

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ANKRAJLI DİYAFRAM DUVARLARIN NÜMERİK ANALİZ**  
**YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ**

**ALPEREN CEVAHİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Dr. Öğr. Üyesi Banu YAĞCI (Tez Danışmanı)  
Doç. Dr. Eyübhan AVCI  
Dr. Öğr. Üyesi Arzu OKUCU

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2022**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Ankrajlı Diyafram Duvarların Nümerik Analiz Yöntemleri İle Modellenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Alperen CEVAHİR**

## ÖZET

**ANKRAJLI DİYAFRAM DUVARLARIN NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMLERİ  
İLE MODELLENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ALPEREN CEVAHİR  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ BANU YAĞCI)**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2022**

Bu tez kapsamında, “Geo5” ve “Plaxis 2D” bilgisayar programları kullanılarak parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Geo5 programında, orta katı kıvamlı CL-CI sınıfı bir doğal zemin varsayımı ile çok sıra ankrajlı bir diyafram duvar tasarımı yapılmıştır. Tasarımda farklı zemin sınıfları için boyutların değişimi incelenmiş ve zemin araştırmalarının önemi ortaya konmuştur. Geo5 programında tasarlanmış ve analiz edilmiş olan sistemin, Plaxis 2D programı ile deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, duvardaki maksimum yatay deplasmanlar cinsinden kıyaslanmış ve büyük farklar olduğu belirlenmiştir. Bu farkların, Plaxis programı ile yapılan analizlerde, önemli oranda varsayılan zemin profil yapısı, zemin malzeme modeli ve geometrik sınırlardan kaynaklandığı belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Zemin ankrajı, Diyafram duvar, Plaxis, Geo5

Bilim Kodları: 91105 / 91132

Sayfa Sayısı : 62

## **ABSTRACT**

### **MODELLING OF ANCHORED DIAPHRAGM WALLS USING NUMERICAL ANALYSIS METHODS**

**MSC THESIS**

**ALPEREN CEVAHIR**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. BANU YAĞCI)**

**BALIKESİR, JUNE - 2022**

In this thesis, a parametric study was carried out using “Geo5” and “Plaxis 2D” computer programs. In the Geo5 program, a multi-row anchored diaphragm wall was designed with the assumption of a CL-CI soil class with medium stiff. The changes in the design for different soil classes were examined and the importance of soil investigations was determined. The variation of design dimensions for different soil classes was examined and the importance of soil investigations was determined. The deformation analyzes of the system, which was designed and analyzed in the Geo5 program, were carried out with the Plaxis 2D program. The results were compared in terms of the maximum horizontal displacements at the wall, and it was determined that there were large differences. It was determined that these differences were significantly caused by the assumed soil profile structure, soil material model and geometric boundaries in the analyzes with the Plaxis program.

**KEYWORDS:** Ground Anchors, Diaphragm wall, Plaxis, Geo5

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>4</b>
<b>3. ÇOK SIRA ANKRAJLI DUVAR SİSTEMLERİ</b> .....	<b>8</b>
3.1 Zemin Ankrajları.....	8
3.2 Ankrajlı Duvarlar .....	11
3.3 Ankrajlı Duvar Tasarımında Temel İlkeler.....	13
3.3.1 Ankrajlı Duvarlarda Potansiyel Göçme Mekanizmaları .....	14
3.3.2 Yanal Basınçlar .....	18
3.3.2.1 Duvar Deformasyonunun Yanal Basınçlar Üzerindeki Etkisi .....	22
3.3.2.2 Görünür Toprak Basıncı Dağılımları .....	25
3.3.2.3 Yanal Basınçların Duvar Gömülme Derinliği ve Duvar Sehimi ile İlişkisi.....	27
3.3.3 Zemin Ankraj Tasarımı .....	28
<b>4. GEO5 PROGRAMI İLE UYGULAMA</b> .....	<b>33</b>
4.1 Geo5 Perde Tasarımı Uygulaması .....	33
4.1.1 Geo5 Perde Tasarımı-Veri Girişi .....	33
4.1.2 Geo5 Perde Tasarımı-Analiz.....	35
4.2 Geo5 Perde Kontrolü Uygulaması .....	36
4.2.1 Geo5 Perde Kontrolü-Veri Girişi .....	36
4.2.2 Geo5 Perde Kontrolü-Analiz.....	37
4.3 Geo5 Uygulamasında Farklı Zemin Sınıflarının Etkisi .....	40
<b>5. PLAXIS 2D PROGRAMI İLE UYGULAMA</b> .....	<b>43</b>
5.1 Plaxis 2D Uygulama .....	43
5.2 Plaxis Programında Zemin Profili ve Malzeme Modelinin Etkisi.....	49
5.3 Plaxis Programında Geometrik Sınır Şartlarının Etkisi .....	54
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>57</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>60</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>62</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Zemin ankraj bileşenleri .....	8
Şekil 3.2: Ankraj kafası bileşenleri .....	9
Şekil 3.3: İmalat tekniklerine göre ankraj tipleri. ....	11
Şekil 3.4: Geçici ve kalıcı ankrajlı duvar uygulamaları.....	12
Şekil 3.5: Zemin ankrajlarının duvar stabilitesine katkısı.....	14
Şekil 3.6: Ankrajlı duvar tasarımında potansiyel göçme koşulları .....	15
Şekil 3.7: Sürtünmesiz bir istinat duvarı için Rankine aktif ve pasif yatay basınçların mobilizasyonu.....	19
Şekil 3.8: Aktif ve pasif yatay gerilme koşullarındaki değişimler.....	19
Şekil 3.9: Modellenen iki sıra ankrajlı duvar uygulaması.....	22
Şekil 3.10: İlk ankraj seviyesinde kazı sonrası yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları .....	23
Şekil 3.11: Ankrajın gerilmesi aşamasında yanal duvar hareketleri ve toprak basınçları. .	23
Şekil 3.12: Son ankraj seviyesindeki kazı sonrası yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları.....	24
Şekil 3.13: Nihai kazı seviyesindeki yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları. ....	25
Şekil 3.14: Terzaghi ve Peck görünür basınç zarfları .....	26
Şekil 3.15: Yanal toprak basıncının duvar gömülme derinliği ve duvar sehimi ile ilişkisi.	27
Şekil 3.16: Zemin ankrajları için (a) düşey ve (b) yatay mesafe sınırları.....	32
Şekil 4.1: Geo5 (2021) Uygulamaları. ....	33
Şekil 4.2: Geo5 perde tasarımı yanal zemin basınç modu. ....	34
Şekil 4.3: Geo5 perde tasarımında yanal zemin basınç dağılımı. ....	35
Şekil 4.4: Geo5 perde tasarımı programında duvar gömülme derinliği ve ankraj kuvvetleri .....	35
Şekil 4.5: Geo5 perde tasarımı programında eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramları. ....	36
Şekil 4.6: Geo5 Perde kontrolü programında ankraj özellikleri-1 .....	37
Şekil 4.7: Geo5 Perde kontrolü programında ankraj özellikleri-2 .....	38
Şekil 4.8: Geo5 perde kontrolü programı analiz sonuçları; deformasyonlar, yanal zemin basınçları. ....	39
Şekil 4.9: Geo5 perde kontrolü programında ankrajların içsel stabilite tahkiki. ....	39
Şekil 4.10: Geo5 perde kontrolü programında ankraj taşıma kapasitesi tahkikleri.....	40
Şekil 5.1: Sonlu eleman analizleri için geometrik sınır şartları. ....	43
Şekil 5.2: Plaxis programında zemin profili (Model-1).....	44
Şekil 5.3: Plaxis programında ankrajlı duvar geometrik modeli. ....	46
Şekil 5.4: Plaxis programında geometrik modelin sonlu elemanlar ağı.....	46
Şekil 5.5: Plaxis programında aşamalı inşaat adımları. ....	48
Şekil 5.6: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-1).....	49
Şekil 5.7: Plaxis programında zemin profili (Model-2).....	50
Şekil 5.8: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-2).....	51
Şekil 5.9: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-3).....	52
Şekil 5.10: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-4).....	53
Şekil 5.11: Plaxis programında geometrik model için farklı sınır şartları. ....	55
Şekil 5.12: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-5).....	55
Şekil 5.13: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-6).....	56

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Zemin ankrajları için minimum güvenlik faktörleri.....	10
<b>Tablo 3.2:</b> Ankraj kökü boyunca zemin ile enjeksiyon ara yüzeyindeki aderans gerilme değerlerini etkileyen faktörler .....	16
<b>Tablo 3.3:</b> Zemin ankrajları için ön tasarım amaçlı nihai transfer yükleri (düz gövdeli - küçük çaplı- yerçekimi enjeksiyonlu).....	30
<b>Tablo 3.4:</b> Ankraj kök bölgesinde zemin ile enjeksiyon ara yüzey nihai gerilme değeri...	31
<b>Tablo 4.1:</b> Geo5 perde tasarımı programında zemin malzeme özellikleri.....	34
<b>Tablo 4.2:</b> Geo5 perde tasarımı programında zemin ankraj parametreleri. ....	34
<b>Tablo 4.3:</b> Geo5 Perde kontrolü programında zemin malzeme özellikleri.....	37
<b>Tablo 4.4:</b> İkinci bölüm şekil başlığına bir başka örnek.....	38
<b>Tablo 4.5:</b> Farklı zemin sınıfları için Geo5 programı malzeme parametreleri .....	40
<b>Tablo 4.6:</b> Farklı zeminler için Geo5 Perde tasarımı programı analiz sonuçları.....	40
<b>Tablo 4.7:</b> Farklı zeminler için Geo5 Perde kontrolü programı analiz sonuçları. ....	41
<b>Tablo 5.1:</b> Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-1).....	44
<b>Tablo 5.2:</b> Plaxis programında diyafram duvar malzeme özellikleri .....	45
<b>Tablo 5.3:</b> Plaxis programında ankraj serbest boyu için malzeme özellikleri.....	45
<b>Tablo 5.4:</b> Plaxis programında ankraj kök bölgesi için malzeme özellikleri. ....	46
<b>Tablo 5.5:</b> Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-2).....	50
<b>Tablo 5.6:</b> Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-3).....	52
<b>Tablo 5.7:</b> Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-4).....	53
<b>Tablo 5.8:</b> Plaxis programında farklı modeller ve duvar deplasmanları. ....	54

## SEMBOL LİSTESİ

<b>c</b>	: Kohezyon
<b>c'</b>	: Efektif kohezyon
<b>D</b>	: Ankraj kök çapı
<b>DMT</b>	: Dilatometre deneyi
<b>E</b>	: Elastisite modülü
<b>EA</b>	: Normal rijitlik
<b>EI</b>	: Eğilme rijitliği
<b><math>E_{50}^{ref}</math></b>	: Üç eksenli sekant rijitliği
<b><math>E_{oed}^{ref}</math></b>	: Ödometre tanjant rijitliği
<b><math>E_{ur}^{ref}</math></b>	: Boşaltma/yükleme rijitlik modülü
<b>FS</b>	: Güvenlik katsayısı
<b>H</b>	: Kazı yüksekliği
<b>HS</b>	: Hardening soil
<b><math>K_a</math></b>	: Aktif toprak basıncı katsayısı
<b><math>K_p</math></b>	: Pasif toprak basıncı katsayısı
<b><math>K_0</math></b>	: Sükunet haldeki toprak basıncı katsayısı
<b>MC</b>	: Mohr-Coulomb
<b>m</b>	: Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri
<b><math>N_s</math></b>	: Kararlılık sayısı
<b>OCR</b>	: Zeminin aşırı konsolidasyon oranı
<b>PMT</b>	: Presiyometre deneyi
<b><math>R_{inter}</math></b>	: Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı
<b><math>S_h</math></b>	: Komşu ankrajların yatay mesafesi
<b><math>T_s, T_e</math></b>	: Eksenel çevre direnci
<b><math>\sigma_v'</math></b>	: Düşey efektif gerilme
<b><math>\phi</math></b>	: İçsel sürtünme açısı
<b><math>\phi'</math></b>	: Efektif içsel sürtünme açısı
<b><math>\delta</math></b>	: Duvar-zemin sürtünme açısı
<b>v</b>	: Poisson oranı
<b><math>\gamma</math></b>	: Birim hacim ağırlığı
<b><math>\gamma_{unsat}</math></b>	: Doğal birim hacim ağırlığı
<b><math>\gamma_{sat}</math></b>	: Doygun birim hacim ağırlığı
<b>w</b>	: Duvar ağırlığı
<b><math>\Psi</math></b>	: Dilatasyon açısı



## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans eğitimimin her anında bana yardımcı olan, bilgi ve tecrübelerini paylaşan, fikir ve görüşleriyle önemli katkıları bulunan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Banu YAĞCI' ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde, her zaman yanımda olan maddi manevi destekleyen, değerli aileme gösterdikleri sabır ve anlayış için çok teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2022**

**Alperen CEVAHİR**

# 1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunda önemli bir artış olduğu görülmektedir. İnsanoğlu doğal gereksinimlerini karşılamak ve refah seviyesi yüksek bir hayat sürdürebilmek amacıyla inşaat sektöründe önemli gelişmelere öncü olmuştur. İhtiyaçların artması ile mevcut arazilerden yeterince faydalanmak amacıyla yer altı yapılarına gereksinim duyulmuştur. Genellikle yüksek yapılarda kullanılan derin temeller, yer altı otoparkları, metro, tünel ve karayolu projeleri gibi çeşitli yapıları inşa etmek için iksa sistemlerini kullanmak kaçınılmazdır. Bu tür yapıların inşasında derin kazıların çok büyük bir risk oluşturduğu bilinmektedir. Dolayısıyla bu riski en aza indirmek amacıyla birçok iksa sistemleri üzerinde çalışılmıştır.

İksa sistemleri derin kazı gerektiren inşaatlarda açılan kazının dengede durabilmesi, göçmemesi için yapılan destek yapılarıdır. Bu destek yapıları, zemin özelliklerine, yapıya gelecek yanıl toprak basıncına, proje için güvenli ve ekonomik olmasına vb. hususlara bağılı kalınarak seçilmelidir. Bundan dolayıdır ki iksa sistemleri yapılırken detaylı bir geoteknik araştırması, zemin mekaniği bilgisi gerektirir. Ankrajlı diyafram duvar uygulamaları esnek iksa sistemlerinden biridir. Gerek uygulanabilirlik açısından gerekse diğler iksa sistemlerine nazaran ekonomik olmasıyla günümüzde sıkça tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, Bölüm 2' de literatür araştırmalarına ve Bölüm 3' de çok sıra ankrajlı diyafram duvarların tasarımına ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Bölüm 4' de, Geo5 (2021) programı kullanılarak, orta katı kıvamlı CI-CL sınıfı doğal zemin ortamında, 9 m yüksekliğinde çok sıra ankrajlı bir diyafram duvar tasarımı gerçekleştirilmiştir. Zemin parametreleri Geo5 veri tabanından alınmıştır. Bu bölümün ilk aşamasında, Geo5 programının "Perde Tasarımı" bileşeni kullanılmış, limit denge analizlerine dayalı ankraj kuvvetleri ile duvar gömülme derinliği hesaplanmış ve şev stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Programın bir diğler bileşeni "Perde kontrolü", uygulamanın aşamalı inşaat olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu bileşen ile, duvar deplasmanları hesaplanmış ve güvenlik katsayısı (ASD) yaklaşımı ile içsel stabilite, şev stabilitesi ve ankraj doğrulama tahkikleri yürütülmüştür. Bu bölümün ikinci aşamasında, tasarımda kazı derinliği, iksa sistemi, ankraj uygulama derinlikleri ve ankraj açısı sabit tutularak farklı zemin sınıfları için (ML-orta katı, SC-orta sıkı ve SM-orta sıkı) analizler tekrarlanmış ve tasarım boyutları stabilite tahkikleri ile düzenlenmiştir. Bu analizler ile zemin sınıfının

belirlenmesi aşamasındaki yetersizlik ve belirsizlik doğrultusunda karşılaşılabilecek zemin sınıftaki farkların, tasarım boyutlarına ve sistemin stabilitesine nasıl etki edebileceği irdelenmiştir. Bu değerlendirmeler arazi ve laboratuvar çalışmalarında hassas davranılması gerektiğini ve zemin sınıfı belirleme çalışmalarında olası hataların, tasarımın yetersiz kalmasına ya da ekonomik olmamasına yol açabileceğini göstermektedir.

Bölüm 5’ de, geoteknik mühendisliği problemlerinin şekil değiştirme ve stabilize analizleri için geliştirilmiş bir sonlu elamanlar yazılımı olan Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Bu bölümün ilk aşamasında, Geo5 programı ile CL-CI sınıfı homojen tek bir zemin tabakası için tasarlanmış olan modelin (Model-1) Plaxis programı ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada Plaxis programında zemin, “Mohr-Coulomb” malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Her iki yazılımdaki analiz sonuçları duvardaki maksimum yatay deplasmanlar cinsinden kıyaslanmış ve hem sayısal olarak hem de maksimum deplasmanın yeri açısından büyük farklar olduğu gözlenmiştir. Geo5 programında belirlenen maksimum yatay deplasman izin verilebilir aralıkta kalırken, Plaxis programında belirlenen deplasmanların izin verilebilir bir aralıkta olmadığı belirlenmiştir.

Bu iki ayrı bilgisayar programı ile yürütülen analiz sonuçlarının bu denli farklı olması nedeniyle Plaxis programındaki modelin daha gerçekçi olması gerektiği düşünülmüş ve bu doğrultuda farklı modeller oluşturulmuştur. Model-2’ de derinlik artışı ile rijitlik artışı temsil edebilmek için tabakalı zemin profili varsayılmıştır. Model-3’ de zemin malzeme modeli HS-pekleşen zemin olarak değiştirilmiştir. Model-4’te, hem tabakalı zemin profili hem de HS-pekleşen zemin malzeme modeli kullanılmıştır. Model-5 ve Model-6’ da literatürdeki gözlemler doğrultusunda geometrik sınır şartları değiştirilmiştir. Modelde tabakalı zemin profili varsayımı ile duvardaki maksimum yatay deplasman değerinde yaklaşık olarak %50 oranında azalma gözlenmiştir. Zemin malzeme modelinin HS-pekleşen zemin olarak seçilmesi ise homojen tek tabaka kabulüne rağmen maksimum deplasmanı %78 oranında düşürmüştür. Diğer yandan hem zemin malzeme modelinin hem de zemin profilinin aynı modelde değiştirildiği (HS-pekleşen zemin, tabakalı) analizde, deplasman sonuçları yine yaklaşık %78 oranında düşmüş olup bu aşamada malzeme modelinin HS-pekleşen zemin olarak seçilmesi durumunda zemin profil yapısının fark yaratmadığı gözlenmiştir. Sınır şartlarının daha minimal tutulduğu modeller, homojen tek tabakalı zemin profili için gerçekleştirilmiş ve zemin malzeme modellerinin etkisi kıyaslanmıştır. Mohr-Coulomb malzeme modelinin kullanıldığı analizde, duvardaki

maksimum yatay deplasmanda azalmalar gözlemlenirken, HS-Pekleşen zemin modelinin kullanıldığı analizde, deplasmanların arttığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda Plaxis programında, sınır şartlarının zemin malzeme modeline göre farklı etki yarattığı ve tasarımlarda sınır şartları seçiminin önemli olduğu söylenebilir.

