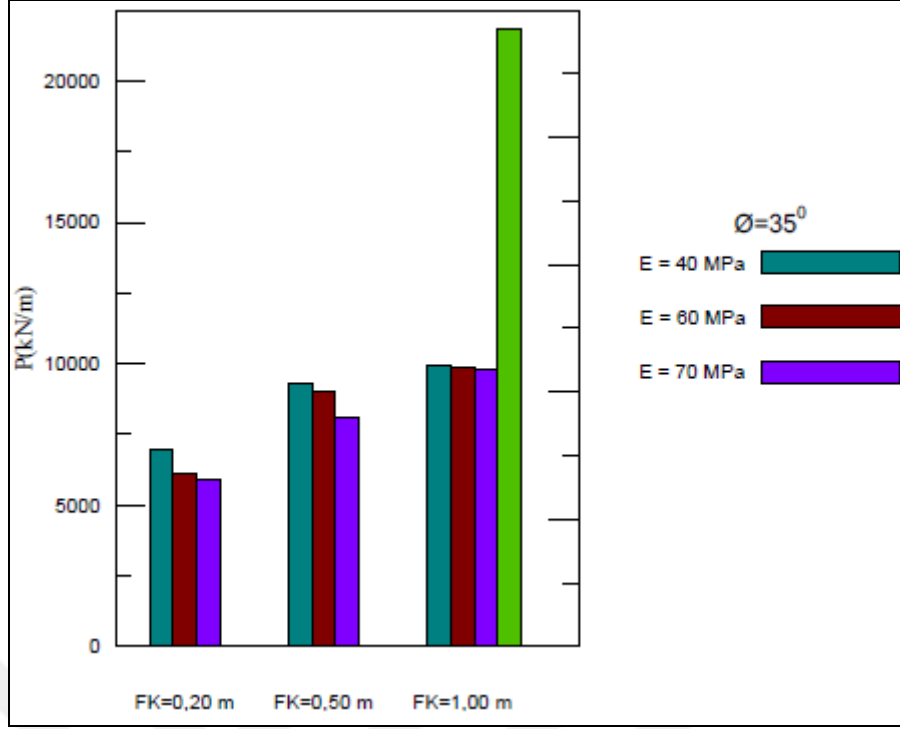


Şekil 4.8  $\phi=25^\circ$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değeri

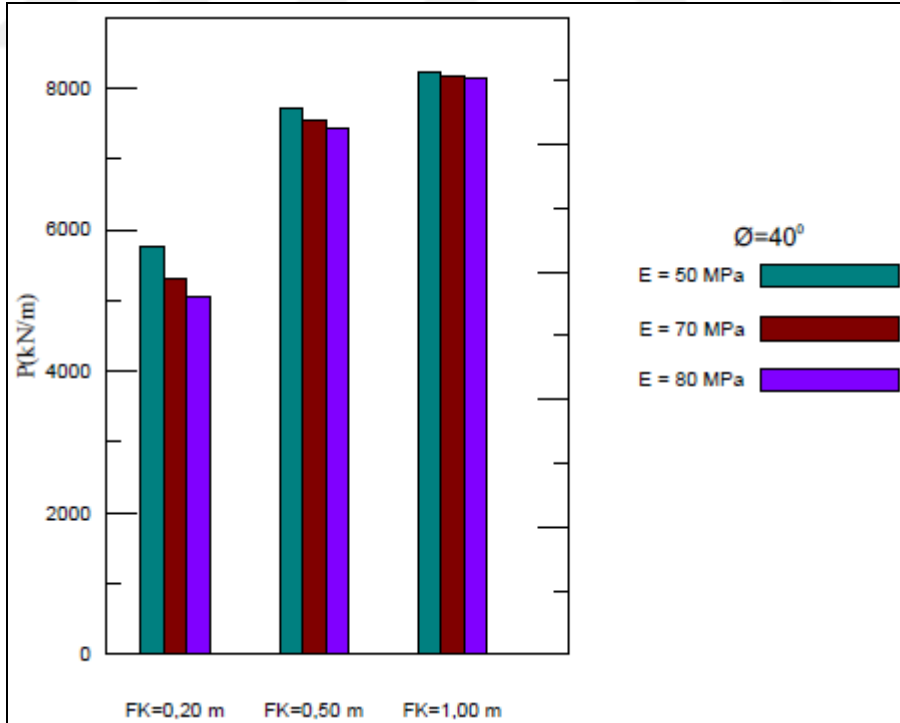


Şekil 4.9  $\phi=30^\circ$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değeri

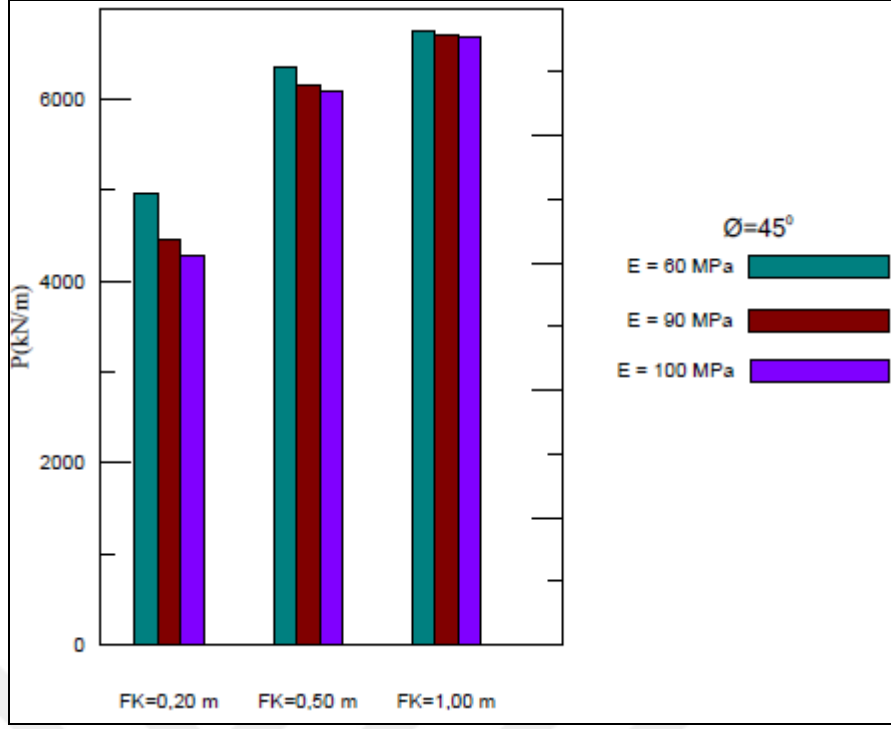




Şekil 4.10  $\phi=35^{\circ}$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri



Şekil 4.11  $\phi=40^{\circ}$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri



Şekil 4.12  $\phi=45^\circ$  için parametrik çalışma sonucunda kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değeri

İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) arttıkça düşey şaft kazıklarına etkiyen yanıl kuvvetin beklendiği üzere önemli derecede azaldığı ve yanıl kuvvet değeri etkileyen en önemli parametresinin kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) olduğu görülmektedir.

Plaxis sonlu elemanlar (SE) programından elde edilen, düşey şaft kazıklarına etkiyen yanıl kuvvet değeri aynı kayma mukavemeti açısı değeri ( $\phi$ ) ve aynı kazık çapı (D) için yapılan analizlerde, şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri etkileyen parametrenin elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) olduğu anlaşılmaktadır. Zeminin elastisite modülü arttıkça dayanımı artmakta ve şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri önemli ölçüde düşmektedir.

