



T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KONSOL İKSA YAPILARINDA TASARIM YÖNTEMLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI

ENGİN AKTAŞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY  
OCAK-2018

**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KONSOL İKSA YAPILARINDA TASARIM YÖNTEMLERİNİN**  
**ARAŞTIRILMASI**

**ENGİN AKTAŞ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**OCAK-2018**

T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tezin Adı: Konsol İksa Yapılarında Tasarım Yöntemlerinin Araştırılması  
Öğrencinin, Adı Soyadı: Engin Aktaş  
Tez Savunma Tarihi: 09/01/2018  
Kod No:

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ  
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığımı onaylarım.

Doç. Dr. Murat ÖRNEK  
Enstitü ABD Başkanı

Bu tez tarafımda (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER  
İkinci Tez Danışmanı

Doç. Dr. Murat ÖRNEK  
Tez Danışmanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri:

İmzası

Doç Dr. Murat ÖRNEK

.....

Doç Dr. Hakan T. TÜRKER

.....

Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

.....

Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk CANSIZ

.....

Yrd. Doç. Dr. Ali DOĞAN

.....

Not : Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

.../.../...

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılmayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Engin AKTAŞ**



*Eşim Çiğdem ve kızım Lisa'ya*

## ÖZET

### KONSOL İKSA YAPILARINDA TASARIM YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Günümüzde özellikle şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerdeki inşaat mühendisliği uygulamalarında derin kazılara ihtiyaç giderek artmaktadır. Derin kazılarda stabilitenin sağlanması da önemli geoteknik konuları arasında yer almaktadır. Kazı stabilitesinin sağlanması adına inşa edilen iksa yapılarının tasarımı hakkında literatürde birçok analitik ve sayısal yöntem önerilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yanal zemin basıncı ve iksa yapılarının tasarımı konuları ile ilgili farklı analitik yöntemler incelenmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemine dayanan iki boyutlu geoteknik yazılımı Plaxis 2D kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde verilen analitik yaklaşımların değerlendirildiği çözümlenelerde Mathematica yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada kazı derinliği, palplanş gömülme derinliği, palplanş rijitliği, zemin mukavemeti, zemin modeli gibi parametreler değişken olarak ele alınmış ve her bir analizin sonucunda eğilme momenti değerleri belirlenmiştir. Ardından, sayısal analiz sonuçları ile analitik yaklaşım sonuçları karşılaştırılarak elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

2018, 70 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Palplanş, iksa yapıları, yanal basınç, analitik yöntem, sonlu elemanlar yöntemi

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF DESIGN METHODS IN CANTILEVER RETAINING STRUCTURES

Nowadays especially in urbanized areas, there is a rising need for deep excavations civil engineering applications. Providing stability in deep excavations is also an important geotechnical issue. Numerous analytical and numerical methods have been proposed in the literature on the design of retaining structures built for providing excavation stability.

In this study, different analytical methods related to the lateral soil pressures and design of retaining structures has been investigated. For this purpose, numerical analyzes were performed using the finite element method based two-dimensional geotechnical software Plaxis 2D. Mathematica was used in the evaluation of the analytical approaches given in the literature. In the study, parameters such as excavation depth, pile embedment depth, pile rigidity, soil strength, and soil model were considered as variables and the bending moments were determined after each analysis. Then, the findings from comparison of the numerical and analytical results were interpreted.

2018, 70 pages

**Keywords:** Piles, retaining structures, lateral pressures, analytical approaches, finite element method

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgilerini ve tecrübelerini sakınmadan, hiçbir yardımı esirgemeyen sayın danışman hocalarım Doç. Dr. Murat ÖRNEK ve Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın büyük bir kısmını oluşturan Plaxis 2D yazılımını kullanabilmemi sağladığı için sayın danışman hocam Doç. Dr. Murat ÖRNEK'e ayrıca teşekkür etmek isterim.

Aklıma takılan her soru işaretinde bilgisini ve yardımını esirgemeyen sayın hocam Arş. Gör. Yakup TÜREDİ'ye teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca destek olmakla kalmayıp aynı zamanda beni teşvik eden değerli annem Dilek ŞİMŞEK'e ve kardeşim Emre AKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatın her anında olduğu gibi çalışmalarım süresince de desteğini hiç eksiltmeyen sevgili eşim Çiğdem AKTAŞ'a ve tezimi yazdığım dönemde dünyaya gelerek bana motivasyonların en büyüğünü veren canım kızım Lisa AKTAŞ'a çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	I
ABSTRACT .....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Serbest Gömülü Konsol Palplanşlar.....	3
2.2. Ankrajlı Palplanşlar .....	13
3. İKSA UYGULAMALARINDA PALPLANŞLAR.....	17
3.1. Palplanş Sistemlerinde Yapısal Davranış.....	19
3.2. Palplanş Sistemlerinde Yanal Zemin Basınçlarının Belirlenmesi.....	22
3.2.1. Rankine Teorisi .....	22
3.2.2. Coulomb Teorisi.....	24
3.3. Palplanş Sistemlerinde Tasarım Yöntemleri .....	25
3.3.1. Konsol Palplanşlar.....	25
3.3.2. Tek Ankrajlı Palplanşlar.....	28
3.3.3. Çok Ankrajlı Palplanşlar .....	30
4. SAYISAL ANALİZ .....	32
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	32
4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Hesaplama Adımları .....	33
4.3. Sayısal Analiz Programı (Plaxis) .....	35
4.3.1. Girdi (Input) .....	35
4.3.2. Hesaplama (Calculation) .....	39
4.3.3. Çıktı (Output) .....	40
4.3.4. Eğriler (Curves).....	41
4.4. Zemin Modelleri.....	42

5. ANALİTİK YAKLAŞIM.....	49
5.1. Analitik Yöntem Hesap Adımları.....	49
5.2. Hesap Adımlarının Mathematica İle Kodlanması .....	52
6. SAYISAL VE ANALİTİK YAKLAŞIMLARIN KARŞILAŞTIRMALI SONUÇLARI.....	55
6.1. Seri I (Kazı Derinliğinin Etkisinin Araştırılması).....	56
6.2. Seri II (Gömülme Derinliğinin Etkisinin Araştırılması) .....	58
6.3. Seri III (Palplanş Rijitliğinin Etkisinin Araştırılması).....	62
6.4. Seri IV (Zemin Mukavemetinin Etkisinin Araştırılması) .....	63
6.5. Seri V (Zemin Modelinin Etkisinin Araştırılması) .....	65
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	67
KAYNAKLAR .....	68
ÖZGEÇMİŞ .....	70

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Engel metodu. Parabolik net zemin basıncı dağılımı .....	3
Şekil 2.2.	Krey metodu. Doğrusal zemin basınç dağılımı .....	4
Şekil 2.3.	Blum metodu. Doğrusal zemin basınç dağılımı.....	4
Şekil 2.4.	Brinch Hansen metodunda gösterilen zemin basınç dağılımı.....	5
Şekil 2.5.	Bransby ve Milligan (1975) tarafından yapılan bir testte X-ray metodu kullanılarak kumdaki yer değiştirmeler .....	6
Şekil 2.6.	(a) Fourie ve Potts (1989) tarafından yapılan sonlu elemanlar ağı. Kare şekilli zemin alanının kenar uzunluğu 100m'dir. (b) $K_0=2$ durumu için deplasmanlar .....	7
Şekil 2.7.	Kazı derinliği-Yatay deplasman grafiği.....	8
Şekil 2.8.	King metodu için varsayılan net basınç diyagramı.....	9
Şekil 2.9.	King yönteminde $\varepsilon'=0.35$ eğrisi kullanılarak gömülme derinliğinin bulunması.....	10
Şekil 2.10.	Sonlu elemanlar ağ yapısı (Day, 1999).....	11
Şekil 2.11.	Day (1999) tarafından yapılan farklı çalışmalar .....	11
Şekil 2.12.	Sıfır net zemin basıncı noktası (Day, 1999). .....	12
Şekil 2.13.	Rowe' un tasarladığı ankrajlı palplanş modeli .....	13
Şekil 2.14.	Ankrajlı palplanşların tasarımı için önerilen grafik (Rowe, 1952).....	14
Şekil 2.15.	Plant (1972) tarafından geliştirilen ölçekli palplanş modeli.....	14
Şekil 2.16.	Kademeli kazıda X-ışını yöntemiyle ölçülen yer değiştirmeler.....	15
Şekil 2.17.	Göçme yüzeyinin konumu.....	16
Şekil 3.1.	Konsol Palplanş.....	17
Şekil 3.2.	Ankrajlı Palplanş.....	18
Şekil 3.3.	Ahşap palplanş.....	18
Şekil 3.4.	Betonarme palplanş.....	19
Şekil 3.5.	Çelik Palplanş.....	19
Şekil 3.6.	Harekete göre yatay zemin basıncındaki değişim.....	21
Şekil 3.7.	Mohr Coulomb göçme zarfı.....	21
Şekil 3.8.	Kayma yüzeyleri, a) Pasif sınır durumu b) Aktif sınır durumu.....	22
Şekil 3.9.	Kohezyonun dikkate alındığı Mohr-Coulomb göçme kriteri.....	23
Şekil 3.10.	Coulomb kama analizi.....	24

Şekil 3.11.	Konsol palplanşa etkiyen zemin basıncı (şematik).....	25
Şekil 3.12.	Tam yöntem ve zemin basınç dağılımındaki ani değişim.....	26
Şekil 3.13.	Basitleştirilmiş yöntem. Dönme noktası altındaki basıncın kuvvet (R) olarak gösterilmesi .....	27
Şekil 3.14.	Kademeli yöntem, net basınç diyagramı.....	27
Şekil 3.15.	Ankrajlı palplanşta net zemin basıncı.....	28
Şekil 3.16.	Serbest zemin basıncı yöntemi .....	29
Şekil 3.17.	Sabit zemin destek metodu.....	29
Şekil 3.18.	Ankrajlı palplanşların tasarımı için Blum' ın eşdeğer kiriş yöntemi .....	30
Şekil 4.1.	Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması.....	33
Şekil 4.2.	Sonlu elemanlar.....	34
Şekil 4.3.	Genel ayarlar.....	36
Şekil 4.4.	Model geometrisi .....	36
Şekil 4.5.	Yükler ve sınır koşulları.....	37
Şekil 4.6.	Malzeme özellikleri.....	37
Şekil 4.7.	Sonlu elemanlar ağ yapısı.....	38
Şekil 4.8.	Başlangıç koşulları.....	39
Şekil 4.9.	Hesaplama aşamaları.....	39
Şekil 4.10.	Hesaplama arayüzü.....	40
Şekil 4.11.	Palplanşa etkiyen kesme kuvveti ve moment diyagramları.....	41
Şekil 4.12.	Gerilme, deformasyon ve yük sonuç tablosu.....	41
Şekil 4.13.	Eğri.....	42
Şekil 4.14.	$E_0$ ve $E_{50}$ Rijitlik Modüllerinin Tanımlanması .....	44
Şekil 4.15.	Göçme Anında Gerilme Zarfları .....	47
Şekil 5.1.	Yatay basınç ve maksimum moment diyagramları (Das, 1984).....	49
Şekil 6.1.	Kazı derinliğinin etkisi (1. Grup).....	57
Şekil 6.2.	Kazı derinliğinin etkisi (2. Grup).....	58
Şekil 6.3.	Gömülme derinliğinin etkisi (1. Grup).....	60
Şekil 6.4.	Gömülme derinliğinin etkisi (2. Grup).....	61
Şekil 6.5.	İksa rijitliğinin etkisi.....	63
Şekil 6.6.	Zemin mukavemetinin etkisi.....	64
Şekil 6.7.	Zemin modelinin etkisi.....	66

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 6.1.	Kullanılan parametreler ve değerleri .....	55
Çizelge 6.2.	Zemin modeli parametreleri (1. Grup) .....	56
Çizelge 6.3.	Kazı derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (1. Grup).....	56
Çizelge 6.4.	Zemin modeli parametreleri (2. Grup) .....	57
Çizelge 6.5.	Kazı derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (2. Grup).....	58
Çizelge 6.6.	Zemin modeli parametreleri (1. Grup) .....	59
Çizelge 6.7.	Gömülme derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (1. Grup) .....	59
Çizelge 6.8.	Zemin modeli parametreleri (2. Grup) .....	60
Çizelge 6.9.	Gömülme derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (2. Grup) .....	61
Çizelge 6.10.	Zemin modeli parametreleri .....	62
Çizelge 6.11.	İksa rijitliğinin etkisi için veriler ve sonuçlar.....	62
Çizelge 6.12.	Mohr-Coulomb zemin modeli parametreleri.....	64
Çizelge 6.13.	Pekleşen zemin modeli parametreleri.....	65
Çizelge 6.14.	Mohr-Coulomb zemin modeline ait veriler ve sonuçlar.....	65
Çizelge 6.15.	Pekleşen zemin modeline ait veriler ve sonuçlar .....	65

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\varphi$	Kayma mukavemeti açısı
$c$	Zemin kohezyonu
$c_a$	Adezyon
$c_u$	Drenajsız kayma mukavemeti
$D$	Ankraj kök çapı, çivi deliği çapı
$E$	Elastisite modülü
$EA$	Ankraj kökü rijitliği
$EI$	Eğilme rijitliği
$K_a$	Aktif toprak basıncı katsayısı
$K_o$	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$K_p$	Pasif toprak basıncı katsayısı
$L$	Ankraj boyu
$M_{max}$	Maksimum moment
$P_a$	Aktif toprak basıncı
$P_p$	Pasif toprak basıncı
$\alpha$	Duvarın yatayla yaptığı açı
$\beta$	Duvar arkasındaki eğimli bölgenin yatayla yapmış olduğu açı
$\beta$	Zemin yüzünün yatayla yaptığı açı
$\gamma$	Zeminin birim hacim ağırlığı
$\gamma_d$	Suya doymun birim hacim ağırlığı
$\gamma_k$	Kuru birim hacim ağırlığı

$\nu$  Poisson oranı

$\tau$  Kayma gerilmesi

$\psi$  Kayma yüzeyinin yatayla yaptığı açı

### **KISALTMALAR**

YASS Yeraltı su seviyesi



## 1. GİRİŞ

Dayanma yapıları, zeminin hareketini engellemek veya sınırlamak ve derin kazı gerektiren geoteknik uygulamalarına imkan sağlamak amacıyla inşa edilen yapı elemanlarıdır. Malzemelerine, geometrilerine ve çalışma prensiplerine göre sınıflandırılabilen farklı tipte dayanma yapıları mevcuttur. Genel olarak dayanma yapısı çeşitleri; ağırlık duvarları, yarı ağırlık duvarları, betonarme konsol duvarlar, payandalı duvarlar, toprakarme duvarlar, diyafram duvarlar ve palplanş perdelerdir.

Günümüzde konut, işyeri, hastane, alışveriş merkezi gibi yapıların bodrum kat sayılarının artması, metro istasyonları gibi yeraltı yapılarının yaygınlaşması nedeni ile inşaat uygulamalarında derin kazı yöntemlerine sıklıkla başvurulmaktadır. Bahsedilen bu yapıların birçoğu şehir içlerinde ve aktif yapılaşmanın olduğu bölgelerde yapılmaktadır. Bu nedenle inşaat alanı, dolayısı ile kazı yapılacak alan oldukça sınırlıdır. Bu tip inşaat senaryolarında, kazı yaparken şev oluşturulması pek mümkün olmamaktadır. Mevcut durum ve nedenler düşünüldüğünde derin kazılar esnasında iksa yapılarının kullanımı zorunlu hale gelmeye başlamıştır. Palplanşlar ve palplanş adı altında incelenebilecek diyafram duvarlar iksa yapısı olarak oldukça yaygın kullanılan yapılardır.

Palplanşlar 20. yüzyılın başlarına kadar nadiren kullanılmıştır. 1950'lere yaklaşıldığında mevcut yapıların yakınında derin kazı yapılması, yeraltı yapıları ve liman yapılarının inşası gibi mühendislik uygulamalarında iksa sistemleri büyük önem kazanmıştır. İş makinelerindeki gelişmeler de betonarme ve çelik palplanşların uygulanmasına kolaylık sağlamıştır.

Palplanşlar ile ilgili ilk tasarım yöntemleri 1900'lerin başında geliştirilmiştir. Sonrasında birçok araştırmacı bu konuyla ilgili çalışma yapmıştır. Bu araştırmalar genel olarak Klasik (Analitik) Tasarım Yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Yaklaşık olarak son 50 yıldır klasik yöntemlerde ciddi değişiklikler yaşanmamıştır. Bunun yerine, dönemin imkanlarından faydalanarak mühendislerin tasarımlarında güvenli sonuca daha hızlı ulaşmasını sağlayacak Sayısal Tasarım Yöntemleri geliştirilmiştir. Sayısal tasarım, bilgisayar teknolojilerinden yararlanılarak, hesap adımlarının kodlanması ve sayısal işlemlerin yaptırılmasıdır. Farklı kodlama yöntemleri kullanılarak farklı yazılımlar üretilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı analitik tasarım yöntemleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Zemin birim hacim ağırlığı,



içsel sürtünme açısı, iksa rijitliği ve zemin modeli gibi farklı değişkenler dikkate alınarak yapılan çalışmalarda analitik ve sayısal tasarım yöntemlerinin işleyişinin anlaşılması ve aralarındaki ilişkinin ortaya konulması hedeflenmiştir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular ve değerlendirmeler, aşağıdaki sıra ile sunulmuştur.

Bölüm 1'deki "Giriş" kısmında, geoteknik uygulamalar ve iksa yapılarının tasarımı hakkında bilgilendirme yapılmış, bu tez çalışmasından kısaca bahsedilmiştir.

Bölüm 2'deki "Önceki Çalışmalar" kısmında, iksa yapıları hakkında literatür taraması yapılmış ve yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

Bölüm 3'te palplanşların iksa uygulamalarındaki kullanımı ve tasarım yöntemleri hakkındaki bilgiler "İksa Uygulamalarında Palplanşlar" başlığı altında verilmiştir.

Bölüm 4'teki "Sayısal Analiz" kısmında, sonlu elemanlar yönteminden ve sayısal analiz programından bahsedilmiştir.

Bölüm 5'te palplanş tasarımına ilişkin analitik yöntem hesap adımlarından, "Analitik Yaklaşım" başlığı altında bahsedilmiştir.

Bölüm 6'daki "Analitik ve Sayısal Analizlerin Karşılaştırmalı Sonuçları" kısmında, yapılan analizler sonucu elde edilen moment değerleri karşılaştırılmış ve bu sonuçlar yorumlanmıştır.

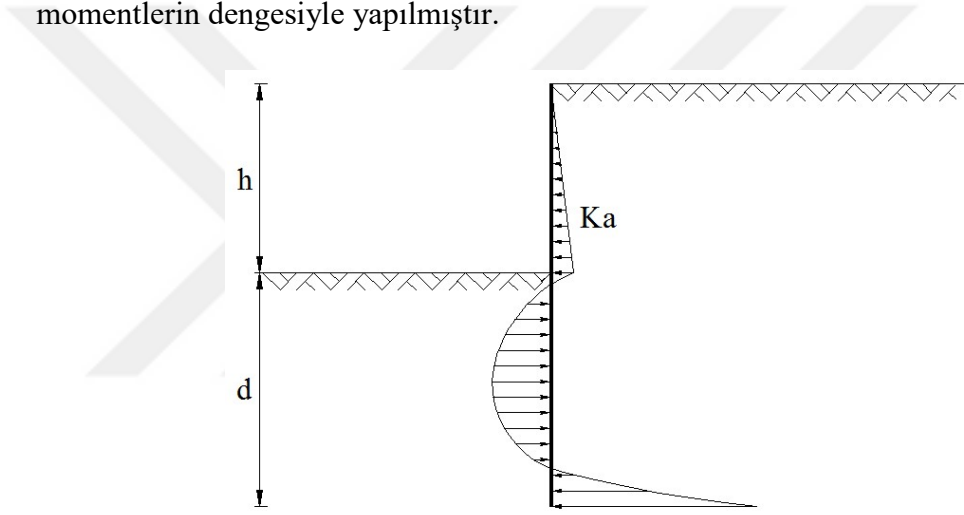
Bölüm 7'de "Sonuçlar ve Öneriler" başlığı altında, elde edilen sonuçlar verilmiştir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Palplanşlar ile ilgili ilk çalışmalar 20. yüzyılın başlarında yapılmaya başlanmıştır. Bu bölümde araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalar, serbest gömülü konsol palplanşlar ve ankrajlı palplanşlar olmak üzere iki grupta ele alınmıştır.

### 2.1. Serbest Gömülü Konsol Palplanşlar

Konsol palplanşlar 20. yüzyılın başlarından önce nadiren tasarlanmıştır. Deneysel gözlemlere dayanan ilk tasarım yöntemlerinden biri Engels (1903) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde tüm derinlik boyunca parabolik bir net zemin basıncı dağılımı önerilmiştir (Şekil 2.1) ve gömülme derinliğinin hesaplanması, yatay kuvvetlerin ve momentlerin dengesiyle yapılmıştır.



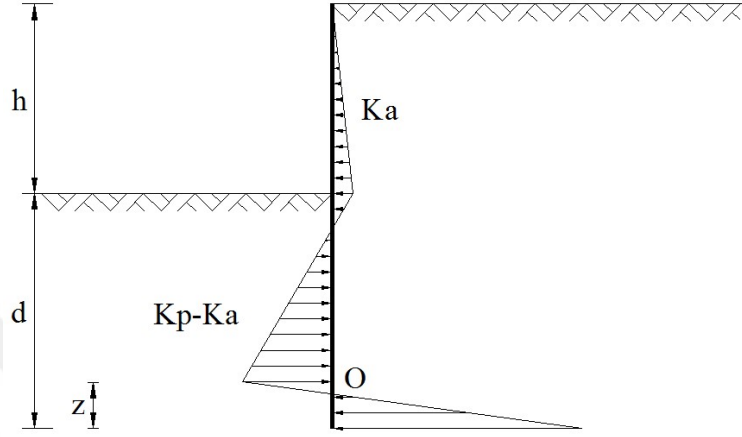
Şekil 2.1 Engels metodu. Parabolik net zemin basıncı dağılımı

Yöntem aşağıdaki hususlarda farklılıklar getirmesi açısından birçok araştırmaya ışık tutmuştur.

- Zemin basıncı dağılımlarının şekli
- Duvarın dengesini hesaplama yöntemi
- Zemin basıncı katsayılarının türetilmesinde kullanılan teoriler
- Güvenlik faktörünün tanımı ve büyüklüğü
- Duvar sürtünmesinin varsayılan dağılımı ve yönü
- Zeminin içsel sürtünme açısını elde etme yöntemi.

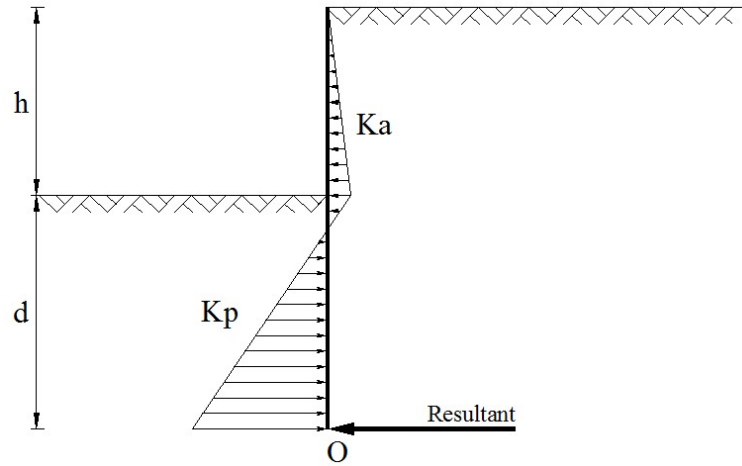
Krey (1932) tarafından, kazı kotunun üstündeki kısmın arkasındaki aktif zemin basıncının ve kazı kotunun hemen altındaki kısmın önündeki pasif zemin basıncının göçmeden önce tamamen harekete geçirildiği doğrusal net zemin basınç dağılımını

önerilmiştir (Şekil 2.2) (Bica ve Clayton, 1989). Bu dağılım daha sonra birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır. Penetrasyonun tasarım derinliği, palplanşın önünde bulunan maksimum net zemin basıncına karşılık gelen ve zemin tabanındaki yatay kuvvetler ve momentlerin her ikisini de karşılayan “z” bulunarak hesaplanmıştır. Krey yöntemi günümüzde en çok kullanılan yöntemin temelini oluşturmuştur.



Şekil 2.2 Krey metodu. Doğrusal zemin basınç dağılımı

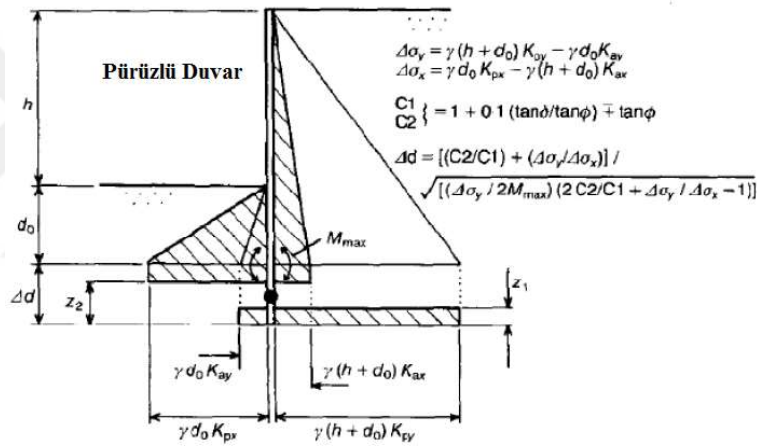
Blum (1931) tarafından palplanşın alt kısmındaki zemin basıncı, Şekil 2.3' te gösterildiği gibi, O noktasına etki eden hayali bir R kuvveti ile değiştirilmiştir.



Şekil 2.3 Blum metodu. Doğrusal zemin basınç dağılımı

Gömülme derinliği, O noktasına göre moment olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, hesaplanan gömülme derinliğini 0.2d oranında arttırılmıştır. Bu nedenle, son tasarım gömülme derinliği 1.2d olarak önerilmiştir. Tüm bunlara karşın, bu uygulamanın sağladığı güvenlik tam olarak anlaşılammıştır (Cuadrado, 2010).