## 2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Nossan vd. 2009 çalışması kapsamında, Hırvatistan'ın Zagreb kentindeki iki ticari binanın inşası için açılan derin kazıları desteklemek amacıyla uygulanan 3 adet ankrajlı istinat yapısı üzerinde inceleme yapılmıştır. Ankrajlı istinat yapılarının ölçülen inklometrik yatay yer değiştirmeleri, PLAXIS 2D sayısal modeli ile hesaplanan yatay yer değiştirme sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Zemin stratigrafileri ve zemin parametreleri birbirine benzer olan inşaat alanları, 3 m kalınlığında kil dolgu, 3 m ile 14 m arası kötü derecelenmiş çakıl ve onun altında 14 m ile 30 m arasında sert kil tabakalarından oluşmaktadır. Kazı derinlikleri sırasıyla 13,5 m, 9 m ve 7 m'dir. PLAXIS 2D programı tasarımında "Hardening Soil" ve "Hardening Soil Small Strain" modelleri kullanılmıştır. Yatay yer değiştirmeler karşılaştırıldığında, bu modellerin tasarımlarda kullanılmasının son derece uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Dayıoğlu 2010 çalışması kapsamında Harbiye Kongre Merkezi derin temel kazısı incelenip ankrajlı iksa sisteminin yapım aşamasında yaşanan problemlerden, proje revizyonlarından söz edilmektedir. Kazı ve uygulama aşamalarında, yapıda birçok olumsuz belirtilerin gözlemlenmesi üzerine revizyonlar yapılmıştır. Deplasmanların beklenenden fazla olması ve iksa sistemi arkasında çekme çatlaklarının oluşması ile düşey elamanın kademeli betonarme perdeden, fore kazıya döndürülmesi planlanarak, deplasmanlar kontrol altına alınabilmıştır. Zemin profili, trakya formasyonun heterojen yapısı olmasından kaynaklı kazı ve iksa işlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Özellikle, kolaylıkla ayrılan, sağlam kaya tabakalarının arasındaki grafitik şistli tabakaların, iksa sisteminin güvenliğini önemli ölçüde etkilediği ve kazı ilerleyişini aksattığı görülmüştür. Grafitik şistli tabakalara rastlanan bölgelerde hesaplanan 18 mm deplasman değerinin aksine 170 mm mertebesinde yatay deplasman olduğu görülmüştür. Bu durum; derin kazılarda kazı metodolojisinin çok iyi belirlenmesi ve belirlenen metotların dışına çıkılmaması gereğinin bir göstergesi olmuştur. Ayrıca uzun vadede stabilite sağlamak amacı ile iksa sisteminin üst yapı ile desteklenmesi gerekmiştir. Buradan; özellikle kalıcı iksalı kazıların, deplasman kontrollü yapılması sonucu çıkmıştır. İksa sisteminde oluşan deplasmanların artışı ile komşu binalarda dönme ve oturmanın arttığı, aletsel gözlemlerle saptanmıştır. Kazının tamamlanması, üst yapının yükselmesi ve iksa sisteminin desteklemesi ile birlikte deplasmanlar sonlanmış ve dolayısı ile komşu binalardaki dönme ve oturmanın ortadan kalktığı belirtilmiştir.

Tan vd. 2012 çalışması kapsamında, Malezya, Kuala Lumpur'da 6 kat bodrumlu, kazı derinliği 24,5 m ile 28,5 m arasında olan derin kazı inşası için yapılmış 1,2 m kalınlığındaki ankrajlı diyafram duvarların performansı incelenmiştir. Analizler, plaxis 2D sonlu elemanlar programında “Hardening Soil” model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ankrajlı diyafram duvar üzerinde her bir kazı aşamasında, hesaplanan ve ölçülen yanal yer değiştirmeler karşılaştırılmış ve duvar arkasında kalan zemindeki oturmalar incelenmiştir. Analizlerde elde edilen yer değiştirmelerin ve oturmaların, ölçülen değerlerle oldukça uyumlu olduğu görülmüş ve bu nedenle derin kazı tasarımlarında “Hardening Soil” model kullanımının uygunluğu açıklanmıştır. Duvar arkasında kalan zemindeki oturma miktarının, kazı derinliğinin yaklaşık %0,2'si kadar olduğu gözlenmiş ve duvar yüksekliğin 5-12 katı kadar uzanan mesafede, oturma faktörünün etkili olabileceği belirtilmiştir.

Aslan ve Yağcı 2018 (a) çalışması, Geo5 programı ile farklı kazı derinliklerindeki konsol diyafram duvarlar için yapılmıştır. Arazi deneylerine dayalı farklı ampirik ilişkilerin geoteknik model üzerindeki etkisi ve Geo5 programı kapsamındaki farklı zemin yatak katsayısı ilişkilerinin tasarımıdaki etkisi parametrik olarak değerlendirilmiştir. Analizlerin, sonlu elemanlar dışındaki daha basit analiz yöntemlerinde, özellikle seçilen zemin yatak katsayısının, sonuçları önemli oranda etkilediği belirlenmiştir.

Aslan ve Yağcı 2018 (b) çalışmasında, geoteknik problemler için çözüm sağlayan ancak hesap yöntemi açısından farklı iki ayrı yazılım (Geo5 ve Plaxis) kullanılarak, geoteknik modellemenin farklı derin kazı destek sistemlerinin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı zemin koşulları için hem drenajsız parametrelerin hem de efektif parametrelerin kullanıldığı parametrik çalışmada, geoteknik model için seçilen parametrelerin gerçekçi çözümlere ulaşılmasında önemli olduğu ifade edilmiştir.

Vural ve Işık 2019 çalışması kapsamında, duvar yüksekliğinin yaklaşık % 0,96 sı oranında aşırı bir yatay deplasman yapan ankrajlı iksa sistemi üzerinde, bu deplasmanın sebepleri araştırılmıştır. Proje plaxis programında da modellenerek deplasmanlar karşılaştırılmıştır. Zemin stratigrafisi katı kil, sert kil ve çok sert kilden oluşmaktadır ve tabakaların aşırı konsolide olduğu düşünülmektedir. Fakat konsolidasyon deneyleri yapılmadığından aşırı konsolidasyon oranları bilinmemektedir. Plaxis programında, farklı aşırı konsolidasyon

oranları kullanılarak sonuçlar karşılaştırıldığında, iksa sistemine gelen yükleri ve deplasmanları OCR değerinin büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Aşırı konsolidasyon oranının belli bir seviyenin üzerinde olması durumunda ankrajlı iksa sistemine gelen yanal toprak basınçlarının büyük oranda artarak aşırı deplasmanlar oluşmasına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, inklometrik ölçümler ile OCR=5 olarak kabul edilen plaxis modellemesinin yatay deplasman sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yalçın 2019 çalışmasında, gevşek kum zemin üzerinde yer alan tek sıra ankrajlı bir perde duvar için PLAXIS 2D programı ile ankraj uygulama derinliği, ankraj açısı ve duvar gömülme derinliğinin etkisi parametrik olarak incelemiştir. Çalışmada, ankraj uygulama derinliğinin artması ile yatay duvar hareketlerinin azaldığı, ankraj eğimlerinin artmasının duvar deplasmanlarında ve güvenlik katsayısı değerlerinde önemli sayılabilecek değişimler oluşturmadığı, duvar gömülme derinliğindeki artışın ise ankraj kuvvetlerini ve ankraj kök kuvvetlerini önemli derecede etkilemediği belirlenmiştir.

Uçar 2020 çalışması kapsamında, İstanbul İli, Avrupa yakasında yapımı tamamlanan bir yapı kompleksi kapsamında inşa edilen kesişen kazıklı ve öngermeli ankraj destekli iksa sistemi incelenmiştir. Çok bodrumlu bir yapı yapılacağından kazı derinliği 29,7 m olan kesişen kazıklı ve öngermeli ankrajlı geçici iksa sistemi tasarlanmıştır. Yapı alanının jeolojisi bakımından 5 adet, ortalama 22 m derinliğinde sondaj yapılmış ve kuvaterner yaşlı, çakıllı, killi, siltli ve kumlu birimlerinden oluşan Alüvyon birimi ile derinlerde Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu Kıltaşı-Çamurtaşı ve Kumtaşı birimler gözlenmiştir. Kazık imalatı esnasında delme işleminde 25 m üzeri derinliklerinde ilerleme verimliliğinin düştüğü kaydedilmiş ve iksa sistemi yenilenmiştir. Sert sıkı birimle kesişen kazıkların boyları 35 m'den 25 m'ye düşürülmüş ve kazının kalan bölümü hasır çelikli 35 cm kalınlıkta püskürtme beton ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır. İnklinometre ölçümleri ile zemindeki yanal deplasmanların incelenmesi sonucu sınır değerlerin aşıldığı gözlenmiş ve güçlendirme amaçlı bazı kotlardaki ankraj kademelerine ilave öngermeli ankrajlar eklenerek tedbir alınmıştır. Analizler sonucunda, elastisite modülü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi rijitlik parametrelerinin yanal deplasmanları doğrudan etkilediği ve bu parametrelerin artmasıyla yanal deplasmanların azaldığı ifade edilmiştir. Ankraj özelliklerinin de iksa sistemindeki yanal deplasmanlara olan etkisi araştırılmış ve 10 m'den fazla yapılan kök boyunun deplasmanların azalmasına ciddi katkı sağlamadığı

belirtilmiştir. Ayrıca ankrajlar arası yatay mesafenin azalması ve halat çapının artması ile yanal deplasmanlarda azalma görüldüğü ifade edilmiştir.

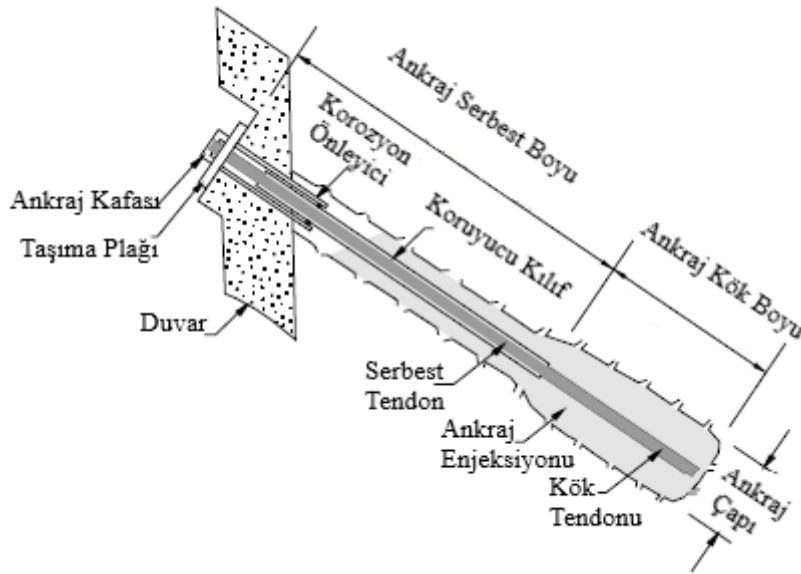
Şen 2021 çalışmasında, ankrajlı iksa sistemi tasarımında gerilme ve deformasyon analizlerinde Mohr-Coulomb, Hardening Soil ve Hardening Soil with Small-Strain Stiffness zemin malzeme modellerinin etkisini incelemek amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen iksa sistemi elemanlarının deplasman ve gerilme değerleri, İstanbul ilinde uygulanmış sistemin aletsel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Rocscience SLIDE ve Plaxis yazılım programları kullanılmıştır. İki programda da hesaplanan kritik kayma yüzeyi ve güvenlik katsayısı değeri karşılaştırılmıştır. Hem drenajlı hem drenajsız zemin parametreleri ile çalışılmıştır. Kazı derinliğinin 8.55 m ile 14.45 m arasında değiştiği derin kazı projesinde, idealize zemin profili çok katı kil ve sert kil zemin birimlerinden oluşmaktadır. Drenajlı analizler içerisinde nihai kazı adımındaki yatay yöndeki deplasman değerlerinin derinlikle değişimi incelendiğinde, MC modelde kazı tabanı altındaki maksimum deplasman değeri, HS modeldeki maksimum deplasman değerinin 2 katı kadar daha fazladır. Nihai kazı aşamasında, HS model ile yapılan drenajlı analiz, araştırma konusu derin kazı projesinin ölçülen deplasman değerleriyle en yakın sonuçları vermiştir. Ayrıca SLIDE analizleri sonucunda elde edilen kritik kayma yüzeyi ile (mükavemet azaltma) Plaxis ile elde edilen kritik kayma yüzeyinin bulunduğu bölge açısından farklılıklar bulunduğu ve minimum güvenlik katsayısı değeri Plaxis' de 1.464, SLIDE ile 1.344 ve 1.345 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin geçici iksa sistemleri için kabul edilebilir olan 1.30 değerinden yüksek olduğu ifade edilmiştir.



### 3. ÇOK SIRA ANKRAJLI DUVAR SİSTEMLERİ

#### 3.1 Zemin Ankrajları

Öngerilmeli enjeksiyonlu zemin ankrajı, uygulanan bir çekme yükünü zemine iletmek için kullanılan, zemine veya kayaya monte edilen yapısal bir elemandır. Enjeksiyonlu zemin ankrajları, harçla doldurulmuş sondaj deliklerine monte edilir. Zemin ankrajları şu temel bileşenleri içerir: (1) ankraj kafası (2) ankraj serbest boy uzunluğu ve (3) ankraj kök uzunluğu. Bir zemin ankrajının bu ve diğer bileşenleri şematik olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Ankraj, öngerme çeliğinden (çubuk veya halat) gelen kuvveti zemin yüzeyine veya desteklenen yapıya iletebilen ankraj kafası, yatak plakası ve trompetten oluşan birleşik sistemdir (Sabatini vd. 1999).

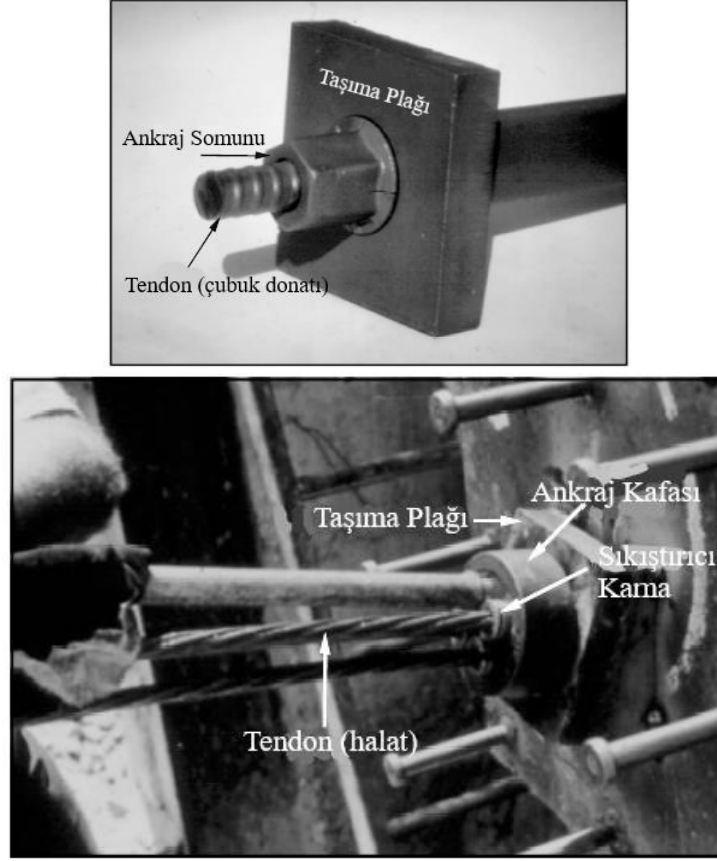


Şekil 3.1: Zemin ankraj bileşenleri.

Ankraj kafası, öngerme kuvvetinin duvar yüzeyine dağıtılmasını sağlar. Bu kısımda, ankraj ön gemesi uygulanır ve servis yüküne gerilen ankrajın kilitlemesi sağlanır. Ankraj kafası diye adlandırılan bu bölge, sıkıştırıcılar (kamalar), ankraj ve taşıyıcı plakadan oluşmaktadır. Şekil 3.2' te ankraj kafası bileşenleri gösterilmiştir.

Ankraj kafası ile ankraj kök başlangıcı arası serbest uzunluk olarak tanımlanır. Ön germeli çeliğin elastik olarak uzayabilen ve direnç kuvvetini ankraj kökü ile yapıya aktaran kısımdır. Kök kısmı ise ankraj çubuğunu zemine sabitleyen, çevresine çimento enjeksiyonu yapılmış kısımdır. Ön germe kuvvetini zemine aktarır. Çimento harcının yüksek basınç

altında ankraj deliğine itilerek doldurulur ve kök bölgesi oluşturulur (Şekil 3.1). Zemin ankrajları, kullanım sürelerine ve imalat tekniklerine göre kendi içinde ayrı ayrı sınıflandırılabilir.



Şekil 3.2: Ankraj kafası bileşenleri.

### **Kullanım Sürelerine Göre Ankrajların Sınıflandırılması**

**Geçici ankrajlar:** Genellikle bir projenin inşaatı sırasında, kısa süreli olarak kuvvetlere karşı koyan ankrajlardır. Genellikle kullanım süreleri 2 yıldır. Geçici ankrajlar (1), servis süreleri 6 aydan daha az ve göçmesi durumunda çok ciddi sorunlara neden olmayan, toplumun güvenliğini etkilemeyen ankrajlardır. Geçici ankrajlar (2), servis süreleri 2 yıl civarında olan, göçmesi sonucunda ciddi sorunlara neden olabilen ankrajlardır. İksa sistemlerinde kullanılabilirler.