Plaxis sonlu elemanlar (SE) programından elde edilen şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri aynı kayma mukavemeti açısı değeri ( $\phi$ ) ve aynı, zeminin elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) için yapılan analizlerde, şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri etkileyen parametrenin kazık çapı (D) olduğu anlaşılmaktadır. Kazık çapı arttıkça dayanımı artmakta ve düşey şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değerlerinin önemli derecede arttığı görülmektedir.

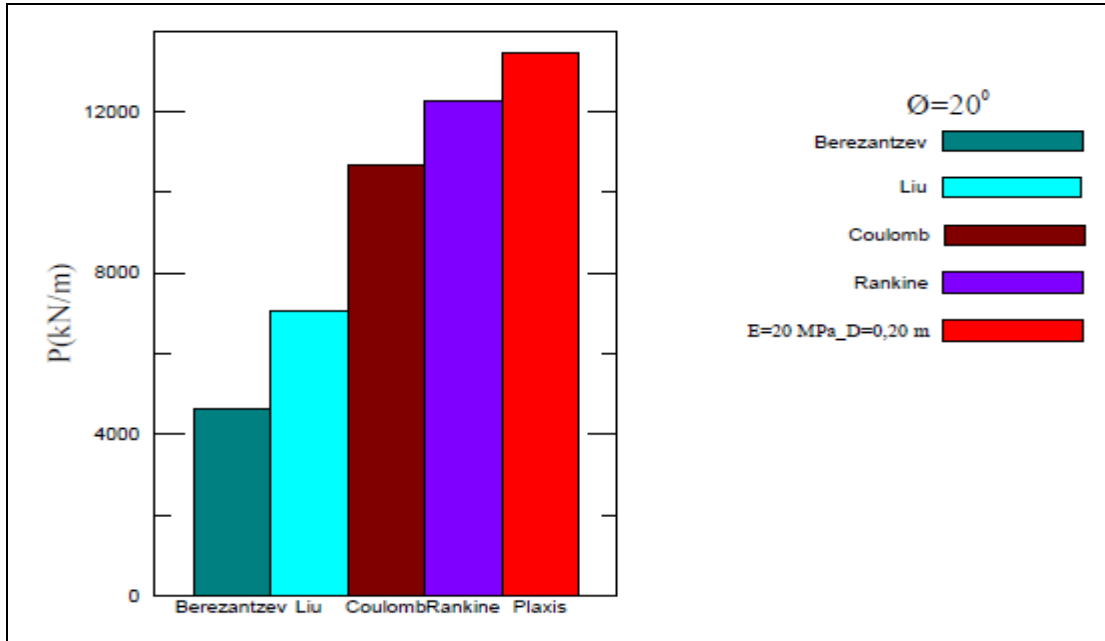
$K_0$  değerinin 1 olarak alınmasıyla yanal gerilmeler düşey gerilmelere eşit alınmış bu nedenle  $\phi=35^\circ$  için yapılan analizlerde en büyük itki değeri kendine en yakın itki değerinden yaklaşık 2 kat daha büyük olarak  $K_0$  için yapılan analizden elde edilmiştir.

Kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri, toprak basınçları yardımıyla hesaplandığı için Bölüm 4.1.1' de yer alan toprak basıncı dağılımları ile örtüşmektedir.

#### 4.3 Plaxis Analizlerinde Düşey Şaft Kazılarında Kazıklı Duvar Arkasına Etkiyen Yanal Kuvvetlerin 6 Ana Model ve 58 Alt Model ile İncelenmesi ve Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması

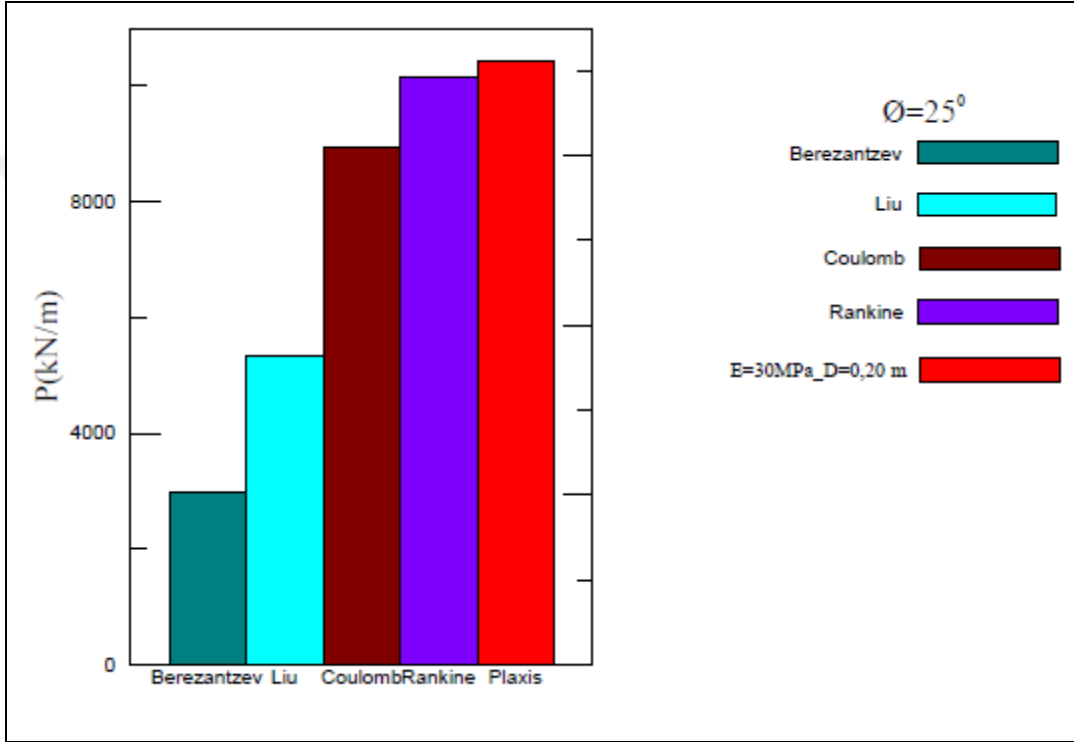
Rankine [2], Coulomb [1], Berezantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] tarafından önerilen çözümler sonucunda kazığa etkiyen yanal kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu değerler aynı grafik üzerinde Plaxis programından elde edilen değerler içinde aynı kayma mukavemeti açısı dikkate alınarak ve en yakın yanal kuvvet değeri ile birlikte karşılaştırılarak irdelenecektir.

Kazı taban deplasmanlarının yanal toprak basınçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için  $\phi=30^\circ$ ,  $E_{50}^{ref} = 30$  MPa özelliklerine sahip granüler zemin ve  $D=0,50$  m çapa sahip fore kazıklar ile oluşturulan sistemden elde edilen yanal kuvvet değerleri Şekil 4.3.c'de diğer yanal kuvvet değerleri ile birlikte verilmiştir.