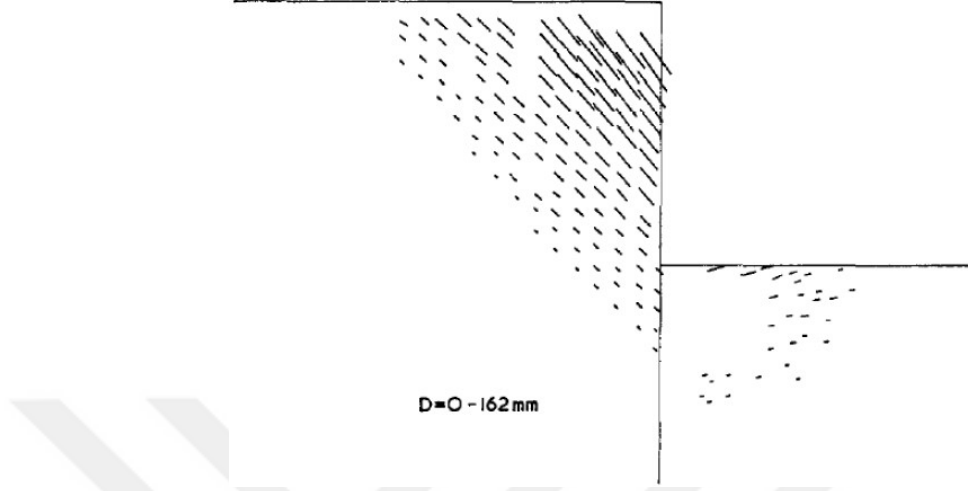
1953 yılında Brinch Hansen tarafından bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Brinch Hansen yöntemi ile önceki yöntemlerin aksine, duvar ve kırılma yüzeyi arasındaki yaklaşık kinematik uyumluluk koşulları ile birlikte tüm düzlem denge koşulları karşılanarak mevcut birtakım sorunlara çözüm getirilmiştir (Şekil 3.4). Brinch Hansen tarafından “c” ve “tanφ” üzerindeki emniyet faktörü ve basıncın hesaplanacağı derinlikteki dönme merkezinin konumunun belirlenmesinde zemin basınç katsayılarının kullanılmıştır. Maksimum eğilme momenti, bu dağılım üzerinde kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktada belirlenmiştir. Daha sonra, gömülme derinliği, kesme kuvvetinin sıfır olduğu noktada dengesiz moment dahil olmak üzere, duvarın alt kısmı için yatay kuvvetler ve momentler arasında denge denklemi yazılarak elde edilmiştir. Ek gömülme derinliği “ $\Delta d$ ”, ampirik denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Yanal basınçların sıfır kesme kuvveti noktasının altında sabit olduğu varsayılmıştır.



Şekil 2.4 Brinch Hansen metodunda gösterilen zemin basınç dağılımı

Bransby ve Milligan (1975) tarafından, kuru kum koşullarında laboratuvar ölçekli konsol palplanşların zemin deformasyonlarını deneysel olarak araştırılmıştır. Palplanş, cam kenarlı bir kasanın içinde, 30cm serbest yükseklik ve 37cm sıkı kuma gömülü olarak uygulanmıştır. Çalışma, düzlem gerilme koşullarında gerçekleştirilmiştir. X-ray tekniği, duvardaki ve zemindeki hareketleri belirlemek ve kumdaki kırılma yüzeylerini izlemek için kullanılmıştır. Zeminin deformasyonlarını palplanşın sapmaları ile ilişkilendiren bir analitik yöntem sunulmuştur. Deformasyonları belirlemek için X-ray yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır. Esasında yöntem, kumun içine dikdörtgen düzlemsel bir kılavuz ızgaranın gömülmesini ve numunenin testin farklı evrelerinde radyografilerini ortaya çıkarmaktan ibarettir. Her bir noktanın radyograf üzerindeki konumu ölçülebilmektedir.

Dolayısıyla nokta işaretleyicilerinin ve zeminin yer değiştirmeleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. X-ray yöntemi ile elde edilen bir görünümün bir örneği Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



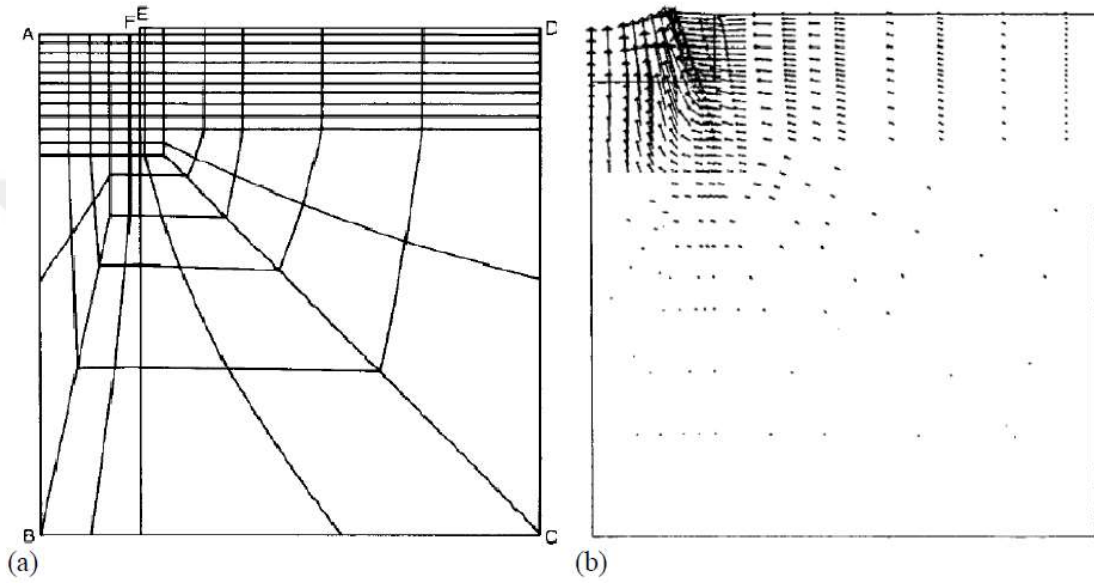
**Şekil 2.5** Bransby ve Milligan (1975) tarafından yapılan bir testte X-ray metodu kullanılarak kumdaki yer değiştirmeler

Bu yöntemde duvar pürüzlülüğünün deformasyon davranışına etkisi oldukça azdır. Önerilen yöntem, herhangi bir  $\beta$  çizgisindeki (yırılma yüzeyi) noktadaki gerilme artımlarının eşit olduğunu ve yalnızca duvarın artan açısı ile belirlendiğini varsaymaktadır. Bu yöntemle, davranış iyi bir Şekilde modellenebilmekte ve duvarın arkasındaki yüzey yerleşimlerinin büyüklüğü ve boyutunun tahmini mümkün olabilmektedir (Bransby ve Milligan, 1975).

Padfield ve Mair (1984) tarafından, sert kilin içine gömülmüş istinat yapılarının tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, CIRIA Rapor 104 olarak da bilinmektedir. Bu rapor, sert konsolide kil üzerinde gömülü tek ankrajlı veya konsol palplanşların tasarımı içermektedir. Yanal zemin basıncı hesaplamaları ele alınmış, ankrajlı ve konsol duvarlar için yöntemler özetlenmiştir (serbest zemin ve sabit zemin koşulları, tam metot ve basitleştirilmiş metot). Ayrıca raporda genel stabilizeye karşı emniyet faktörünü değerlendiren çeşitli yöntemler karşılaştırılmış ve bu kapsamda gömülme derinliği, kuvvet, moment ve pasif basınç faktörleri olmak üzere dört adet tasarım parametresi üzerinde durulmuştur.

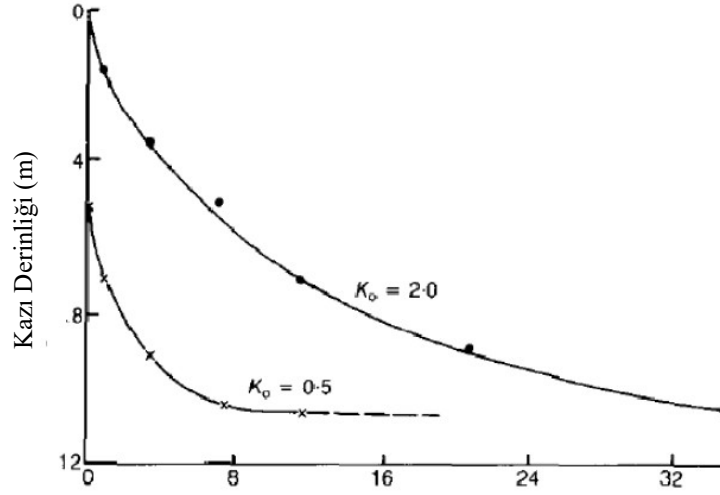
Fourie ve Potts (1989) tarafından, bir konsol palplanş için sonlu elemanlar ve sınır denge analizinin karşılaştırması sunulmuştur. Zemin davranışı, drenajlı koşullar altında bir elastoplastik davranış kabulüyle modellenmiştir. Çalışmada kullanılan klasik yöntem

olarak, CIRIA Rapor 104'te açıklanan tam yöntem ve basitleştirilmiş yöntem kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde, Young modülünün derinlikle lineer olarak arttığı kabul edilerek zeminin, drenajlı, sıfır su basıncına sahip, kohezyonsuz ve 25°'lik tek bir içsel sürtünme açısına sahip olduğu varsayılmıştır. Alan, 165 adet 8 düğümlü izoparametrik elemana ayrılmıştır (Şekil 2.6). Aynı zamanda başlangıç gerilmesinin etkisi de incelenmiştir. Sükunet durumundaki yanal zemin basınç katsayılarının  $K_0=0,5$  ve  $K_0=2$  olması durumları içinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.6** (a) Fourie ve Potts (1989) tarafından yapılan sonlu elemanlar ağı. Kare şekilli zemin alanının kenar uzunluğu 100m'dir. (b)  $K_0=2$  durumu için deplasmanlar

Sonuçlar,  $K_0=0.5$  ve  $K_0=2$  iken palplanşın büyük mertebelerde yatay hareketler yaptığını göstermiştir (Şekil 2.7). Şekildeki grafik, bu geometri ile izin verilen maksimum kazı derinliği ile kuvvet parametreleri arasındaki ilişkiyi temsil eden yatay asimptotları göstermektedir. Bu asimptotlar aynı zamanda sınır durumunu ifade etmektedir. Bu çalışmada maksimum kazı derinliği 10.6m, palplanş yüksekliği 20m ve dolayısıyla gömülme derinliği 9.4m olmuştur. Sonuçlar, hem sınır denge yöntemi hem de sonlu elemanlar yaklaşımında elde edilen gömülme derinliklerinin birbirine oldukça yakın olduklarını göstermektedir. Sonlu elemanlar analizi, Cuadrado (2010) tarafından sunulan sınır denge yaklaşımındaki %20'lik gömülme derinliği artışının uygun olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda sonuçlar, düşük  $K_0$  değerli kazılarda sınır denge yöntemlerinin, azami eğilme momentlerinin yaklaşık %50'sinde daha yüksek değerler verdiğini göstermiştir. Bu nedenle eğilme momenti değerlerinin bir miktar azaltılması gerektiği ifade edilmiştir.



Farklı  $K_0$  değerleri için maksimum yatay deplasmanlar (cm)

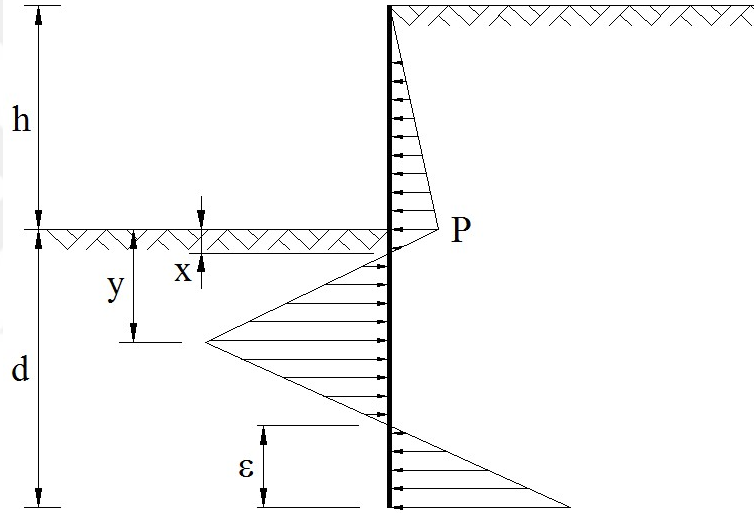
### Şekil 2.7 Kazı derinliği-Yatay deplasman grafiği

Day ve Potts (1993) tarafından, sonlu elemanlar modeli çalışmalarında, kiriş elemanların palplanşları iyi bir şekilde temsil edebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, yapı elemanı tipinin etkisi önemli olduğundan, kiriş elemanı yaklaşımı, kalın beton istinat duvarlarının analizleri için önerilmemektedir. Yapının geometrisini daha doğru bir şekilde tarif ettikleri için iki boyutlu elemanların kullanılması daha uygundur.

Bica ve Clayton (1989) tarafından, literatürde mevcut analitik yöntemlerin ayrıntılı bir incelemesi sunulmuştur. Çalışmada 25 farklı yöntem tarif edilerek birbirleriyle ve deney verileri ile uyumu araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, sınır denge yöntemlerinin, gömülme derinliğinin ve maksimum eğilme momentinin iyi bir şekilde modellenebildiğini göstermiştir.

Göçme durumlarında palplanşların analizi ve tasarımı için yeni bir analitik yöntem King (1995) tarafından önerilmiştir. Bu yöntem oldukça popüler hale gelmiş ve sıklıkla kullanılmıştır. Yöntemin sınır dengesine dayanmasından ve bir grafikten parametre alınmasından dolayı, yarı ampirik prosedürden oluştuğu kabul edilmektedir. Bu yöntem zemin basıncı dağılımının geometrik basitleştirmelerine ihtiyaç duymaması nedeniyle, mevcut sınır durum yöntemlerine önemli bir alternatif oluşturabileceği kabul edilmiştir. Bu yönteme göre denge, pasif bölgede sınır durumunu varsaymadan kurulabilmektedir. Öte yandan yöntem, ampirik bir parametreye bağlıdır. Bu yöntemin uygulanabilirliği, kısıtlı öngörüsünü ispatlayan ve ampirik parametre için yeni bir değer öneren Day (1999) tarafından sağlanmıştır.

Bu yönteme göre aktif basınç, duvarın arka tarafında kazı seviyesinin üstünde söz konusudur. Bu durum Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Grafiğin geri kalan kısımları, birbirleriyle ilişkili olsalar da çözülememektedir. Önceden belirlenmiş  $h$  ve  $\varepsilon$ ,  $y$  ve  $x$  değerleri kullanılmak üzere (sırasıyla, duvarın önünde maksimum basınç ve sıfır net basınç derinliği) denge denklemleri ortaya çıkarılabilmektedir. Kazı seviyesinin altında, net basınç eğimi yükün uygulanması boyunca bilinmemekte, ancak sınır koşullarda çözüm mümkün olabilmektedir. Daha sonra,  $x$  ve  $P$  (kazı seviyesindeki aktif basınç) arasında ilişki kurulabilmektedir. Göçme durumunda  $x / P$  oranının  $1 / (K_p - K_a) \cdot \gamma'$  ya eşit olduğu bilinmektedir.  $P$  yerine  $K_a \cdot \gamma \cdot h$  yazılarak göçme durumunda  $x / h$  oranı elde edilir ve bu oranın  $((K_p / K_a) - 1)^{-1}$ e eşit olduğu kabul edilmektedir. Güvenlik faktörü, servis süresince  $x/h$  olarak, göçme durumunda ise  $(x/h) \cdot c$  olarak ifade edilmiştir.

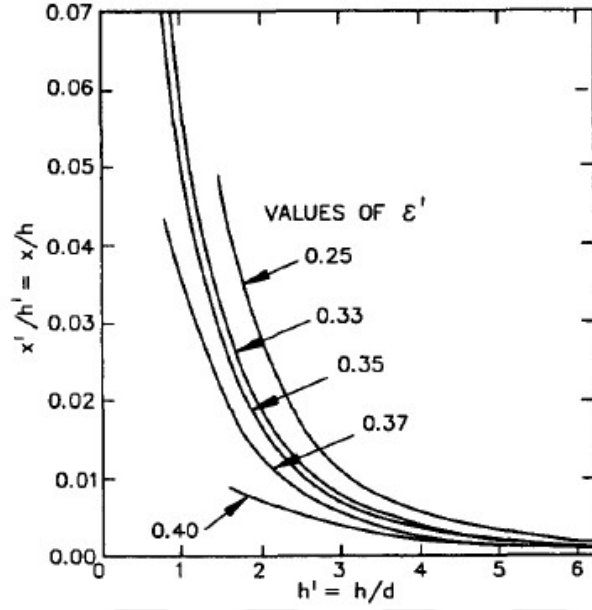


**Şekil 2.8** King metodu için varsayılan net basınç diyagramı

Önceden belirlenmiş bir güvenlik faktörü için tasarım yapılırken, aşağıdaki işlem adımları takip edilerek bir gömülme derinliği hesaplanmaktadır. İlk adımda göçme durumunda,  $(x/h) \cdot c$  oranı hesaplanmaktadır. Bu oran sadece  $\phi'$  ye bağlıdır. Daha sonraki adımda  $x/h$ , servis süresi için emniyet faktörü olarak hesaplanmakta ve son olarak,  $h/d$  Şekil 2.9'da yer alan  $\varepsilon' = 0.35$  eğrisi kullanılarak elde edilmektedir.  $H$  değeri baştan beri bilindiği için gömülme derinliği de grafikten rahatlıkla okunabilmektedir.

Bu yöntemde emniyet faktörü kontrol edilirken, ters prosedür izlenmelidir.  $\varepsilon' = 0.35$  eğrisinin kullanılması tavsiyesi santrifüj testlerine dayanmaktadır. Bu çalışmaların ardından, Day (1999) tarafından, King (1995)'in  $\varepsilon' = 0.35$  önerisinin genellikle Birleşik Krallık ve ABD yöntemlerinden daha sınırlı olduğu belirtilmiştir. Tüm bu sebeplerden dolayı  $\varepsilon'$  değerinin daha düşük olması gerektiği Day (1999) tarafından önerilmiştir.

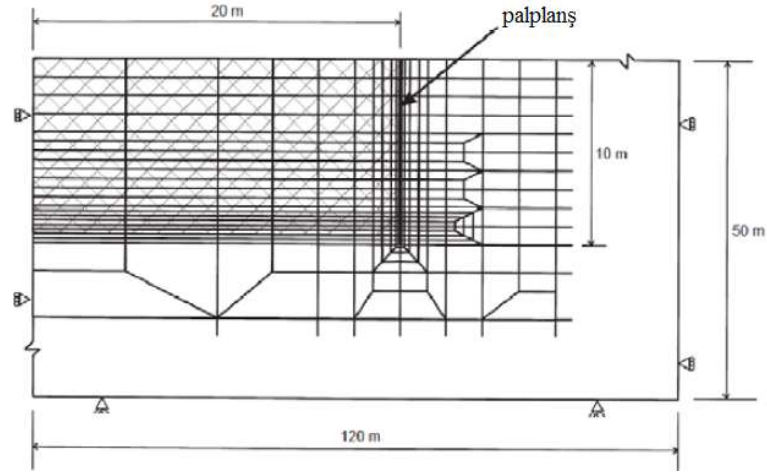




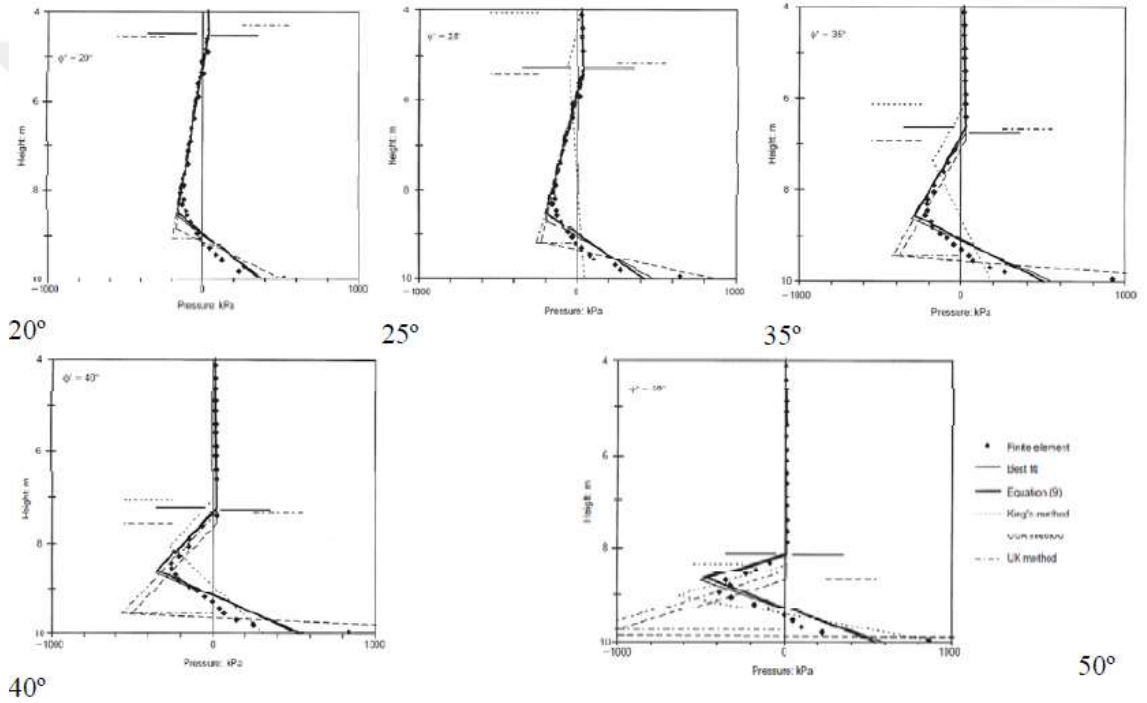
**Şekil 2.9** King yönteminde  $\varepsilon' = 0.35$  eğrisi kullanılarak gömülme derinliğinin bulunması

King (1995) tarafından, yöntem kademeli ve tam metotla kıyaslanmış ve santrifüj testlerinde mevcut metotlardan çok daha kritik derinliklerde kazılar için uygun olduğu ifade edilmiştir. Bu kapsamda Powrie (1996) tarafından, drenajsız koşulları göz önüne alan birkaç çalışmadan biri sunulmuştur.

Day (1999) tarafından, palplanşlara etkiyen net zemin basıncının incelendiği ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan ağ yapısında (Şekil 2.10) önceki çalışmalarda kullanılan yapılara göre bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Çalışmada yüksekliği 10m seçilen duvar için  $20^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında değişen içsel sürtünme açlarına sahip ve farklı kazı derinliklerinde 5 durum ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, uygun doğrusal yaklaşım için sıfır net zemin basıncı noktası, sınırlı koşullardaki aktif ve pasif zemin basınç dağılımlarının oranına bağlı olmaktadır.

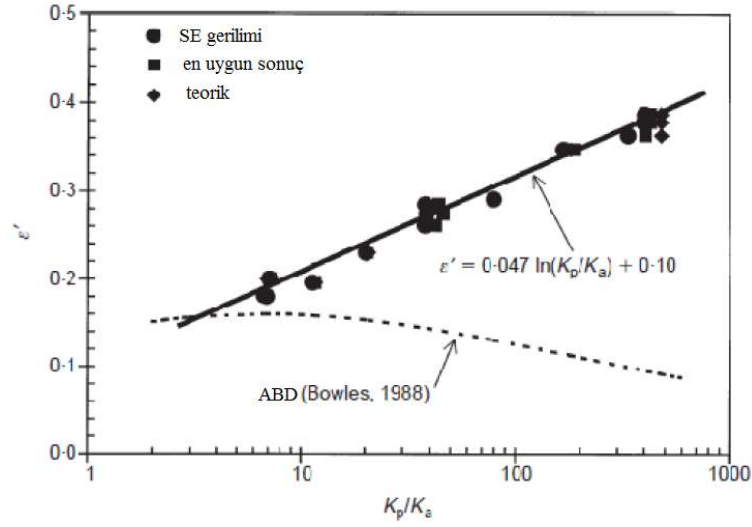


Şekil 2.10 Sonlu elemanlar ağ yapısı (Day, 1999)



Şekil 2.11 Day (1999) tarafından yapılan farklı çalışmalar

Day (1999) tarafından, sıfır basınç noktasını tanımlamak için Şekil 2.12'de sunulan bir eşitlik önerilmiştir. Bu eşitlikte, sıfır basınç noktasının konumu ile  $K_p/K_a$  oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ifade edilmiştir. Bu yaklaşımda tahmin edilen yükseklik ve maksimum eğilme momenti genellikle sonlu elemanlar verileri ile gösterilenden daha az elde edilmiştir. Day yöntemi sonuçlarının, sonlu elemanlar tahminleri ve santrifüj modeli verileri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 2.12** Sıfır net zemin basıncı noktası (Day, 1999)

Ayrıca,  $\varepsilon'$  değerinin kazının tüm aşamalarında bulunabildiği ancak kesinlikle sabit olmayacağı ve bu değer aşağıdaki eşitlikle belirlendiği ifade edilmiştir (Day, 1999).

$$\varepsilon' = 0.047 \ln \left( \frac{K_p}{K_a} \right) + 0.1 \quad (2.1)$$

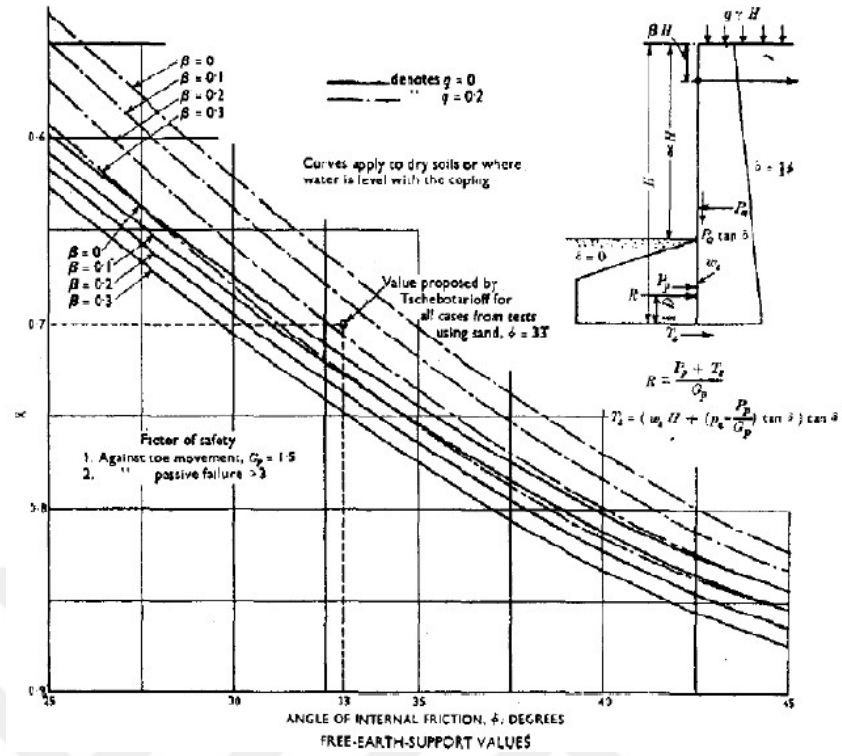
Day (2001) tarafından yapılan çalışmada  $20^\circ$  ve  $50^\circ$  arasında içsel sürtünme açısı ve 0.5 ile 2.0 arasında  $K_0$  değerleri gibi bir dizi koşul içeren, aynı geometri ve ağ sıklığının kullanıldığı 30 farklı analiz sonuçları gösterilmiştir. Çalışmada, konsol palplanşlar için aktif ve pasif zemin basınç katsayılarının, Caquot ve Kerisel yönteminde önerildiği teorik sınır değerlerinde olduğu kabul edilmiştir. Aynı zamanda Day (2001) tarafından, Padfield ve Mair' in CIRIA Raporu 104' te verilen yaklaşımları doğrulamıştır. Çalışma sonuçları maksimum eğilme momentinin sadece o noktanın üstündeki net basınca bağlı olduğunu ve pasif basıncın tamamen harekete geçirildiği varsayımı ile doğrudan hesaplanabileceğini göstermiştir. Böylece maksimum eğilme momentinin ifadesi aşağıda gösterildiği gibi basitleştirilmiştir.

$$M_{max} = \frac{1}{6} K_a \gamma (a + h)^3 + \frac{1}{6} K_p \gamma a^3 \quad (2.2)$$

Burada,  $a$  ifadesi aşağıdaki eşitlikle açıklanabilmektedir.