**Sürekli ankrajlar:** Derin kazı destek sistemlerinde güvenlik ve stabilitenin servis ömrü süresince sağlanması için uygulanan ankrajlardır. Sürekli ankrajlarda (3), korozyon riski yüksektir. Ayrıca, göçme halinde ciddi sorunlara neden olabilirler. Tablo 3.1' de geçici

ankrajlar ve sürekli ankrajlar için geçerli olan minimum güvenlik faktörleri gösterilmiştir (Yalçın, 2019).

**Tablo 3.1:** Zemin ankrajları için minimum güvenlik faktörleri.

Ankraj Sınıfı	Minimum Güvenlik Faktörleri			Kontrol Yüğü Faktörü
	Tendon	Zemin / Enjeksiyon Ara yüzeyi	Enjeksiyon/tendon yada enjeksiyon/kapsülleme yüzeyi	
Geçici Ankrajlar (1)	1.40	2.0	2.0	1.10
Geçici Ankrajlar (2)	1.60	2.5*	2.5*	1.25
Sürekli Ankrajlar (3)	2.00	3.0 <sup>+</sup>	3.0 <sup>+</sup>	1.50

Not: \* Kapsamlı arazi deneyleri için minimum 2.0 kabul edilebilir.

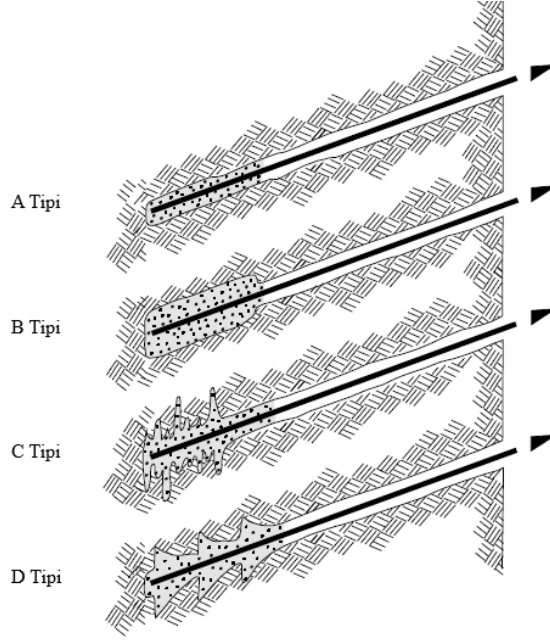
+ Zeminin limit sürtünme değerine karşılık maksimum 4.0 kabul edilebilir.

### **İmalat Teknikleri Dikkate Alınarak Ankrajların Sınıflandırılması**

Bir ankrajın taşıma kapasitesi, belirli bir zemin durumu altındaki geometrisi tarafından etkilenir. Ankraj tasarımında; ankraj imalat tekniğı, enjeksiyon ve delme yöntemleri önemli etkiye sahiptir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak ankrajlar 4 ana grup altında ayrılabilirler (Şekil 3.3).

**A tipi ankrajlar:** Zemin ile harç arasındaki kayma mukavemeti, kök kısmındaki sıyrılmaya karşı gösterilen direnç ile oluşturur. Dayanım, deliğın stabilitesine bağılı olup, doğrusal ya da doğrusal olmayan düz şaftlı ankrajlardır. Genellikle kayalarda ya da katı ve sert kohezyonlu zeminlerde kullanılır. Mukavemet, zemin-enjeksiyon yüzeyi arasında oluşan yüzey kayma gerilmelerine bağılıdır.

**B tipi ankrajlar:** Genellikle ince daneli kohezyonsuz zeminlerde ve zayıf çatlaklı kayalar için uygundur. Bu tip ankrajlarda 0,35 MPa'dan daha yüksek basınçlar altında çimento harcı kök bölgesine doldurulur. Sondaj tipik olarak içi boş gövdeli bir burgu kullanılarak veya delgi muhafazaları ile döner teknikler kullanılarak delinir. Burgu veya muhafaza geri çekilirken, harç, tüm ankraj kök bölgesi doldurulana kadar basınç altında deliğe enjekte edilir.



Şekil 3.3: İmalat tekniklerine göre ankraj tipleri.

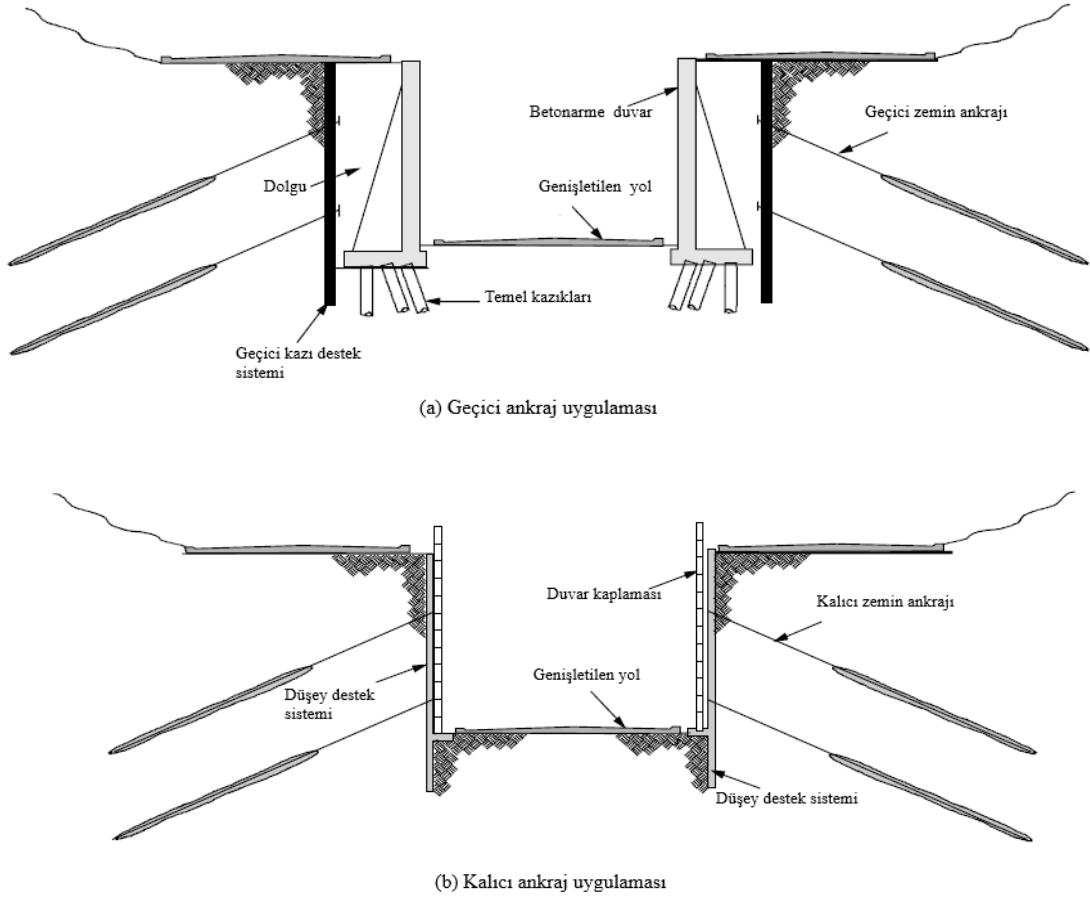
**C tipi ankrajlar:** İki enjeksiyon işleminden oluşur. Birinci enjeksiyonun sertleşmesinden sonra, çoğunlukla  $2000 \text{ kN/m}^2$ 'den daha fazla basınç altında, ikincil enjeksiyon uygulanır. Çimento enjeksiyonunun zemin boşluklarını doldurması ile ankraj kökü genişletilir. İkincil enjeksiyon genellikle “manchette system” adı verilen özel bir tüp sistemi ile ya da ankraj kökü içinde çalışabilen minyatür enjeksiyon tüpleri kullanılarak yapılır. Kohezyonsuz zeminlerde, bazen de kohezyonlu zeminlerde başarılı bir şekilde uygulanabilir.

**D tipi ankrajlar:** Ankraj delgisi sırasında kök bölgesinde oluşturulan bir veya birden fazla genişlemelerle ankraj kapasitesi arttırılmaktadır. Katı ve sert kıvamlı kohezyonlu zeminlerde uygulanabilir. Ankrajın enjeksiyonunda Tremie yöntemi uygulanır. Kayma mukavemeti ve uç mukavemeti sıyrılmaya karşı direnç oluşturur. Çok yaygın uygulama alanı olmamakla beraber kohezyonsuz zeminlerde de uygulamaları bulunmaktadır (Şekil 3.3).

### 3.2 Ankrajlı Duvarlar

Kazı derinliği arttıkça, kazıyı rijit istinat yapıları ile desteklemek hem ekonomik değildir hem de zordur. Bu gibi durumlarda esnek destek sistemleri geliştirilir. Bu esnek istinat sistemlerinden biri de ankrajlı duvarlardır. Ankrajlı duvarlar, pasif ankraj veya öngerilmeli ankraj olarak tasarlanabilir. Yol genişletme çalışmalarında veya birçok derin kazı işlerinde

ankrajlı duvarlar, kullanım sürelerine göre geçici veya kalıcı olmak üzere farklı iki şekilde tercih edilebilir. Şekil 3.4, geçici ve kalıcı ankrajlı duvar uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir (Sabatini vd. 1999).



**Şekil 3.4:** Geçici ve kalıcı ankrajlı duvar uygulamaları.

Öngörülen ankrajlı bir duvarın tasarım adımları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

1. Tüm geometri, dış yükleme koşulları (geçici ve/veya kalıcı, sismik vb.), performans kriterleri ve inşaat kısıtlamaları dahil olmak üzere proje gereksinimlerinin belirlenmesi.
2. Saha zemin koşullarının laboratuvar ve arazi deneylerine dayalı olarak değerlendirilmesi.
3. Tasarım özelliklerinin değerlendirilmesi, tasarım güvenlik faktörleri ve korozyon koruma seviyesinin belirlenmesi.

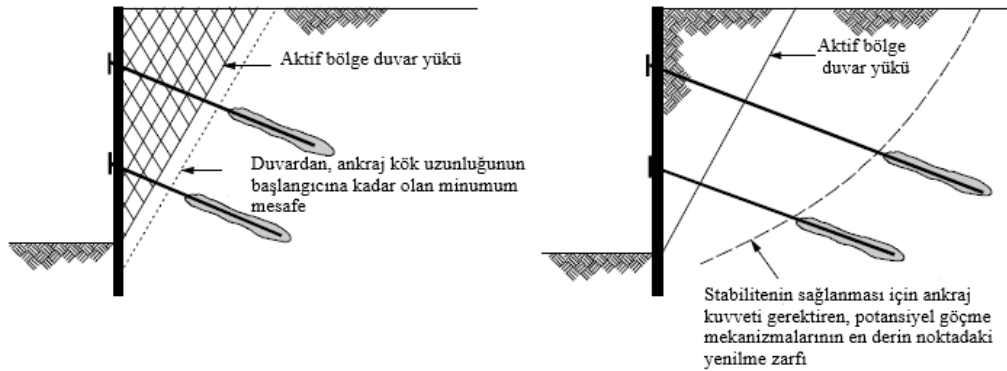
4. Duvarın arkasına etki eden yanal toprak basınç dağılımının seçilmesi. Su basınçları, ek yük ve sismik basınçların eklenmesi ile toplam yanal basıncın değerlendirilmesi.
5. Yatay zemin ankraj yüklerinin ve duvar eğilme momentlerinin hesaplanması. Optimum duvar eğilme momenti dağılımı elde edilene kadar dikey ankraj konumlarının ayarlanması.
6. Komşu parsellere geçiş hakkı sınırlamalarına, zemin katmanlarına ve yeraltı yapılarının konumuna göre gerekli ankraj eğiminin değerlendirilmesi.
7. Her bir yatay ankraj yükünün, ankraj boyunca dikey bir kuvvet ve kuvvet bileşenine çözümlenmesi.
8. Duvar tipine göre ankraj yatay aralıklarının değerlendirilmesi. Bireysel ankraj yüklerinin hesaplanması.
9. Zemin ankraj tipinin seçilmesi.
10. Kazı tabanının altındaki duvarın düşey ve yanal kapasitesinin değerlendirilmesi. Gerekirse duvar kesitinin revize edilmesi.
11. Ankrajlı sistemin iç ve dış stabilitesinin değerlendirilmesi. Gerekirse zemin ankraj geometrisinin revize edilmesi.
12. Maksimum yanal duvar hareketinin ve zemin yüzeyi oturmalarının tahmin edilmesi. Gerekirse tasarımın revize edilmesi.
13. Drenaj sistemlerinin tasarlanması.

### **3.3 Ankrajlı Duvar Tasarımında Temel İlkeler**

Ankrajlı bir duvar sistemi kavramı, yeterli bir hizmet verebilirlik seviyesinde dış göçme durumlarına direnecek, dahili olarak kararlı bir toprak kütlesi oluşturmaktır. Ankrajlı duvarların tasarımı, çeşitli potansiyel göçme koşullarına karşı güvenli olan nihai inşa edilmiş bir duvar elde etmeye odaklanır. Tasarım, inşaat için pratik ve ekonomik bir temel sağlarken zemin ve duvar hareketlerini sınırlandırmalıdır. Tasarım, duvar sistemine uygulanan yüklere tepki olarak hem ankrajlar hem de duvar elemanları tarafından direncin mobilizasyonunu dikkate almalıdır. Duvarı dengede tutmak için gereken toplam ankraj kuvvetinin büyüklüğü, zemin yükleri, yeraltı suyu ve dış yüklerin neden olduğu kuvvetlere bağlıdır. Ankrajlar, Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, duvarı yükleyen aktif toprak bölgesinin arkasında uygun bir mesafede toprağa geri iletilecek olan gerekli stabilize edici kuvvetleri sağlayabilir. Ankraj kuvvetlerinin aktif bölgenin arkasına iletilmesi gerekliliği, genellikle ankraj kök uzunluğunun oluşturulduğu duvarın arkasındaki minimum mesafeyi tanımlar. Ankraj kök uzunluğu, Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, ankrajların arkasından ve duvar

tabanının altından geçebilecek potansiyel olarak kritik kırılma yüzeylerini kesecek şekilde zemine uzanmalıdır. Ankrajların zemine yerleştirilmesi gereken derinlik, herhangi bir ankraj kuvveti olmaksızın yetersiz güvenlik faktörüne sahip en derin potansiyel kırılma yüzeylerinin konumuna göre belirlenmelidir. Özetle, ankrajlı bir duvar tarafından desteklenen bir kazıda, yeni bir şev geometrisinin sağlanması için aşağıdakiler gereklidir (Sabatini vd. 1999):

- Ankrajlı duvar, kazının hemen bitişiğindeki toprağı dengede destekleyebilmelidir. Bu destek, tipik olarak, ankrajlarda gereken maksimum kuvveti ve duvar bölümünde gereken maksimum boyutları, dayanımı ve eğilme momentlerini yönetir.
- Ankrajlar, yetersiz güvenlik faktörlerine sahip bir dizi sığ ve derin yerleşimli potansiyel yenilme yüzeyi için toprağın içine yeterince derin uzatılmalıdır. Ankraj kuvvetleri, kabul edilebilir bir güvenlik faktörüne sahip olmalarını sağlamak için bu potansiyel kayma yüzeyleri üzerinde etki eder.



Şekil 3.5: Zemin ankrajlarının duvar stabilitesine katkısı.

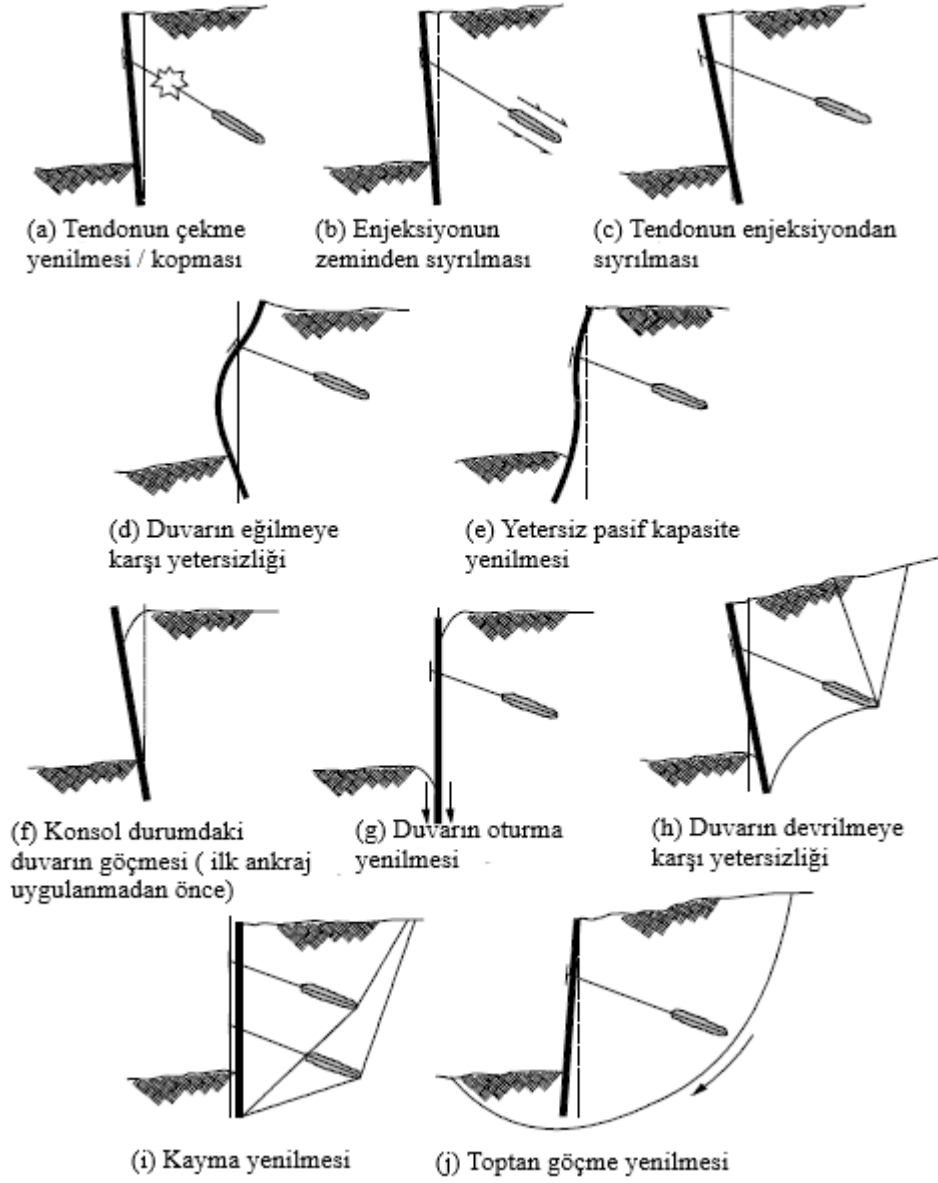
### 3.3.1 Ankrajlı Duvarlarda Potansiyel Göçme Mekanizmaları

Ankrajlı sistemlerin uzun vadeli stabilitesi için gerekli olan parametrelerin belirlenmesinde, çeşitli olası göçme mekanizmalarının dikkate alınması gereklidir (Şekil 3.6).