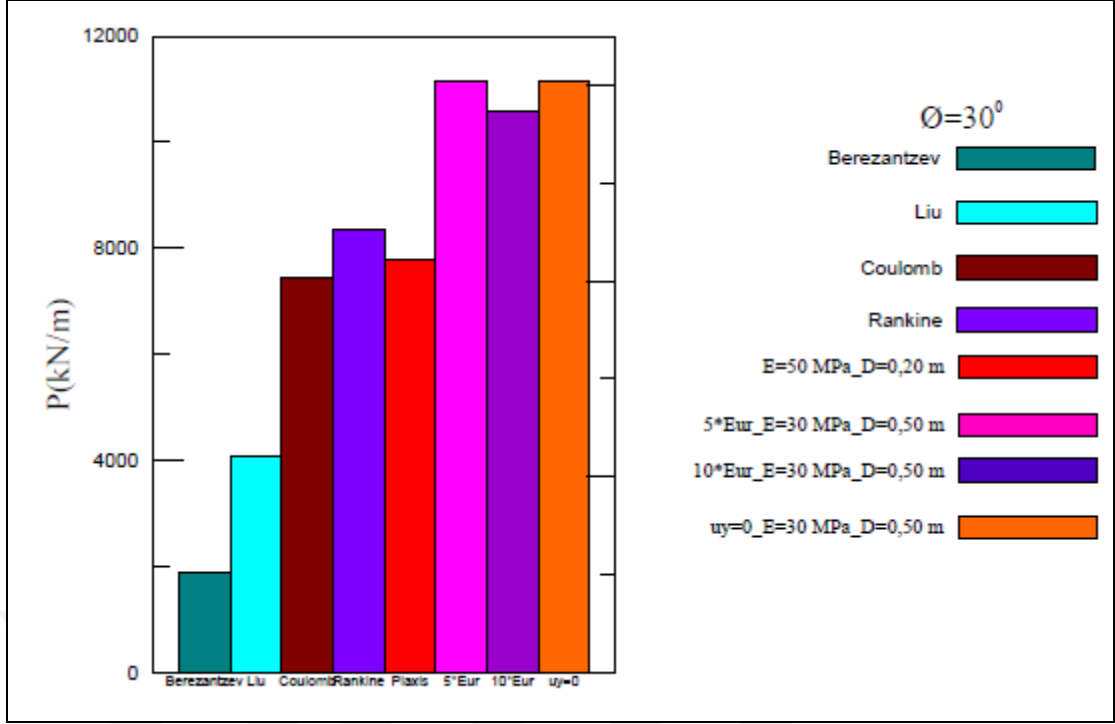
Şekil 4.13  $\phi=20^\circ$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

$\phi=20^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerleri ile kullanılan parametreleri Şekil 4.13 üzerinde verilen Plaxis modelinde düşey shaft kazığına etkileyen yanal kuvvet değeri incelendiğinde, Plaxis modelinden elde edilen yanal kuvvet değerinin tüm analitik çözümlerden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Elde edilen yanal kuvvet değerine en yakın değeri Rankine çözümünün verdiği anlaşılmaktadır. Plaxis modelinden elde edilen yanal kuvvet değerinin tüm analitik çözümlerden daha yüksek çıkmasının başlıca nedeni shaft kazığının, modelin deplasman toleransını azaltması ve  $K_0$  sukünetteki yanal toprak basıncı değeri kullanılmasıdır.



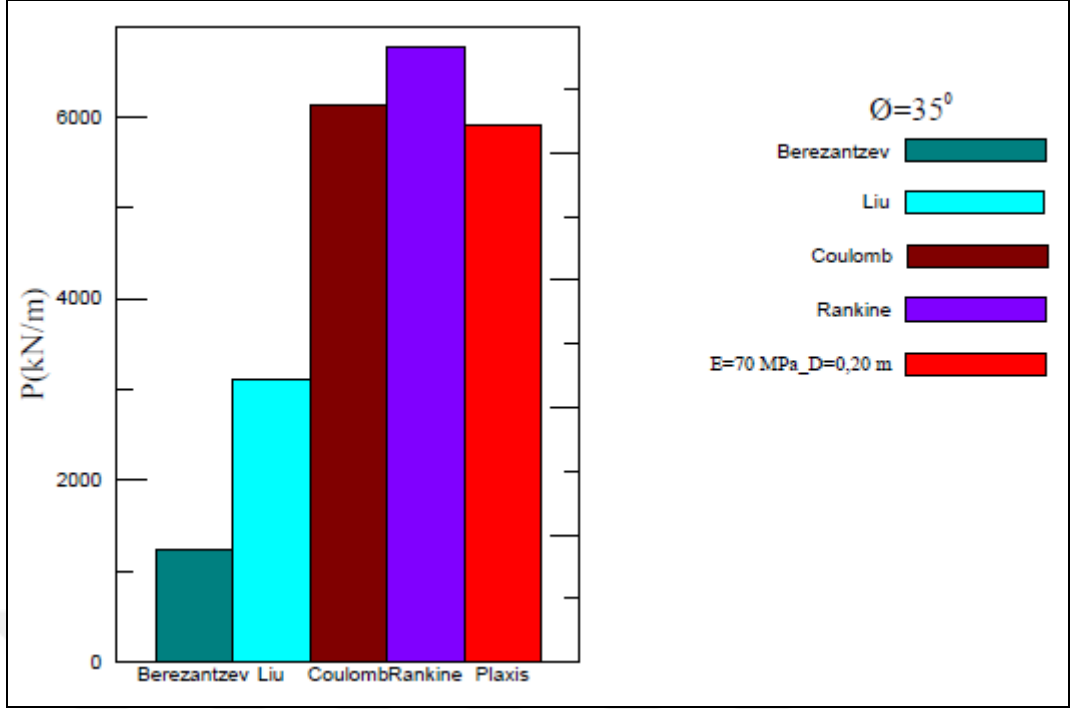
Şekil 4.14  $\phi=25^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

$\phi =25^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerleri ile kullanılan zemin parametreleri ve kazık çapı Şekil 4.14 üzerinde verilen Plaxis modelinde shaft kazığına etkileyen yanal kuvvet değeri incelendiğinde, Plaxis modelinden elde edilen yanal kuvvet değerinin tüm analitik çözümlerden daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen yanal kuvvet değerine en yakın değeri Rankine çözümünün verdiği görülmektedir.  $\phi =25^0$  için yapılan analizlerde  $\phi=20^0$  için yapılan analizlere göre Rankine çözümünden elde edilen yanal toprak basıncı değeri ile Plaxis modelinden elde edilen düşey shaft kazığına etkileyen yanal kuvvet değeri arasındaki fark daha azalmıştır.



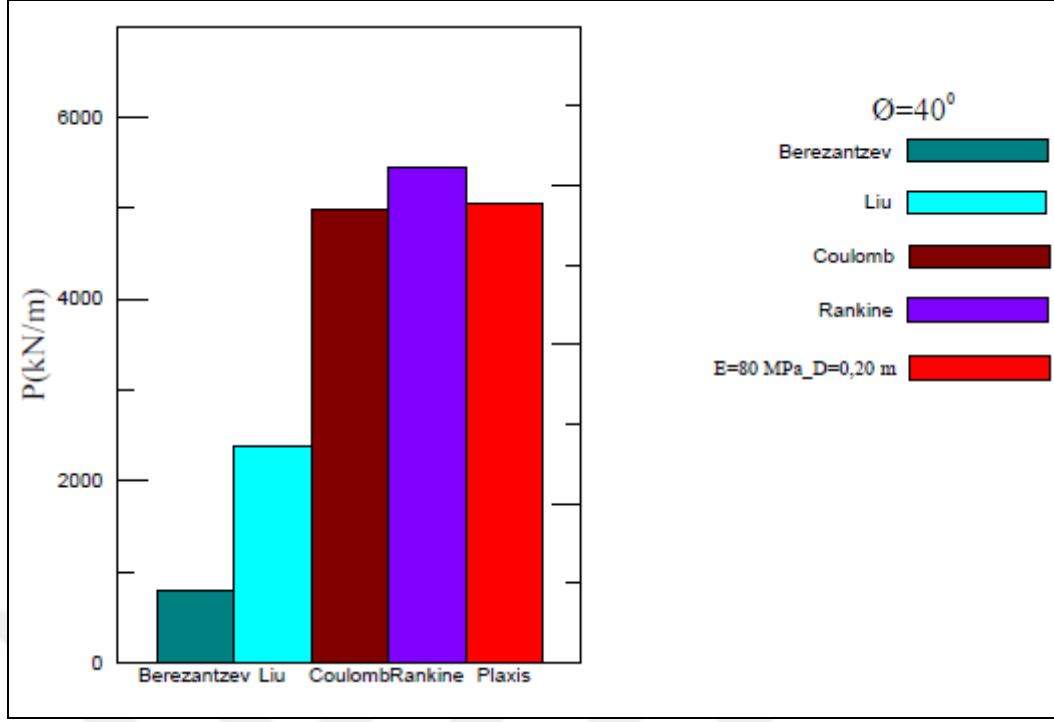
Şekil 4.15  $\phi=30^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değeriinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanıl kuvvet değeriinin karşılaştırılması