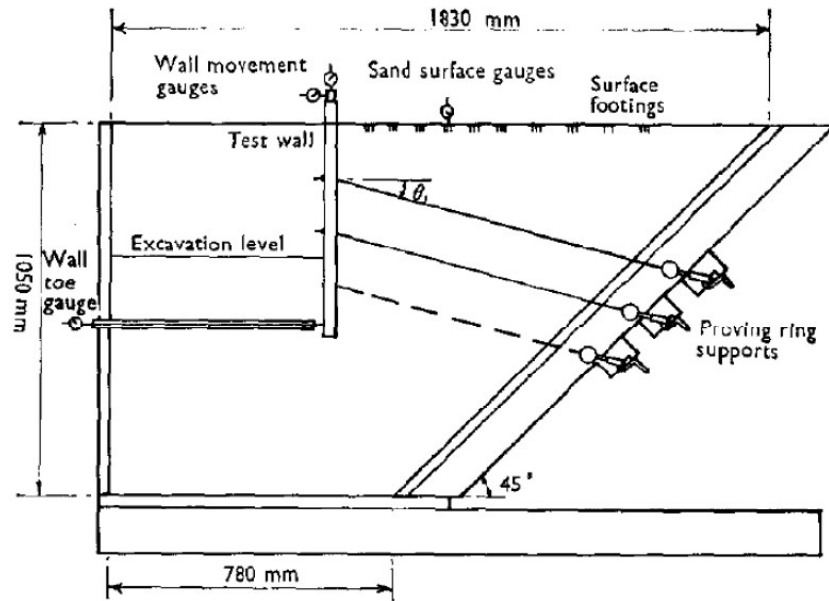
$$a = \frac{h}{\sqrt{\frac{K_p}{K_a} - 1}} \quad (2.3)$$





Şekil 2.14 Ankrajlı palplanşların tasarımı için önerilen grafik (Rowe, 1952)

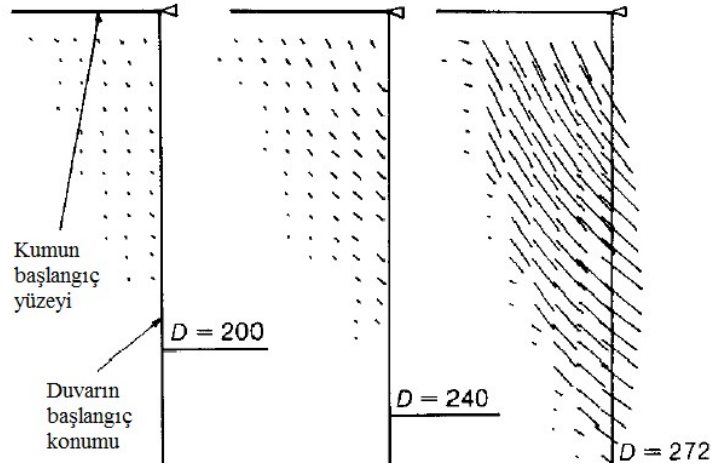
Plant (1972) tarafından, çok ankrajlı palplanşlarda ankraj eğiminin stabiliteye etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, 0.6 m yüksekliğinde, kuru kum tutan ölçekli bir model palplanşın test sonuçları sunulmuştur (Şekil 2.15). Deneylerde üç ankraj halatına  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  eğim verilmiştir. Bir diğer deney grubunda ise iki alt sıra yatay olarak kalırken, üst sıra ankraja sırasıyla  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  eğim verilmiştir.



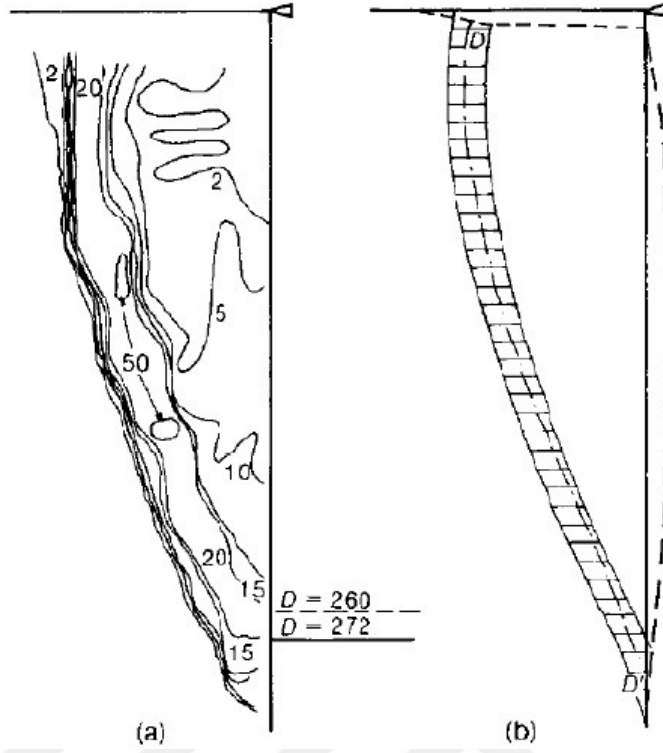
Şekil 2.15 Plant (1972) tarafından geliştirilen ölçekli palplanş modeli

Plant (1972) tarafından zemin-duvar-ankraj sisteminde genel davranışın oldukça karmaşık olduğu belirtilmiş, ankraj eğiminin artmasıyla birlikte palplanş ve zemin hareketlerinde artışların olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonuçları duvarın hareketinin engellenemeyeceğini, ancak uygun bir ankraj eğimi seçilerek azaltılabileceğini göstermiştir. Buna ek olarak, alt seviyedeki ankrajların üstten daha az eğimli olması durumunda duvar hareketlerini azaltacak daha rijit bir sistem elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Milligan (1983) tarafından, radyografik yöntemle yer değiştirmelerin ölçüldüğü üst kısmı ankrajlı palplanşlar üzerine deneysel bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmada model olarak kuru ve sıkı kum tutan 30cm yüksekliğinde duvar kullanılmıştır. Kazı işlemi, kademeli kazıya benzer şekilde yükseklikler değiştirilerek yapılmıştır. Farklı deney gruplarında farklı duvar pürüzlülüğü dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda X-ışını yöntemi ile elde edilen yer değiştirme ölçümleri Şekil 2.16'da, göçme yüzeyinin konumu ile ilgili grafiklerde Şekil 2.17'de yer almaktadır. Çalışmada duvarın ön tarafındaki hareketi bulmaya yönelik ölçümlere yer verilmemiştir.



Şekil 2.16 Kademeli kazıda X-ışını yöntemiyle ölçülen yer değiştirmeler



Şekil 2.17 Göçme yüzeyinin konumu

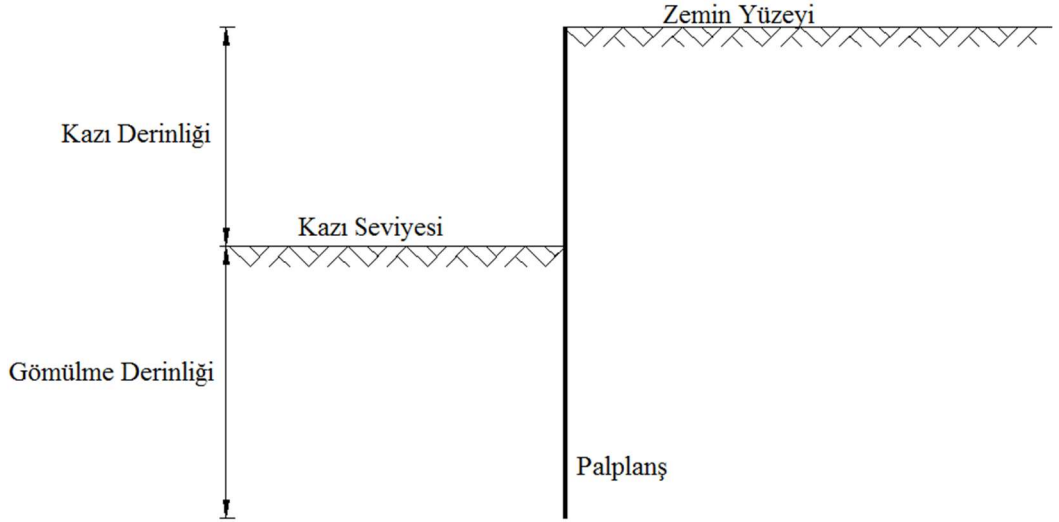
Bu çalışmaların dışında literatürde palplanş davranışı ile bir çok çalışma yer almaktadır (Ahmed, 2014, Asaad ve ark., 2015, Hetham ve Ramadan, 2013, Sert ve ark., 2016, Shakeel ve ark., 2017, Zekri ve ark., 2014)

### 3. İKSA UYGULAMALARINDA PALPLANŞLAR

Dayanma yapıları genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. i) Rijit dayanma yapıları; stabilitenin büyük bölümü yapının kendi ağırlığı ile sağlamakta iken hareket yapının bütününde oluşmaktadır. ii) Esnek dayanma yapıları; stabilizeyi sağlayan parametrelerin sayısı artmaktadır. Bunlar, yapı malzemesinin sertliği, dayanımı ve duvar kalınlığı gibi parametrelerdir. Bu tür yapılarda eğilme ve bütün bir hareket gözlenmektedir.

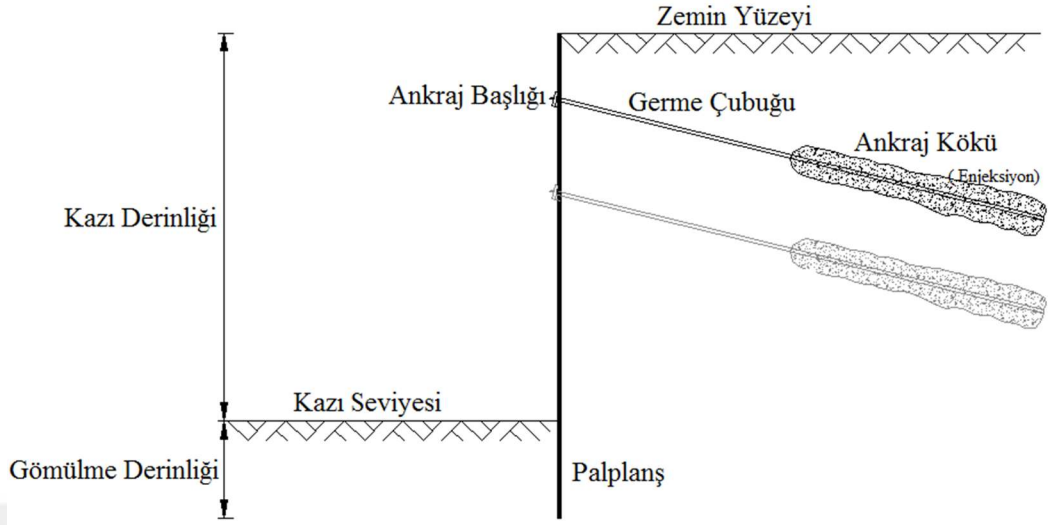
Palplanşlar, esnek dayanma yapıları grubundadır. Dayanımını, sadece zemine gömülü olan kısım ile sağlayan palplanş türüne konsol palplanş denir (Şekil 3.1). Bir diğer sistem ise ankrajlı palplanşlardır (Şekil 3.2). Bu iksa yapıları kesme gerilmesi ve eğilme momentine maruz kalmaktadır. Başlıca yararı ise, rijit dayanma yapılarına nazaran malzeme kullanımını asgari seviyelere düşürmektedir.

Palplanşlar, kazı esnasında zemin basıncına direnç göstermek ve su girişini sınırlamak veya engellemek amacıyla kazı öncesi inşa edilen yapılardır.



Şekil 3.1 Konsol Palplanş





**Şekil 3.2** Ankrajlı Palplanş

Ahşap palplanşlar en eski iksa sistemi malzemelerinden olan ahşap ile kazıklar ve paneller inşa edilerek oluşturulmaktadır (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3** Ahşap palplanş

Betonarme palplanş, diyafram duvar olarak ta adlandırılan bir palplanş türüdür. Zeminde kuyu açılıp içerisine donatı konulduktan sonra beton dökme işlemi gerçekleştirilerek inşa edilmektedir. Zeminin kendini tutamayacağı durumlarda bentonit ile doldurularak stabilitesi sağlanmakta ve istenilirse önceden imal edilmiş olan kazıklar yerine çakılarak ta duvar oluşturulabilmektedir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4** Betonarme palplanş

Çelik palplanş ise farklı kesitte çelik elemanların yan yana çakılıp birbirine kenetlenmesiyle oluşturulan yapılardır. Oldukça esnektir ve moment karşılama performansı oldukça iyidir. Liman yapıları, köprü ayakları ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5** Çelik Palplanş

### **3.1. Palplanş Sistemlerinde Yapısal Davranış**

Gömülü bir tutucu yapının asıl özelliği gömülü bölgenin stabilitesine katkıda bulunmasıdır. Bu nedenle tanımlanacak ana bilinmeyen parametre, zemin basıncının duvar üzerindeki büyüklüğüne ve dağılımına bağlı gömülme derinliğidir. Palplanşa etki eden zemin basıncı aynı zamanda aşağıdakilere bağlıdır;

- Zemin basıncı dağılımının şekli
- Geometri
- Palplanşın esnekliği
- Zemin-yapı etkileşimi
- Uygulama yöntemi

Palplanşların her bir noktasında oluşan gerilmeler, yapıda oluşan hareketlere bağlıdır. Göçme durumlarındaki zemin basınçlarını tanımlamak için Rankine eşitlikleri kullanılmaktadır. Sürşarj yükü bulunmayan yatay bir yüzeye sahip zemindeki yatay ve düşey efektif gerilmeler derinlik ile doğrusal olarak artar. Bu durum sükunetteki zemin basınç katsayısı ( $K_0$ ) olarak tanımlanır.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (3.1)$$

$\sigma'_h$  : Yatay efektif gerilme

$\sigma'_v$  : Düşey efektif gerilme

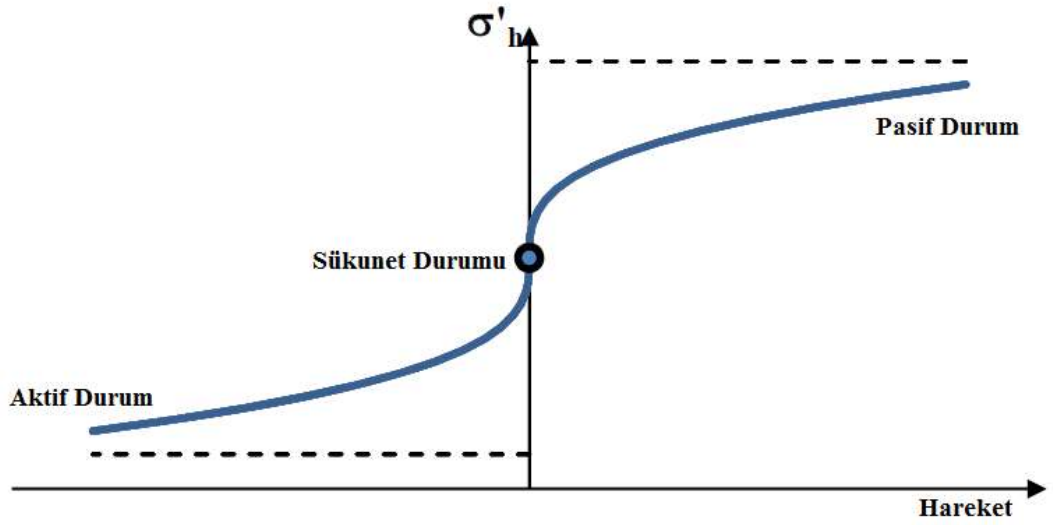
Palplanş inşa edildikten ve kazı yapıldıktan sonra zemin basıncı, aktif ve pasif basınç olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır.

1) Aktif basınçta ( $K_a$ ) zemin, istinat yapısına basınç uygulamaktadır. Palplanş kazı yapılmış olan yöne doğru hareket etmekte ve yatay gerilme azalmaktadır. Yatay basınçta oluşan azalma sonucunda bir göçme kaması oluşmaktadır. Zemin basıncı, sükunet durumuna göre daha düşüktür.

2) Pasif basınçta ( $K_p$ ) palplanş, arkasında tuttuğu zemine doğru hareket etmekte ve bu durum zemin basıncının artmasına neden olmaktadır. Basınç burada sükunet durumuna göre daha yüksektir. Sonuçta bir göçme kaması meydana gelmekte fakat boyutu aktif durumdakine göre daha büyük değerlerde olmaktadır.

Şekil 3.6 palplanşa ait yatay zemin basıncı grafiğini göstermektedir. İstinat yapısındaki hareket ne kadar büyük olursa yatay gerilme de o kadar fazla olmaktadır. Asimptotlar, Rankine aktif ve pasif sınır durumlarını ifade etmektedir ve genellikle  $K_0$ ,  $K_a$ 'ya  $K_p$ 'den daha yakındır. Bu üç basınç katsayısı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

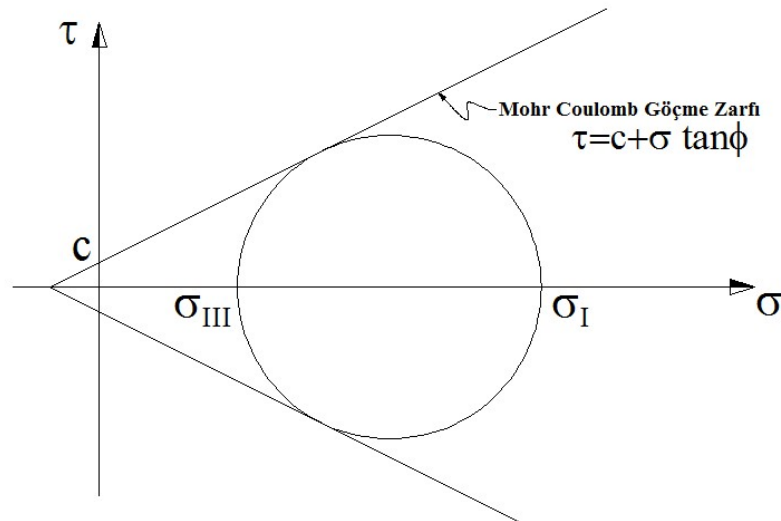
$$K_a < K_0 < K_p \quad (3.2)$$



Şekil 3.6 Harekete göre yatay zemin basıncındaki değişim

Zemin mekaniğinde bir noktadaki üç boyutlu gerilme durumu, iki boyutlu bir temsil olan Mohr Dairesi ile gösterilebilmektedir (Şekil 3.7). Bu gerilme, normal ( $\sigma_n$ ) ve kayma ( $\tau$ ) gerilmeleri olarak iki bileşene ayrılmaktadır. Başlıca gerilmeler  $\sigma_1$  ve  $\sigma_{III}$ 'tür. Bir diğer başlıca gerilme olan  $\sigma_{II}$ ,  $\sigma_{III}$  ile eşit kabul edildiğinden pratikte gösterilmemektedir. Çemberin çevresi, her birinin kendi düzlemine ait gerilmeleri olan noktalardan oluşmaktadır. Kayma gerilmesi sıfır olduğunda, grafikten büyük ve küçük normal gerilmeler elde edilmekte ve Mohr Coulomb doğrusal göçme zarfı aşıldığında ise göçme meydana gelmektedir. Bu durum Eşitlik 3.3'te gösterilmektedir. Zeminlerdeki kohezyon etkisi her zaman göçmeye karşı koyan bir faktördür.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\phi \quad (3.3)$$



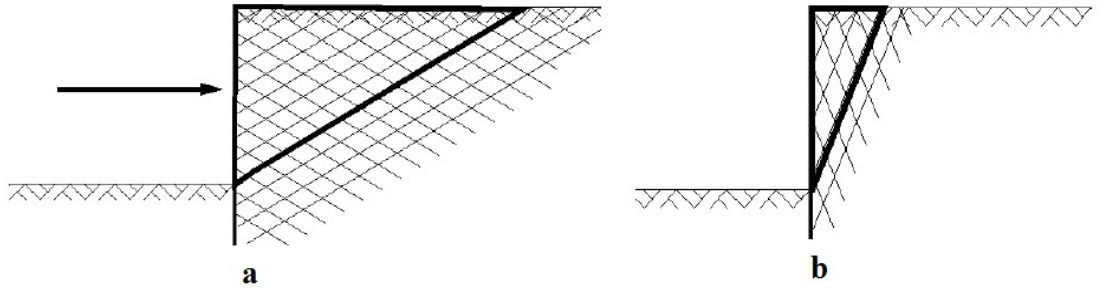
Şekil 3.7 Mohr Coulomb göçme zarfı

## 3.2. Palplanş Sistemlerinde Yanal Zemin Basınçlarının Belirlenmesi

Palplanş tasarımı yapabilmek için zemin basıncındaki dağılımın bilinmesi kritik öneme sahiptir. Bu basıncı tespit etmek için farklı varsayımlar kullanan iki adet teori mevcuttur. Bunlar, Rankine ve Coulomb teorileridir. Her iki teori için de geliştirilen genel denklemler, yapı arkasında tutulan zeminin kohezyonsuz, homojen ve drenajlı olduğu temel varsayımlarına dayandırılmaktadır.

### 3.2.1. Rankine Teorisi

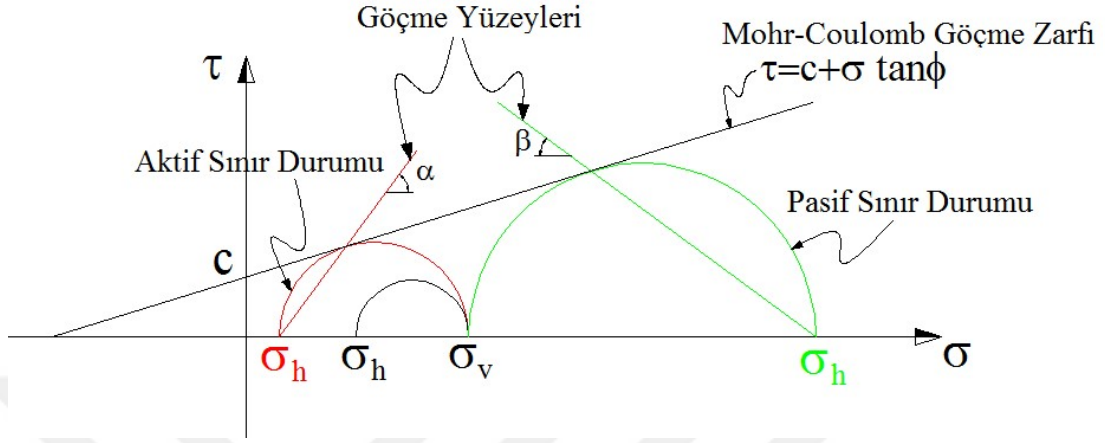
Rankine' in 1857 yılında önerdiği bu teoriye göre, istinat yapılarına etkiyen yatay zemin basınç dağılımını veren teorisinde kullandığı bazı kabuller ve yöntemler bulunmaktadır. Bunlar; i) istinat yapısıyla zemin arasında sürtünme yoktur, ii) yapı yüzeyi düşeydir, iii) yapı rijittir ve iv) basınç kuvveti zemin yüzeyine paraleldir. Bu teoriye ait temel hipotez, zeminin Rankine sınır durumunda olmasıdır. Rankine sınır durumu, yapının iki tarafında da göçme yüzeylerinin bulunduğu plastik denge durumudur. Bu yüzeyler Mohr-Coulomb kayma kriterlerine ulaşmıştır. Bu teoriye göre zeminin her iki tarafında oluşan kayma yüzeyleri, kama boyutlarını belirlemektedir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi pasif taraftaki kama hacim ve kütle olarak aktif taraftakinden daha büyüktür.



Şekil 3.8 Kayma yüzeyleri, a) Pasif sınır durumu b) Aktif sınır durumu

Bu kriter altında göçme, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi sırasıyla aktif ve pasif limit durum için sadece iki toprak sürtünme açısı ile meydana gelmektedir. Bu açılar, aktif ve pasif sınır durumu için söylendiği gibi, farklı olacak olan göçme kaması şeklini belirlemektedir. Aktif durumda, küçük gerilme  $\sigma_{iii}$ , yatay gerilme  $\sigma_h$ 'ye karşılık gelmekte ve büyük gerilme  $\sigma_i$ , düşey gerilme  $\sigma_v$ 'ye karşılık gelmektedir. Buna göre, pasif

durumda,  $\sigma_1 = \sigma_h$  ve  $\sigma_{\min} = \sigma_v$  durumu elde edilmektedir. Şekil 3.9'da göçme yüzeyi, kutuptan göçme zarfının ulaştığı noktaya bir çizgi çizilerek elde edilmektedir.