#### *Çelik tendonun kopması*

Ankrajların çelik tendon bileşeni yükler altında gerilir. Uygulanan yük, tendonun yapısal kapasitesinden büyükse, kopma kaçınılmazdır. Bu nedenle, çelik tendonun yapısal yetersizliğine ilişkin bir güvenlik faktörü kullanılmalıdır. Tendon yükünün, nihai tasarım

için belirtilen minimum çekme mukavemetinin %60'ını ve geçici yükleme koşulları (yükleme deneyi sırasında) için % 80'nini aşmaması önerilir.



Şekil 3.6: Ankrajlı duvar tasarımında potansiyel göçme koşulları.

### ***Zemin kütlelerinin göçmesi***

Burada atıfta bulunulan zemin kütlelerinin göçmesi, ankraja potansiyel olarak aşırı statik yük getiren heyelanlar gibi dış kuvvetlerden değil, ankraj yüklerinden kaynaklanan göçmeyi içerir. Sığ zemin ankrajları için, zemin kütlelerinin göçmesi, ankraj kök bölgesinin önündeki bir zemin kütlelerinin yükselmesi ve ardından kök bölgesinin çekilmesi ile karakterize edilir. Artan gerilmeler, ankraj kök bölgesinde direncin tam mobilizasyonuna neden olduğundan,



ankrajın önündeki toprak kütlelerinde bir kesme yüzeyi gelişir. Kesme yüzeyi, pasif bir toprak basıncı göçmesini simüle eder. Pratik olarak, zemin kütlelerinin göçmesi, zemin yüzeyinin 4,5 m altında gömülü olan ankrajlar için bir faktör değildir.

### ***Zemin-enjeksiyon sıyrılma yenilmesi***

Ankraj kök bölgesindeki enjeksiyon ile zemin arasındaki aderans kuvvetinin yetersiz kalması durumunda oluşan göçme mekanizmasıdır. Zemin mukavemetinin yetersiz olması, enjeksiyon ve enjeksiyonlama işlemindeki kusurlar nedeniyle ön görülen aderans gerilme değeri, hesaplanan değerden düşük olması halinde göçme gözlemlenebilir. Sahada uygulanmış projeler incelendiğinde, tipik zemin ankrajları için kök uzunluğunun 9 ile 12 m'den fazla artırılmasının, sıyrılma direncinde önemli artışlar ile sonuçlanmadığını göstermiştir. 12 metreden daha fazla bir kök boyuna ve sıyrılma direncine gereksinim duyulduğunda ankraj kapasitesinin tam olarak aktif çalışması için enjeksiyonlama işleminde özel prosedürlerin kullanılması gerekebilir. Üniform bir zeminde, küçük çaplı zemin ankrajları için aderans gerilmesini etkileyen tipik faktörler Tablo 3.2'de özetlenmiştir (Sabatini vd. 1999).

**Tablo 3.2:** Ankraj kökü boyunca zemin ile enjeksiyon ara yüzeyindeki aderans gerilme değerlerini etkileyen faktörler.

<b>Faktörler</b>	<b>Kohezyonsuz Zeminler</b>	<b>Kohezyonlu Zeminler</b>
Zemin özelliği	Sürtünme açısı, dane dağılımı	Adezyon, plastisite indeksi
Delme yöntemi	Muhafazalı olması sürtünmeyi artırır	Muhafazasız veya su ile delme kapasiteyi düşürür
Kök uzunluğu	6 m' den 12 m'ye kadar ankraj kapasitesinde kademeli artışlar	Drenajsız mukavemeti 96 kPa'dan az olan zeminler için ankraj kapasitesinde sürekli artış.
Kök çapı	Ankraj kapasitesinde kök çapı 100 mm olana kadar hafif artışlar	Ankraj kapasitesinde kök çapı 300 mm olana kadar artış
Enjeksiyon basıncı	Basınç artması ile ankraj kapasitesi artar	Ankraj kapasitesi sadece kademeli enjeksiyon ile artar. Yüksek başlangıç basınçlarından kaçınılmalıdır.

**Not:** Zemin-harç adezyonunu sağlamak için, kuyu deliği temizlenmeli ve delik açıldıktan sonra harç mümkün olduğunca çabuk yerleştirilmelidir.

### ***Tendon-enjeksiyon sıyrılma yenilmesi***

Enjeksiyon-çelik tendon arasındaki göçme mekanizması üç bileşen içerir: (1) yapışma (2) sürtünme ve (3) mekanik kilitleme. Yapışma, mikroskobik olarak pürüzlü çeliğin ve

çevreleyen harcın fiziksel birleşimidir. Bu ilk bağ, hareket meydana geldikten sonra sürtünme ile değiştirilir. Sürtünme, çelik yüzeyin pürüzlülüğüne, normal gerilmeye ve kaymanın büyüklüğüne bağlıdır. Mekanik kilitleme, nervürler veya bükülmeler gibi ana tendon düzensizliklerine karşı kesme mukavemetinin groutobilize edilmesinden oluşur. Bu kilitleme, çubuğun nihai mukavemetinin harçta kısa bir gömülmede geliştirilebildiği dişli çubuklar için baskın bağlantı mekanizmasıdır. “Kayma” ancak, maksimum yoğunluktaki enjeksiyon-tendon bağ direnci neredeyse toplam bağ uzunluğu boyunca harekete geçirildikten sonra meydana gelir. Bu kaymadan sonra, tendon daha fazla uzamaya karşı sadece sürtünme direnci (elde edilen maksimum toplam direncin yaklaşık yarısı kadar) sunacaktır. Deneyimler şunu göstermiştir (Sabatini vd. 1999):

- Enjeksiyonun tendona yapışma direnci, harcın basınç dayanımı ile doğrusal orantılı değildir. Ankraj kök dayanımı genellikle enjeksiyonun basınç mukavemeti arttıkça artmasına rağmen, artan enjeksiyon mukavemeti ile kökün nihai mukavemetinin oranı azalır. Örneğin, 27,6 MPa enjeksiyon harcının mukavemetinde 17,2 MPa'lık bir aderans dayanımı oluşurken, enjeksiyon harcının dayanımında %25 artım yapıldığında 34,5 MPa'ya yükselen harç mukavemeti için aderans dayanımı %12 artarak 19,3 Mpa'ya yükselmektedir.
- Gömülme ile geliştirilen kök direnci, tendon uzunluğu arttıkça artar, ancak birim değerlerinde azalma olur.
- Çubuklardaki pul pul pas, bağı azaltır, ancak en gevşek pasın silinmesi, paslanmamış bir çubuğa eşit veya ondan daha büyük bir bağ oluşturan daha pürüzlü bir yüzey oluşturur. Fakat açıkça çukurlu çubuklar, enjeksiyon-tendon bağı yeterli olsa bile kabul edilemez.
- Kısa süreli oluşan gevşek toz pas, enjeksiyon-tendon bağı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

### ***Duvar göçmeleri***

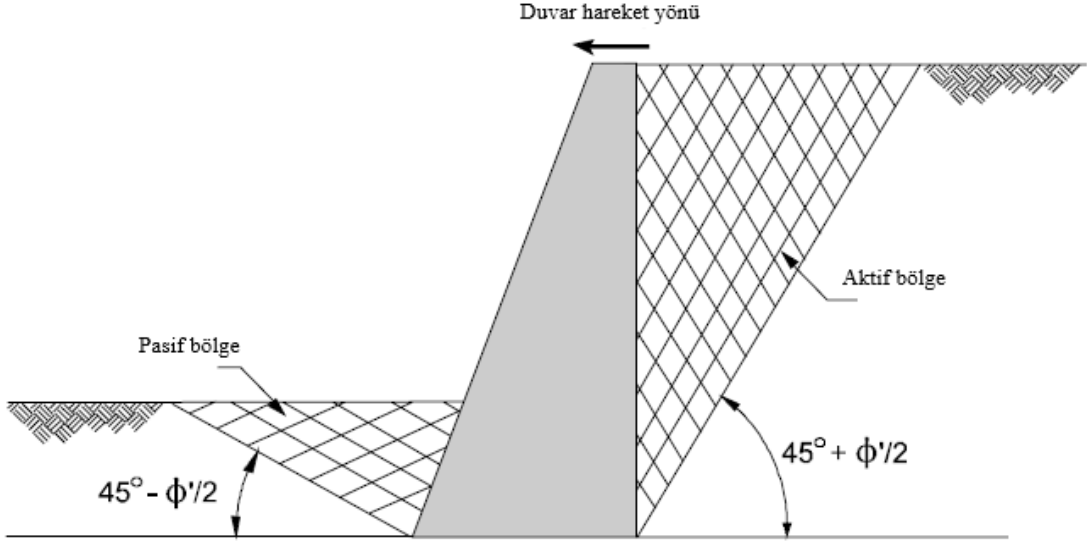
Duvar göçmeleri kapsamında, eğilme türü ve dönme türü göçmeler, duvar eksenel kapasitesinin yetersizliği nedeniyle göçme, duvarda pasif direncin yetersizliği nedeniyle göçme ve duvarı da içine alan toptan göçmeler yer almaktadır.

### 3.3.2 Yanal Basınçlar

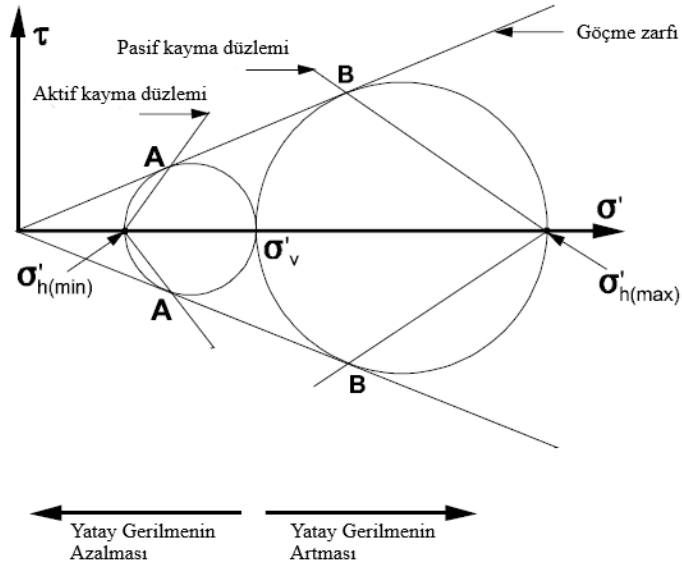
Duvar sistemleri, arkasında oluşan yanal toprak basınçlarına dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Yanal basınçlar duvar arkası zemin ağırlığının neden olduğu yükler, deprem yer hareketleri ve çeşitli sürşarj yüklerinin bir sonucu olarak gelişir. Ankrajlı sistemlerin tasarımında, üç farklı yanal zemin basıncı koşulu göz önünde bulundurulur: aktif toprak basıncı, pasif toprak basıncı ve sükunetteki toprak basıncı. Gerçek zemin davranışı ile geleneksel tasarım varsayımları arasındaki ayırım, özellikle toprak basınçları düşünüldüğünde önemlidir. Teorik analizlere dayanan aktif ve pasif basınçlarla ilgili basit doğrusal varsayımlar, aşağıdaki faktörlere bağlı olan bazı çok karmaşık süreçlerin önemli ölçüde basitleştirilmesidir: a) Duvar hareketi (dönme, öteleme); b) Duvar esnekliği; c) Zemin sertliği ve mukavemet özellikleri; d) Zemin yatay gerilmesi; e) Duvar/zemin ara yüz sürtünmesi. Esnek duvar elemanlarına sahip ankrajlı duvar sistemleri için, yarı deneysel “görünür toprak basınç zarfları” yaygın olarak kullanılır (Sabatini vd. 1999).

#### **Aktif ve Pasif Toprak Basınçları**

Aktif ve pasif yatay toprak basınçları için, yatay bir arka eğime sahip düz (yani, sıfır duvar sürtünmeli) bir duvar istinat duvarı varsaydığımızda (Şekil 3.7); bu durum Rankine koşullarını tanımlar. Bu koşullarda, düşey efektif gerilme,  $\sigma_v'$  (Şekil 3.8) altındaki bir zemin elemanı göz önüne alınır. Duvarın potansiyel hareketleri düşünüldüğünde, zemin elemanı, istinat duvarı tasarımı bağlamında temelde önemli olan iki farklı yolla göçmeye uğrayabilir. Yatay zemin gerilmesi arttığında ve zemin elemanının B noktasında kırılmasına kadar maksimum değerine ( $\sigma_{v(maxs)'}'$ ) ulaştığında göçme gerçekleşir. Bu senaryo, duvarın önemli ölçüde dışa doğru hareketi ile duvarın tabanındaki zeminde yanal toprak basıncını arttırdığında ortaya çıkacaktır (Pasif bölge) (Şekil 3.7). Benzer şekilde, yatay zemin gerilmesi azalarak minimum ( $\sigma_{v(min)'}'$ ) değerine ulaşabilir ve A noktasında kırılma gerçekleşebilir. Bu senaryo, duvarın arkasındaki yanal toprak basınçlarını azaltan dışa doğru hareketi modellemektedir (Aktif bölge) (Şekil 3.7) (Sabatini vd. 1999).



**Şekil 3.7:** Sürtünmesiz bir istinat duvarı için Rankine aktif ve pasif yatay basınçların mobilizasyonu.



**Şekil 3.8:** Aktif ve pasif yatay gerilme koşullarındaki değişimler.

Aktif olarak adlandırılan bölgede, yatay ile  $45 + \phi/2$  eğimli kesme yenilme düzlemleri boyunca zemin yenilmesi gerçekleşebilir. Böylece zeminin aktif durumda olduğu söylenebilir. Duvar dolgudan dışarıya doğru belirli bir miktar hareket eder durumdadır. Aktif durumdaki kohezyonsuz bir zeminde K değeri  $K_a$  olup aktif toprak basıncı katsayısı

olarak bilinir. Zemin aktif koşula ulaştığı zaman, zemindeki yatay gerilme en alt sınırdaki kalacaktır. Aktif koşula ulaşmak için gerekli hareket miktarları zemin tipine ve uygulanan duvar yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Pasif koşul da ise duvarın tam tersi olacak şekilde dolguya doğru hareket etmesi beklenir. Homojen bir zeminde pasif durumdaki kesme yenilmesi düzlemleri yatay ile  $45+\phi/2$  derece eğimlidir. Pasif koşuldaki kohezyonsuz bir zeminde K değeri  $K_p$  olup pasif toprak basıncı katsayısı olarak bilinir. Bu değer K katsayısının üst sınır değeridir ve duvara etkiyebilecek basıncın üst sınırını belirtir. (Coduto, 2006 ) Şekil 3.8'e bakılarak aşağıdaki iki ilişkiye ulaşılabilir;

$$K_a = \frac{1-\sin\phi'}{1+\sin\phi'} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$K_p = \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (3.2)$$

Burada  $K_a$  aktif toprak basıncı katsayısı ve  $K_p$  pasif toprak basıncı katsayısıdır.  $K_a$  ve  $K_p$ 'nin 3.1 ve 3.2 numaralı denklemlere dayalı tanımları, kohezyonsuz (yani,  $c=0$ ) bir tutulmuş zemin için Rankine koşullarına dayalıdır.

Efektif gerilme mukavemeti parametreleri  $\phi'$  ve  $c'$  ile tanımlanan kohezyonlu bir zemin için aktif ve pasif toprak basıncı katsayıları aşağıdaki şekildedir:

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) - \frac{2c'}{\sigma'_v} \tan\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + \frac{2c'}{\sigma'_v} \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (3.4)$$

Burada  $\sigma'_v$  efektif düşey gerilmedir.

$\phi = 0$  ve  $c = S_u$  olan drenajsız durum için ise toplam aktif ve pasif toprak basıncı katsayıları aşağıdaki şekildedir:

$$K_{AT} = 1 - \frac{2S_u}{\sigma'_v} \quad (3.5)$$

$$K_{pT} = 1 + \frac{2S_u}{\sigma_v} \quad (3.6)$$

Burada  $\sigma_v$  toplam düşey gerilmedir.

Ankrajlı duvar uygulamalarının çoğu için, duvar sürtünmesinin aktif toprak basınçları üzerindeki etkisi nispeten küçüktür ve genellikle göz ardı edilir. Aktif toprak basıncı katsayısı  $K_a$  ve pasif toprak basıncı katsayısı  $K_p$ , yukarıdaki uygun denklemler kullanılarak değerlendirilebilir.