$\phi =30^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değeri ile kullanılan zemin parametreleri ve kazık çapı Şekil 4.15 üzerinde verilen Plaxis modelinde düşey şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri incelenğinde, kazı taban deplasmanlarının serbest bırakıldığı Plaxis modelinden elde edilen yanıl kuvvet değeri Rankine ve Coulomb çözümleri arasında yer almaktadır. Kazı taban deplasmanına izin verilmeyen ve  $E_{ur}^{ref}$  değeriinin elastisite modülünün ( $E_{50}^{ref}$ ) değeriinin sırasıyla 5 ve 10 katı alındığı Plaxis modellerinden elde edilen düşey şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvetlerin tüm yanıl kuvvet değeriinden daha yüksek çıktığı görülmektedir.



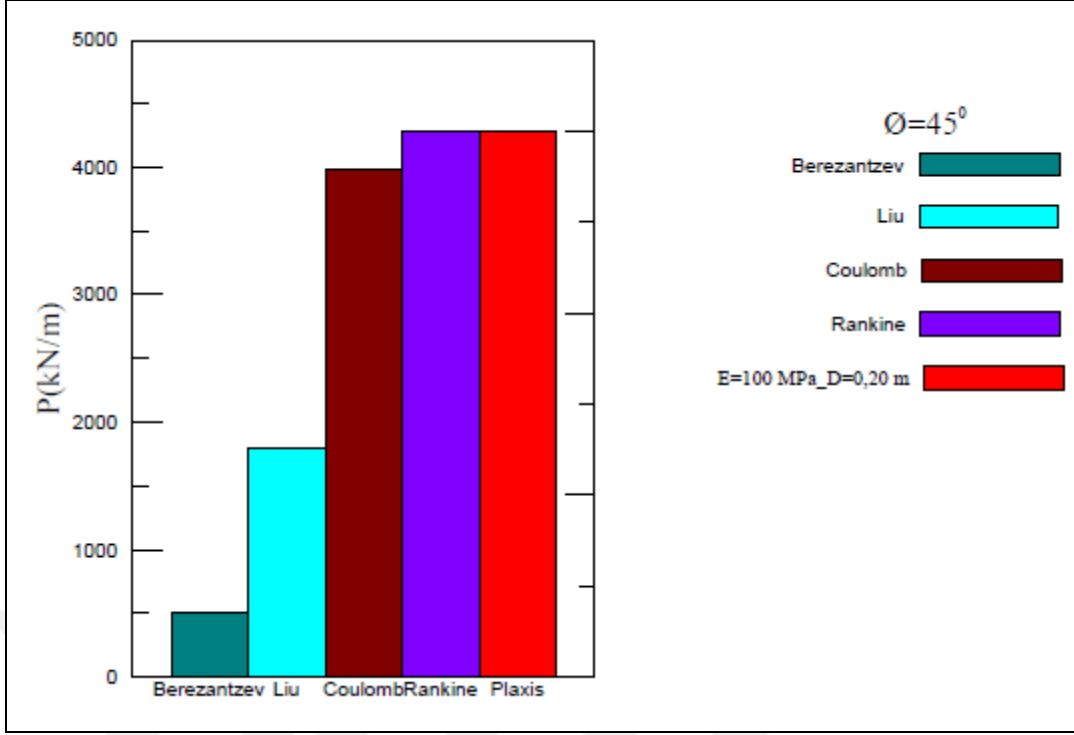
Şekil 4.16  $\phi=35^\circ$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değeriinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanıl kuvvet değeriinin karşılaştırılması

$\phi = 35^\circ$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değeri ile kullanılan zemin parametreleri ve kazık çapı Şekil 4.16 üzerinde verilen Plaxis modelinde şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değeri incelendiğinde, Plaxis modelinden elde edilen yanıl kuvvet değeri Rankine ve Coulomb çözümlerinden daha küçük elde edilmiştir.



Şekil 4.17  $\phi=40$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

$\phi=40^\circ$  için analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvet değerleri ile kullanılan zemin parametreleri ve kazık çapı Şekil 4.17 üzerinde verilen Plaxis modelinde düşey şaft kazığına etkileyen yanal kuvvet değeri incelendiğinde, Plaxis modelinden elde edilen yanal kuvvet değeri Rankine çözümünden daha küçük çıkmıştır. Nümerik analiz çözümü Coulomb çözümüyle çok yakın bir değer olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.18  $\phi=45^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değęerlerinin, Plaxis programından elde edilen ve analitik çözüme en yakın olan yanıl kuvvet değęerlerinin karşılaştırılması

$\phi=45^0$  için analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvet değęerleri ile kullanılan zemin parametreleri ve kazık çapı Şekil 4.18 üzerinde verilen Plaxis modelinde şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değęeri incelendiğinde, Plaxis modelinden elde edilen yanıl kuvvet değęeri Rankine çözümlüyle çok yakın bir değęer olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.3.a,b,c,d,e ve f'de görüldüğü üzere analitik çözümlere, nümerik analizlere en yakın yanıl kuvvet değęerleri her kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) için yapılan analizlerde, kazık çapı  $D=0,20$  m ve elastisite modülü  $E_{50}^{ref}$  olmak üzere söz konusu analizin en yüksek  $E_{50}^{ref}$  değęeri için elde edilmiştir. Bunun sebebi, en küçük kazık çapı  $D=0,2$  m çapa sahip kazıkların düşük rijitlik parametreleri sayesinde zemin deplasmanına izin vermesi ve yüksek elastisite modülü ( $E_{50}^{ref}$ ) değęerlerinin ise zemin mukavemetini arttırması olarak açıklanabilir.