Şekil 3.9 Kohezyonun dikkate alındığı Mohr-Coulomb göçme kriteri

Böylece, göçme durumuna aktif ya da pasif durumdan ulaşılabilir. Yatay bir zemin yüzeyi göz önüne alınarak zeminin her bir noktası için etkili gerilme aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\sigma'_H = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (\text{Aktif durum}) \quad (3.4)$$

$$\sigma'_H = \sigma'_v K_p - 2c\sqrt{K_p} \quad (\text{Pasif durum}) \quad (3.5)$$

Geometrik işlemlerin ardından, göçme yüzeylerinin yatayla yaptıkları açılarının yalnızca zeminin içsel sürtünme açısına ( $\phi$ ) bağlı olduğu görülmektedir. Aktif ve pasif durum için  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları sırasıyla;  $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$  ve  $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ 'dir. Aktif ( $K_a$ ) ve pasif ( $K_p$ ) basınç katsayıları da aynı şekilde içsel sürtünme açısına ( $\phi$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.6)$$

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.7)$$



biraz kısıtlı olduğu bilinmekle beraber genel olarak aktif durum için daha uygun olmaktadır. Öte yandan pasif durumda özellikle  $\delta$  ve  $\phi$  açılarının büyük değerleri için bu teori uygun değildir ve bu durum esasında palplanşlar için oldukça kritik öneme sahiptir. Bu teorinin en önemli faydası ise karmaşık geometrilere sahip problemlerin çözümüne yönelik çok yönlülüğü sağlayabilmesidir.

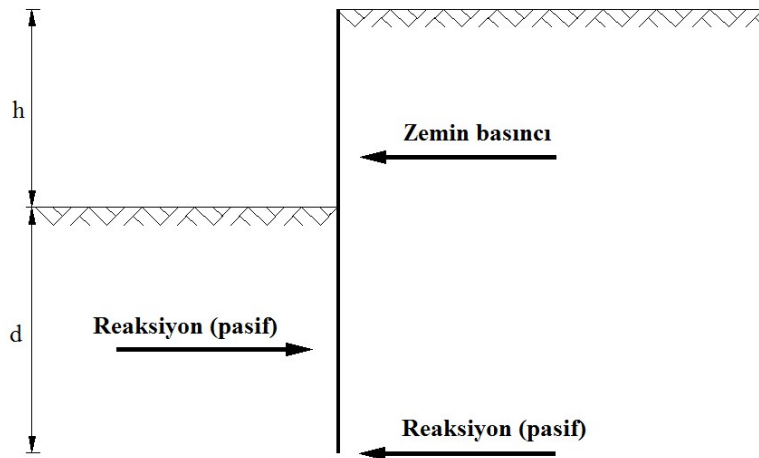
### 3.3. Palplanş Sistemlerinde Tasarım Yöntemleri

Palplanşların tasarımı için literatürde önerilen birkaç farklı yöntem bulunmaktadır. Orijinal öneriler 20. yüzyılın ilk yarısından kalmıştır ve sürekli geliştirilmiştir. Günümüzde halen incelenmekte ve üzerinde çalışılmaktadır.

Burada bu yöntemler konsol palplanşlar için (tam yöntem, basitleştirilmiş yöntem, kademeli yöntem), tek ankrajlı palplanşlar için (serbest zemin destek yöntemi, sabit zemin destek yöntemi) ve çok ankrajlı palplanşlar için açıklanmaktadır. Bu yöntemler, klasik yöntemler ya da analitik yöntemler olarak adlandırılmaktadır (King, 1995). Konsol veya ankrajlı palplanşlarda geoteknik tasarım hesaplamalarını tanımlamak için, yatay kuvvetler ve momentlerin dengesinden faydalanılmaktadır.

#### 3.3.1. Konsol Palplanşlar

Konsol palplanşta, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi stabilize sağlanacak şekilde palplanşın tabanında bir reaksiyon kuvveti oluşmaktadır. Gömülme derinliği arttıkça ters yönde oluşan bu reaksiyon kuvveti de büyümektedir. Ancak stabilizeyi sağlamak için bu durumun oluşması şart değildir. Şekil 3.11’de gösterilen “h” kazı derinliğini, “d” ise palplanşın gömülü taraftaki boyunu ifade etmektedir.

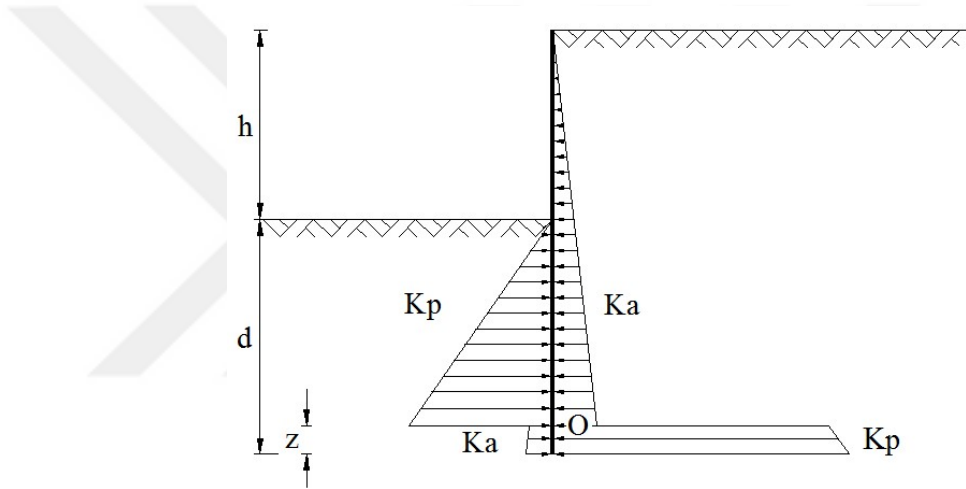


Şekil 3.11 Konsol palplanşa etkiyen zemin basıncı (şematik)



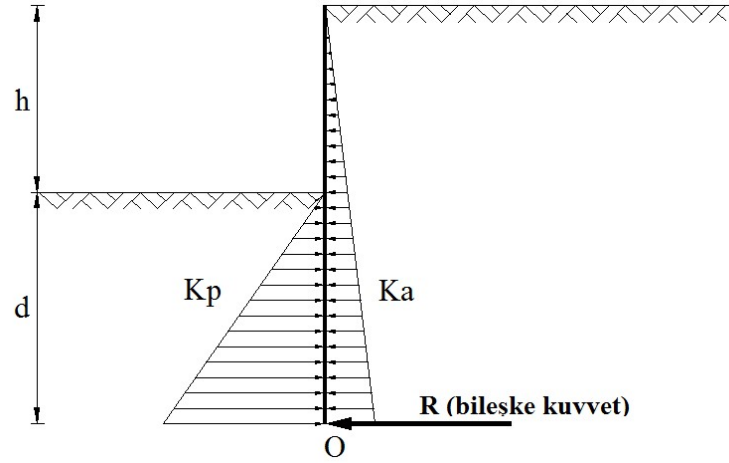
Konsol palplanşların tasarımında tam yöntem, basitleştirilmiş yöntem ve kademeli yöntem yer almaktadır.

Klasik tasarım yöntemlerinden biri olan tam yöntem, Birleşik Krallık yöntemi olarak ta bilinmektedir. Padfield ve Mair (1984) tarafından tanımlanmıştır (Şekil 3.12). Bu yöntemde aktif basınç durumunun, dönme noktasının üstündeki yapı kısmının arkasında oluştuğu ve pasif basınç durumunun, kazı kotu ile dönme noktası arasındaki yapı kısmının önünde oluştuğu varsayılmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemde göre normal basınç yönündeki bir devrilme, dönme noktasında oluşmaktadır. Bu noktanın altında, yapı arkasında pasif basınç oluşmakta ve aktif tarafı öne doğru hareket ettirmektedir. Bu nedenle, zemin basınç dağılımında ani bir sıçrama meydana gelmektedir.



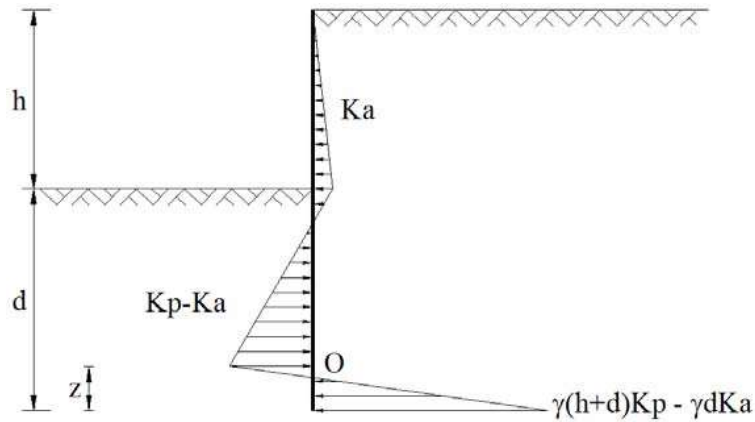
Şekil 3.12 Tam yöntem ve zemin basınç dağılımındaki ani değişim

Tam metodun karmaşıklığı ve hesaplamalarındaki zorluklardan dolayı Padfield ve Mair (1984) tarafından basitleştirilmiş yöntem önerilmektedir. Şekil 3.13'te gösterildiği gibi, dönme noktasının altındaki toprak basıncı,  $O$  noktasına etki eden,  $R$  olarak temsil edilen eşdeğer bir kuvvettir. Hesaplanan gömülme derinliği değerinin, tam yöntemle hesaplanana kıyasla oldukça düşük olması nedeniyle, bulunan değer %20 oranında artırılarak referans gömülme derinliği bulunmaktadır.  $0.2d$  ek uzunluğunun  $R$  değerini üretebildiğinden emin olmak için bir doğrulama yapılması gerektiği kabul edilmektedir. Basitleştirilmiş yöntem, diğer yöntemlerden biraz daha kısıtlı olmasına rağmen, gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermektedir. En büyük fayda, geleneksel denklem sisteminin çözümündeki basitliktir.



**Şekil 3.13** Basitleştirilmiş yöntem. Dönme noktası altındaki basıncın kuvvet ( $R$ ) olarak gösterilmesi

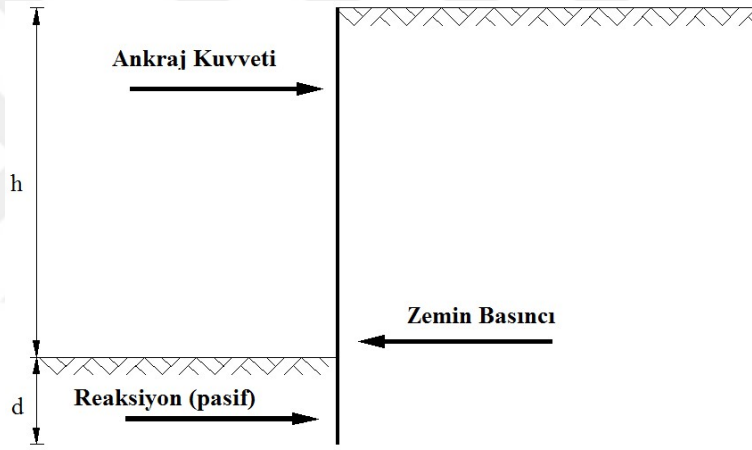
Krey (1932) tarafından önerilen yaklaşımın geliştirilmesinin ardından Bowles (1988) tarafından zemin basınç dağılımında ani değişim sergilemeyen bir yöntem önerilmiş ve kademeli yöntem olarak isimlendirilmiştir. Bu yöntemde yapılan varsayım, Şekil 3.14'te gösterildiği gibi, net zemin basıncının yönünü duvarın önünden arkasına kademeli olarak değiştirdiği bir geçiş bölgesi oluşturmaktadır. Bu geçiş, dönme noktası etrafında gerçekleşmekte ve doğrusal olduğu varsayılmaktadır. Duvarın tabanındaki zemin basıncının bilinmesi durumunda, gömülme derinliğini elde etmek için bilinmeyen tek parametre “ $z$ ” olmaktadır. Kademeli yöntem, ABD yöntemi (Day, 1999; Şkrabl, 2006) ya da genel doğrusal net basınç yöntemi (Day, 2001) olarak bilinmektedir. Bunların tamamı ilk olarak Krey (1932) tarafından önerilen yöntemin güncellenmesinden oluşmaktadır.



**Şekil 3.14** Kademeli yöntem, net basınç diyagramı

### 3.3.2. Tek Ankrajlı Palplanşlar

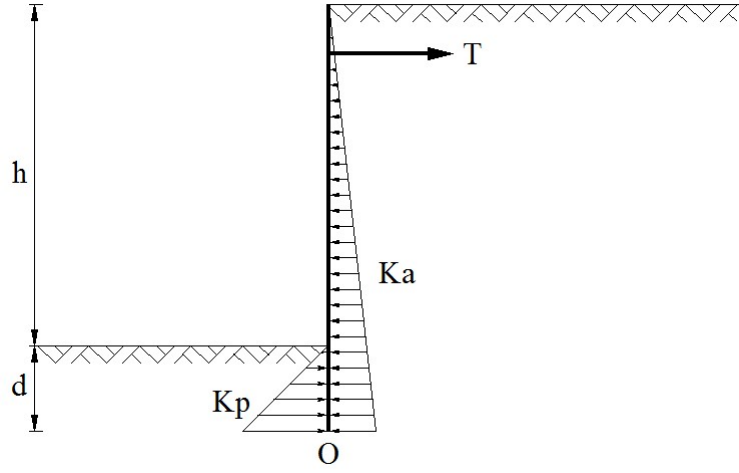
Kazı derinliğinin fazla olması durumunda konsol palplanşlarda zemine gömülü tarafın derinliğini azaltmak amacıyla ankrajlı sistemler uygulanmaktadır. Tek sıra ankrajlı palplanş sistemlerinde Şekil 3.15'te görüldüğü gibi denge sağlanmaktadır. Bununla birlikte, bu reaksiyon, tasarım yöntemine göre farklılıklar göstermektedir. Ankrajın konumu, eğimi ve yükü tasarımdan doğrudan etkilenmektedir. Ankrajlı palplanşın konsola göre en büyük avantajı, gömülme derinliğini azaltmasıdır. Başka bir deyişle ankraj, yapıyı daha kararlı hale getiren kazı derinliğini arttırma kabiliyetine sahiptir. Bununla birlikte sistemde daha fazla bilinmeyene sebep olması gibi bir dezavantajı da bulunmaktadır. Ankraj sayesinde kazı derinliği artırılabilirse de, ankraj uygulaması yapılan kadar yapı konsol olarak davranmaktadır.



Şekil 3.15 Ankrajlı palplanşta net zemin basıncı

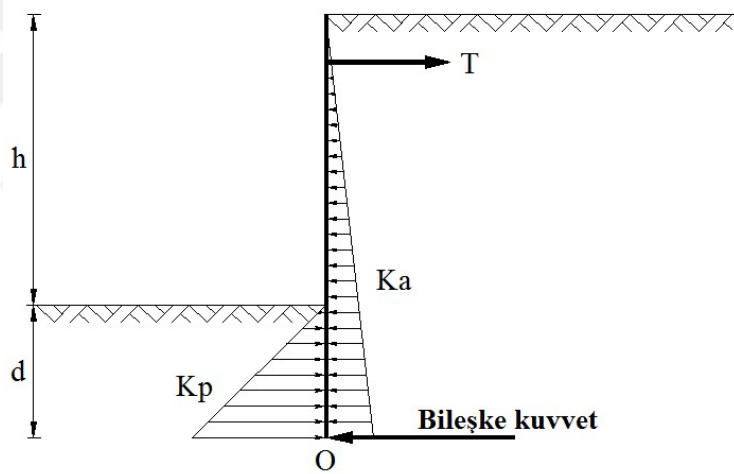
Ankrajlı palplanş sistemlerinin başlıca klasik tasarım yöntemleri arasında yer alan serbest zemin destek yöntemi ve sabit zemin destek yöntemi aşağıda sunulmuştur.

Serbest zemin destek yöntemi, palplanşın gömülü kısmındaki hareketlerin sırasıyla palplanşın arkası ve önündeki aktif ve pasif itkiyi harekete geçirmek için yeterli olduğu varsayımına dayanmaktadır. Pasif basıncın yalnızca palplanşın önünde, gömülme derinliği "d" boyunca etki ettiği varsayılmaktadır (Şekil 3.16). Dolayısıyla, palplanşın alt kısmı serbest hareket etmekte ve dengeyi sağlamak için minimum teorik gömülme derinliği bulunmaktadır. Bu yöntemde gömülme derinliğini hesaplamak için kullanılan eşitlikte, aktif ve pasif basınçlar ile ankraj kuvveti hesaba katılmaktadır. Ankrajın uygulandığı noktaya göre moment alınarak oluşturulan eşitlik sıfıra eşitlenerek gömülme derinliği elde edilmektedir.



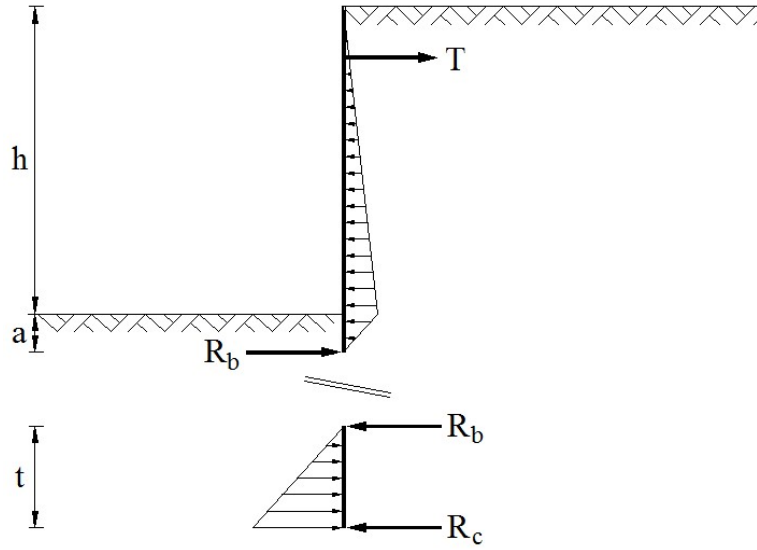
**Şekil 3.16** Serbest zemin basıncı yöntemi

Sabit zemin destek yönteminde, zemin basıncı dağılımı konsol durumuna çok benzemektedir (Şekil 3.17) ve palplanş, eğilme momentine maruz kalan gömülü bir kiriş gibi davranmaktadır.



**Şekil 3.17** Sabit zemin destek metodu

Bu yöntem, gömülme derinliğinin maksimum seviyeye çıkarılmasına olanak sağlamakta ve genellikle net basıncın sıfır olduğu (O) noktanın yeri tahmin edilerek tanımlanan ilave bir denklem gerektirmektedir. Bu noktanın gömülü kısmın ortasında yer aldığı sıklıkla görülmektedir, ancak başka varsayımlarda mevcuttur. Blum (1931) tarafından, eğilme noktasından kazı kotuna olan mesafe ile  $K_a$  arasında bir bağlantı önerilmiştir. Gömülme derinliğini bulmak için kullanılan yöntem, aynı zamanda Blum (1931)'in eşdeğer kiriş yöntemi olarak bilinmektedir (Şekil 3.18). Buna göre palplanş bir kiriş gibi düşünülmekte ve net basıncın sıfır olduğu noktadan iki parçaya bölünmektedir.



**Şekil 3.18** Ankrajlı palplanşların tasarımı için Blum (1931) eşdeğer kiriş yöntemi

Sabit zemin destek yönteminde, üst kirişte  $R_b$ 'yi bulmak için ankraj uygulama noktasına göre moment alınmaktadır. Ardından alt kirişte  $R_c$  ihmal edilip en alt noktaya göre moment alınmasıyla gömülme derinliği elde edilmektedir.

### 3.3.3. Çok Ankrajlı Palplanşlar

Derin kazılarda kazı stabilitesinin sağlanması adına birden fazla ankraj tasarımına ihtiyaç duyulabilmektedir. Çok ankrajlı palplanşlar tamamen farklı bir geoteknik konuyu temsil etmektedir. Sorunun karmaşıklığı, ankrajların sayısı arttıkça büyümektedir. Esasında, çok sıralı ankrajların tasarımı için herhangi bir analitik yöntem mevcut değildir. Bununla birlikte, analitik yöntemlerin az olmasına karşın, bu tür yapılar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple, çoklu ankrajlı palplanşların davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunan bazı analitik veriler mevcuttur.

Bu uygulamada palplanşın serbest yüksekliğine çok sıra ankraj uygulayarak gömülme derinliğini azaltmak mümkündür. Bu durum uygulamanın en büyük avantajını göstermektedir. Aynı zamanda stabilizeyi sağlayan en önemli parametre gömülme derinliği olmaktan çıkarmaktadır. Ankrajların reaksiyonu denge denklemini sağlamak yeterlidir. Bununla birlikte gömülme derinliği azaltılarak, genel veya gömülü kısım ile ilgili stabilize problemleri ortaya çıkabilmektedir.

Çok ankrajlı palplanş sistemlerinde tasarım süreci, palplanşın sürekli olup olmamasına bağlıdır. Genel itibarıyla kabul edilen zemin basınç dağılımı, serbest zemin destek metodundaki gibidir. Uygulamada ankrajlar çekme gerilmesine çalışmalı ve

kesinlikle basınca maruz kalmamalıdır. Basınca maruz kalması durumunda ankrajın konumu değiştirilmelidir. Ankrajların yeri, optimum moment ve stabilite sağlanana kadar iterasyon ile tespit edilmelidir.

Çok sıralı ankraja sahip palplanşlar için literatürde yer alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Plant (1972) tarafından, çok ankrajlı palplanşlar ile ilgili bir dizi deney yapılmıştır. Ankraj eğiminin palplanş hareketi, zemin göçmesi, ankraj yükü ve zemin basıncı dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, 1 m'lik bir palplanş modeline 3 sıra öngermeli ankraj uygulanmıştır. Zemin cinsi olarak kum kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir (Plant, 1972);

- Çok sıra ankrajlı palplanşların davranışları karmaşıktır. Zemin, palplanş ve ankraj arasında bir etkileşim bulunmaktadır.
- Ankraj eğimini artırmak, zemin ve palplanşın hareketlerinde artışa neden olmaktadır.
- Palplanş hareketini azaltmak ve rijitliği artırmak için, orta ve alt sıradaki ankrajlar daha dik eğime sahip olmalıdır.

## 4. SAYISAL ANALİZ

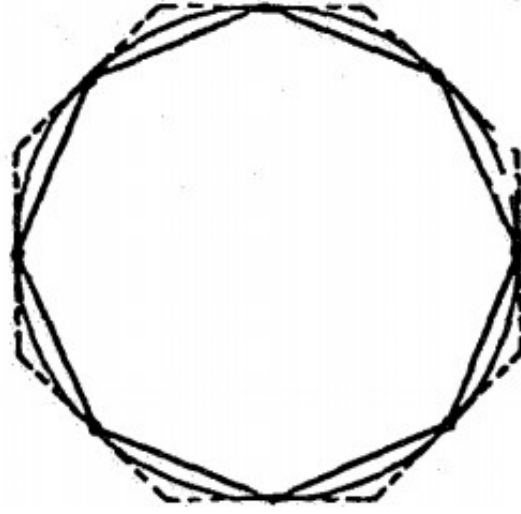
Bu bölümde, sonlu elemanlar hesaplama yöntemi ve bu tez çalışması kapsamında kullanılan ticari yazılımın (Plaxis) kullanımının genel bir şeması tanıtılmakta ve kullanılan model hakkında bilgi verilmektedir.

### 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu yöntemin, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir.

Sonlu elemanlar yöntemindeki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulunmasıdır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harçayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan geleneksel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir yöntemlerden biri olabilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde, çözüm bölgesi çok sayıda basit küçük birbirine bağlı sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yönteme sonlu elemanlar isminin verilmesi yeni ise de, sonlu elemanlar düşüncesi gerçekte günümüzden birkaç yüzyıl önce kullanılmıştır. İlk matematikçiler tarafından bir dairenin çevresi, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, daireyi çokgene indirgeyerek (problemi basitleştirerek) hesaplanmıştır. Günümüzün deyimini ile bu çokgenin her kenarı bir sonlu elemanı ifade etmektedir.



**Şekil 4.1** Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması

#### **4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Hesaplama Adımları**

Genel bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü daima belirli basamaklardan oluşan bir yöntem ile elde edilmektedir. Bu yöntem bir statik veya dinamik yapı probleminin çözümü için aşağıdaki basamaklardan oluşmaktadır.

1) Yapının veya çözüm bölgesinin elemanlara ayrılması:

Sonlu elemanlar yönteminde ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Bu ayırımında uygun sonlu elemanlar kullanılmakta, elemanların cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmektedir. Bazı sonlu eleman örnekleri Şekil 4.2'de verilmiştir.

2) Her elemanın özelliklerinin formüle edilmesi, eleman rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerinin bulunması:

Karmaşık bir yapının herhangi bir yük altındaki deplasmanının kesin olarak tahmin edilmesi imkansız olduğundan, bir eleman için, çözümü yaklaşık olarak ifade edilebilecek uygun bir deplasman modeli seçilmektedir. Bu model hesaplamalar açısından basit olmakta, ancak bazı yakınsama gereklerini de yerine getirmektedir. Çoğunlukla bu model bir polinom şeklinde olmaktadır. Denge denklemleri veya varyasyonel prensipler ve yaklaşık deplasman modeli kullanılarak eleman katılık matrisleri ve yük vektörleri bulunmaktadır.





Genel denge denklemleri, problemin sınır şartları uygulanarak düzeltilmekte ve daha sonra düğüm noktalarının deplasmanları hesaplanmaktadır.

6) Eleman gerilme ve birim uzamalarının hesaplanması:

Düğüm noktalarının deplasmanları ile katı hal mekaniği ve yapısal mekaniğin gerekli denklemleri kullanılarak eleman birim uzamaları ve gerilmeleri hesaplanmaktadır.