### **Sükunetteki Toprak Basıncı**

Bir istinat yapısının esnemez olduğunu varsayarsak bu kapsamda, rijit bir duvar eğilme hareketleri geçirmeyendir. Bunun karşısı esnek bir duvar (eğilmeye karşı dirençsiz) olacaktır. Esnemeyen-rijit duvar, ötelenmeyen ve dönmeyen anlamına gelir. Böyle bir duvarın zeminde yanal deformasyonlar meydana getirmeyecek şekilde inşa edildiğini varsaydığımızda, zemindeki yanal gerilmeler doğal örselenmiş durumda oldukları ile aynıdır. Bu durumdaki K değeri  $K_0$  (sükunet halindeki yanal zemin basıncı katsayısı) dir.  $K_0$  değerini en doğru değerlendirme şekli dilatometre deneyi (DMT) veya presiyometre deneyi (PMT) gibi arazi deneyleriyle mümkündür. Ayrıca örselenmemiş numuneler üzerinde özel laboratuvar deneyleri ile de ölçülebilir. Ancak ekonomik kısıtlamalar nedeniyle mühendisler genellikle bu deneyleri büyük ve kritik projelerde kullanmayı tercih etmektedir. Projelerin çoğunda tasarım  $K_0$  değerleri için ampirik ilişkilere başvurmak gerekir. Bu konuda aşağıda verilen Mayne ve Kuhawy (1982) ilişkisi de dahil olmak üzere bir kaç bağıntı geliştirilmiştir (Coduto, 2006).

$$K_0 = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (3.7)$$

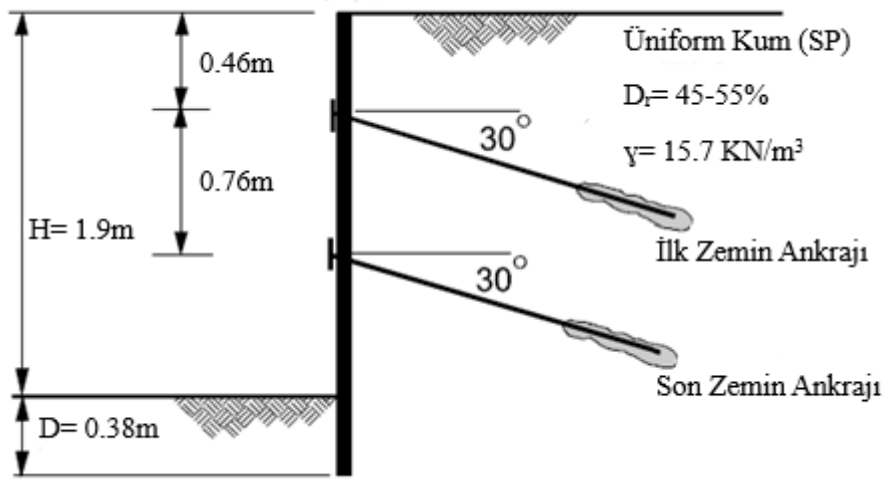
Burada,  $OCR$  zeminin aşırı konsolide oranı,  $\phi'$  zeminin efektif sürtünme açısıdır.

Kumlar için  $K_0$  tipik olarak 0,4 ila 0,5 aralığındadır. Normal konsolide killer için aralık 0,55 ila 0,65' dir. Hafif aşırı konsolide killer ( $AKO < 4$ ) için  $K_0$ , 1'e yakın bir değere ulaşabilir. Aşırı konsolide killer ( $AKO > 4$ ) için ise  $K_0$  değerleri 2'ye kadar veya daha büyük olabilir. Çelik kirişler, palplanş duvar veya ankrajlı duvar tasarımında, sükunet halindeki toprak basınçları genellikle olarak kullanılmaz. Sükunetteki toprak basınçlarının kullanılması, duvar sisteminin yanal deformasyona uğramadığını varsayar. Ön gerilmeli rijit duvar sistemlerinin tasarımında bu koşulun kullanımı uygun olabilir, ancak otoyol

uygulamaları için esnek ankrajlı duvar sistemleri için bu rijit gereksinimine göre tasarım yapmak pratik değildir (Sabatini vd. 1999).

### 3.3.2.1 Duvar Deformasyonunun Yanal Basınçlar Üzerindeki Etkisi

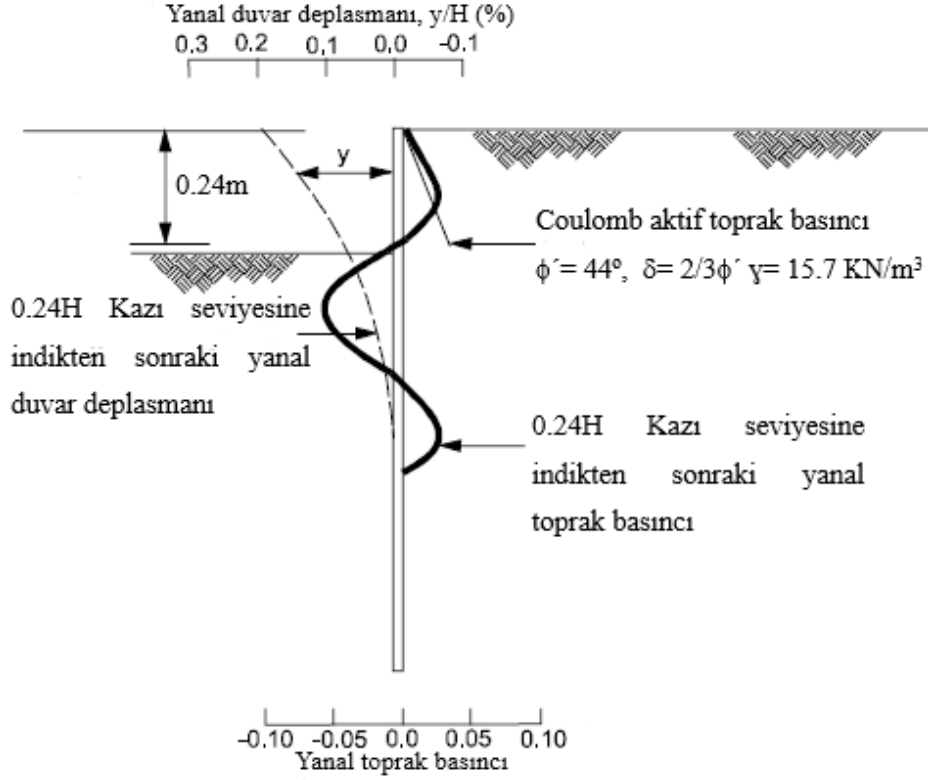
İki sıra ankrajlı duvar tasarımı üzerine yapılan bir çalışma, her bir yapım aşamasındaki yanal toprak basıncı ve duvar deformasyonu arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Şekil 3.9) (Sabatini, 1999).



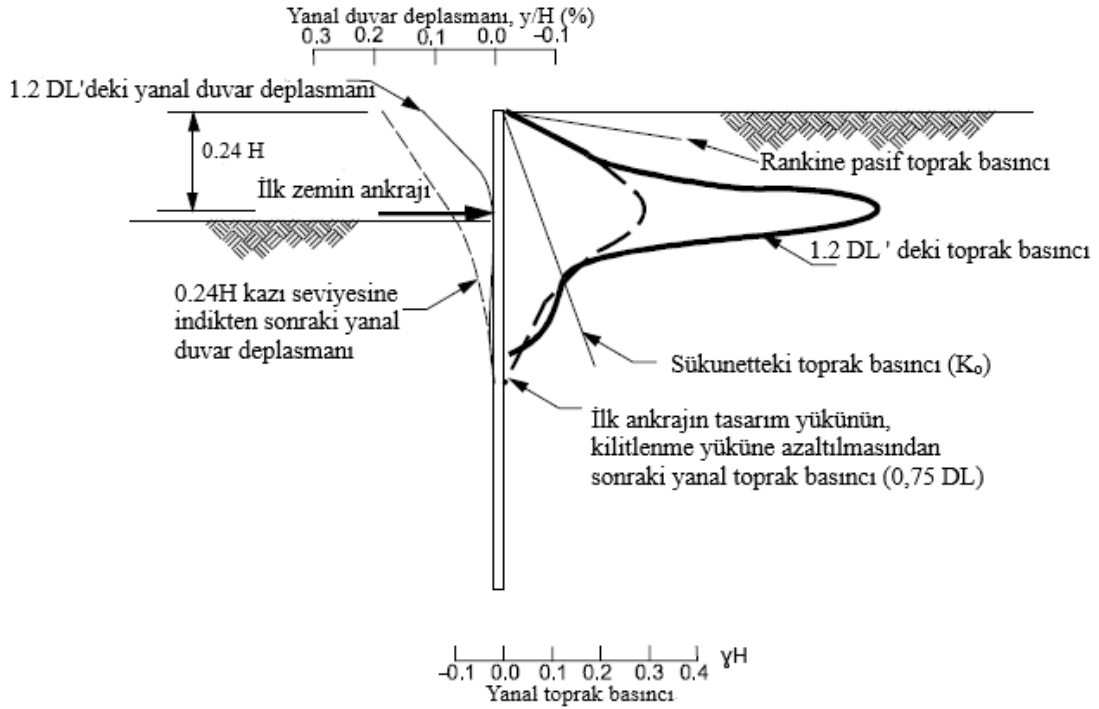
Şekil 3.9: Modellenen iki sıra ankrajlı duvar uygulaması.

İlk aşamada, ankrajın uygulanabileceği seviyeye kadar yapılan kazı ile duvar sistemi ankastre konsol olarak çalışma eğilimine geçer. Duvarın ilk kazı seviyesinin üzerindeki kısmı için, yanal toprak basıncı ve deformasyon modelinin genellikle, derinlik ile lineer olarak artan aktif durumdaki toprak basıncı ve şekil değiştirmeler ile tutarlı olduğu görülmektedir (Şekil 3.10).

İkinci aşamada, ankrajın gerilmesinin bir sonucu olarak yanal toprak basıncında önemli değişiklikler meydana gelir (Şekil 3.11). Gerilme sırasında duvar, arkasındaki tutulan zemine doğru itilir, bu da ankraj seviyesindeki aktif basıncın, pasif toprak basınç değerine yakın olacak kadar büyük bir artışına neden olur. Yük, tipik olarak tasarım yükünün yüzde %75-100'üne azaltıldığında, ankrajın etrafında bir gerilme soğanı oluşacak şekilde basınç düşer. Fakat yine de aktif toprak basıncından daha fazla olacaktır.



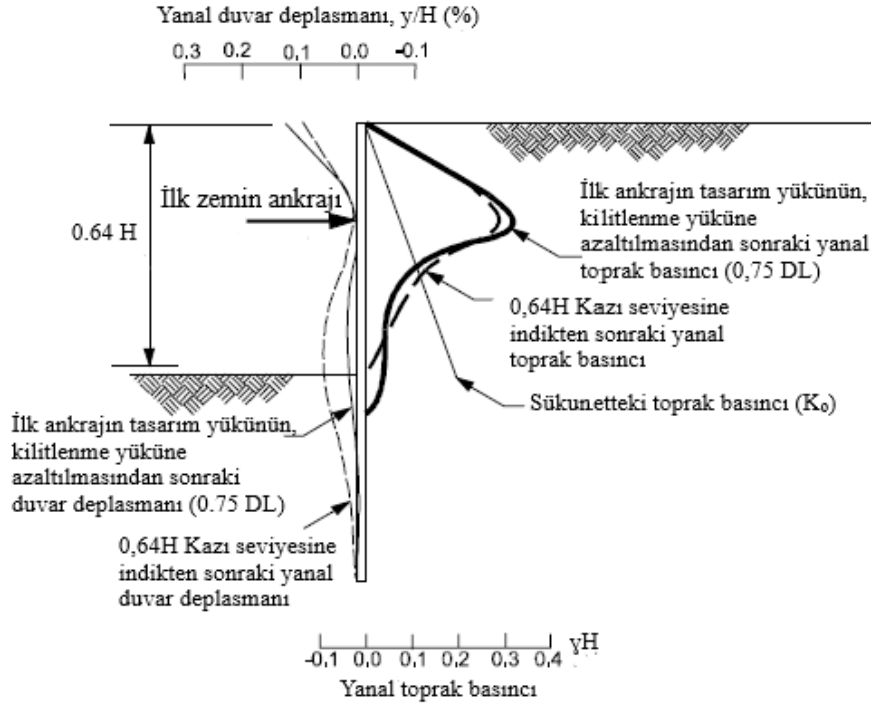
Şekil 3.10: İlk ankraj seviyesinde kazı sonrası yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları.



Şekil 3.11: Ankrajın gerilmesi aşamasında yanal duvar hareketleri ve toprak basınçları.



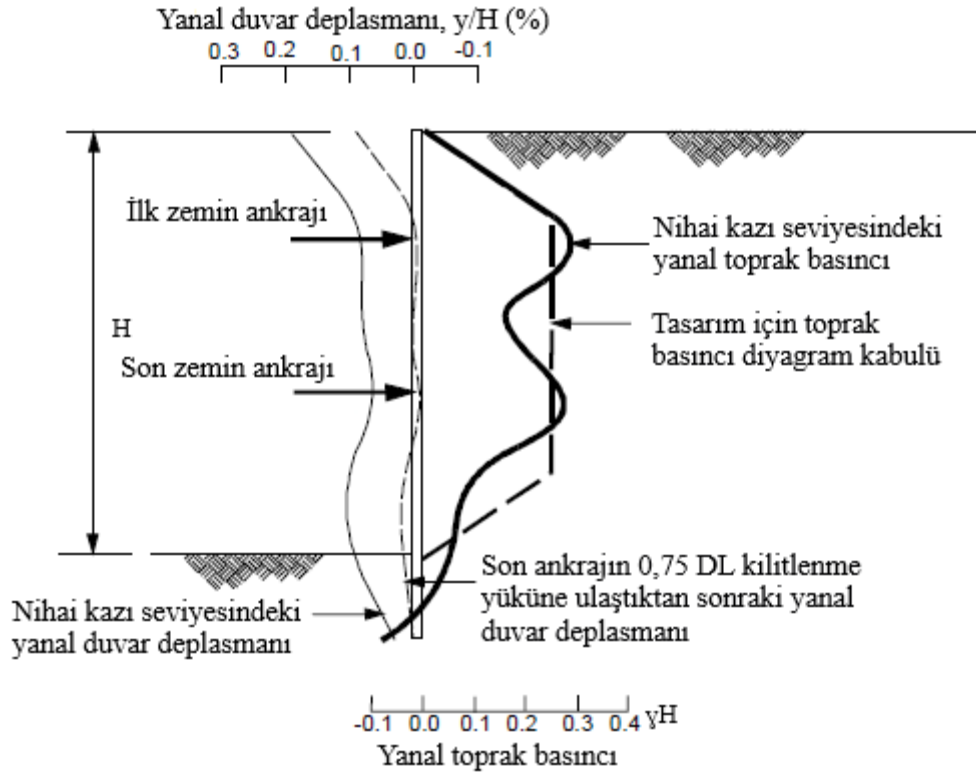
Son ankrajın uygulanabilmesi için yapılan kazı sonrası duvarın yanal olarak hareket etmesi tetiklenir ve yanal basınç dağılımları değişir (Şekil 3.12). Üst ankraj ile kazı tabanı arasındaki toprak basıncı azalır ve yük, daha rijit olan üst ankraj ve kazı tabanına yeniden dağıtılır ve bu bölgede toprak basıncının artmasıyla sonuçlanır.



**Şekil 3.12:** Son ankraj seviyesindeki kazı sonrası yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları.

Son zemin ankrajının da gerilmesi sonrasında yanal duvar deformasyonu, ilk ankrajda gerçekleşen modele benzer şekilde tekrarlanır (Şekil 3.13). Son ankrajın bulunduğu yerde bir gerilme soğanı gelişir. Nihai kazı tabanı derecesine kadar yapılan hafriyat sonucunda, son ankraj ile kazı tabanı arasında yanal kabarmalar meydana gelir. Nihai kazı seviyesindeki toprak basıncı dağılımının, ikizkenar yamuk şeklindeki dağılıma yakın olduğu gözlenmektedir (Şekil 3.13). Bu dağılım “görünür toprak basıncı dağılımı” olarak tanımlanmıştır. Tamamen aktif koşulları (üçgen basınç dağılımı) üstlenen toprak basıncı diyagramı dikkate alınsaydı, kazı tabanının yakınındaki toprak basınçları olduğundan fazla ve üst ankrajlardaki basınçlar olduğundan az hesaplanacağı için duvar eğilme momentlerinin ve gerekli duvar gömülme derinliğinin aşırı güvenli olacak şekilde tasarlanmak mecburiyetinde kalacağı söylenebilir. Bu sonuçlar, sert zeminde inşa edilmiş esnek bir model duvar için ifade edilmiştir. Bu toprak basıncı ve deformasyon

modelleri, tam aktif toprak basıncı koşullarının gelişmesine neden olan, kazı alt tabanında duvarın nispeten büyük dışa dönmesine maruz kalabilen zayıf zemine gömülü duvarlar için uygun olmayabilir (Sabatini, 1999).



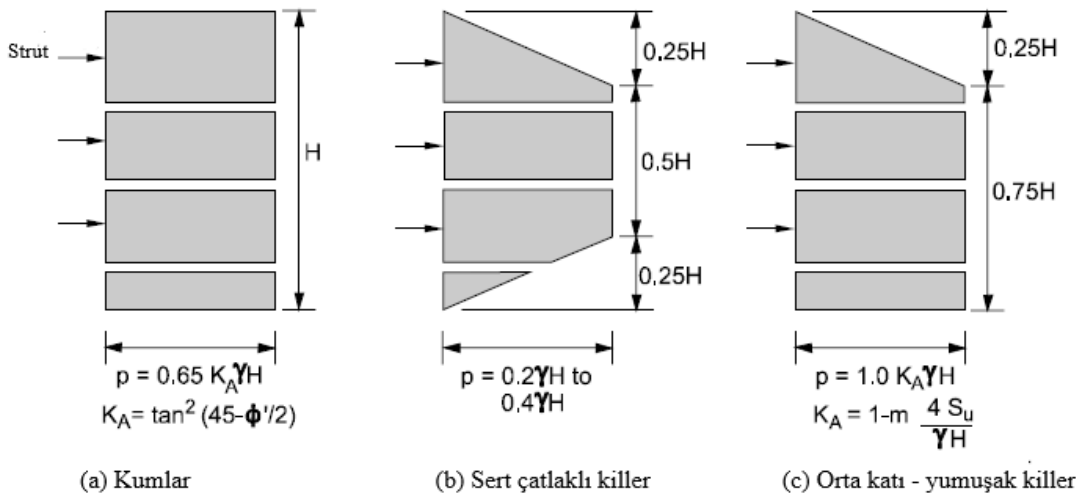
Şekil 3.13: Nihai kazı seviyesindeki yanal duvar deplasmanları ve toprak basınçları.