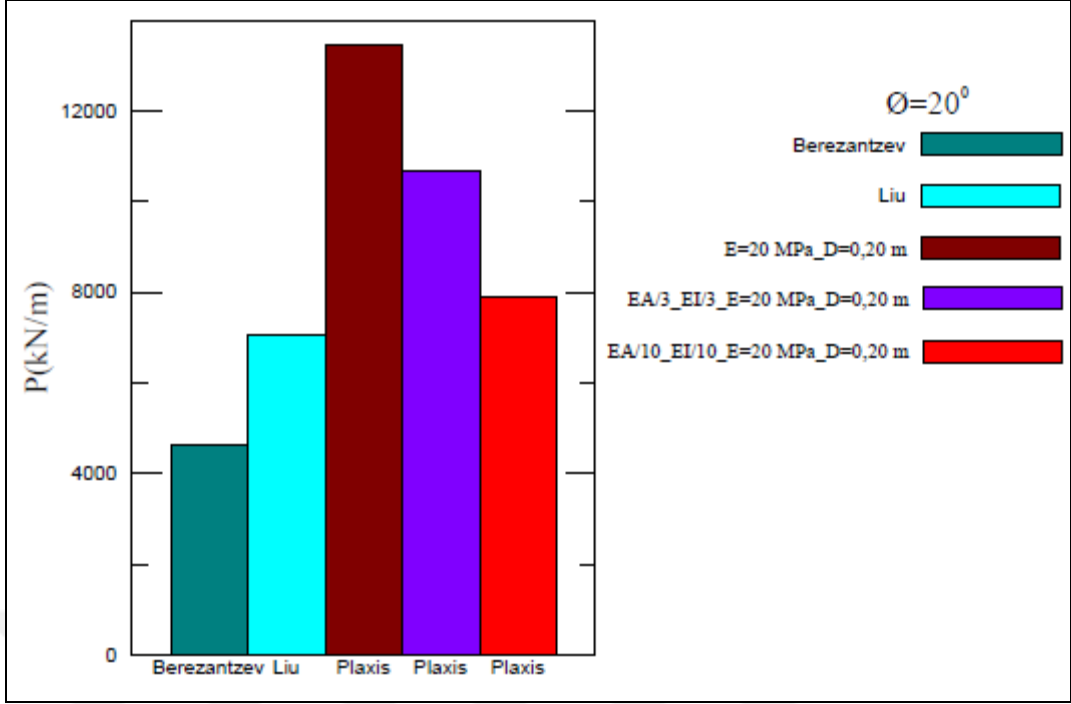
Plaxis analizlerinde, kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değęeri  $20^0$ ,  $25^0$  için şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değęerlerinde azalma göstererek Rankine çözümlüne yaklaşmıştır. Kayma mukavemeti açısı  $30^0$  değęerinde azalma devam ederek Rankine ve Coulomb değęerlerinin altında yer almış ve  $40^0$ ,  $45^0$  değęerlerinde tekrar yükselerek önce Coulomb daha sonra Rankine sonuçlarına yakın yanıl kuvvet değęerleri elde edilmiştir.



#### **4.4 Parametrik Çalışma Sonucunda 6 Ana Model ve 58 Alt Model için Kazıklı Duvar Arkasına Gelen Yanal Kuvvetlerin İncelenmesi ve Analitik Çözümler ile Karşılaştırılması**

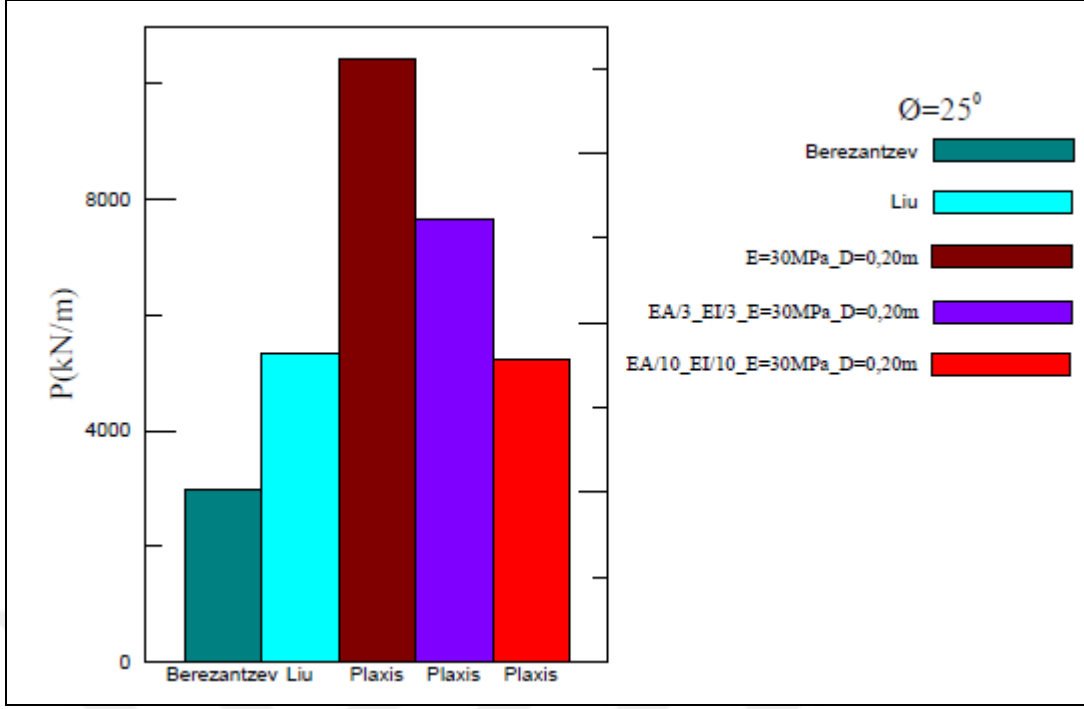
Analitik çözümler kullanılarak elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerleri ve nümerik analizler sonucunda Plaxis sonlu elemanlar (SE) programından elde edilen yanal kuvvet değerler ile karşılaştırıldığında, Plaxis 2D programından elde edilen sonuçların  $\phi=20^0$ ,  $\phi=25^0$ ,  $\phi=45^0$  için analitik çözümlerin en yüksek değerlerini veren Rankine çözümünden daha yüksek çıkmıştır.  $\phi=30^0$ ,  $\phi=40^0$  için analitik çözümlerin en yüksek iki değerini veren Coulomb ve Rankine değerlerinin arasında ve  $\phi=35^0$  için Coulomb çözümün biraz daha altında kaldığı görülmüştür.

Plaxis programında yapılan analizler için aynı kayma mukavemeti açısı kullanılarak yapılan analizlerde yanal kuvveti etkileyen en önemli parametrenin şaft kazıkları olarak modellenen plate elemanların EA ve EI parametreleri yani rijitlik değerleri olduğu görülmektedir. Kazık çapı arttıkça kazıkların rijitlik değerleri yükseldiği için sistemin rijitliği artmış deplasmanlar sınırlandırılmış ve bu nedenle yanal kuvvet değerlerinde devamlı bir artış gözlenmiştir. Bu nedenle, Liu ve diğerleri [4] tarafından elde edilen yanal kuvvet değerlerine en yakın yanal kuvvet değerlerinin elde edildiği alt model 7, 16, 25, 37, 46, 55 ' de yer alan kazıkların rijitlik parametreleri olan EA ve EI değerleri üç ve on değerlerine bölünerek analizler tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen yanal kuvvet değerleri Berezantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] tarafından bulunan yanal kuvvet değerleri karşılaştırılarak irdelenecektir.