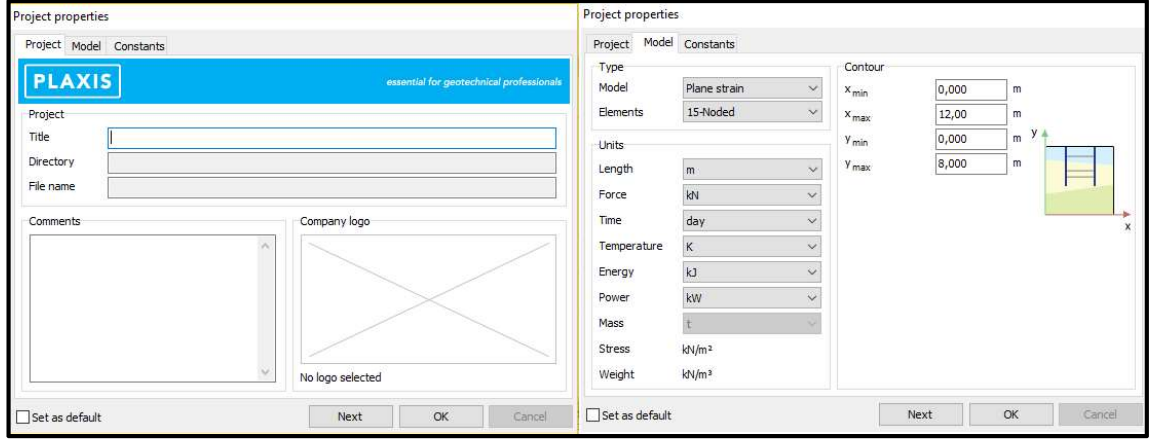
### **4.3. Sayısal Analiz Programı (Plaxis)**

PLAXIS, birçok geoteknik uygulama için deformasyon ve kararlılık analizi yapmak üzere kullanılan özel amaçlı, iki boyutlu bir sonlu elemanlar bilgisayar programıdır. Bu programda gerçek durumlar, düzlemsel ya da bir aksel simetrik koşullarda modellenmektedir. Kullanıcı arabirimleri, geoteknik modellemede art arda kullanılmak üzere gerçekleştirilen dört alt programdan (Girdi, Hesaplamalar, Çıktı ve Eğri Çizimi) oluşmaktadır. Bu alt programlar, geoteknik bir problemin çözümü için mantıklı ve eksiksiz bir metodoloji oluşturularak ayrı ayrı ele alınmalıdır. Her bir alt programın çalışması aşağıda kısaca açıklanmıştır (Brinkgreve, Swolfs ve Engin, 2011).

#### **4.3.1. Girdi (Input)**

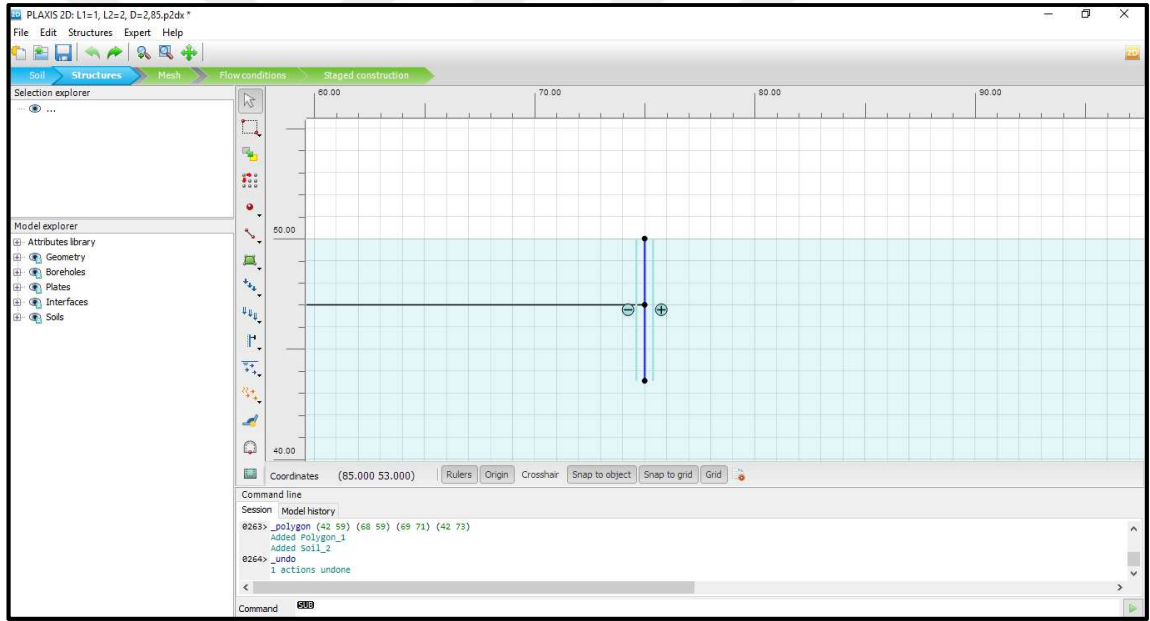
Plaxis sayısal analiz programı ile sonlu elemanlar analizi yapmak için kullanıcı tarafından sonlu elemanlar modeli oluşturulmakta malzeme özellikleri ve sınır koşulları belirtilmektedir. Tüm işlemler, bu alt programda yapılmaktadır. Kullanıcı tarafından, x-y düzleminde noktalar, çizgiler ve diğer bileşenlerden oluşan iki boyutlu bir geometri modeli oluşturulmaktadır. Uygun bir sonlu elemanlar ağının oluşturulması, bir elemanın özelliklerin ve sınır koşullarının oluşturulması ve geometri modelinin girdisine dayanan ağ yapısı bu aşamada gerçekleştirilir. Bu aşamanın sonunda, başlangıçtaki efektif gerilmeler, başlangıç durumunu belirlemek için üretilmektedir. Bu aşamada yer alan süreç aşağıda gösterilmiştir.

Genel ayarlar: Bir dosya adı, model (eksenel simetri veya düzlemsel), alanın boyutu, elemanın türü (6 veya 15 düğüm), birimler vb. belirtilmektedir (Şekil 4.3).



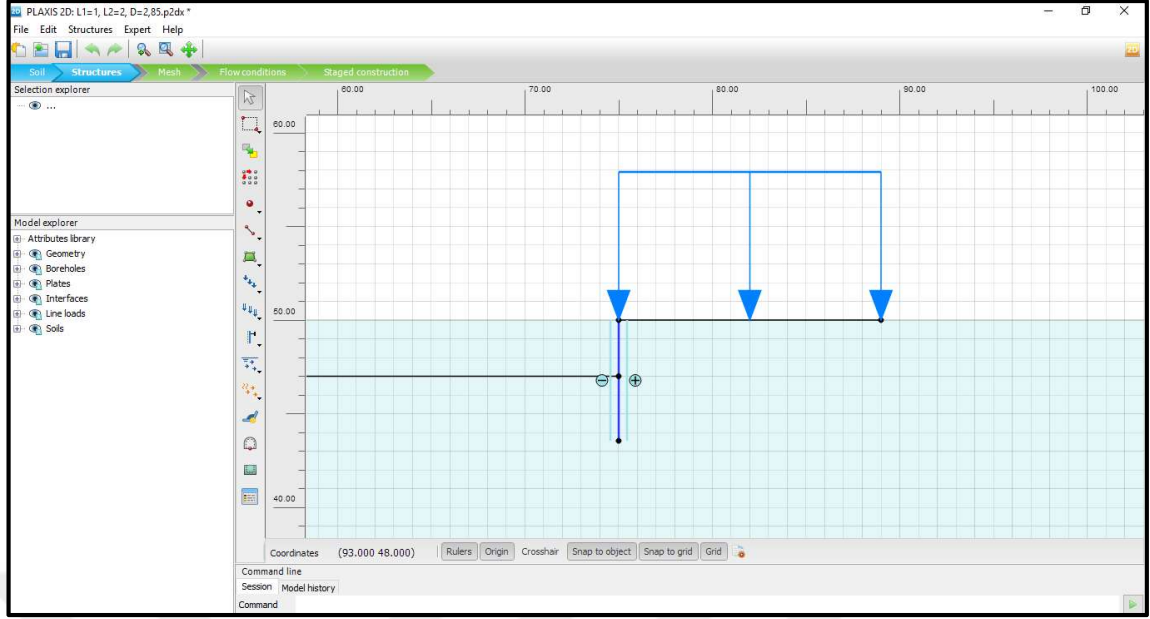
Şekil 4.3 Genel ayarlar

Geometri: Problemin geometrisi, noktalar, çizgiler, plakalar, geogridler ve yüzeyler bu aşamada oluşturulur (Şekil 4.4).



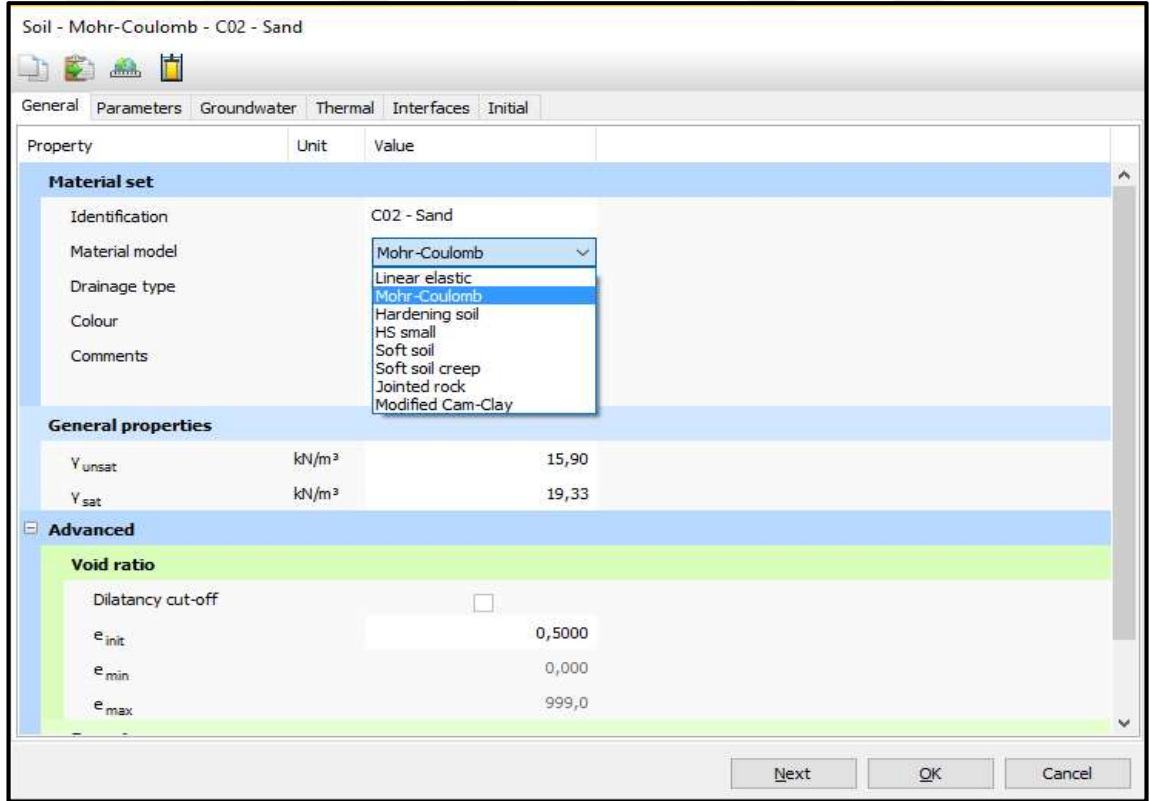
Şekil 4.4 Model geometrisi

Yükler ve sınır koşulları: Yayılı veya noktasal yükler, öngörülen yer değiştirmeler, drenaj durumu, kuyular ve sabitlikler belirtilir (Şekil 4.5).



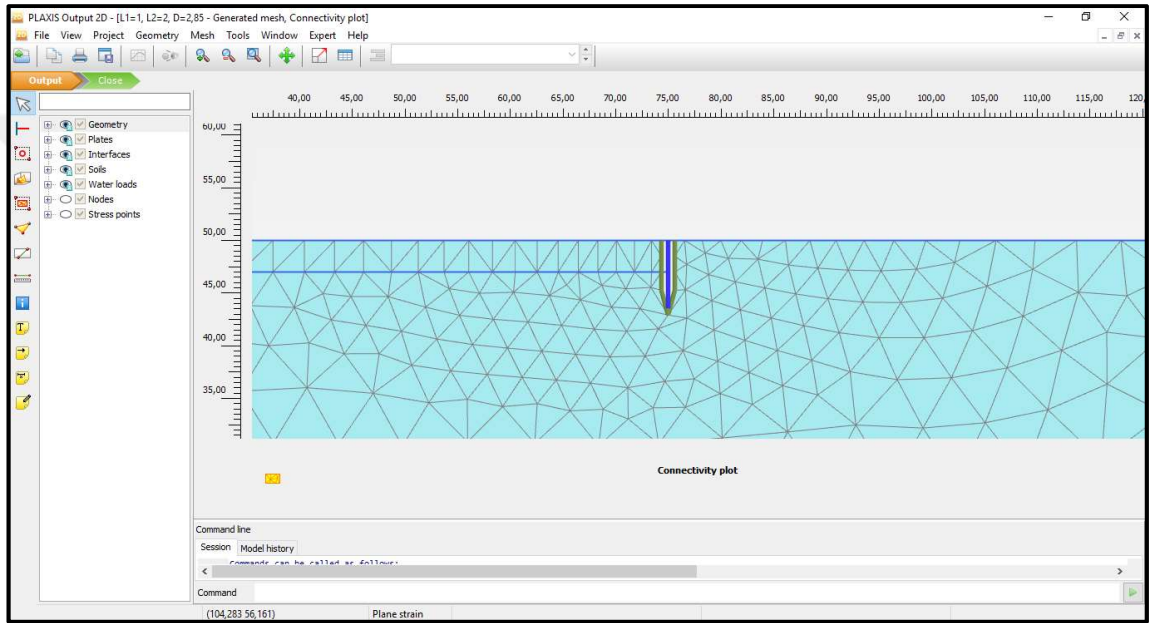
Şekil 4.5 Yükler ve sınır koşulları

Malzeme özellikleri: Zemin, kullanıcı tanımlı bir model veya önceden belirlenmiş (Linear elastic, Mohr-Coulomb, Hardening soil, HS small, Soft soil, Soft soil creep, Jointed rock, Modified Cam-Clay) modellerden biriyle modellenenbilir. Bu aşamada özellikler, geometrinin her bir ögesine uygulanmaktadır (Şekil 4.6).



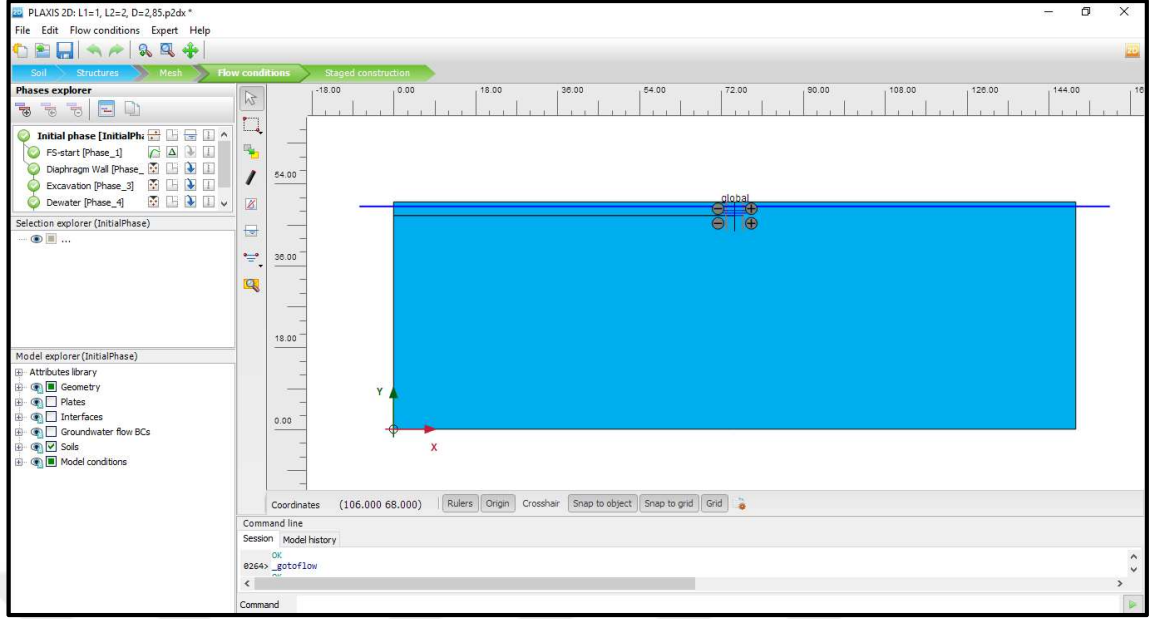
Şekil 4.6 Malzeme özellikleri

Ağ yapısı: Ağ yapısı, geometrinin ayrık olduğu sonlu elemanlar bileşimidir. Temel öge türü, 6 düğüm veya 15 düğümlü üçgen biçimlidir. Optimum performans elde etmek için sonlu elemanlar örgü yapısı kullanıcılar tarafından özelleştirilebilirler. Bu çalışmada kullanılan eleman, 15 düğümlü üçgen eleman olup, yer değiştirmeler için dördüncü dereceden bir sıranın enterpolasyonunu sağlarken, on iki nokta da gerilme değerlerinin değerlendirildiği Gauss sayısal integrasyonunu içermektedir. 15 düğümlü üçgen eleman daha iyi bir doğruluk sağlamakta iken, ancak önemli bir hafıza tüketimine sebep olmaktadır (Şekil 4.7).



**Şekil 4.7** Sonlu elemanlar ağ yapısı

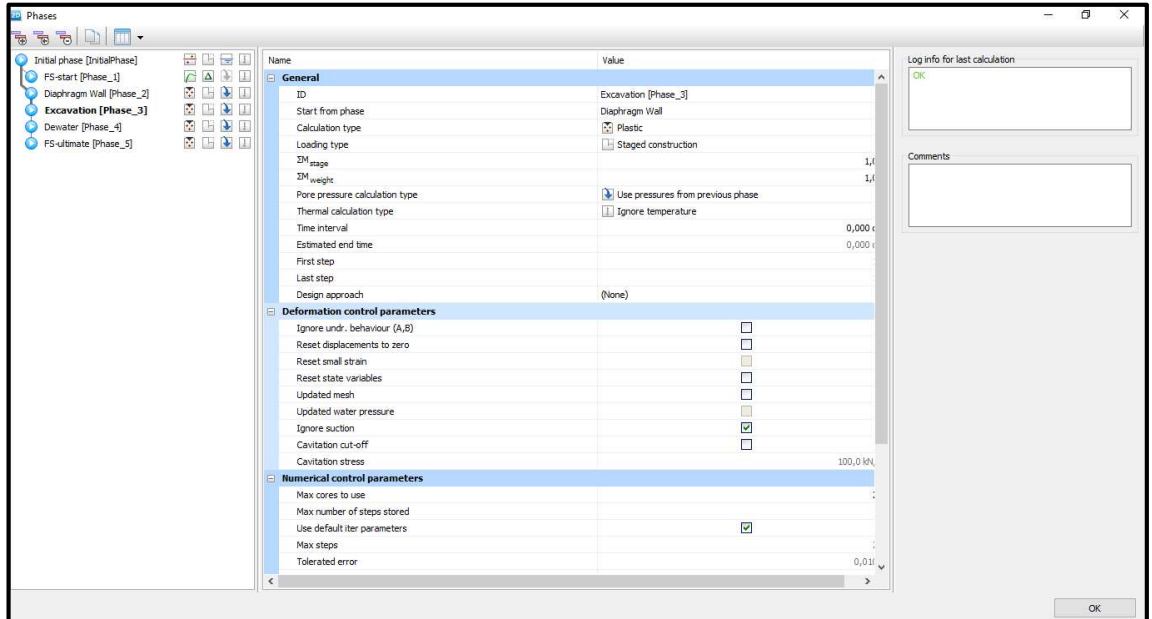
Başlangıç koşulları: Bu aşamada başlangıç su basınçları yeraltı su seviyesi esas alınarak belirlenir. Ardından efektif gerilme alanı, yapısal elemanlar dikkate alınmadan her küme için  $K_0$  katsayısı seçilerek üretilir (Şekil 4.8).



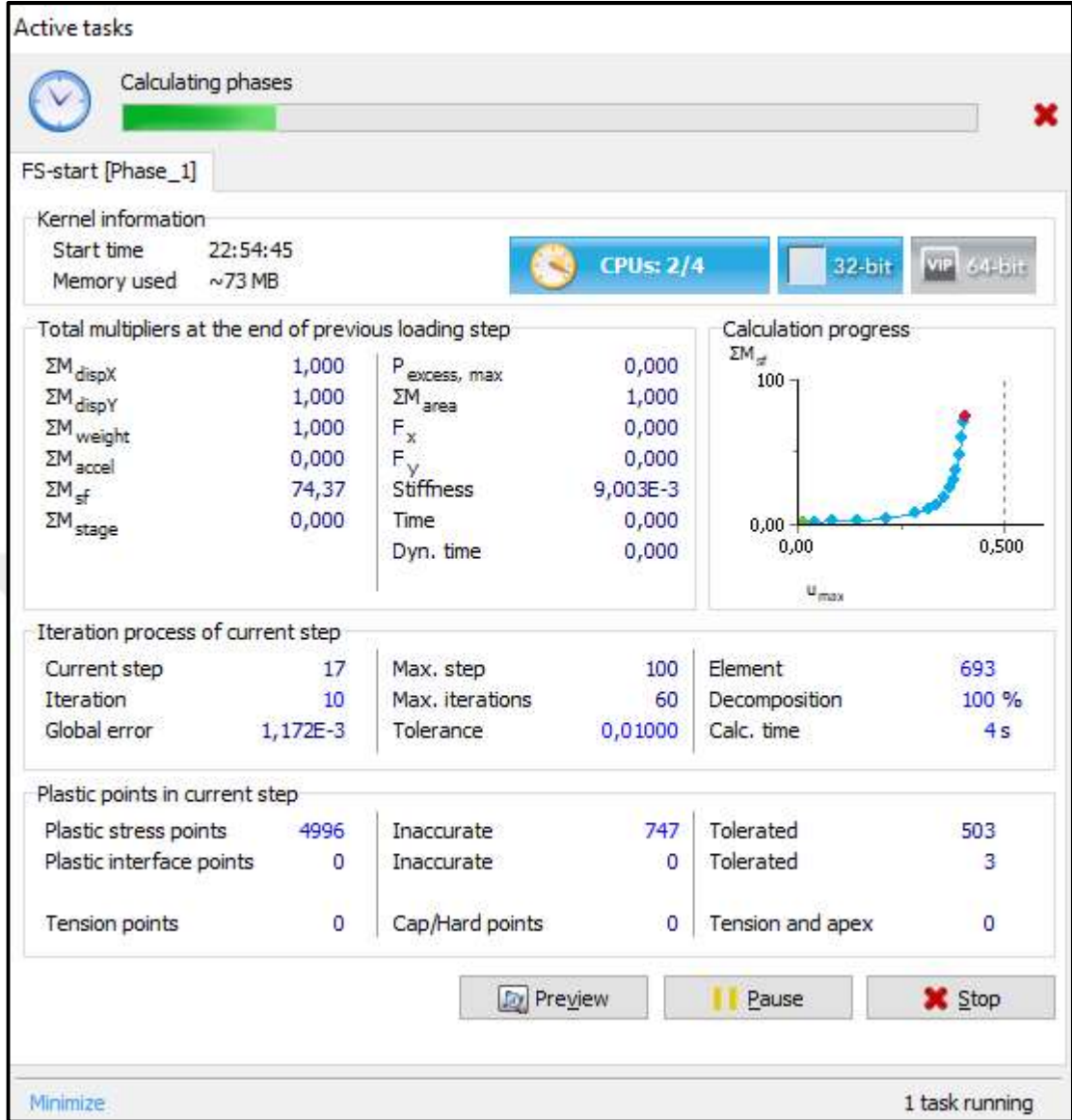
Şekil 4.8 Başlangıç koşulları

#### 4.3.2. Hesaplama (Calculation)

Bir geometri modelinin, ağ ve başlangıç koşullarının önceki adımlarda oluşturulmasının ardından bu aşamada, ne tür hesaplamalar gerçekleştirilmesi gerektiği tanımlanmaktadır. Hesaplama programı, plastik, konsolidasyon ve dinamik hesaplamaları yapabilmektedir. Projenin inşaat aşamaları bu adımda canlandırılabilir. Örneğin bir ilave sürşarj yükü veya kademeli bir kazı ayrı ayrı tanımlanabilir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Hesaplama aşamaları

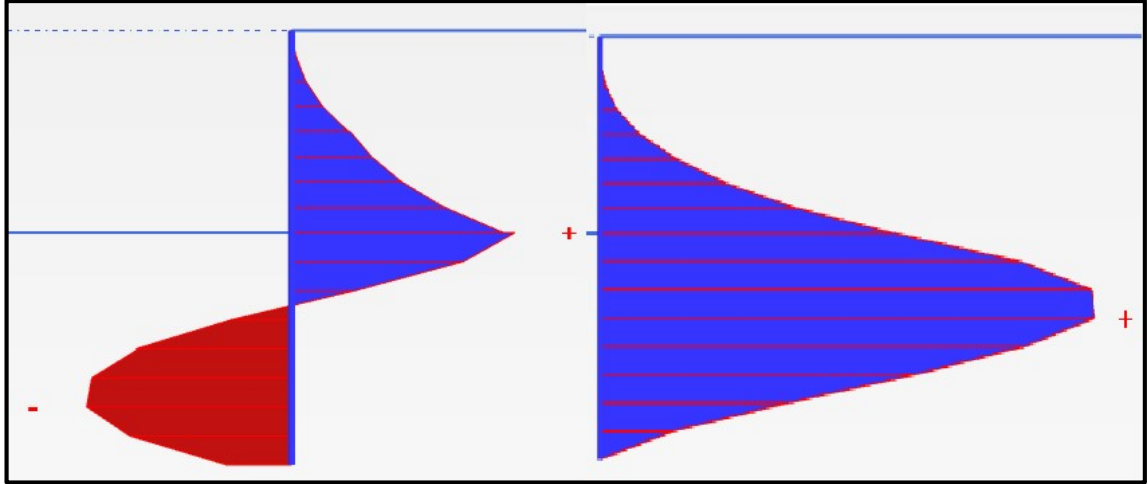


Şekil 4.10 Hesaplama arayüzü

Sayısal analiz programında, doğrusal olmayan plastisite problemlerini çözmek için çeşitli adımlar bulunmakta ve hepsi de yük kademesi seçimi esasına dayanmaktadır. Doğru yapılandırmanın seçimi, optimum sonuçların elde edilmesi için otomatik olarak program tarafından yapılmaktadır.