### 3.3.2.2 Görünür Toprak Basıncı Dağılımları

Ankrajlı bir duvarda gelişen toprak basıncı dağılımı, duvar deformasyonlarının büyüklüğüne ve dağılımına bağlıdır. Bazı görece esnek, konsol ve ankrajlanmamış duvarların, tüm duvar yüksekliği için aktif toprak basınçlarına neden olan yeterince büyük yanal deformasyonlara maruz kalması beklenebilir. Bu sistemlerin tasarımı için, Rankine veya Coulomb analiz yöntemlerini kullanan teorik aktif toprak basıncı diyagramları kullanılabilir. “Yukarıdan aşağıya” inşa edilen ankrajlı duvar sistemleri için, deformasyon modeli daha karmaşıktır ve teorik Rankine veya Coulomb toprak basıncı dağılımının gelişimi ile tutarlı değildir. Bu tip ankrajlı duvarlar için toprak basınçlarını değerlendirme yöntemleri, görünür toprak basıncının kullanımını içerir. Görünür toprak basıncı diyagramları, orijinal olarak Terzaghi ve Peck (1967) ve Peck (1969) tarafından içten destekli kazılarda payandaların muhafazakâr tasarımı için yüklemeler sağlamak üzere

geliştirilen yarı deneysel diyagramlardır. Saha ölçümlerinden geriye doğru hesaplanmış olan dikdörtgen veya yamuk şeklindeki basınç zarfları Şekil 3.14’de özetlenmiştir. Şekilde, görünen toprak basıncı diyagramlarının maksimum ordinatı  $p$  ile gösterilmektedir. Terzaghi ve Peck zarfları aşağıdaki faktörlere dayalı olarak geliştirilmiştir:

- Kazının 6 m’den daha derin ve nispeten geniş olduğu varsayılmaktadır. Zemin kesme dayanımının tam değerinin mobilize edilebilmesi için duvar hareketlerinin yeterince büyük olduğu varsayılır.
- Yeraltı suyunun kumlar için kazı tabanının altında olduğu varsayılır ve killer için konumu önemli görülmez. Spesifik olarak, bu analizlerde su basıncından kaynaklanan yüklemeye dikkate alınmamıştır.
- Zemin kütlelerinin homojen olduğu varsayılır ve kesme sırasındaki zemin davranışının kumlar için drenajlı, killer için drenajsız olduğu varsayılır, yani sadece kısa süreli yüklemeler dikkate alınır.
- Yükleme diyagramları sadece duvarın açıkta kalan kısmı için geçerlidir ve duvarın kazı tabanının altına gömülü kısmı için geçerli değildir.



Şekil 3.14: Terzaghi ve Peck görünür basınç zarfları.

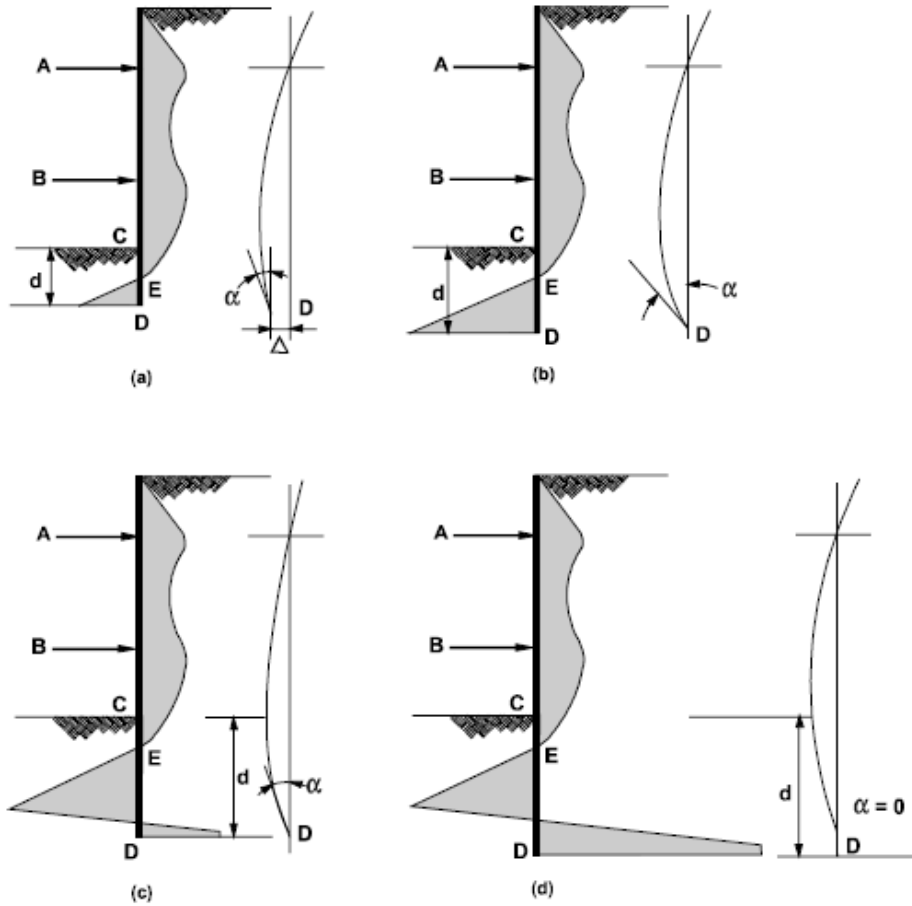
Killer için, görünür toprak basıncı, şu şekilde tanımlanan kararlılık sayısı  $N_s$  ile ilişkilidir

$$N_s = \frac{\gamma H}{S_u} \quad (3.8)$$

Şekil 3.14' de gösterildiği gibi, nispeten düşük  $N_s$  değerlerine (yani sert killere) ve nispeten yüksek  $N_s$  değerlerine (yani yumuşak ila orta katı killere) sahip zeminlerdeki farklılıkları hesaba katmak için killere için iki görünür toprak basıncı zarfı geliştirilmiştir. Terzaghi ve Peck (1967) ve Peck (1969) tarafından geliştirilen görünür toprak basıncı diyagramlarının bu orijinal formları FHWA tarafından tavsiye edilmemekle birlikte, orijinal diyagramlarda Henkel (1971) ve FHWA-RD-97-130'da (1998) tarafından önerilen değişiklikler için çerçeve sağlamaktadır (Sabatini vd. 1999).

### 3.3.2.3 Yanal Basınçların Duvar Gömülme Derinliği ve Duvar Sehimi ile İlişkisi

Ankrajlı bir duvar sisteminin genel stabilitesi ve duvar elemanları içinde gelişen gerilme seviyesi, duvarın bağıl rijitliğine, duvar gömülme derinliğine, zemin dayanımı ve rijitliğine bağlıdır. Şekil 3.15, ankrajlı bir duvar için gömülme derinliği, yanal toprak basıncı dağılımı ve deforme olmuş duvar şekli arasındaki genel ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3.15: Yanal toprak basıncının duvar gömülme derinliği ve duvar sehimi ile ilişkisi.

Durum (a), “serbest toprak desteği” koşuluna atıfta bulunur. Bu durumda duvar önündeki pasif basınçlar D noktasındaki yanal sehimi ve dönmeyi önlemek için yetersizdir. Serbest toprak mesnet koşullarına dayalı tasarımlar, duvarın önündeki zeminin, negatif eğilme momentlerini teşvik etmek için gerekli olan ölçüde etkili kısıtlama üretmediğini varsayar. Şekil 3.5'deki (b), (c) ve (d) durumları, duvar penetrasyon derinliğini artırmanın etkisini göstermektedir. (b) ve (c) durumunda, pasif basınçlar D noktasındaki yanal sehimi önlemek için yeterlidir, ancak duvarın tabanında dönme hala devam etmektedir. (d) durumu için, D noktasında hem yanal sehimi hem de dönmeyi önlemek için duvarın her iki tarafında pasif basınçlar yeterince gelişmiştir. (d) durumu “sabit toprak desteği” durumunu ifade eder (Sabatini vd. 1999).

### **3.3.3 Zemin Ankraj Tasarımı**

#### **Kritik Potansiyel Göçme Yüzeyinin Önemi**

Ankraj tasarımı yapılırken kritik potansiyel göçme yüzeyinin konumu dikkate alınmalıdır. Ankraj kök bölgesi, kritik potansiyel göçme yüzeyinin yeterince arkasında konumlandırılmalıdır. Böylece ankraj kökünden zemine aktarılacak yükün, ankraj serbest boy bölgesine etkisi önlenmiş olacaktır. Duvar ile kritik potansiyel göçme yüzeyi arasında kalan bölge “yüksüz” bölge veya serbest boy bölgesi olarak adlandırılır. Serbest boy uzunluğu tipik olarak kritik potansiyel göçme yüzeyinin minimum  $H/5$  kadar (burada H kazı yüksekliğidir) ya da 1,5 m arkasına uzatılır. Kohezyonsuz zeminlerde inşa edilen duvarlar için, kritik potansiyel göçme yüzeyinin durumu, kazı köşesinden yataydan  $45^\circ + \phi/2'$  lik bir açıyla yüzeye uzanan bir düzlem çizilerek (aktif kama) belirlenir (Şekil 3.16) (Sabatini vd. 1999).

#### **Ankraj Serbest Boyunun Tasarımı**

Ankraj serbest boy tasarımında kullanılacak çelik elemana göre kriterler farklılık göstermektedir. Ankraj olarak kullanılan çelik eleman, çubuk donatı veya çelik halat şeklinde olabilir. Kaya ve zemin ankrajları için minimum serbest boy uzunluğu, çelik halatlar için 4,5 m ve çelik donatı çubuklar için minimum 3 m' dir. Kök bölgesinin kritik potansiyel göçme yüzeyinin arkasında kalabilmesi için serbest boy farklılık gösterebilir. Ayrıca ilk ankraj için kök bölgesinin merkezi ile zemin yüzeyi arasındaki örtü yükü mesafesi minimum 4,5 m olacak şekilde serbest boy tasarımı yapılmalıdır.

Minimum şartlardan daha uzun bir ankraj serbest boyuna, şu amaçlar doğrultusunda ihtiyaç duyulabilir;

- Kök bölgesini, kritik potansiyel göçme yüzeyinin arkasında minimum bir mesafeye konumlandırmak
- Kök bölgesini, geoteknik özellikler bakımından uygun (rijit) zemine yerleştirmek
- Ankrajlı sistemin genel stabilitesini sağlamak
- Uzun vadeli hareketleri göz önüne almak

### **Ankraj Kök Boyunun Tasarımı**

Ankraj kök bölgesinin yük taşıma kapasitesini sahadaki uygulamanın doğrudan etkilediği bilinmektedir. Farklı montaj ve enjeksiyon yöntemleriyle taşıma kapasitesi farklılık gösterebilir. Kök bölgesi için sahada elde edilecek gerçek taşıma kapasitesi, sondaj kalitesine, açılan kuyunun temizliğine ve açık kalma süresine, delgi çapına, enjeksiyonda kullanılan yönteme ve uygulanan enjeksiyon basıncına bağlıdır. Belirli minimum değerler dışında, bu parametrelerin seçimi geoteknik mühendislerin takdirine bırakılmalıdır. Minimum değerler ve varsayımlar kullanılarak ekonomik ve güvenli şekilde ankraj tasarımı yapılabilir. Her bir ankrajın taşıma kapasitesi, test edilerek doğrulanmalıdır. Küçük çaplı, düz gövdeli ve yerçekimi etkisiyle enjeksiyon edilerek yapılmış bir çok ankraj projesi günümüzde çok sık uygulanmaktadır. Birçok ankraj projesinin benzerliğinden dolayı oldukça tipik bazı ankraj özellikleri dikkat çekmiştir.

- Ankraj tasarım yükü 260 kN ile 1160 kN arasında ise: Bu kapasiteye sahip ankraj tendonları, ağır veya özel ekipmana ihtiyaç duyulmadan kullanılabilir. Ek olarak, germe ekipmanı, mekanik kaldırma ekipmanı yardımı olmadan bir veya iki işçi tarafından kullanılabilir. Tipik olarak yaklaşık 300 mm çapında olan içi boş gövdeli takviyeli ankrajlar haricinde, sondaj deliği çapı genellikle 150 mm'den azdır.
- Toplam ankraj uzunluğu 9-18 m arasında ise: Geoteknik veya geometrik gereksinimler nedeniyle, duvarlar veya iksa yapıları için birkaç ankraj 9 m' den daha az olabilir. elik donatı çubuk için minimum 3 m ve elik halatlar için 4,5 m serbest boy uzunluk unutulmamalıdır. Bu minimum serbest boy uzunlukları, yük aktarımı sırasında oturma kayıplarından kaynaklanan yük kaybı ve öngerme donatısında veya zeminde ön gerilim kayıplarını önlemek için gereklidir.
- Zemin ankraj eğimi 10 ile 45 derece arasında ise: Zemin ankrajları genellikle yatayla 15 ile 30 derece açılarda uygulanır. Ankraj eğimine bakılmaksızın, ankraj kök bölgesi, potansiyel göçme yüzeylerinin arkasında ve gerekli tasarım yükünü taşıyabilecek zemin veya kaya tabakalarına yerleştirilmelidir. Altyapı tesislerinden,

bitişik temellerden, geçiş hakkı kısıtlamalarından, zayıf zemin veya kaya katmanlarından kaçınmak için dik eğimler gerekli olabilir. Ankraj öngerme uygulandıktan sonra oluşan çekme kuvvetlerinden kaynaklanan düşey yükleri en aza indirmek için, ankrajlar mümkün olduğunca yataya yakın yerleştirilmelidir. Ancak özel enjeksiyon teknikleri kullanılarak uygulanan 10 dereceden daha düşük açılarda yerleştirilen ankrajların enjeksiyon işlemi çok yaygın değildir.

Yerçekimi etkisiyle veya basınçla yerleşen ya da tekrarlı enjeksiyon uygulayarak yapılan zemin ankraj tipleri için kök boyları genellikle 4.5 m - 12 m arasında olacak şekilde tasarlanmaktadır. Özel yöntemlerin kullanımı gerekmedikçe, kök boyu uzunluğunun 12 m'den daha fazla tasarlanması ile kök kapasitesinde önemli artışların olmayacağı belirtilmiştir (Sabatini vd. 1999).

T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığının “Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler-2018” yönergesinde ankraj kök boyunun kohezyonlu zeminlerde 10 metreden az olmaması gerektiği ve ankraj kök bölgesinin belirlenen aktif kritik göçme yüzeyinden en az 3 metre gerisinden başlanması ve ankraj kök bölgesi üzerinde en az 5 metre zemin örtü yükünün bulunması zorunluluğu ifade edilmiştir. Ankraj kök boyu için ön tasarım yapılırken, ankraj kök kapasitesi öngörülebilir. Zemin ankrajları için ön tasarım amaçlı (düz gövdeli - küçük çaplı- yerçekimi enjeksiyonlu) bir duvar tasarımında, zeminin cinsine ve zeminin sıklık/kıvamına bağlı olarak kullanılabilir nihai transfer yükleri gösterilmiştir (Tablo 3.3).

**Tablo 3.3:** Zemin ankrajları için ön tasarım amaçlı nihai transfer yükleri (düz gövdeli - küçük çaplı- yerçekimi enjeksiyonlu).

Zemin cinsi	Relatif sıklık/kıvam SPT Aralığı	Tahmin edilen nihai transfer yükü (kN/m)
Kum ve Çakıl	Gevşek (4-10)	145
	Orta sıkı (11-30)	220
	Sıkı (31-50)	290
Kum	Gevşek (4-10)	100
	Orta sıkı (11-30)	145
	Sıkı (31-50)	190
Kum ve Silt	Gevşek (4-10)	70
	Orta sıkı (11-30)	100
	Sıkı (31-50)	130
Düşük plastisiteli silt-kil veya ince mikalı kum veya silt karışımları	Katı (10-20)	30
	Sert (21-40)	60

Kohezyonsuz zeminlerde basınçlı enjeksiyon, harç gövdesine etki eden normal gerilmeleri önemli ölçüde artırır. Ankraj kök bölgesinin etkin çapında da küçük artışlar gözlemlenebilir, ancak kapasite tahminleri kuyu çapına dayanmalıdır. Zemin türüne ve enjeksiyonun uygulanma şekline göre ankraj kök bölgesinin nihai aderans gerilme değerleri değişkenlik göstermektedir. Tablo 3.4’ te ankraj kök bölgesinin zemin ile enjeksiyon ara yüzeyinde oluşan ortalama nihai aderans gerilme değerleri tanımlanmıştır.