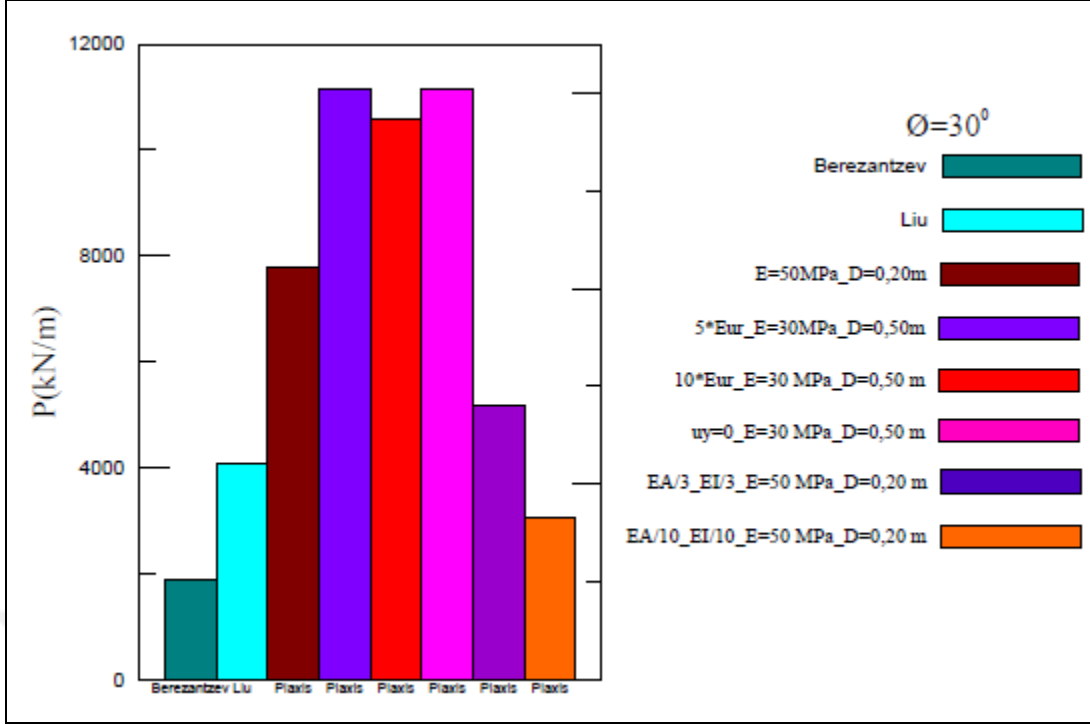
Şekil 4.19  $\phi=20^0$  için rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanıl kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi =20^0$  için Berazantzev [3] ve Liu ve diğerler [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerinin değıştirilmediği ve sırasıyla 3 ile 10 değerlerine bölüdüğü analizler karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölüdüğü analizden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değerinin azalma göstererek Liu ve diğerleri [4] çözüme yaklaştığı belirlenmiştir. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölüdüğü analiz sonucunda ise kazıklı duvar arkasına etki eden yanıl kuvvet değerinin kazık rijitlik parametresinin aynı bırakıldığı analiz sonucu ile 10 değerine bölüdüğü analiz sonucu arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılarak gerçekteşirilen Plaxis 2D analizlerinde, parametreler 3 değerinde ve 10 değerine bölüdüğünde şaft düşey kazığına etkiyen yanıl toprak basınçlarında sırasıyla %20 ve %40 oranlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir.



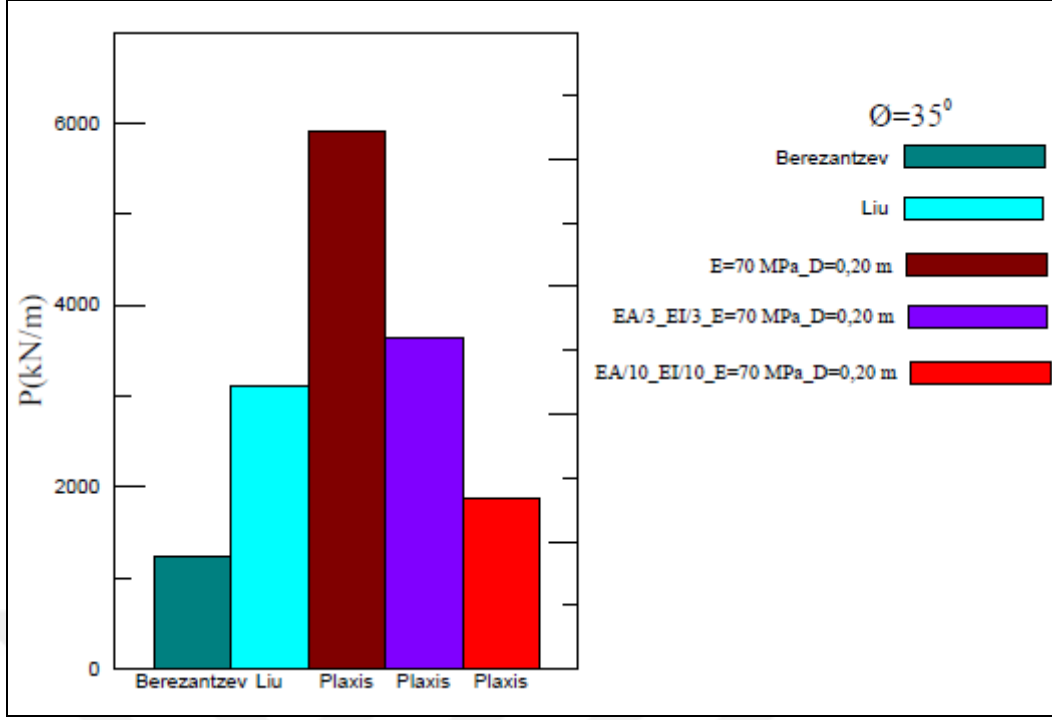
Şekil 4.20  $\phi=25^\circ$  için rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanıl kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi=25^\circ$  için Berazantzev[3] ve Liu ve diğerleri [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerini değıştirilmediği ve sırasıyla 3 ve 10 değerlerine bölündüğü analizler karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölündüğü analizinden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değerinin azalma göstererek Liu ve diğerleri [4] ile Berezantzev [3] çözümlerinin arasında bir değer aldığı belirlenmiştir. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölündüğü analiz sonucunda ise kazıklı duvar arkasına etki eden yanıl kuvvet değerinin Liu ve diğerleri [4] çözümü ile kazık rijitlik parametresinin 10 değerine bölündüğü analiz sonucu arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılılarak gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, parametreler 3 değerinde ve 10 değerine bölündüğünde şaft düşey kazığına etkiyen yanıl toprak basınçlarında sırasıyla %27 ve %50 oranlarında düşüş meydana geldiği görölmektedir.