#### 4.3.3. Çıktı (Output)

Çıktı programında kullanıcı sonuçları kolayca görüntüleyebilir ve hesaplama sürecinden elde edilen değerlerden sonuç listelerini detaylı bir şekilde düzenleyebilir. Genel itibariyle, düğüm noktası yer değiştirmeleri ve mevcutsa yapısal elemanlarda meydana gelen gerilmeler ele alınmaktadır. Bu aşamada sonuçlar gölgeleme, kontur çizgileri, çizgiler, oklar veya başka sunumlarla kontrol edilebilmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Palplanşa etkileyen kesme kuvveti ve moment diyagramları

Diğer yandan, sonuçlar Windows ortamına benzeyen bir yapıya sahip tablolarda verilebilmektedir. Böylece bunları uygun şekilde ele almak ve incelemek için kolayca ana Office uygulamalarına (genellikle Excel) aktarabilmek mümkün olmaktadır (Şekil 4.12).

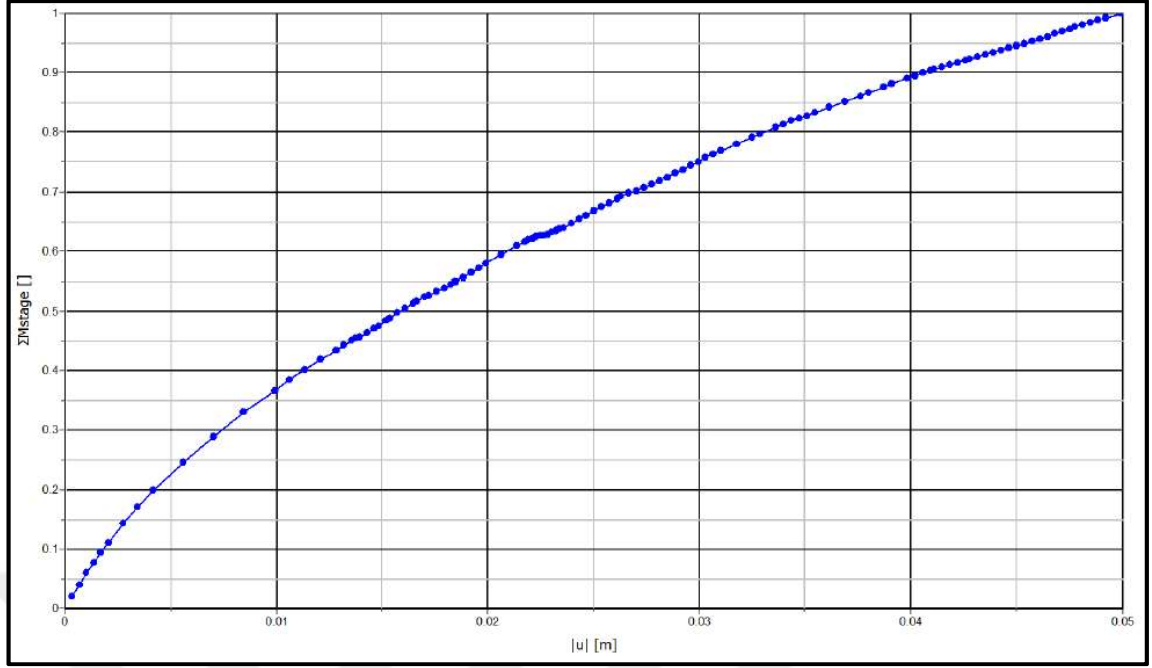
Soil element	Stress point	Local number	X [m]	Y [m]	$\sigma_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Principal stress directions [°]	p [kN/m <sup>2</sup> ]	q [kN/m <sup>2</sup> ]	T <sub>rel</sub>
Clus. 2 - El. 56 CD2 - Sand Sol_1_2	661	1	144,534	49,606	-5,511	-2,339	-1,693	-3,602	-1,909	2,544	-3,181	3,539	1,000
		2	149,605	44,539	-102,189	-71,051	-69,602	-85,896	-16,293	0,158	-80,947	31,887	0,745
		3	149,605	49,606	-5,985	-2,525	-1,839	-3,912	-2,073	-0,768	-3,450	3,850	1,000
		4	146,864	48,442	-26,887	-14,998	-13,621	-20,254	-6,633	0,386	-18,502	12,634	0,853
		5	148,441	46,866	-57,536	-37,716	-36,262	-46,899	-10,637	-0,043	-43,838	20,586	0,785
		6	148,441	48,442	-26,779	-14,965	-13,620	-20,199	-6,580	0,050	-18,455	12,541	0,849
		7	146,019	48,060	-34,190	-20,163	-18,114	-26,152	-8,038	2,093	-24,156	15,156	0,905
		8	148,059	46,022	-73,809	-49,904	-48,590	-61,199	-12,609	-0,048	-57,434	24,588	0,757
		9	149,668	46,022	-74,038	-49,910	-48,381	-61,209	-12,829	0,090	-57,443	24,928	0,770
		10	149,668	48,060	-34,035	-20,362	-18,934	-26,484	-7,550	-0,604	-24,444	14,440	0,834
		11	148,059	49,668	-4,915	-2,076	-1,510	-3,212	-1,702	1,119	-2,834	3,160	1,000
		12	146,019	49,668	-5,375	-2,257	-1,651	-3,513	-1,862	-2,471	-3,094	3,461	1,000
Clus. 2 - El. 57 CD2 - Sand Sol_1_2	673	1	144,919	41,453	-161,903	-115,540	-114,249	-138,076	-23,827	-0,169	-130,564	47,022	0,718
		2	149,633	38,151	-225,848	-163,043	-161,636	-193,742	-32,106	-0,010	-183,509	63,521	0,711
		3	149,633	43,218	-127,912	-90,180	-88,835	-108,374	-19,538	0,100	-102,309	38,422	0,729
		4	147,084	41,100	-168,757	-120,613	-119,279	-144,018	-24,739	-0,066	-136,216	48,825	0,718
		5	148,550	40,073	-188,644	-135,389	-134,026	-161,335	-27,309	-0,028	-152,686	53,950	0,715
		6	148,550	41,649	-158,126	-112,700	-111,349	-134,737	-23,388	-0,023	-127,392	46,116	0,721
		7	146,299	40,425	-181,819	-130,328	-128,981	-155,400	-26,419	-0,113	-147,043	52,178	0,716
		8	148,195	39,096	-207,554	-149,445	-148,056	-177,805	-29,749	-0,046	-168,352	58,816	0,713
		9	149,691	39,656	-196,713	-141,385	-140,001	-168,357	-28,356	-0,011	-159,367	56,033	0,714
		10	149,691	41,695	-157,302	-112,061	-110,689	-133,996	-23,307	0,017	-126,684	45,943	0,722
		11	148,195	42,742	-136,943	-96,957	-95,616	-116,280	-20,664	-0,030	-109,839	40,673	0,726

Şekil 4.12 Gerilme, deformasyon ve yük sonuç tablosu

#### 4.3.4. Eğriler (Curves)

Eğriler aşaması, geometride önceden seçilmiş noktalarda yük-yer değiştirme eğrileri veya gerilme şemaları gibi tüm verilerin oluşturulabildiği bölümdür. Bu aşamada elde edilen görünüm Şekil 4.13'te yer almaktadır.





Şekil 4.13 Eğri

#### 4.4. Zemin Modelleri

İki ve üç boyutlu PLAXIS programlarında zemin davranışını modellemek için aşağıdaki özellikleri kısaca belirtilen zemin modeli kullanılmaktadır.

- Zemin davranışını çok sınırlı bir şekilde temsil edebilen ve kaya gibi sadece rijit ve büyük zemin kütlelerini modellemek için kullanılan Lineer Elastik Model. Programda giriş bilgileri olarak Young modülü,  $E$  ve Poisson oranı,  $\nu$  değerleri girilmektedir.
- Drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen aksenal deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanan Pekleşme Zemin Modeli. Bu modelde gerilme seviyesi, kohezyon ( $c$ ), sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) ile sınırlandırılmıştır. Modelde elastisite teorisinden çok plastisite teorisini kullanılmaktadır.
- Yumuşak zeminlerdeki büzülme ve gerilme gevşemesi gibi viskoz etkiler ile normal konsolide killerde gözlenen zamana bağlı sıkışma davranışını dikkate alan Yumuşak Zemin Krip Modeli. Özellikle, temel ve dolgulardaki zamana bağlı oturma problemleri ile tüneller ve derin kazı gibi zemindeki yük boşalması problemlerinde bu model kullanılmaktadır.

- Tabakalı veya birleşik kayaların davranışını modellemede kullanılan plastik kaymanın sadece sınırlı sayıda kayma doğrultularında meydana geldiği anizotropik elasto-plastik bir model olan Jointed Rock modeli. Modelde giriş parametreleri olarak, Elastisite modülü,  $E$ , Poisson oranı,  $\nu$ , kohezyon,  $c$ , içsel sürtünme açısı,  $\phi$  ve dilatasyon açısı,  $\psi$  değerleri girilmektedir.
- Elasto-tam plastik zemin davranışını modelleyebilen Mohr Coulomb zemin modeli

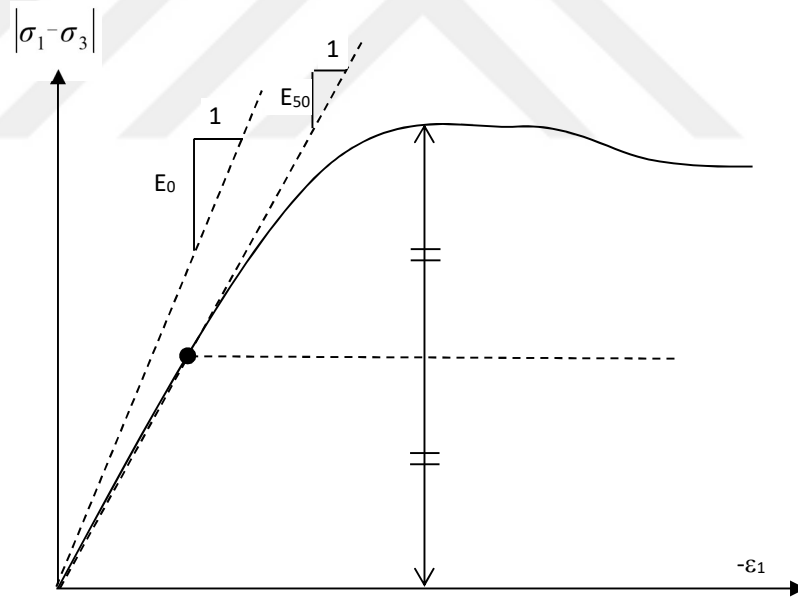
Arazi çalışmalarında dairesel temel üzerine düşey yönde aksenal yükleme yapılarak temel plakasında oluşan düşey deplasmanlar ölçülmektedir. Gerek deney süresi, gerekse deneyin yapıldığı araziye zemin koşulları dikkate alındığında, sayısal analizler drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu konuda literatürdeki benzer çalışmalara bakıldığında homojen ve suya doymuş kil zeminlerde sayısal analizlerin genellikle drenajsız koşullarda ve Mohr-Coulomb zemin modeli ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmalarda, genellikle zeminin drenajsız kayma mukavemeti  $c_u$ 'nun üniform ve homojen kil zeminlerde derinlikle arttığı vurgulanmaktadır. Buna karşın, sayısal analizlerde ortalama bir  $c_u$  değerinin seçilmesi ve analizlerde zemin modeli olarak Mohr-Coulomb modelinin kullanılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir (Lehane 2003; Long ve O'Riordan, 2001; Taiebat ve Carter, 2002; Osman ve Bolton, 2005). PLAXIS programında yukarıda verilen literatüre uygun olarak drenajsız koşullarda Mohr-Coulomb modeli kullanıldığında parametre olarak  $\phi=\phi_u=0$  ve  $c=c_u$  olarak girilebileceği ifade edilmektedir. İleri düzey zemin modelleri (Modifiye Cam Kili gibi) kullanıldığında ise, yine drenajsız koşullarda analizlerin yapılması, buna karşılık drenajlı koşullarda elde edilen model parametrelerinin ( $\lambda$ ,  $\kappa$  gibi) girilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu durumda, drenajlı parametreler kullanılarak  $c_u$ 'nun hesaplanacağı ifade edilmektedir. Yukarıda verilen literatür çalışmalarında genellikle ilk yöntemin daha çok tercih edildiği görülmektedir. Bu yüzden, bu tez çalışmasında Mohr Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Modelde kullanılan parametrelerle ilgili ayrıntılar ve PLAXIS yazılımında modele özgü açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

Zemin davranışının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan Mohr Coulomb modelinde elastisite modülü  $E$ , Poisson oranı  $\nu$ , kohezyon  $c$ , içsel sürtünme açısı  $\phi$  ve

dilatasyon açısı  $\psi$  olma üzere beş ayrı parametreyi içermektedir. Ayrıca,  $E_{\text{increment}}$  ve  $c_{\text{increment}}$  gibi ileri düzey parametreler de modelde yer almaktadır.

a) Elastisite Modülü (E): Mohr Coulomb modelinde Young modülü temel rijitlik modülü olarak ele alınmaktadır. Rijitlik modülü gerilme (birim alana düşen yük) cinsinden tanımlanmaktadır. Çoğu geomalzemenin yüklemenin hemen başında lineer olmayan bir davranış sergilemesinden dolayı, hesaplamalarda kullanılan rijitlik parametresi değerlerine dikkat edilmelidir.

Zemin mekaniğinde üç eksenli basınç deneyinde elde edilen  $|\sigma_1 - \sigma_3| - \varepsilon_1$  eğrisinin başlangıç eğimi  $E_0$ , mukavemetin %50'sine karşılık gelen doğrunun eğimi de sekant modülü ( $E_{50}$ ) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.14).  $E_0$  modülünün büyük oranda lineer elastik davranış gösteren aşırı konsolide killerde ve bazı kayalarda,  $E_{50}$  modülünün ise kumlarda ve normal konsolide killerde kullanılması önerilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).



Şekil 4.14  $E_0$  ve  $E_{50}$  Rijitlik Modüllerinin Tanımlanması

Zeminlerde hem başlangıç modülü ( $E_0$ ) hem de sekant modülünün ( $E_{50}$ ) değeri, çevre basıncına bağlı olarak değişmektedir. Derin zemin tabakalarında elde edilen rijitlik modülleri, sıg tabakalarda elde edilen modüllere göre daha büyüktür. Aynı zamanda zeminlerde rijitlik, gerilme izlerine de bağlıdır. Yük boşalması ve yeniden yükleme esnasında elde edilen rijitlik değerleri, başlangıç yüklemesine göre oldukça büyüktür.

Young modülüne bağlı olarak tanımlanan rijitlik modülü, drenajlı yükleme durumunda göçme durumuna göre daha küçük olmaktadır.

Küçük deformasyonlarda ( $<10^{-5}$ ) elde edilen rijitlik değerleri mühendislik problemlerinde önerilen limit durumlarında ( $<10^{-3}$ ) elde edilen değerlere göre oldukça yüksektir. Bu yüzden zemin davranışının tanımlanmasında sabit bir rijitlik modülü kullanılabilmesi için deformasyon seviyesinin, gerilme seviyesinin ve gerilme izinin belirlenmesi gerekmektedir.

**b) Poisson Oranı ( $\nu$ ):** Standart drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde aksenal yüklemenin hemen başında önemli oranda hacim azalması meydana gelmekte ve bunun sonucunda düşük bir başlangıç Poisson oranı elde edilmektedir. Yük boşalması problemleri gibi bazı problemlerde bu düşük başlangıç değerinin kullanılması uygun olabilmekte, ancak genel itibariyle Mohr Coulomb modelinde daha yüksek Poisson oranı değerlerinin kullanılması önerilmektedir.

PLAXIS yazılımında ağırlık yüklemesi durumu için Elastik model veya Mohr Coulomb modelleri kullanıldığında Poisson oranının seçilmesi için oldukça kolaydır. Bu tür bir yükleme için gerçekçi bir  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$  değeri verilmelidir.

Mohr Coulomb modelinde tek boyutlu basınç durumları için yaygın olarak kullanılan  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v = \nu(1-\nu)$  tanımlaması yapılmıştır. Bu tanımda gerçekçi bir  $K_0$  değerini verebilen Poisson oranı tanımlamak oldukça kolaydır. Çoğu durumda Poisson oranı değerleri 0.3 ile 0.4 arasında değişmektedir. Genellikle bu değerler, tek boyutlu aksenal yükleme dışında kalan yükleme durumları için kullanılmaktadır. Yük boşalması durumunda daha düşük bir Poisson oranının (0.2 gibi) kullanılması daha uygun olmaktadır. Poisson oranı değeri tanımlanırken çok aşırı konsolide gerilme durumlarında elde edilen  $K_0 > 1$  durumu oluşmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Drenajsız koşullar geçerli olduğunda Poisson oranı efektif Poisson oranı olarak değerlendirilirken, drenajsız koşullar geçerli olduğunda düşük sıkışabilirlik durumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Zeminin sıkışabilirliğinin boşluk suyunun sıkışabilirliğinden çok fazla olduğu durum için drenajsız davranışta Poisson oranının değeri 0.35'den küçük olmalıdır.

Young modülüne ilave olarak kayma modülü  $G$  ve ödometre modülü  $E_{oed}$  gibi alternatif rijitlik modülleri de tanımlanmaktadır. Bu modüller, izotropik elastisitedeki

Hooke yasasına göre Young modülü ve Poisson oranına bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.1)$$

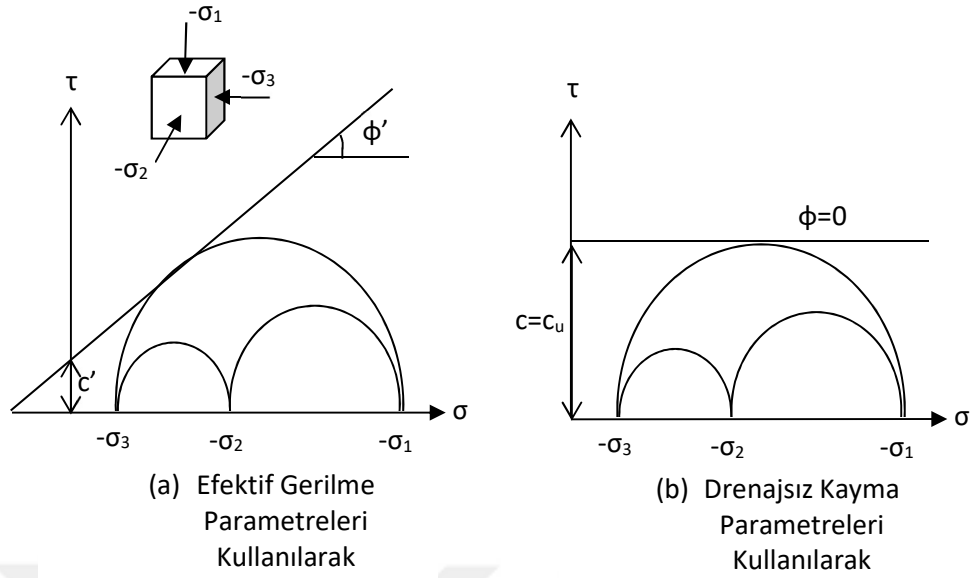
$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (4.2)$$

**c) Kohezyon (c):** Kohezyon, gerilme cinsinden tanımlanan bir mukavemet ölçüsüdür. Mohr Coulomb modelinde kohezyon parametresi, zemindeki efektif kohezyon  $c'$  ve efektif içsel sürtünme açısı  $\phi'$  ile birlikte tanımlanmaktadır. Bu durum, sadece drenajlı zemin davranışı için değil aynı zamanda drenajsız zemin davranışında da geçerlidir. PLAXIS'te her iki durumda da efektif gerilme analizi yapılmaktadır. Ayrıca zeminin drenajsız kayma mukavemetini  $c_u$  (veya  $s_u$ ) modellemek için kohezyon parametresi  $\phi=\phi_u=0$  durumunda da kullanılmaktadır (Şekil 4.15b).

Drenajsız koşullar için efektif kayma mukavemeti parametreleri  $c'$  ve  $\phi'$  değerlerinin tanımlanmasının dezavantajı, model tarafından oluşturulan drenajsız kayma mukavemetinin gerçekte oluşan drenajsız kayma mukavemetinden daha farklı değerler alabileceğidir. Bunun sebebi, gerilme izlerinde görülen farktır.

Öte yandan efektif parametre kullanılmasının avantajı, konsolidasyon sonucu ortaya çıkan kayma dayanımı değişiminin otomatik olarak elde edilebilmesidir. Drenajsız kayma dayanımını ( $\phi=0$  durumunda) modellemede kohezyon parametresi kullanılmasının avantajı, gerçek gerilme durumu ve gerilme izinden bağımsız olarak kayma mukavemetinin doğrudan kontrol edilebilmesidir.

**d) İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ):** İçsel sürtünme açısı  $\phi$  (phi) derece cinsinden ifade edilen bir parametredir. Efektif kohezyon değerine ( $c'$ ) bağlı olarak tanımlanan sürtünme açısı genellikle zemin içinde oluşan efektif sürtünmeyi modellemek için kullanılmaktadır (Şekil 4.15a). Bu durum sadece drenajlı zemin davranışı için değil, drenajsız zemin davranışı için de geçerlidir. Her iki durumda da PLAXIS'te efektif gerilme analizi yapılmaktadır. Ayrıca zemin dayanımı, kohezyon parametresinin zeminin drenajsız kayma dayanımına eşitlenmesiyle de modellenebilmektedir ( $\phi=0$  durumunda) (Şekil 4.15b).



**Şekil 4.15** Göçme Anında Gerilme Zarfları

Sıkı kumlarda olduğu gibi büyük içsel sürtünme açılarında plastik aşamadaki hesap süresi oldukça uzundur. Hesaplama zamanı, içsel sürtünme açısının büyüklüğüne göre değişmektedir. Ön tasarım yapılırken çok yüksek bir içsel sürtünme açısı seçilmesi, işlem süresi açısından çok tavsiye edilmemektedir.  $\phi' > 35^\circ$  durumunda işlem süresi daha da artmaktadır. İçsel sürtünme açısı Mohr gerilme daireleri yardımıyla kayma dayanımını belirlemektedir (Şekil 4.15).

**d) Dilatasyon açısı ( $\psi$ ):** Dilatasyon açısı  $\psi$  (psi) derece cinsinden ifade edilen bir parametredir. Çok aşırı konsolide tabakalar dışında kil zeminler genişemezler (yani  $\psi = 0^\circ$  dir). Kumlarda ise dilatasyon yoğunluğa ve içsel sürtünme açısına bağlıdır. Genelde dilatasyon açısı içsel sürtünme açısına göre oldukça küçüktür. Quartz kumlarında dilatasyon açısının değeri  $\psi \cong \phi - 30$  olmaktadır. Çoğu durumda  $\phi < 30^\circ$  hali için dilatasyon açısı sıfıra eşittir. Dilatasyon açısının çok küçük bir negatif değer alması, gevşek kumlarda söz konusudur. Zeminlerde  $c = c_u(s_u)$  ve  $\phi = 0$  olması halinde davranış modellenirken dilatasyon açısı sıfır alınmaktadır. Drenajsız koşullarda modellemede pozitif bir dilatasyon açısı kullanılırken dikkatli davranılmalıdır.

**e) Rijitlik ve Kohezyon Artışı ( $E_{\text{increment}}$ ,  $c_{\text{increment}}$ ):** Mohr Coulomb modelinde ileri düzey parametreler, rijitlik ve kohezyona bağlı mukavemetin derinlikle artışı ile ilgilidir. Zeminlerde gerilme seviyesi büyük oranda rijitliklerine bağlıdır. Rijitlik genellikle derinliğe bağlı olarak artış göstermektedir. Mohr Coulomb modelinde rijitlik sabit bir

değerdir. Rijitlik değerinde derinliğe bağlı olan bu artışı ifade etmek için  $E_{\text{increment}}$  parametresi tanımlanmaktadır.  $E_{\text{increment}}$ , birim derinlik için Young modülü artışı (birim derinlikteki birim gerilme) olarak ifade edilmektedir. PLAXIS yazılımında kohezyonun derinlikle değiştiği kil tabakaları için  $c_{\text{increment}}$  parametresi tanımlanmıştır.  $c_{\text{increment}}$  birim derinlik için kohezyon artışı (birim derinlik için gerilme) olarak ifade edilmiştir.

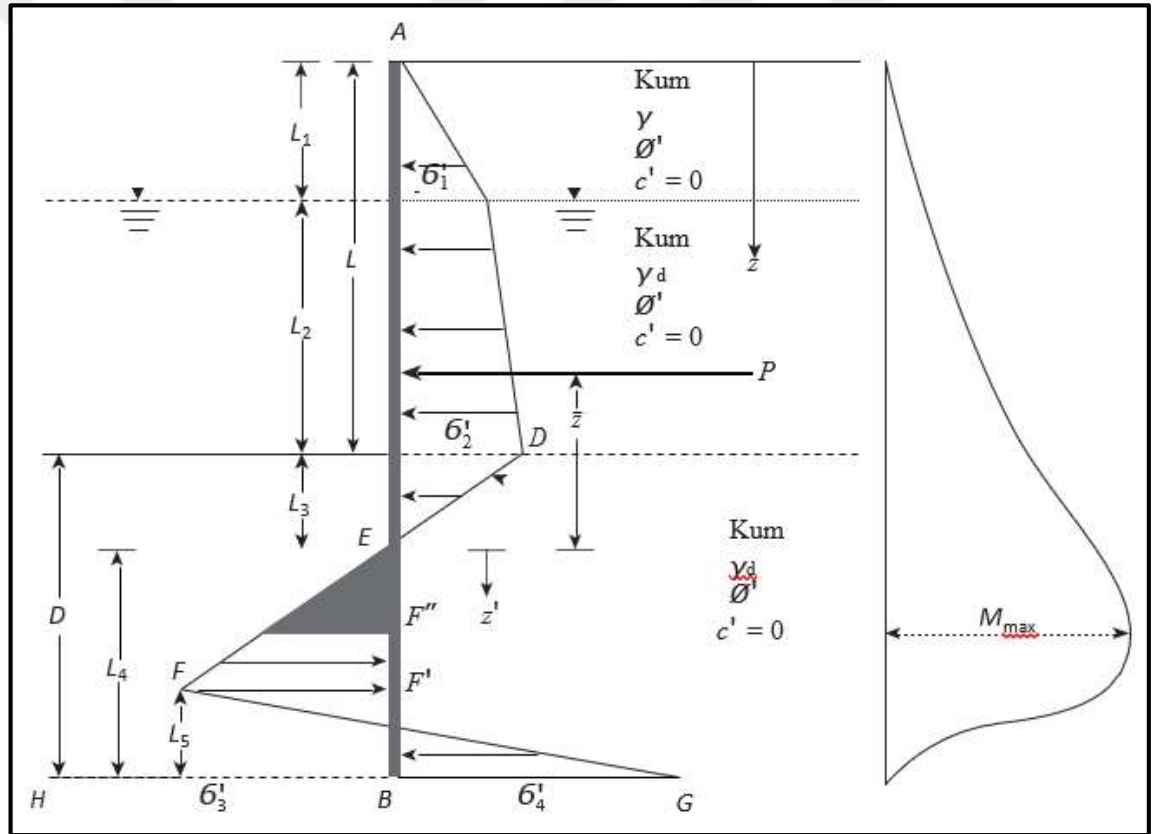


## 5. ANALİTİK YAKLAŞIM

Bu tez çalışması kapsamında analitik yöntem olarak, Das (2010) tarafından önerilen tasarım yöntemi kullanılmıştır. Çalışma süresince çok fazla sayıda analiz yapıldığından dolayı, bu yöntemin hesap adımları bilgisayar destekli bir programla kodlanarak analizlerin hızlıca gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. İlerleyen bölümlerde analitik yöntemin hesap adımlarından ve kodlandığı programdan bahsedilecektir.