**Tablo 3.4:** Ankraj kök bölgesinde zemin ile enjeksiyon ara yüzey nihai gerilme değeri.

Kaya tipi	Kaya		Kohezyonlu Zemin		Kohezyonsuz Zemin	
	Ortalama nihai kök gerilmesi (Mpa)	Ankraj tipi	Ortalama nihai kök gerilmesi (Mpa)	Ankraj tipi	Ortalama nihai kök gerilmesi (Mpa)	
Granit ve bazalt	1.7 – 3.1	Yerçekimi enjeksiyonlu ankrajlar (düz gövdeli)	0.03 – 0.07	Yerçekimi enjeksiyonlu ankrajlar (düz gövdeli)	0.07 – 0.14	
Dolomitik kireçtaşı	1.4 – 2.1	Basınç enjeksiyonlu ankrajlar (düz gövdeli)		Basınç enjeksiyonlu ankrajlar (düz gövdeli)		
Yumuşak kireçtaşı	1.0 – 1.4	• Yumuşak siltli kil	0.03 – 0.07	• İnce-orta kum, orta sıkı-sıkı	0.08 – 0.38	
Arduvaz ve sert şeyl	0.8 – 1.4	• Siltli kil	0.03 – 0.07	• Orta-iri kum (çakıl), orta sıkı	0.11 – 0.66	
Yumuşak şeyl	0.2 – 0.8	• Katı kil, orta ila yüksek plastisiteli	0.03 – 0.10	• Orta-iri kum (çakıl), sıkı-çok sıkı	0.25 – 0.97	
Kumtaşı	0.8 – 1.7	• Çok katı kil, orta ila yüksek plastisiteli	0.07 – 0.17	• Siltli kumlar	0.17 – 0.41	
Ayrıışmış kumtaşı	0.7 – 0.8	• Katı kil, orta plastisiteli	0.10 – 0.25	• Sıkı buzul	0.30 – 0.52	
Kireçtaşı	0.2 – 1.1	• Çok katı kil, orta plastisiteli	0.14 – 0.35	• Kumlu çakıl, orta sıkı-sıkı	0.21 – 1.38	
Ayrıışmış marn	0.15– 0.25	• Çok katı kumlu silt, orta plastisiteli	0.28 – 0.38	• Kumlu çakıl, sıkı-çok sıkı	0.28 – 1.38	
Beton	1.4 – 2.8					

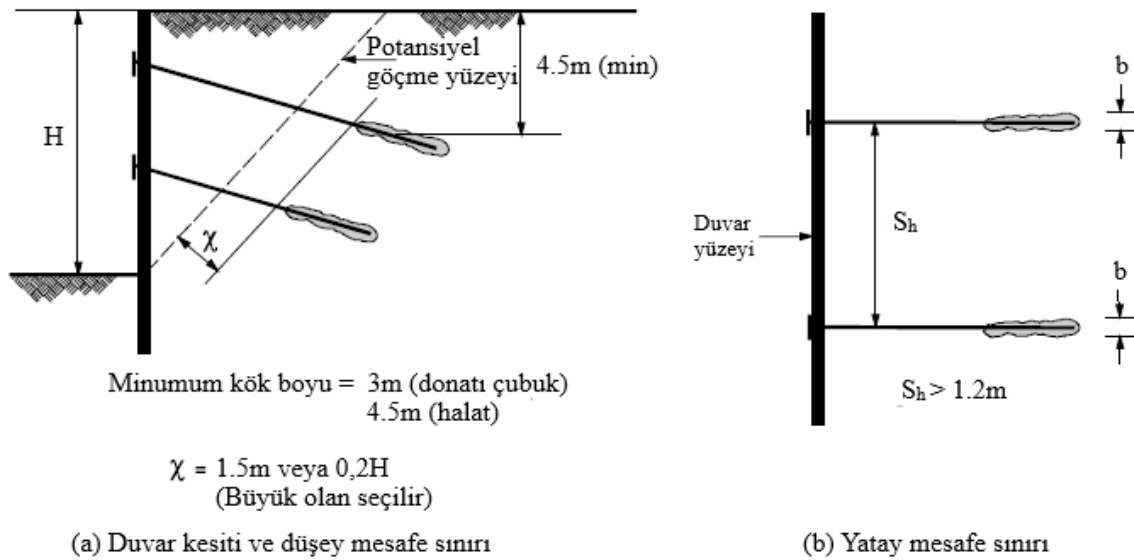
### **Ankrajlar arası mesafelerin belirlenmesi**

Her bir zemin ankrajı, genel olarak komşu ankrajlar arasındaki yatay ve düşey mesafeye dayalı olarak bir yük alanı taşıdığı varsayılarak tasarlanır. Ankraj tendonunun boyutu ve mukavemeti, kuyu delme ve enjeksiyon yöntemleri, ankrajın çapı ve uzunluğu, zemin ankrajının hizmet ömrü boyunca bu yükü taşıyabilmesini sağlamak için belirlenir. Zemin ankrajlarının yatay ve düşey aralıkları, projeye özel gereksinimlere ve aşağıdakileri içerebilecek kısıtlamalara bağlı olarak değişebilir:



- Duvar hareketlerini kontrol etmek için çok rijit bir sistem oluşturma gerekliliği (yakın aralıklı ankrajlar)
- Mevcut yeraltı yapılarının ankrajların yerleşimini ve eğimini etkileyebilmesi
- Tasarım için seçilen düşey duvar elemanlarının tipi

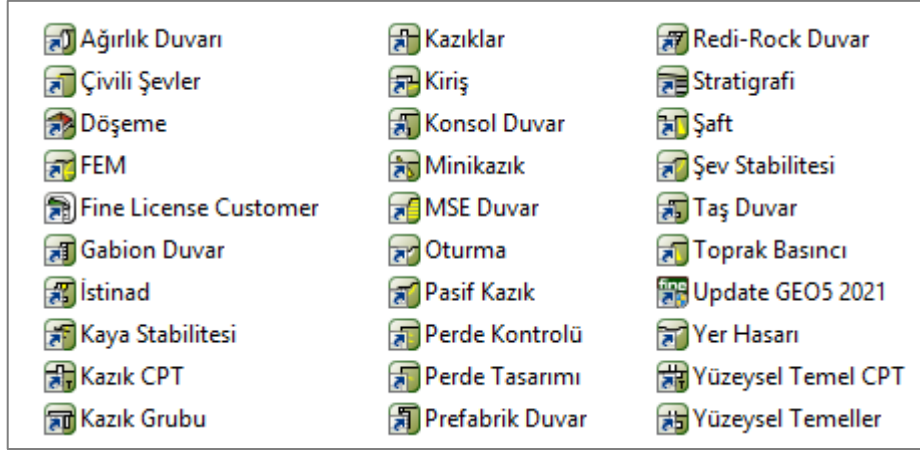
Zemin yüzeyine en yakın üst ankrajın düşey konumu, duvar için izin verilen konsol durumundaki deformasyonları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Konumu, ankraj yüklemeye deneyi sırasında, tutulan zeminin pasif kapasitesini aşma potansiyelini en aza indirecek şekilde belirlenmelidir. Yükleme deneyi sırasında, kalıcı ankrajlar tasarım yükünün %133'üne yüklenir. Böylece duvarın tutulan zemine doğru hareketi gözlenir. En üstteki ankrajda, sürüşarj veya heyelan gibi büyük yüklerin etkisi altında, tasarım yükü büyükse veya zemin yetersiz ise yüklemeye deneyleri sırasında zeminin pasif direncinin aşılması olasıdır. Pasif direnç aşılsa, duvarın zemine doğru aşırı hareketi sonucu eğilme ve çatlaklar oluşur. Basınçlı enjeksiyonlu ankrajların montajı sırasında harç sızıntısını ve büyük enjeksiyon basınçlarından kaynaklanan zemin yüzeyinde kabarmayı önlemek için, en üst ankrajın kök bölgesinin merkezi ile zemin yüzeyi arasındaki örtü yükü mesafesi min. 4,5 m olmalıdır. Komşu ankrajların yatay ile mesafeleri ( $S_h$ ) min 1.2 m' den büyük olmalıdır. (Şekil 3.16) (Sabatini vd. 1999).



**Şekil 3.16:** Zemin ankrajları için (a) düşey ve (b) yatay mesafe sınırları.

## 4. GEO5 PROGRAMI İLE UYGULAMA

Geo5 programı çalışma prensibi limit denge analizlerine dayanmakta olup, yüzeysel temeller, derin temeller, zemin çivili şevler, MSE duvarlar, zemin ankrajlı perde duvarlar gibi birçok geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan yazılım programıdır. Şekil 4.1’ de Geo5 yazılım programının farklı geoteknik alanlarda uygulanma çeşitliliği gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Geo5 (2021) Uygulamaları.

Çalışmada, duvar yüksekliği 9 metre olan çok sıra ankrajlı diyafram duvar tasarlanmıştır. Geo5 (2021) Perde Kontrolü ve Perde Tasarımı bileşenleri kullanılmıştır.

### 4.1 Geo5 Perde Tasarımı Uygulaması

Perde Tasarımı bileşeni kullanarak limit denge analizlerine dayalı ankraj kuvvetleri ile duvar gömülme derinliği hesaplanmış ve şev stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Güvenlik Katsayısı (ASD) tahkik yöntemi kabul edilmiştir.

#### 4.1.1 Geo5 Perde Tasarımı-Veri Girişi

Ankrajlı diyafram duvar, orta katı kıvamlı “CL-CI (Düşük veya orta plastiteli kil)” doğal zemininde uygulanmıştır. Doğal zeminin malzeme özellikleri Tablo 4.1 gösterilmiştir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 2,5 metre derinliğindedir. Yüzeyde trafik yükü olarak, 20 kN/m<sup>2</sup> büyüklüğünde ve 9 m uzunluğunda sürşarj yükü varsayılmıştır.

**Tablo 4.1:** Geo5 perde tasarımı programında zemin malzeme özellikleri.

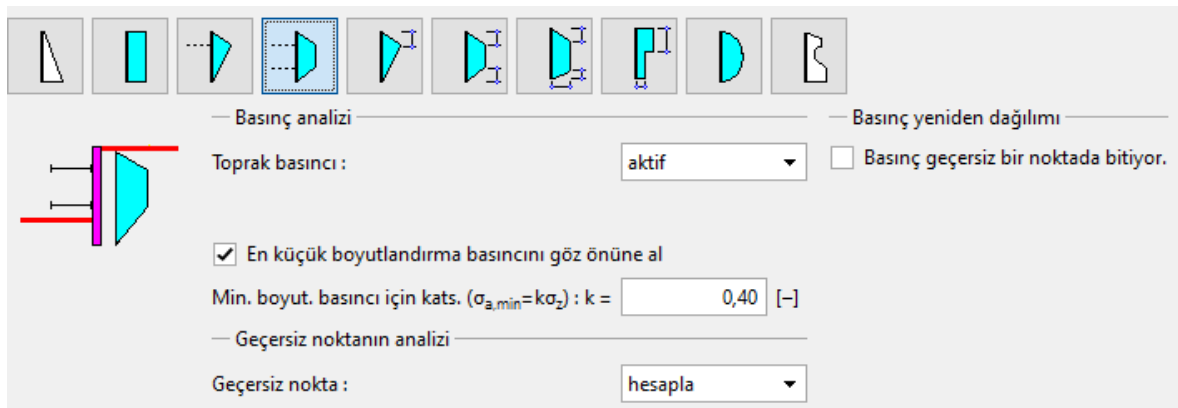
Zemin sınıfı	Kohezyon $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	İçsel Sürtünme Açısı, $\phi'$ (°)	Zemin-duvar sürtünme açısı, $\delta$ (°)	Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı, $\nu'$
CL	12	19	12	21	0,4

Ankrajlar, uygulama derinliği, açısı, serbest boyu, kök boyu ve yatay aralık parametreleri ile tanımlanmıştır. H=9 m kazı derinliğindeki ankrajlı duvar için 3 adet ankraj belirlenmiş ve uygulama derinlikleri 2,5 m, 5 m ve 7,5 m olarak seçilmiştir. Ankraj açısı 15° olarak kabul edilmiştir. Ankraj serbest boyları, sırasıyla minimum olarak 7,5 m, 6 m ve 4,5 m olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Ankraj kök boyları 10 m olarak belirlenmiştir. Ankrajlar arası yatay mesafe 1,3 m seçilmiştir.

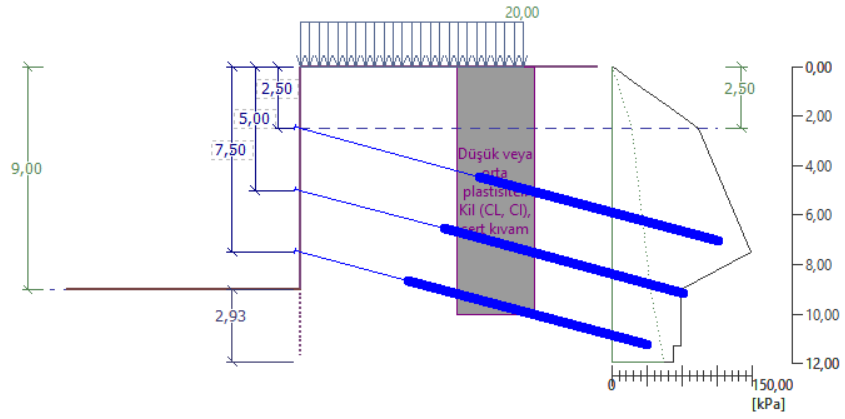
**Tablo 4.2:** Geo5 perde tasarımı programında zemin ankraj parametreleri.

Ankraj Parametreleri	Ankraj No:1	Ankraj No:2	Ankraj No:3
Uygulama Derinliği (m)	2,5	5	7,5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	7,5	6	4,5
Kök boyu (m)	10	10	10
Yatay aralık (m)	1,3	1,3	1,3

Çok sıra ankrajlı perde için yanal zemin basınç diyagramı Şekil 4.2' de gösterildiği gibi seçilmiş ve bu doğrultuda hesaplanan yanal basınç dağılımı Şekil 4. 3' de sunulmuştur.



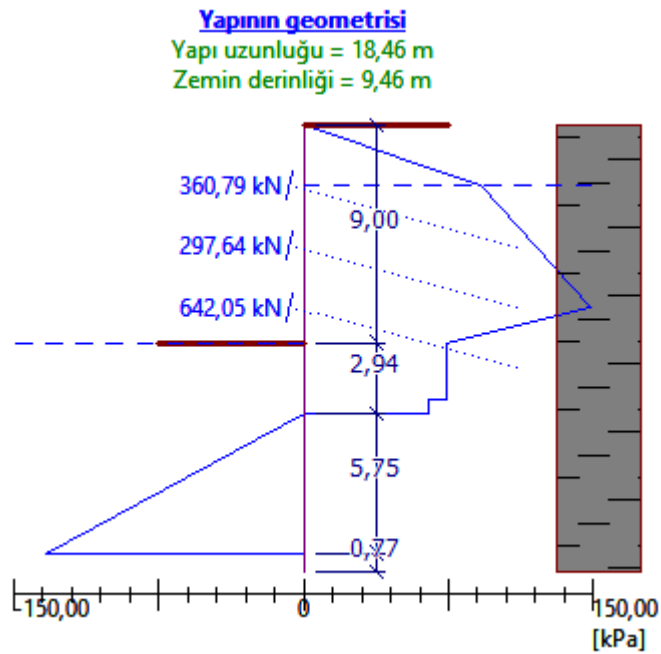
**Şekil 4.2:** Geo5 perde tasarımı yanal zemin basınç modu.



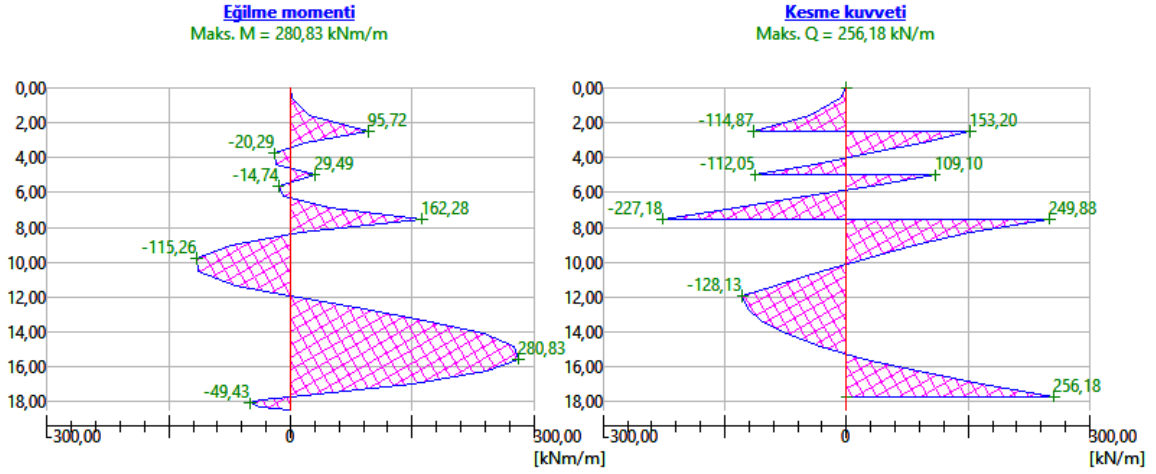
Şekil 4.3: Geo5 perde tasarımında yanal zemin basınç dağılımı.

#### 4.1.2 Geo5 Perde Tasarımı-Analiz

Seçilen ön boyutlar ile gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen, duvar gömülme derinliği ve ankraj kuvvetleri Şekil 4.4' de, duvardaki eğilme momenti ve kesme kuvvetleri diyagramları ise Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Geo5 perde tasarımı programında duvar gömülme derinliği ve ankraj kuvvetleri.



**Şekil 4.5:** Geo5 perde tasarımı programında eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramları.

Belirlenen geometride şev stabilitesi, Bishop Yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve güvenlik sayısı  $FS=1,38 < 1,50$  değeri ile stabilitenin yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 9,46 m olarak hesaplanmış olan gömülme derinliği 11 metre varsayılarak şev stabilitesi tekrarlanmış ve güvenlik sayısı  $FS=1,51 > 1,50$  değeri ile yeterlilik sağlanmıştır. Sonuç olarak toplam yapı uzunluğu  $H=20$  m olarak belirlenmiştir.

## 4.2 Geo5 Perde Kontrolü Uygulaması

Perde kontrolü bileşeni uygulamanın aşamalı inşaat olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu bileşen ile, duvar deplasmanları hesaplanmış ve güvenlik katsayısı (ASD) yaklaşımı ile içsel stabilite, şev stabilitesi ve ankraj doğrulama tahkikleri yürütülmüştür.

### 4.2.1 Geo5 Perde Kontrolü-Veri Girişi

Ankrajlı diyafram duvar uygulaması sahada da aşamalı olarak inşa edildiğinden her bir aşama kendi içerisinde tüm tahkikleri sağlamalı ve güvenli olarak tasarlanmalıdır. Perde tasarımı bileşeni ile toplam 20 metre uzunluğunda hesaplanmış olan 0,50 m kalınlığındaki duvarın inşası 6 aşamada tamamlanmıştır. Perde kontrolü bileşeni için zemin parametrelerine ek olarak “elastisite modülü” ve “yapısal dayanım katsayısı” eklenmiş (Tablo 4.3) ve yatak katsayısı için “otomatik iterasyon” kabulü yapılmıştır.

**Tablo 4.3:** Geo5 Perde kontrolü programında zemin malzeme özellikleri.

Zemin sınıfı	Kohezyon $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	İçsel Sürtünme Açısı, $\phi'$ (°)	Zemin-duvar sürtünme Açısı, $\delta$ (°)	Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı, $\nu'$	Elastisite Modülü, E (MPa)	Yapısal Dayanım Katsayısı
CL	12	19	12	21	0,4	4,5	0,1

Ankrajlar, Geo5 veri tabanından önerilmiş donatı tipindeki 26.5 mm çaplı “DYWIDAG S950/1050 D26.5” modeli olarak seçilmiştir. Seçilen donatı tipi için belirlenen sıyırılma dirençleri Şekil 4.6’ de gösterilmiştir. Bu aşamada kenetlenme mukavemeti Tablo 3.4 referansına dayalı olarak belirlenmiştir.