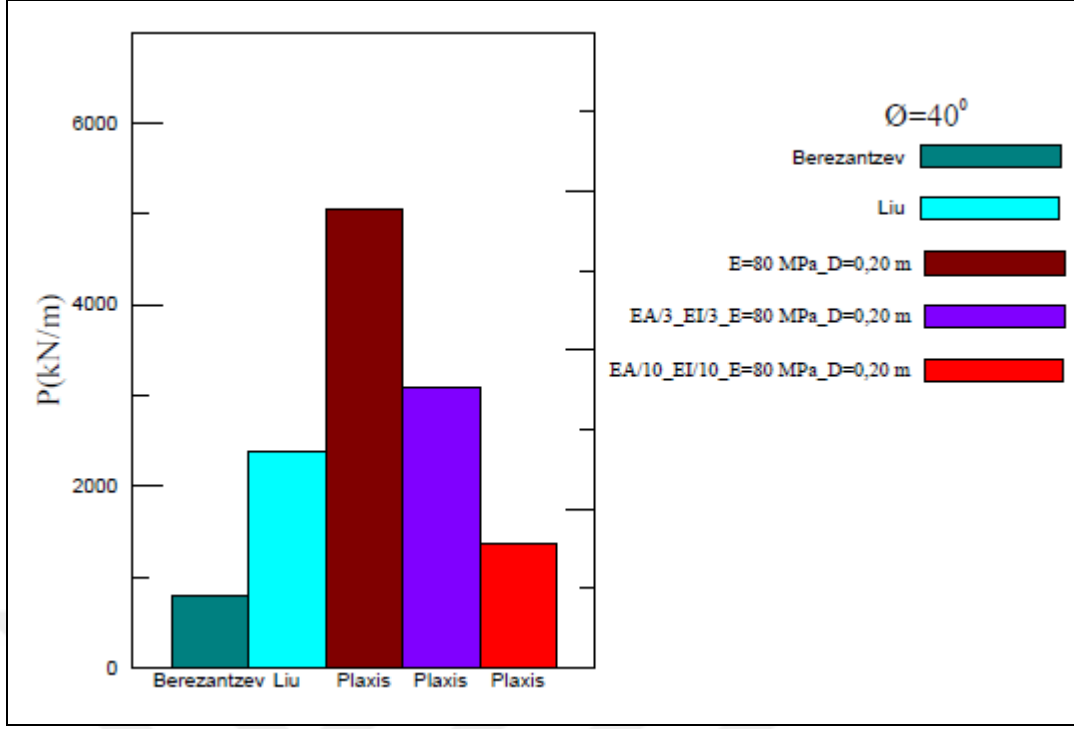
Şekil 4.21  $\phi=30^0$  için rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanıl kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi=30^0$  için Berazantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerini değiştirilmediği, 3 ile 10 değerlerine bölüdüğü kazı taban deplasmanına izin verilmediği ve  $E_{ur}^{ref}$  değerlerinin  $E_{50}^{ref}$  değerlerin sırasıyla 5 ve 10 katı alındığı analizler ile karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölüdüğü analizden elde edilen şaft kazığına etkileyen yanıl kuvvet değerinin azalma göstererek Liu ve diğerleri [4] ve Berezantzev [3] çözümlerinin arasında bir değer aldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölüdüğü analiz sonucunda ise kazıklı duvar arkasına etki eden yanıl kuvvet değerinin Liu ve diğerleri [4] çözümü ile kazık rijitlik parametresinin 10 değerine bölüdüğü analiz sonucu arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılarak gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, kazık rijitlik parametreleri 3 değerinde ve 10 değerine bölüdüğünde şaft düşey kazığına etkileyen yanıl toprak basınçlarında sırasıyla %27 ve %60 oranlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir.



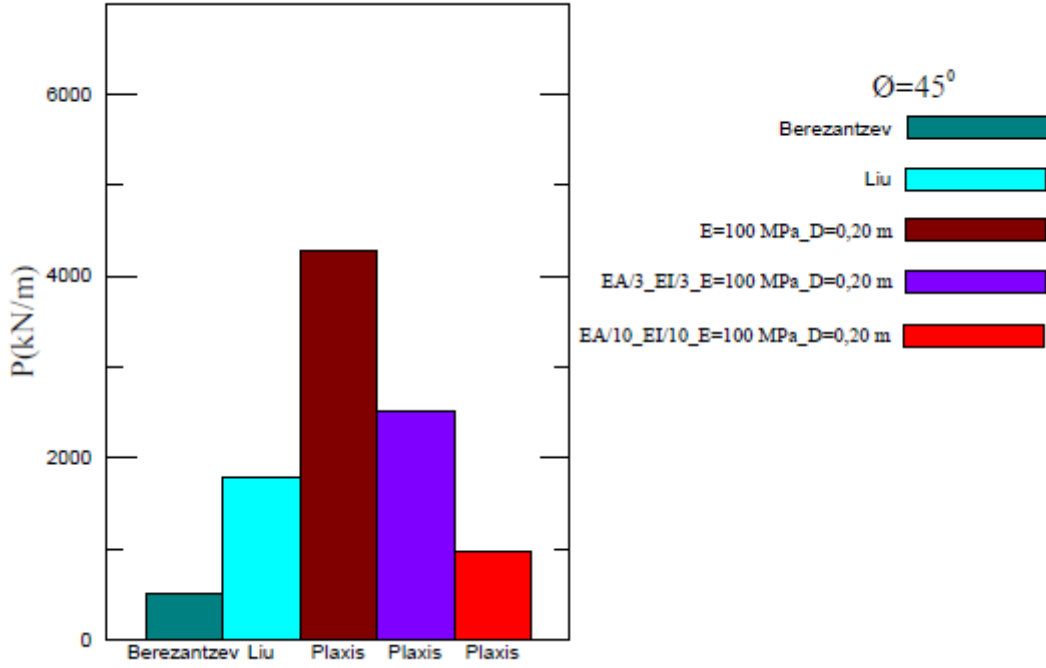
Şekil 4.22  $\phi=35^\circ$  Rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanal kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanal kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi=35^\circ$  için Berazantzev [3] ve Liu ve diğerleri [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerini değiştirilmediği ve sırasıyla 3 ile 10 değerlerine bölüdüğü analizler karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölüdüğü analizden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanal kuvvet değerinin azalma göstererek Liu ve diğerleri [4] ile Berezantzev [3] çözümlerinin arasında bir değer almıştır. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölüdüğü analiz sonucunda ise şaft kazığına etki eden yanal kuvvet değerinin kazık rijitlik parametresinin aynı bırakıldığı analiz sonucu ile 10 değerine bölüdüğü analiz sonucu arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılarak gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, parametreler 3 değerinde ve 10 değerine bölüdüğünde şaft düşey kazığına etkiyen yanal toprak basınçlarında sırasıyla %40 ve %70 oranlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.23  $\phi=40^\circ$  için Rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanıl kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi=40^\circ$  için Berazantzev [3] ve Liu ve diğlerleri [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerini değıştirilmediğı ve sırasıyla 3 ile 10 değıerlerine bölündüğü analizler karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölündüğü analizden elde edilen kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değıerinin azalma göstererek Liu ve diğlerleri [4] ile Berezantzev [3] çözümlerinin arasında bir değıer aldığı görülmektedir. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölündüğü analiz sonucunda ise şaft kazığına etki eden yanıl kuvvet değıerinin kazık rijitlik parametresinin aynı bırakıldığı analiz sonucu ile 10 değıerine bölündüğü analiz sonucu arasında ve Liu ve diğlerleri [4] çözümlerinin üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılıarak gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, parametreler 3 değıerinde ve 10 değıerine bölündüğünde şaft düşey kazığına etkiyen yanıl toprak basınçlarında sırasıyla %42 ve %73 oranlarında düşüş meydana geldiğı görülmektedir.