### 5.1. Analitik Yöntem Hesap Adımları

Şekil 5.1'de yöntemin önerdiği, palplarıya etkiyen yatay zemin basınç diyagramı ve moment diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Yatay basınç ve maksimum moment diyagramları (Das, 2010)

1) Rankine aktif ve pasif yanal zemin basınç katsayıları hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.1 ve 5.2).

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (5.1)$$



$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (5.2)$$

2)  $L_1$  ve  $L_2$  verilmiş ise YASS ( $\sigma_1'$ ) ve kazı ( $\sigma_2'$ ) kotlarındaki yanal zemin basınçları hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.3 ve 5.4).

$$\sigma_1' = \gamma L_1 K_a \quad (5.3)$$

$$\sigma_2' = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.4'te yer alan;  $\gamma' = \gamma_d - \gamma_{su}$  olarak ifade edilmektedir.

3) “z” ölçüsünün maksimum olduğu, yani basınç diyagramının sıfır olduğu “E” noktasına kadar olan palplanş kısmı dikkate alınarak, nihai aktif ve pasif basınçların eşitliğinden yararlanılarak oluşturulan denklemden “ $L_3$ ” uzunluğu hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.5-5.8).

$$\sigma_a' = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma'(z - L_1 - L_2)] K_a \quad (5.5)$$

$$\sigma_p' = \gamma'(z - L_1 - L_2) K_p \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma_a' - \sigma_p' = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a - \gamma'(z - L_1 - L_2)(K_p - K_a) \\ &= \sigma_2' - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) = 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$(z - L) = L_3 = \frac{\sigma_2'}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad (5.8)$$

4) Daha sonra basınç kuvveti “P” Eşitlik 5.9 ile ifade edilmektedir.

$$P = \frac{1}{2} \sigma_1' L_1 + \sigma_1' L_2 + \frac{1}{2} (\sigma_2' - \sigma_1') L_2 + \frac{1}{2} \sigma_2' L_3 \quad (5.9)$$

5) “P” basınç kuvvetinin, basıncın sıfır olduğu “E” noktasına olan uzaklığı “z” ise “E” noktasına göre moment alınarak bulunmaktadır (Eşitlik 5.10).

$$\bar{z} = \frac{\sum M_E}{P} \quad (5.10)$$

6) Palplanşın en altı olan “B” noktasında aktif basınç soldan sağa, pasif basınç sağdan sola doğrudur. Bu basınçlar aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.11-5.14).

$$\sigma_p' = (\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma' D) K_p \quad (5.11)$$

$$\sigma_a' = \gamma' D K_a \quad (5.12)$$

$$\sigma'_p - \sigma'_a = \sigma'_4 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p + \gamma' L_3 (K_p - K_a) + \gamma' L_4 (K_p - K_a) \quad (5.13)$$

$$= \sigma'_5 + \gamma' L_4 (K_p - K_a) \quad (5.14)$$

Burada “ $(\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p + \gamma' L_3 (K_p - K_a)$ ” ifadesi “ $\sigma'_5$ ” olarak gösterilmiştir. Bu ifade bir sonraki aşamada kullanılmaktadır.

7) Daha sonra “ $L_4$ ” ün bulunmasını sağlamak adına bu aşamada dört adet parametre hesaplanmaktadır.

$$A_1 = \frac{\sigma'_5}{\gamma' (K_p - K_a)} \quad (5.15)$$

$$A_2 = \frac{8P}{\gamma' (K_p - K_a)} \quad (5.16)$$

$$A_3 = \frac{6P[2\bar{z}\gamma' (K_p - K_a) + \sigma'_5]}{\gamma'^2 (K_p - K_a)^2} \quad (5.17)$$

$$A_4 = \frac{P[6\bar{z}\sigma'_5 + 4P]}{\gamma'^2 (K_p - K_a)^2} \quad (5.18)$$

8) Yukarıda bulunan parametreler yerine konulup, aşağıdaki denklem deneme-yanılma ile çözümlenip ve “ $L_4$ ” Eşitlik 5.19 vasıtasıyla bulunmuştur.

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 + A_2 L_4^2 + A_3 L_4 + A_4 = 0 \quad (5.19)$$

9) Palplanşın en altındaki “ $\sigma'_4$ ” basıncı ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_4 = \sigma'_5 + \gamma' L_4 (K_p - K_a) \quad (5.20)$$

10) Palplanşın alt noktasındaki, net basınç diyagramında bulunmayan ‘ $\sigma'_3$ ’ basınç değeri Eşitlik 5.21 yardımıyla bulunmuştur.

$$\sigma'_3 = \gamma' L_4 (K_p - K_a) \quad (5.21)$$

11) Ardından “ $L_5$ ” uzunluğu ise Eşitlik 5.22’den hesaplanmaktadır.

$$L_5 = \frac{\sigma'_3 L_4 - 2P}{\sigma'_3 + \sigma'_4} \quad (5.22)$$

12) Gömülme derinliği (D) aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Eşitlik 5.23).

$$D = L_3 + L_4 \quad (5.23)$$

13) Bu aşamada basınç diyagramı oluşturulmaktadır.

14) Maksimum momentin oluşacağı noktanın ( $F''$ ), basınç kuvvetinin sıfır olduğu noktaya (E) olan uzaklığı ( $z'$ ) bulunmaktadır (Eşitlik 5.24).

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{\gamma'(K_p - K_a)}} \quad (5.24)$$

15) Bu değer kullanılarak oluşacak maksimum moment değeri Eşitlik 5.25 ile hesaplanmaktadır.

$$M_{max} = P(\bar{z} + z') - \left[ \frac{1}{2} \gamma' z'^2 (K_p - K_a) \right] \frac{1}{3} z' \quad (5.25)$$

## 5.2. Hesap Adımlarının Mathematica İle Kodlanması

Mathematica, tanınmış bir simgesel matematik yazılımıdır. “Kernel-frond end” mantığı ile çalışan yazılım çizgisel arayüzlüdür ve denklem girmesi kolaydır. Matematiksel her türlü hesaplamanın yapılabildiği mathematica, sayısal işlemler yapılabilen bir hesap makinesi gibi de düşünülebilmektedir. Aşağıda bu yazılım ile oluşturulan analitik yöntem kodları verilmektedir.

Mathematica yoğun hesaplamalar gerektiren işlemler için zaman kaybını ortadan kaldırmaktadır. Veri analizi, fonksiyonların grafiklerine dair animasyonlar, olasılık işlemlerindeki zenginlik, fizik, kimya, biyoloji ve mühendislikteki çeşitli uygulamalar, görüntü işleme vb. alanlarda Mathematica güçlü bir yazılım olarak kullanılmaktadır. Mathematica, yüksek boyutlarda veriyi hızlı ve kolay işleyebilmektedir. Laplas, fourier dönüşümlerini ve analizlerini yapabilmekte ve bunlar gibi çok çeşitli fonksiyonları kolayca gerçekleştirebilmektedir. Nümerik özelliklerinin yanında, Mathematica cebrik işlemleri yapmayı kolaylaştıran geniş bir araç kutusuna ve güçlü bir sembolik işlem yapabilme yeteneğine sahiptir. Mathematica notebookları mühendislere hazırladıkları projeleri düzenli ve etkileyici bir formatta sunmaları için uygun tasarlanmıştır. Mathematica notebookları, hazırlanan hesaplamaların, analizlerin, formüllerin ve çizilen grafiklerin otomatik olarak yerleştirildiği interaktif dökümanlardan oluşmaktadır. Hesaplamalar, analizler yapıldıktan ve grafikler çizildikten sonra, notebook’a kısaca açıklamalar, başlıklar ve görseller eklenerek çalışma dökümanları bir sunum haline

getirilebilmektedir. Sonuçta Mathematica her türlü hesaplama işlemine uygundur ve bu yüzden mühendisler tarafından sıklıkla kullanılmaktadır.

Mathematica Kodları:

$$Ka[\varphi_]:=Tan[\pi/4-\varphi/2]^2$$

$$Kp[\varphi_]:=Tan[\pi/4+\varphi/2]^2$$

$$\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi_]=\gamma L_1 Ka[\varphi];$$

$$\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(\gamma L_1+\gamma_p L_2) Ka[\varphi];$$

$$L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]/(\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi]))$$

$$\sigma_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi,DD_]=\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])*(DD-L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]);$$

$$\sigma_4[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi,DD_]=(\gamma L_1+\gamma_p L_2) Kp[\varphi]+\gamma_p*DD*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])$$

$$\sigma_F[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi,DD_,z_1_]=\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])*(z_1);$$

$$\sigma_5[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(\gamma L_1+\gamma_p L_2) Kp[\varphi]+\gamma_p*L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi]);$$

$$PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=1/2$$

$$\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi]*L_1+\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi]*L_2+1/2*(\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]-$$

$$\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi]*L_2+1/2*\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]$$

$$A_1[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=\sigma_5[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]/(\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi]))$$

$$A_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(8*PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi])/(\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi]))$$

$$A_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(6*PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*(2*z_b[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*\gamma_p*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])+\sigma_5[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]))/(\gamma_p^2*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])^2)$$

$$A_4[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*(6*z_b[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*\sigma_5[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]+4*PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]))/(\gamma_p^2*(Kp[\varphi]-Ka[\varphi])^2)$$

$$z_b[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi_]=(1/2$$

$$\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi]*L_1*(1/3*L_1+L_2+L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi])+\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi]*L_2*(L_2/2+L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi])+1/2*(\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]-\sigma_1[\gamma,L_1,\varphi])*L_2*(1/3$$

$$L_2+L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi])+1/2*\sigma_2[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]*(2/3*L_3[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]))/PP[\gamma,\gamma_p,L_1,L_2,\varphi]$$

$$z_p[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] := \sqrt{\frac{2 * PP[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]}{\gamma_p * (Kp[\varphi] - Ka[\varphi])}}$$

$$eq1[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD, L5, z1] := 1/2 * (\sigma F[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD, z1] + \sigma 3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD]) * (DD - L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] - z1) - 1/2 * (\sigma 3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD] + \sigma 4[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD]) * L5 == 0$$

$$eq2[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD, L5, z1, Mmx] := Mmx + (\sigma F[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD, z1] * (DD - L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] - z1) * (DD - L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] - z1) / 2 + 1/2 * (DD - L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] - z1) * (\sigma 3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD] - \sigma F[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD, z1]) * (DD - L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] - z1) / 3) - 1/2 * L5 * (\sigma 3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD] + \sigma 4[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, DD]) * L5 / 3 == 0$$

$$dnklm[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, L4] := L4^4 + A1[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] * L4^3 - A2[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] * L4^2 - A3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] * L4 - A4[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]$$

$$LL4[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] := \text{FindRoot}[dnklm[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi, L4], \{L4, L1 + L2\}][[1, 2]]$$

$$Dteori[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] := L3[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] + LL4[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]$$

$$Liksa[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] := L1 + L2 + 1.3 * Dteori[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]$$

$$Mmx[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] := PP[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] * (z_b[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] + z_p[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]) - (1/2 * \gamma_p * z_p[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi]^2 * (Kp[\varphi] - Ka[\varphi]) * z_p[\gamma, \gamma_p, L1, L2, \varphi] / 3)$$

## 6. SAYISAL VE ANALİTİK YAKLAŞIMARIN KARŞILAŞTIRMALI SONUÇLARI

Bu bölümde, bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analiz ve analitik çözümlerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, uyumlulukları araştırılmıştır. Karşılaştırmalar aşağıda sıralanan 5 seri üzerinden yapılmıştır:

- Seri I (Kazı Derinliğinin Etkisinin Araştırılması)
- Seri II (Gömülme Derinliğinin Etkisinin Araştırılması)
- Seri III (Palplanş Rijitliğinin Etkisinin Araştırılması)
- Seri IV (Zemin Mukavemetinin Etkisinin Araştırılması)
- Seri V (Zemin Modelinin Etkisinin Araştırılması)

Bu kapsamda irdelenen parametreler ve analiz sayıları aşağıda yer almaktadır (Çizelge 6.1).

**Çizelge 6.1** Kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre	Sembolü	Değerler	Analiz Sayısı
YASS	$L_1$ (m)	1, 2, 3, 4, 5, 6	
YASS ile kazı kotu arası mesafe	$L_2$ (m)	1, 2, 3, 4, 5, 6	
İçsel sürtünme açısı	$\Phi$ (°)	27, 32, 37, 42, 47	
Kuru birim hacim ağırlık	$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.9 17.0	198
Doygun birim hacim ağırlık	$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.33 20.0	
İksa eğilme rijitliği	EI (kNm <sup>2</sup> /m)	$1.2 \times 10^5$ $1.2 \times 10^6$ $1.2 \times 10^7$	
Zemin Modeli		Mohr-Coulomb Pekleşen zemin	18

### 6.1. Seri I (Kazı Derinliğinin Etkisinin Araştırılması)

Kazı derinliğinin etkisi iki farklı zemin modeli için incelenmiştir. Aşağıda kullanılan zemin modeli, sonuçların gösterildiği çizelgeler ve grafikler sunulmuştur (Çizelge 6.1-6.4, Şekil 6.1).

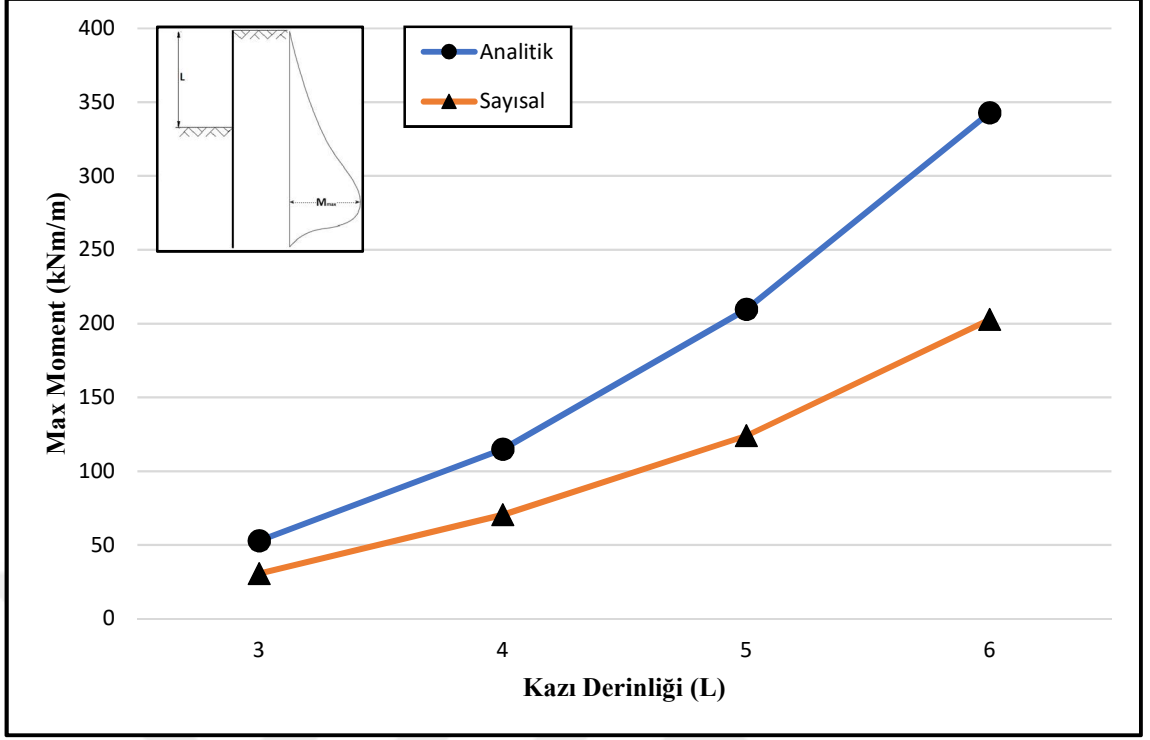
Aynı kazı derinliğine sahip konsol iksa geometrileri, analitik ve sayısal yöntemlerin ikisiyle de çözülmüştür. Beklenildiği üzere kazı derinliği arttıkça iksa yapısının maruz kaldığı moment değeri de artmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde, kazı derinliği arttıkça analitik ve sayısal yöntemlerde elde edilen moment değerlerinin aralarındaki fark artmaktadır. Fakat moment değerleri arasındaki oranın değişmediği gözlenmiştir (Şekil 6.1).

**Çizelge 6.2** Zemin modeli parametreleri (1. Grup)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	15.9
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	32
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.2686

**Çizelge 6.3** Kazı derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (1. Grup)

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>kazı</sub>	D	L <sub>iksa</sub>	L <sub>1</sub> /L <sub>kazı</sub>	D/L <sub>iksa</sub>	M <sub>max</sub> (kNm/m)	
							ANALİTİK	SAYISAL
2	1	3	3.45	6.45	0.667	0.535	52.79	30.6
2	2	4	4.44	8.44	0.500	0.526	114.89	70.36
2	3	5	5.4	10.4	0.400	0.519	209.58	123.9
2	4	6	6.35	12.35	0.333	0.514	342.93	202.8



Şekil 6.1 Kazı derinliğinin etkisi (1. Grup)

İki grup halinde yapılan çalışma sonucunda, moment değerleri arasındaki oranın zemin mühendislik parametrelerine bağlı olmadığı gözlenmiş ve yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6.2).

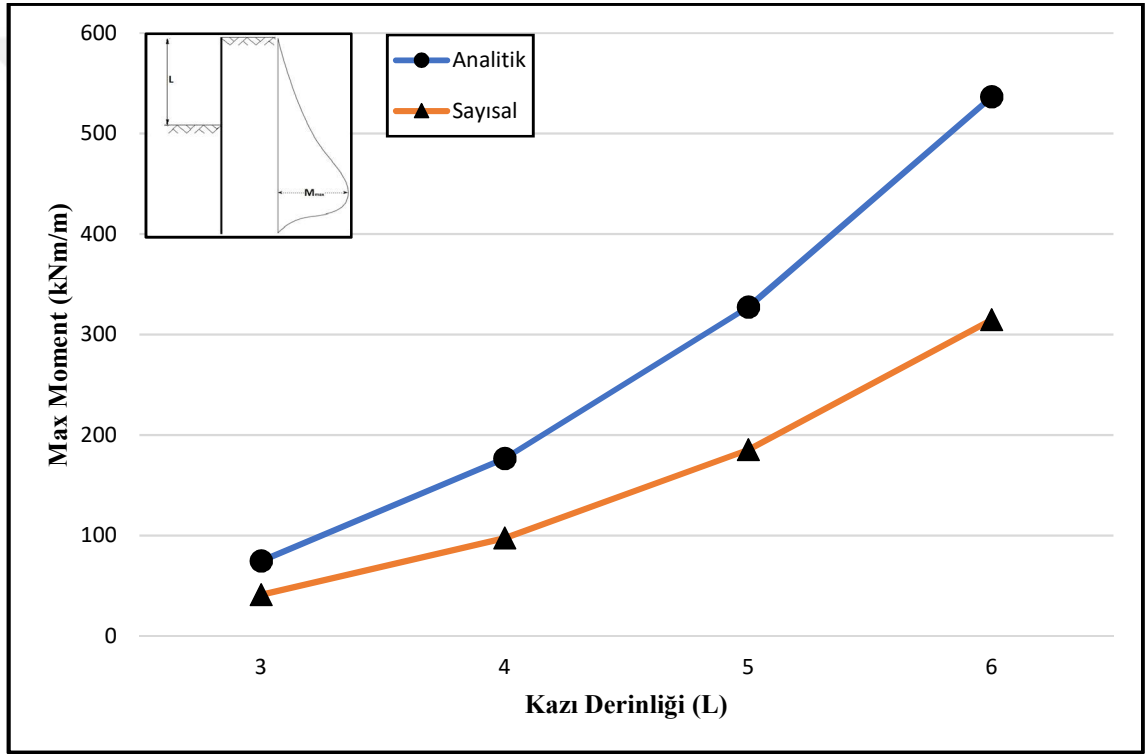
Çizelge 6.4 Zemin modeli parametreleri (2. Grup)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	$\text{kN/m}^3$	17.0
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{\text{ref}}$	$\text{kN/m}^2$	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	$\text{kN/m}^2$	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	( $^\circ$ )	30
Dilatasyon açısı	$\psi$	( $^\circ$ )	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.5



Çizelge 6.5 Kazı derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (2. Grup)

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>kazı</sub>	D	L <sub>iksa</sub>	L <sub>1</sub> /L <sub>kazı</sub>	D/L <sub>iksa</sub>	M <sub>max</sub> (kNm/m)	
							ANALİTİK	SAYISAL
3	0	3	4.03	7.03	1.000	0.573	74.61	40.94
4	0	4	5.37	9.37	1.000	0.573	176.86	97.5
4	1	5	6.55	11.55	0.800	0.567	327.31	185.2
4	2	6	7.68	13.68	0.667	0.561	536.67	314.6



Şekil 6.2 Kazı derinliğinin etkisi (2. Grup)

## 6.2. Seri II (Gömülme Derinliğinin Etkisinin Araştırılması)

Gömülme derinliğinin etkisi de kazı derinliğinin etkisinin araştırıldığı analizlerde olduğu gibi iki farklı zemin modeli için incelenmiştir.

Analitik tasarım yöntemi ile bulunan gömülme derinlikleri, sayısal analiz programında modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Kazı derinliği arttıkça gömülme derinliğinin de arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla iksa boyu uzamaktadır. Bu durumun sonucunda palplanşa etkiyen moment değerlerinde artışlar meydana gelmektedir. Şekil

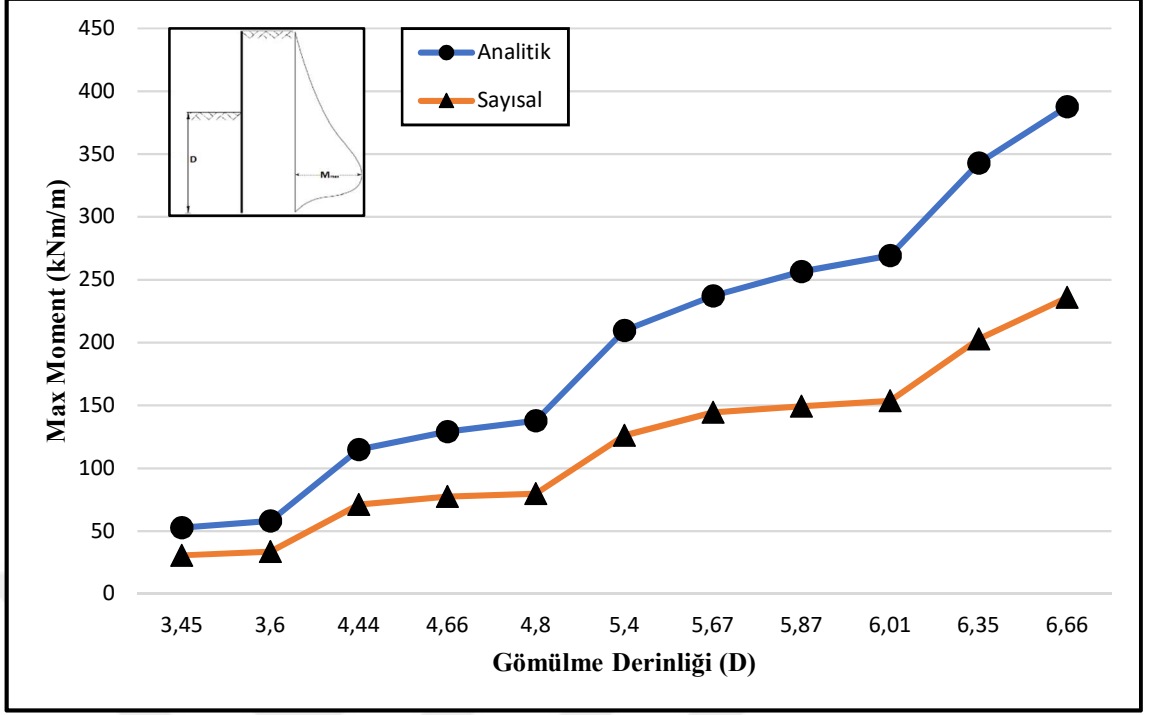
6.3'te görüldüğü üzere analitik ve sayısal analiz sonucu elde edilen moment değerleri aralarındaki fark, oranını koruyarak sürekli bir artış göstermektedir. Çizelge 6.5 ve 6.6 1. grup analizlere ait, Çizelge 6.7 ve 6.8'de 2. grup analizlere ait model parametreleri ve eğilme momentlerini sunmaktadır.

**Çizelge 6.6** Zemin modeli parametreleri (1. Grup)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	15.9
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	32
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.2686

**Çizelge 6.7** Gömülme derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (1. Grup)

							<b>Mmax (kNm/m)</b>	
$L_1$	$L_2$	$L_{kazı}$	$D$	$L_{iksa}$	$L_1/L_{kazı}$	$D/L_{iksa}$	ANALİTİK	SAYISAL
2	1	3	3.45	6.45	0.667	0.535	52.79	30.7
3	0	3	3.6	6.6	1.000	0.545	58.14	33.57
2	2	4	4.44	8.44	0.500	0.526	114.89	71.08
3	1	4	4.66	8.66	0.750	0.538	129.22	77.43
4	0	4	4.8	8.8	1.000	0.545	137.82	79.78
2	3	5	5.4	10.4	0.400	0.519	209.58	126.2
3	2	5	5.67	10.67	0.600	0.531	237.08	144.5
4	1	5	5.87	10.87	0.800	0.540	256.56	149.3
5	0	5	6.01	11.01	1.000	0.546	269.18	153.6
2	4	6	6.35	12.35	0.333	0.514	342.93	202.8
3	3	6	6.66	12.66	0.500	0.526	387.76	235.8



Şekil 6.3 Gömülme derinliğinin etkisi (1. Grup)

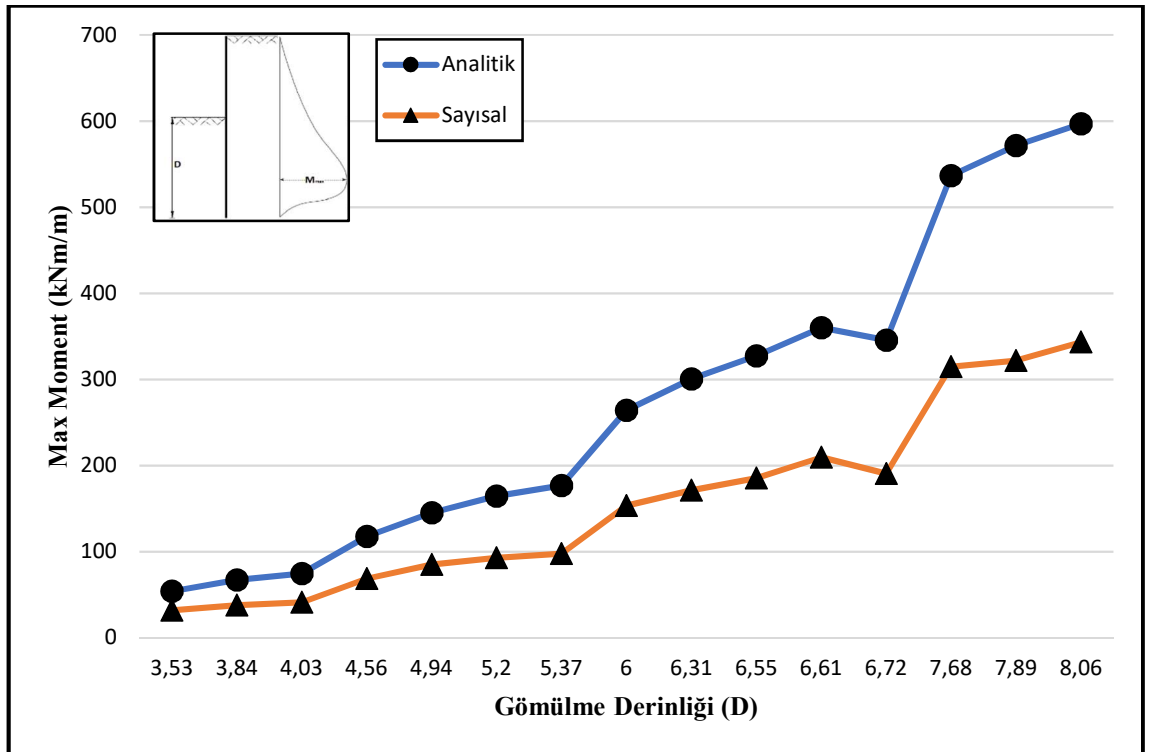
İkinci grup zemin yapısı birinci gruba göre daha düşük dayanıma sahip olduğundan aynı kazı derinliği için daha büyük gömülme derinliği gerektirmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sayısal analiz sonucu elde edilen moment değerleri önceki çalışmalarda olduğu gibi analitik yöntemle elde edilenlerden düşük olmuştur. Kazı derinliği etkisinde gözlemlendiği gibi, gömülme derinliğinin etkisi araştırılırken de moment değerleri arasındaki sayısal ilişkinin değişmediği gözlenmiştir (Şekil 6.4).

Çizelge 6.8 Zemin modeli parametreleri (2. Grup)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	17.0
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	30
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.5

Çizelge 6.9 Gömülme derinliği etkisi için veriler ve sonuçlar (2. Grup)

							<b>Mmax (kNm/m)</b>	
<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L<sub>kazı</sub></b>	<b>D</b>	<b>L<sub>kısa</sub></b>	<b>L1/L<sub>kazı</sub></b>	<b>D/L<sub>kısa</sub></b>	<b>ANALİTİK</b>	<b>SAYISAL</b>
								<b>L</b>
1	2	3	3.53	6.53	0.333	0.541	53.98	31.89
2	1	3	3.84	6.84	0.667	0.561	67.08	37.79
3	0	3	4.03	7.03	1.000	0.573	74.61	40.94
1	3	4	4.56	8.56	0.250	0.533	117.84	68.73
2	2	4	4.94	8.94	0.500	0.553	145.3	84.96
3	1	4	5.2	9.2	0.750	0.565	164.61	92.88
4	0	4	5.37	9.37	1.000	0.573	176.86	97.5
2	3	5	6	11	0.400	0.545	264.34	153.2
3	2	5	6.31	11.31	0.600	0.558	300.67	171.4
4	1	5	6.55	11.55	0.800	0.567	327.31	185.2
1	5	6	6.61	12.61	0.167	0.524	360.25	209.5
5	0	5	6.72	11.72	1.000	0.573	345.43	190.5
4	2	6	7.68	13.68	0.667	0.561	536.67	314.6
5	1	6	7.89	13.89	0.833	0.568	571.76	321.9
6	0	6	8.06	14.06	1.000	0.573	596.91	343.2



Şekil 6.4 Gömülme derinliğinin etkisi (2. Grup)

### 6.3. Seri III (Palplanş Rijitliğinin Etkisinin Araştırılması)

Analitik tasarım yöntemi iksa yapısının rijit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında palplanşın üç farklı rijitlik değeri için analizler yapıp karşılaştırılmıştır. Bu değerler sırasıyla  $1.2 \times 10^5$  kNm<sup>2</sup>/m,  $1.2 \times 10^6$  kNm<sup>2</sup>/m,  $1.2 \times 10^7$  kNm<sup>2</sup>/m'dir.

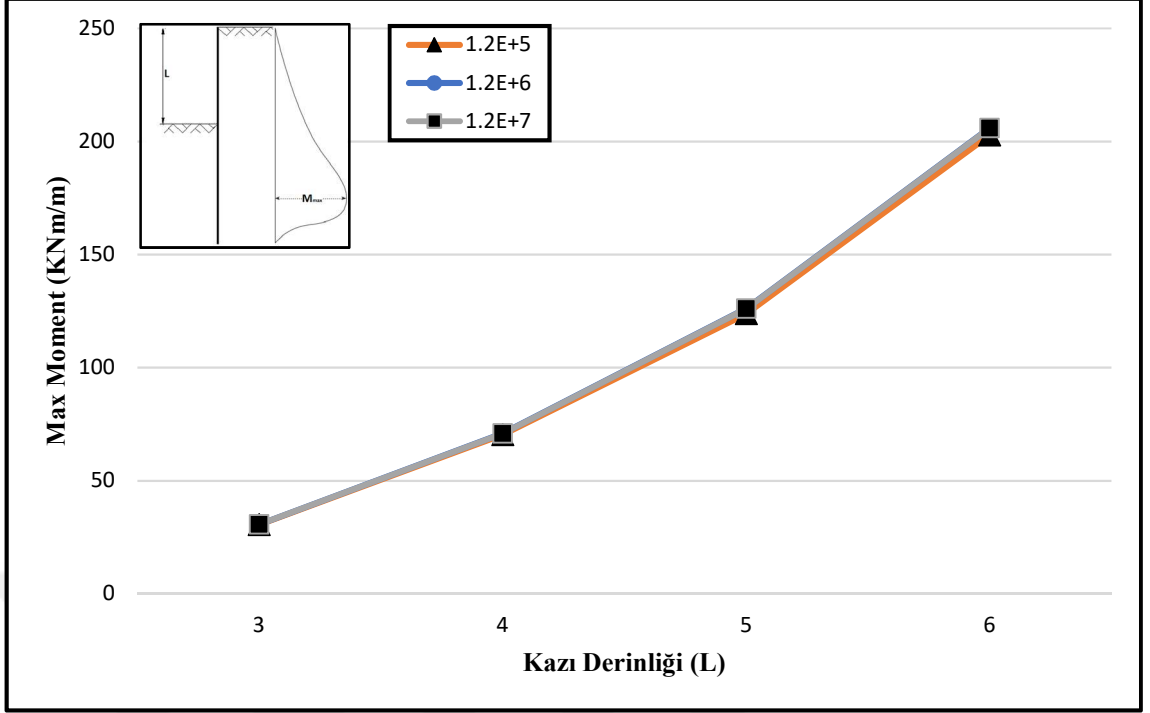
Çizelge 6.9'da gösterilmiş olan parametrelere ait zemin modeli kullanılarak yapılan analizler sonucu elde edilen moment değerleri incelenmiştir. Çizelge 6.10 ve Şekil 6.5'te görüldüğü gibi bu değerler birbirine oldukça yakındır. Momentler arasındaki fark ihmal edilebilir mertebelerdedir. Bu nedenle palplanş yapımı için uygun kalınlık ve dolayısıyla uygun rijitlik seçilerek analizleri gerçekleştirmek uygun görülmektedir.

**Çizelge 6.10** Zemin modeli parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	15.9
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	32
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.2686

**Çizelge 6.11** İksa rijitliğinin etkisi için veriler ve sonuçlar

							Mmax (kNm/m)		
$L_1$	$L_2$	$L_{kazı}$	$D$	$L_{iksa}$	$L_1/L_{kazı}$	$D/L_{iksa}$	$1.2 \times 10^5$	$1.2 \times 10^6$	$1.2 \times 10^7$
2	1	3	3.45	6.45	0.667	0.535	30.6	30.7	30.69
2	2	4	4.44	8.44	0.500	0.526	70.36	71.08	70.93
2	3	5	5.40	10.4	0.400	0.519	123.9	126.2	126.1
2	4	6	6.35	12.35	0.333	0.514	202.8	206.1	205.9



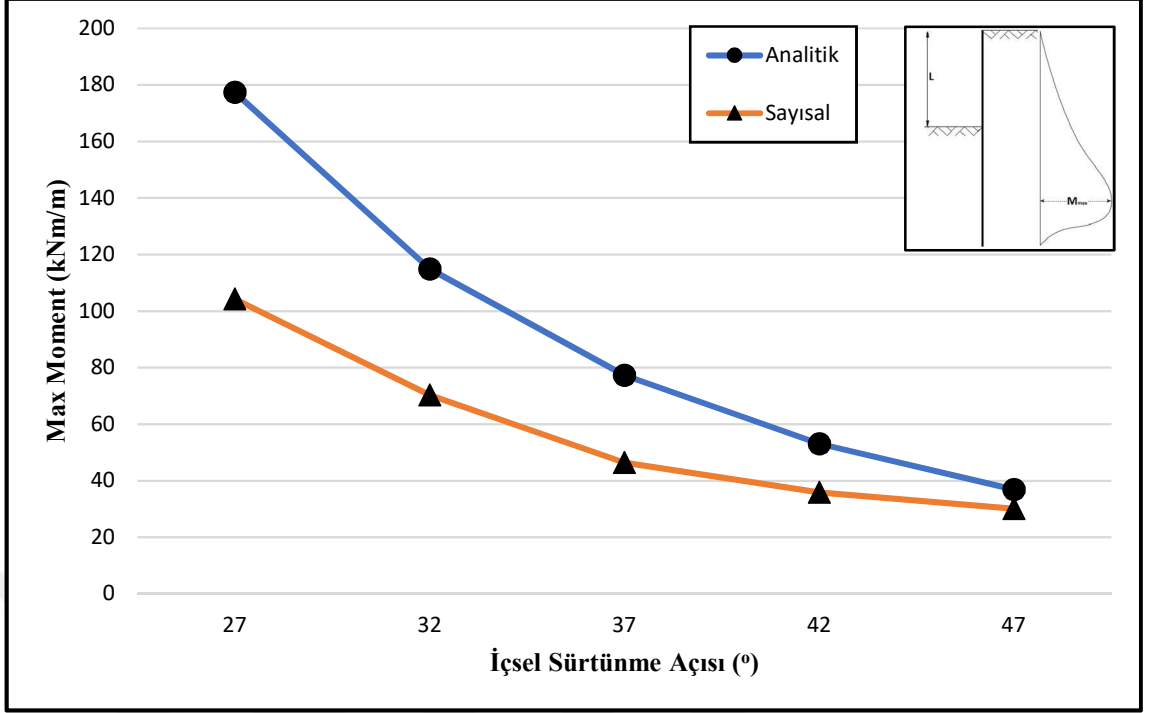
Şekil 6.5 İksa rijitliğinin etkisi

#### 6.4. Seri IV (Zemin Mukavemetinin Etkisinin Araştırılması)

Zemin mukavemetinin moment değerleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için beş farklı içsel sürtünme açısı değeri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yer altı su seviyesinin 2m, kazı derinliğinin 4m olduğu durum dikkate alınarak her bir içsel sürtünme açısı değeri için moment değerleri hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre içsel sürtünme açısının değeri arttıkça zeminin mukavemeti artmakta ve zemin kendini daha fazla tutabilir hale gelmektedir. Bu durumun sonuçlarından biri olarak analitik tasarım yöntemiyle yapılan analizlerde gömülme derinliği değerinin giderek düştüğü gözlenmiştir. Zemin kendini tutabildiği için iksa yapısının maruz kaldığı moment değerlerinde de düşüş olmaktadır.

Yapıya etkiyen moment açısından zemin mukavemeti değerinin yüksek olması avantaj gibi görünse de, gömülme derinliğinin azalması zeminde toptan göçmelere sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla zemin mukavemetinin yüksek olduğu durumlarda da gömülme derinliği parametresini derinlemesine incelemek gerekmektedir. Zemin mukavemeti arttıkça analitik ve sayısal tasarım yöntemleri ile elde edilen moment değerlerinin birbirine yaklaşmasıyla birlikte aralarındaki fark oranını korudukları sonucu elde edilmiştir. Zemin mukavemeti ile eğilme momenti ilişkisi Şekil 6'6'da sunulmuştur.



Şekil 6.6 Zemin mukavemetinin etkisi

#### 6.4. Seri V (Zemin Modelinin Etkisinin Araştırılması)

Zemin modelinin moment değerleri üzerindeki etkisi araştırılırken dört farklı geometriye sahip iksa problemi kullanılmıştır. Bu problemler, Çizelge 6.11 ve Çizelge 6.12’de gösterilen iki farklı zemin modeli (Mohr-Coulomb ve Pekleşen zemin) kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 Mohr-Coulomb zemin modeli parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	$\text{kN/m}^3$	15.9
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{\text{ref}}$	$\text{kN/m}^2$	17500
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Kohezyon	$c$	$\text{kN/m}^2$	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	32
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	0
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.2686

**Çizelge 6.13** Pekleşen zemin modeli parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Birim hacim ağırlığı	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	15.9
Üç eksenli yükleme rijitliği	$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	40000
Poisson oranı	$\nu$	-	0.20
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemet açısı	$\phi$	(°)	32
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	2
Zemin basıncı katsayısı	$K_0$	-	0.4701

Yapılan analizler sonucunda Pekleşen Zemin modeli kullanılan çalışmalarda daha yüksek moment değerleri elde edilmiştir. Bu fark, kayda değer ölçülerde olmamakla beraber analitik tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında Mohr-Coulomb zemin modeli ile yaklaşık olarak aynı fark oranını meydana getirmektedir (Şekil 6.7). Aynı veriler farklı  $L_1/L_2$  oranları için Çizelge 6.13 ve 6.14’te sunulmaktadır.

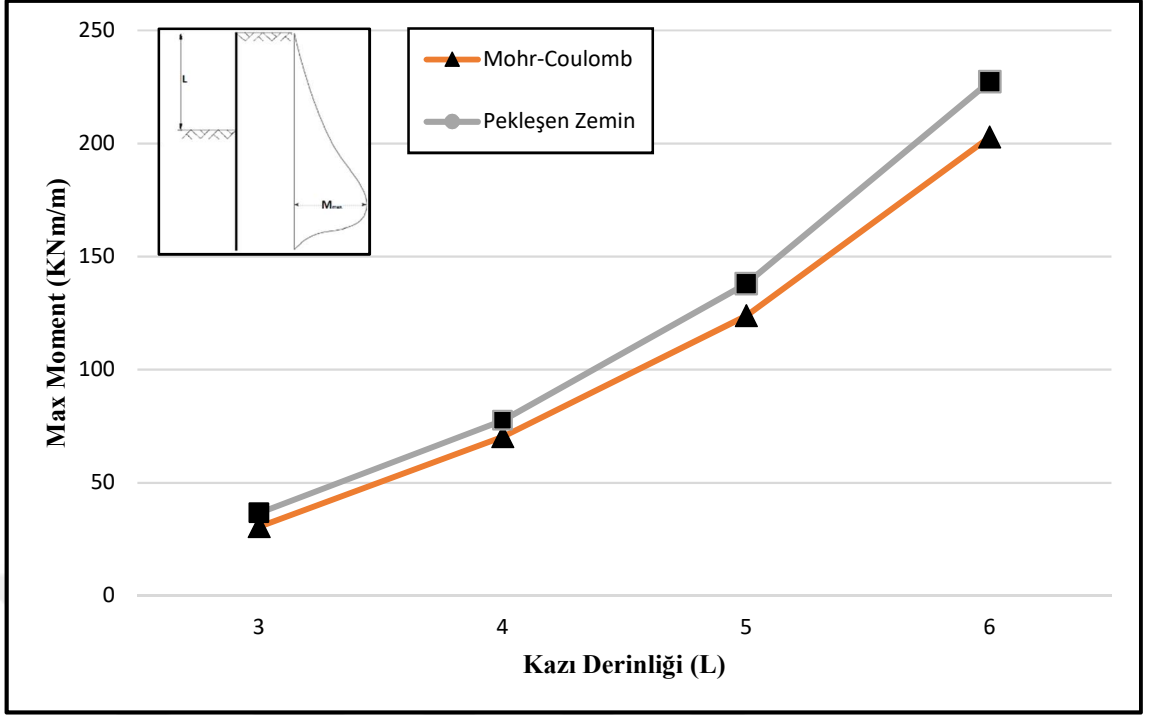
**Çizelge 6.14** Mohr-Coulomb zemin modeline ait veriler ve sonuçlar

$L_1$	$L_2$	$L_{kazı}$	$D$	$L_{iksa}$	$L_1/L_{kazı}$	$D/L_{iksa}$	$M_{max}$ (kNm/m)
2	1	3	3.45	6.45	0.667	0.535	30.6
2	2	4	4.44	8.44	0.500	0.526	70.36
2	3	5	5.4	10.4	0.400	0.519	123.9
2	4	6	6.35	12.35	0.333	0.514	202.8

**Çizelge 6.15** Pekleşen zemin modeline ait veriler ve sonuçlar

$L_1$	$L_2$	$L_{kazı}$	$D$	$L_{iksa}$	$L_1/L_{kazı}$	$D/L_{iksa}$	$M_{max}$ (kNm/m)
2	1	3	3.45	6.45	0.667	0.535	36.68
2	2	4	4.44	8.44	0.500	0.526	77.62
2	3	5	5.4	10.4	0.400	0.519	138
2	4	6	6.35	12.35	0.333	0.514	227.4





Şekil 6.7 Zemin modelinin etkisi

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yanal zemin basıncı ve iksa yapılarının tasarımı konuları ile ilgili farklı analitik yöntemler incelenmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemine dayanan iki boyutlu geoteknik yazılımı Plaxis 2D kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde verilen analitik yaklaşımların değerlendirildiği çözümlerinde Mathematica yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada kazı derinliği, palplanş gömülme derinliği, palplanş rijitliği, zemin mukavemeti, zemin modeli gibi parametreler değişken olarak ele alınmış ve her bir analizin sonucunda eğilme momenti değerleri belirlenmiştir. Ardından, sayısal analiz sonuçları ile analitik yaklaşım sonuçları karşılaştırılarak elde edilen bulgular yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Yer altı su seviyesinin yüksek olması kazı derinliğinin etkisini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir. Eğer kazı derinliği 5 metreden fazla olacak ise ankraj uygulaması yapılması önerilebilmektedir.
- İçsel sürtünme açısının (zemin mukavemetinin) yüksek olduğu durumlarda analitik yöntem ile yapılan hesaplar düşük gömülme derinliği değeri vermektedir. Bu gibi durumlarda sonuçların irdelenip, güvenli tarafta kalınarak gömülme derinliği belirlenmesi gerekmektedir.
- Analitik yöntemde, iksa yapısı rijit ve sınır durumda kabul edildiğinden sayısal analizler yapı eğilme rijitliği lineer artırılarak tekrarlanmıştır. Moment değerlerinde ihmal edilebilir mertebelerde değişiklikler gözlenmiştir.
- Araştırılan her seride ortak bir durum tespit edilmiştir. Sayısal analizler sonucu elde edilen moment değerleri ile analitik yöntemle elde edilen moment değerleri oranlandığında ortaya çıkan sonuç 0.55 ile 0.60 aralığında olmuştur.
- Klasik yöntemlerin güvenli tarafta kalma eğilimi ve sonlu elemanlar analizinin günümüzdeki güvenilirliği dikkate alındığında bu çalışma sonucunda aşağıdaki bağıntı önerilebilmektedir.

$$M_{\text{sayısal}} = 0.6 \times M_{\text{analitik}}$$

- Bu durum, literatürde mevcut analitik yöntemlere göre tasarımı yapılan bir konsol iksa yapısının, güvenli tarafta kalmasıyla daha az maliyetle ve daha az sürede inşa edilebileceği anlamına gelmektedir.

## KAYNAKLAR

- AHMED M. NASR, 2014. Behavior of strip footing on fiber-reinforced cemented sand adjacent to sheet pile Wall. **Geotextiles and Geomembranes**. No.42, 599-610
- ASAAD M. ARMANYOUS, SHIMAA M. GHORABA, I.M.H. RASHWAN, MOHAMED A. DAPAON, 2015. A study on control of contaminant transport through the soil using equal double sheet piles, **Ain Shams Engineering Journal**. No.7, 21-29
- BICA, A. V. D. & CLAYTON, C. R. I. ,1989. Limit equilibrium design methods for free embedded cantilever walls in granular materials. **ICE Proceedings**, Part 1, 86, 879-898.
- BLUM, H., 1931. *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*. W. Ernst & Sohn. Berlin.
- BOWLES, J. E., 1988. *Foundation analysis and design*. **McGraw-Hill, 4th Edition**. New York.
- BRANSBY, P. L. & MILLIGAN, G. W. E., 1975. Soil deformations near cantilever sheet pile walls. **Géotechnique 25**, No. 2, 175-195.
- BRINKGREYE, R. B. J., Swolfs, W. M, Engin, E., 2011. **Plaxis 2D 2011 Manual**. Plaxis bv, the Netherlands.
- CUADRADO, A., 2010. Análisis tenso-deformacional en rotura y condiciones de seguridad de pantallas en voladizo y ancladas. Comparación con métodos clásicos. **Universitat Politècnica de Catalunya**. Thesis.
- Das, B. M., 2010. **Principles of foundation engineering, 7. Edition**.
- DAY, R. A. & POTTS, D. M., 1993. Modelling sheet pile retaining walls. **Computers and Geotechnics**, 15, 125- 143.
- DAY, R. A., 1999. Net pressure analysis of cantilever sheet pile walls. **Géotechnique**, 49, No.2, 231-245.
- FOURIE, A. B. & POTTS, D. M., 1989. Comparison of a finite element and limiting equilibrium analyses for an embedded cantilever retaining wall. **Géotechnique 39**, No.2, 175-188.
- HETHAM A. RAMADAN AMER, 2013. Effect of Wall Penetration Depth on The Behavior of Sheet Pile Walls. **University of Dayton**

- MILLIGAN, G. W. E. 1983 Soil deformations near anchored sheet-pile walls. **Géotechnique** **33**, No.1, 41-55.
- MOHR, O., ENGELS, H., 1903. Zur Berechnung der Bohlwerke, Zentralblatt der Bauverwaltung, Berlin.
- KING, G. J. W., 1995. Analysis of cantilever sheet-pile walls in cohesionless soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 121, No.9.
- ÖRNEK, M., 2009. Yumuşak Kil Zeminlerin Geogrid Donatı ile Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- PADFIELD, C. J. and MAIR, R. J., 1984. Design of retaining walls embedded in stiff clay. **CIRIA Report 104**.
- PLANT, G. W., 1972. Anchor inclination - its effect on the performance of a laboratory scale tied-back retaining wall. **ICE Proceedings**, Part 2.
- POWRIE, W., 1996. Limit equilibrium analysis of embedded retaining walls. **Géotechnique** **46**, No.4, 709-723.
- ROWE, P. W., 1952. Anchored sheet-pile walls. **ICE Proceedings**. Part I, Vol. I.
- SERT, S., LUO, Z., XIAO J., GONG, W., JUANG, C. H., 2016. Probabilistic analysis of responses of cantilever wall-supported excavations in sands considering vertical spatial variability. **Computers and Geotechnics**, No.75, 182-191
- SHAKEEL, M., NG, C. W.W., 2017. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. **Computers and Geotechnics** (in press).
- ŠKRABL, S., 2006. Interactional approach of cantilever pile walls analysis. **Acta Geotechnica Slovenica**, 2006/1.
- TORRABADELLA, A. G., 2013. Numerical analysis of cantilever and anchored sheet pile walls at failure and comparison with classical methods.
- ZEKRÍ, A., GHALANDARZADEH, A., GHASEMÍ, P., AMÍN FAR, M. H., 2014. Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction. **Ocean Engineering**. No.93, 45-63

## ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1990 yılında İzmir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir’de tamamladıktan sonra 2008 yılında Akdeniz Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yüksek öğrenimine başladı. 2011 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. Lisans öğrenimini 2014 yılında bitirdi v aynı yıl Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Çalışma hayatına özel sektörde inşaat mühendisi olarak başlayan yazar su anda Gürtaş İnş. Ve Malz. Taah. Mad. Petr.İth. İhr. San. ve Tic. Ltd. Şirketi’nde tesis müdürü olarak çalışmaktadır. Yazar, evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