Şekil 4.24  $\phi=45^0$  rijitlik parametreleri düşürülmüş şaft kazıkları ile modellenmiş nümerik analizlerden elde edilen yanıl kuvvetler ile analitik çözümlerden elde edilen yanıl kuvvetlerin karşılaştırılması

$\phi=45^0$  için Berazantzev [3] ve Liu ve diğlereri [4] çözümleri ile Plaxis kazık rijitlik parametrelerini aynı bırakıldığı ve sırasıyla 3 ile 10 değlerlerine bölündüğü analizler karşılaştırıldığında, kazık rijitlik parametresinin 10'a bölündüğü analizden elde edilen şaft kazığına etkiyen yanıl kuvvet değlerinin azalma göstererek Liu ve diğlereri [4] ile Berezantzev [3] çözümlerinin arasında bir değler aldığı görülmektedir. Kazık rijitlik parametresinin 3'e bölündüğü analiz sonucunda ise şaft kazığına etki eden yanıl kuvvet değlerinin kazık rijitlik parametresinin aynı bırakıldığı analiz sonucu ile 10 değlerine bölündüğü analiz sonucu arasında kaldığı ve Liu çözümlünün üzerinde değler aldığı gözlemlenmiştir

Kazık rijitlik parametrelerinde azaltma yapılılarak gerçekleştirilen Plaxis 2D analizlerinde, parametreler 3 değlerine ve 10 değlerine bölündüğünde şaft düşey kazığına etkiyen yanıl toprak basınçlarında sırasıyla %45 ve %77 oranlarında düşüş meydana geldiği görülmektedir.

Kazıkların rijitlik parametrelerinin 3 ve 10 değlerlerine bölündüğü Plaxis analizlerinde kazıklı duvar arkasına etkiyen yanıl kuvvet değlerinde sırasıyla %20 - 45 ve %40 - 75 arasında düşüşler meydana gelmiştir. Elde edilen yanıl kuvvet değlerinin, kazık

rijitlik parametresinin 10 değerine bölündüğü analizlerde Liu ve diğerleri [4] ve Berezantzev [3] çözümlerinin arasında, 3 değerine bölündüğü analizlerde ise kazık rijitlik parametresinin değiştirilmediği analiz sonuçlarından elde edilen değerler ile Liu ve diğerleri [4] çözümleri arasında kaldığı görülmüştür.





## BÖLÜM 5

### SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında dairesel en kesitli şaftlarda düşey iksa elemanlarına gelen toprak basınçlarına etki eden faktörleri göstermek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı zemin mukavemeti, duvar ve zemin rijitliği göz önüne alınarak, PLAXIS 2D programında eksenel simetri koşulları altında granüler zemin içerisinde 10 m çapında düşey shaft kazılarının sayısal analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden elde edilen toprak basınçları literatürde yer alan toprak basıncı teorilerinden elde edilenler ile karşılaştırılmıştır.

Plaxis 2D programında analizi gerçekleştirilen modellerde elde edilen yanal toprak basıncı değerleri, dairesel enkesitli düşey shaft duvarlarına etki eden yanal toprak basıncı değerlerinin elde edilmesi amacıyla önerilen analitik çözümlerden daha yüksek çıkmıştır. Bunun sonucunda analitik çözümlerden elde edilen yanal toprak basıncı değerlerini sayısal analizlerle elde edebilmek için zemin mukavemeti, duvar ve zemin rijitliği parametreleri değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır.

Sayısal analizlerde duvar rijitliği gerçek değerleri sırasıyla 3 ve 10 değerlerine bölünerek dikkate alındığında, dairesel en kesitli düşey iksa elemanlarına etki eden toprak basıncı değerlerinde önemli ölçüde azalmalar olduğu ve dairesel en kesitli shaft duvarlar için öne sürülen analitik çözümlere yaklaştığı görülmektedir.

Sayısal analizde kazı taban deplasmanlarının sıfırlandığı sınır koşulu uygulamanın yanal toprak basınçlarında dikkate değer bir düşüş sağlamamıştır.

Gerçekleştirilen bu karşılaştırmalar sonucunda düşey şaft duvarlarına etkiyen toprak basınçlarının belirlenmesinde belirli oranlarda duvar rijitliği azaltılmasının en uygun yaklaşım olduğu görülmektedir.

Şaftlara etkiyen yanal toprak basınçlarının sayısal analizinde gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için arazi veya laboratuvar model deneyleri ile şaft kazılarında yapılacak aletsel gözlemler ve bunların sayısal modellerinin geri analizler ile karşılaştırılmasına ihtiyaç vardır. Diğer yandan yapılacak sayısal analizlerde kohezyon ve sürşarj etkisinin de incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

---

- [1] Coulomb, C.A., (1776). “An Attempt to Apply The Rules of Maxima and Minima to Several Problems of Stability Related to Architecture”, Mem. Acad. Roy., des Sciences, 7:343-382.
- [2] Rankine, W.J.M., (1857). “On The Stability of Loose Earth”, Philosophical Transactions of The Royal Society of London, 147:9-27.
- [3] Berezantzev, V.G., (1958). “Earth Pressure on The Cylindrical Retaining Walls”, Conference on Earth Pressure Problems, 1958, Brussels.
- [4] Liu, F.Q., Wang, J.H. ve Zhang L.L., (2009). “Axi-symmetric Active Earth Pressure Obtained by The Slip Line Method with A General Tangential Stress Coefficient ”, Computers and Geotechnics, 36:352-358.
- [5] Cheng, Y.M., Au, S.K., Hu, Y.Y ve Wei W.B., (2008). “Active Pressures for Circular Cut with Berezantzev’s and Prater’s Theories, Numerical Modeling and Field Measurements ”, Soils and Foundations, 48(5):621-631.
- [6] Özyaydın, K., (1989). Zemin Mekaniği, Meya Matbaacılık ve Yayıncılık, İstanbul.
- [7] Tobar, T. ve Meguid M.A., (2010). “Comparative Evaluation of Methods to Determine Distribution on Cylindrical Shafts”, Tunneling and Underground Space Technology, 25(2):188-197.
- [8] Kumbasar, V. Ve Kip. F., (1984). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- [9] Uzuner, B.A., (1995). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Yayınevi, Trabzon.
- [10] Yıldırım, S., (2009). Zemin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsen Kitapevi, İstanbul.
- [11] Berilgen, M.M., (2012). Toprak Basıncı Teorileri Ders Notları, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [12] Westergaard, H.M., (1940). “Plastic State of Stress Around a Deep Well”, J Boston Society Civil Engineering, 27:1-5.
- [13] Terzaghi, K., (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons., New York.

- [14] Prater, E.G., (1977). "An Examination of Some Theories of Earth Pressure on Shaft Lining", Canadian Geotechnical Journal, 19(7):91-106.
- [15] Cheng, Y.M. ve Hu Y.Y, (2005). "Active Earth Pressure on Circular Shaft Lining obtained by Simplified Slip Line Solution with General Tangential Stress Coefficient", Chin J Geotech Eng, 27(1):110-5
- [16] Liu, F.Q., ve Wang, J.H., (2008). "A Generalized Slip Line Solution to The Active Earth Pressure on Circular Retaining Walls", Computers and Geotechnics, 35:155-164
- [17] Sokolovski, V.V., (1960). Statics of Soil Media, Pergamon Press., London.
- [18] Brinkgreve, R.B.J., Engin E., ve Swolfs, W.M. (ed) (2012). Plaxis Manual, Plaxis BV., Hollanda.
- [19] Kengil, O., (2008). "Elasto-Plastik Zemin Davranışı için Mekanik Parametrelerin Laboratuvar Deneyleri ile Elde Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Cihan Ramazan USLU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 17.09.1989 / ÇANAKKALE  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : cihanruslu@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2013
Lise	Fen – Matematik	Edremit Anadolu Lisesi	2007

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	On Zemin Mühendisliği	Geoteknik Mühendisi
2013	GEOgrup	İnşaat Mühendisi

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Uslu, C.R., Berilgen, M., Selçuk, M.E., (2016). “Şaftlarda Yanal Toprak Basınçlarının Sayısal Analizlerle İncelenmesi” 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 12 Ekim 2016, Erzurum.