— Çekme dayanımı —  
giriş R<sub>t</sub> = 578,00 [kN]  
— Sıyırılma direnci (zemin) —  
çevre sürtünmesinden hesapla  
Kök bölgesinin çapı : d = 150,0 [mm]  
Kenetlenme mukavemeti : f = 130,00 [kPa]  
— Sıyırılma direnci (enjeksiyon) —  
beton mukavemetinden hesapla  
Beton yapı standardı : EN 1992-1-1 (EC2)  
Basınç altında beton mukavemeti : f<sub>ck</sub> = 30,00 [MPa]  
Kohezyon katsayısı : η<sub>1</sub> = 0,70 [-]

**Şekil 4.6:** Geo5 Perde kontrolü programında ankraj özellikleri-1.

#### 4.2.2 Geo5 Perde Kontrolü-Analiz

Bu aşamada, ankrajlı diyafram duvar için deformasyonlar belirlenmekte, içsel stabilite, şev stabilitesi ve ankrajların taşıma kapasiteleri için doğrulamalar yapılmaktadır. Çok sıra ankrajlı diyafram duvar inşaat aşamaları toplam 6 kademe tamamlanmıştır. Yüzeiden 2.5 m derinliğinde olan yeraltı su seviyesi, her bir kazı aşamasında kazı derinliği kadar indirilmiştir. İnşaat aşamaları aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir.

- 1. İnşaat Aşaması;** İlk 3 metre kazısı gerçekleştirilmiştir.
- 2. İnşaat Aşaması;** Birinci ankraj 2.5 m derinliğinde uygulanmıştır.

3. **İnşaat Aşaması;** Kazı derinliği 6 m derinliğe indirilmiştir.
4. **İnşaat Aşaması;** İkinci ankraj 5 m derinliğinde uygulanmıştır.
5. **İnşaat Aşaması;** Kazı derinliği 9 m derinliğe indirilmiştir.
6. **İnşaat Aşaması;** Üçüncü ankraj 7,5 m derinliğinde uygulanmıştır.

Analizlerin 2. İnşaat aşamasında, ankraj köklerinin zeminden sıyrılma direnci yetersiz kalmış ve bu doğrultuda kök boyu 12 m ye çıkarılarak stabilite sağlanmıştır. Diğer yandan 3. İnşaat aşamasından itibaren perde tasarımı programında belirlenmiş olan donatı serbest boyları için içsel stabilite sağlanamadığından kademeli olarak serbest boylar arttırılmıştır (Tablo 4.4). Son inşaat aşamasında ise ankraj doğrulama tahkikleri yetersiz kalmıştır. Bu sebeple çekme dayanımını arttırmak amacıyla donatı çapı 36 mm olarak seçilmiş ve zeminden sıyrılma direncinin karşılanması amacıyla da kök bölgesinin çapı 200 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.7).

**Tablo 4.4:** Geo5 perde kontrolü programında zemin ankraj parametreleri.

Ankraj Parametreleri	Ankraj No:1	Ankraj No:2	Ankraj No:3
Uygulama Derinliği (m)	2,5	5	7,5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	16	15	14
Kök boyu (m)	12	12	12
Yatay aralık (m)	1.3	1,3	1,3

— Çekme dayanımı —

giriş R<sub>t</sub> = 1057,00 [kN]

---

— Sıyrılma direnci (zemin) —

çevre sürtünmesinden hesapla

Kök bölgesinin çapı : d = 200,0 [mm]

Kenetlenme mukavemeti : f = 130,00 [kPa]

---

— Sıyrılma direnci (enjeksiyon) —

beton mukavemetinden hesapla

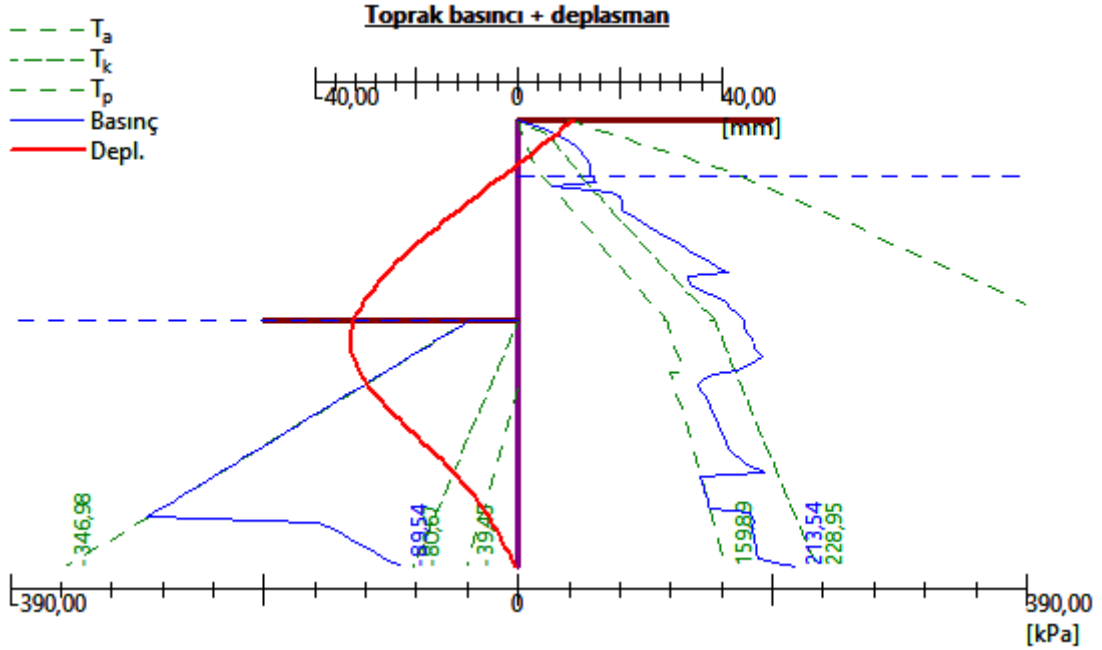
Beton yapı standardı : EN 1992-1-1 (EC2)

Basınç altında beton mukavemeti : f<sub>ck</sub> = 30,00 [MPa]

Kohezyon katsayısı : η<sub>1</sub> = 0,70 [-]

**Şekil 4.7:** Geo5 Perde kontrolü programında ankraj özellikleri-2.

Analiz sonuçlarına ait deformasyonlar Şekil 4.8’ de sunulmuştur. Tüm tahkiklerin güvenli tarafta kaldığı duruma ait sonuçlar Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 da, içsel stabilite ve taşıma kapasitesi doğrulamaları cinsinden gösterilmiştir. Şev stabilitesi için güvenlik katsayısı FS=1.66 elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Geo5 perde kontrolü programı analiz sonuçları; deformasyonlar, yanal zemin basınçları.

#### Ankrajların içsel stabilitesi - kısmi sonuçlar

$E_A = 1089,49 \text{ kN/m}$   $\delta = 32,51^\circ$

Çukurun  $H_0$  altındaki teorik temel derinliği = 10,01 m

Sıra ankrajlar	$E_{A1}$ [kN/m]	$\delta_1$ [°]	G [kN/m]	C [kN/m]	$\theta$ [°]	Dahil Ankraj sıraları	Q [kN/m]	F [kN/m]	$FK_{MAX}$ [kN]
1	457,42	71,83	3890,78	286,13	26,98		3497,60	565,13	734,67
2	521,36	63,26	3972,15	264,27	22,92	1(9%)	3574,47	683,80	888,93
3	613,90	55,28	4029,70	243,96	18,15	1(17%),2(9%)	3644,04	817,61	1062,89

#### Ankrajların içsel stabilite doğrulaması

No.	Ankraj kuvveti [kN]	Maks. izin ver. ankraj kuv. [kN]	Kats. güvenlik
1	361,00	734,67	2,04
2	298,00	888,93	2,98
3	643,00	1062,89	1,65

Kesin ankraj sırası : 3

Gerekli güvenlik kats.  $FS = 1,50 < 1,65 = FS_{minim}$ .

İç stabilite tüm tahkiki Yeterli

Şekil 4.9: Geo5 perde kontrolü programında ankrajların içsel stabilite tahkiki.



Derinlik z [m]	Ad	Maks. kuvvet F [kN]	Ankraj dayanımı R <sub>c</sub> [kN]	Taşıma kapasiteleri		Kullanım [%]	Doğrulama
				Sıyırma direnci (zemin) R <sub>e</sub> [kN]	Sıyırma direnci (enjeksiyon) R <sub>c</sub> [kN]		
2,50	DYWIDAG S950/1050 D36	361,00	704,67	653,45	1027,30	55,25	yeterlidir
5,00	DYWIDAG S950/1050 D36	298,00	704,67	653,45	1027,30	45,60	yeterlidir
7,50	DYWIDAG S950/1050 D36	643,00	704,67	653,45	1027,30	98,40	yeterlidir

**Şekil 4.10:** Geo5 perde kontrolü programında ankraj taşıma kapasitesi tahkikleri.

### 4.3 Geo5 Uygulamasında Farklı Zemin Sınıflarının Etkisi

Geo5 örnek uygulaması, kazı derinliği, iksa sistemi, ankraj uygulama derinlikleri ve ankraj açısı sabit tutularak farklı zemin sınıfları için tekrarlanmış ve tasarım boyutları düzenlenmiştir. Analizlerde kullanılan zeminler için malzeme parametreleri Tablo 4.5 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.5:** Farklı zemin sınıfları için Geo5 programı malzeme parametreleri.

Zemin sınıfı	Kohezyon c' (kN/m <sup>2</sup> )	İçsel Sürtünme Açısı, $\phi'$ (°)	Zemin-duvar sürtünme Açısı, $\delta$ (°)	Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı, $\nu'$	Elastisite Modülü, E (MPa)	Yapısal Dayanım Katsayısı
CL	12	19	12	21	0,4	4,5	0,1
ML	12	21	14	20	0,4	4	0,2
SC	8	27	18	18,5	0,35	8	0,3
SM	5	29	20	18	0,3	10	0,3

Orta katı kıvamlı CL sınıfı doğal zemin için çözülmüş olan sistemde, doğal zemin sınıfının sırasıyla ML (orta katı), SC (orta sıkı) ve SM (orta sıkı) olarak değiştirilmesi durumunda, ankraj tasarım boyutlarındaki değişim incelenmiştir. Perde tasarımı programında, duvar gömülme derinliklerinde toplamda 3 m lik bir fark olduğu ve ankraj kuvvetlerinin de beklenildiği gibi zemin rijitliklerinin artışı doğrultusunda azaldığı gözlenmiştir (Tablo 4.6).

**Tablo 4.6:** Farklı zeminler için Geo5 Perde tasarımı programı analiz sonuçları.

	CL-orta katı	ML-orta katı	SC-orta sıkı	SM-orta sıkı
Duvar Gömülme derinliği	11 m	10 m	8 m	8 m
1. nolu ankraj kuvveti	360 kN	295 kN	213 kN	207 kN
2. nolu ankraj kuvveti	297 kN	259kN	222 kN	214 kN
3. nolu ankraj kuvveti	642 kN	565 kN	436 kN	433 kN

Perde kontrolü programı ile yürütülen tasarımlarda (Tablo 4.7), belirlenen farklı zemin koşulları için değişen rijitlikler ile ankraj kök boylarında toplamda 2 m ve ankraj serbest boylarında ise toplamda 5 m fark olduğu söylenebilir. Benzer şekilde ankraj kök bölgesi çapı ve ankraj donatı çapında da stabilite için gerekli boyutlarda değişim gözlenmektedir. Her bir zemin sınıfı için belirlenen bu tasarım boyutları ile deplasmanlar ve stabilite tahkiklerinin sonuçları irdelenmiştir. Duvar deplasmanları, beklenildiği üzere artan zemin rijitlikleri ile azalmıştır. Ankrjaların içsel stabilite doğrulamaları ve ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdeleri için kritik olan 3. nolu ankraj dikkate alınmıştır. Artan zemin rijitliği ile azalan tasarım boyutlarına rağmen, ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdelerinde bir miktar düşüş ve ankraj içsel stabilite doğrulaması güvenlik katsayılarında da bir miktar artış mevcuttur. Şev stabilite güvenlik katsayılarında ise zemin rijitliği ile ters orantılı bir fark gözlenmektedir. Kohezyonu yüksek olan zemin sınıflarında şev stabilitesinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

**Tablo 4.7:** Farklı zeminler için Geo5 Perde kontrolü programı analiz sonuçları.

		CL	ML	SC	SM
		orta katı	orta katı	orta sıkı	orta sıkı
Tasarım boyutları	Ankraj kök boyu	12 m	12 m	10 m	10 m
	1. nolu ankraj serbest boyu	16 m	14 m	11 m	11 m
	2. nolu ankraj serbest boyu	15 m	13 m	10 m	10 m
	3. nolu ankraj serbest boyu	14 m	12 m	9 m	9 m
	Ankraj kök bölgesi çapı	200 mm	200 mm	150 mm	150 mm
	Ankraj donatısı çapı	36 mm	36 mm	32 mm	32 mm
Tahkikler	Duvarın maksimum yatay deplasmanı	33 mm	22.1 mm	12.2 mm	13 mm
	3. nolu ankraj-içsel stabilite doğrulaması-FS	1.65	1.72	1.70	1.76
	3. nolu ankraj-taşıma kapasitesi kullanım yüzdesi	% 98	% 87	% 82	% 81
	Şev Stabilitesi-FS	1.66	1.66	1.63	1.62

Bu analizler ile zemin sınıfının belirlenmesi aşamasındaki yetersizlik ve belirsizlik doğrultusunda karşılaşılabilecek zemin sınıfındaki farkların, tasarım boyutlarına ve sistemin stabilitesine nasıl etki edebileceği irdelenmiştir. CL ve SC zeminleri kendi arasında karşılaştırıldığında; gömülme derinliklerinde 3 m ve ankrjlara gelen kuvvetlerde %25-%40 arasında değişen oranlarda fark belirlenmiştir. Ayrıca stabilite için sağlanmasında, ankraj serbest boylarında 5 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm lik farklar elde edilmiştir. ML ve SM zemin sınıfları

için; gömülme derinliklerinde 2 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %18-%30 oranlarında fark belirlenmiştir. Ankraj serbest boylarında 3 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm lik fark stabilitenin sağlanması için gerekli olmuştur.

Bu değerlendirmeler göz önünde bulundurularak, zemin sınıfı belirlerken arazi ve laboratuvar çalışmalarında çok hassas davranılması gerekliliği ifade edilebilir. Zemin sınıfı belirleme çalışmalarında olası hatalar, tasarımın yetersiz kalmasına ya da ekonomik olmamasına yol açabilecektir. Tasarımın uygulanacağı sahalar tek tip zeminden oluşmayabilir bu ayrıntıları da kapsayacak şekilde arazi çalışmalarına ve tasarıma etkin olacak zemin sınıfına karar verirken özen gösterilmelidir.

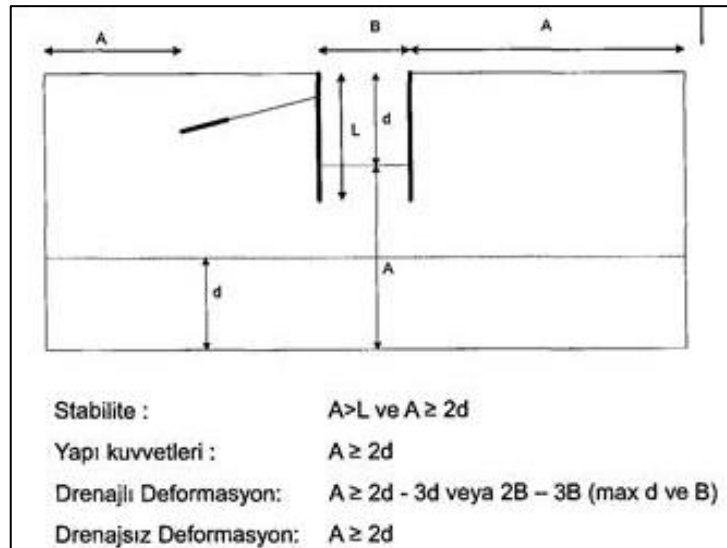
## 5. PLAXIS 2D PROGRAMI İLE UYGULAMA

Plaxis 2D, geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımda ihtiyaç duyulan şekil değiştirme ve stabilize analizlerini gerçekleştirebilecek şekilde geliştirilmiştir. Plaxis ile analiz edilmek istenilen bir problemin ilk olarak sayısal modelini oluşturmak gerekmektedir. Sayısal model, genellikle yarı sonsuz olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış durumunu ifade etmektedir. Sayısal modeli elde etmek için noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan bir grafik model oluşturulur. Sayısal model, farklı zemin tabakalarını, yapısal elemanları, inşa aşamalarını ve ortamdaki tüm yükleri ve sınır koşullarını kapsamalıdır. Yarı sonsuz problemlerde modelin sınırları sonuçları etkilemeyecek boyutlarda seçilmelidir.

### 5.1 Plaxis 2D Uygulama

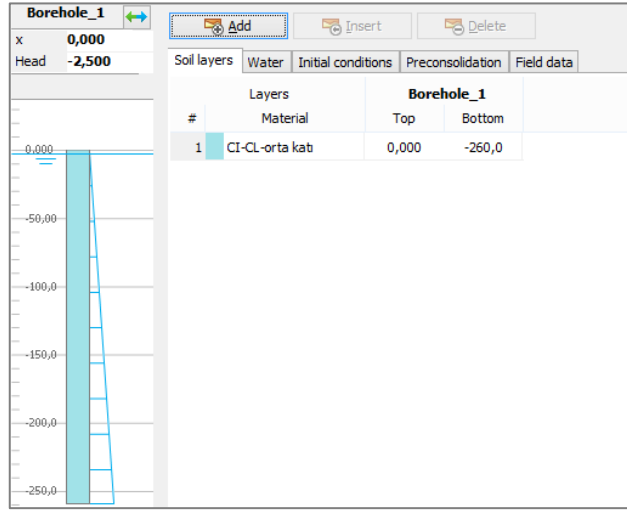
#### Model-1

Bu bölümde, Plaxis 2D bilgisayar programı ile ilk olarak gerçekleştirilen uygulama, Geo5 programı kullanılarak yapılan analizlerin karşılaştırılması amacıyla orta plastisiteli “CL-CI” sınıfı homojen tek bir zemin tabakası için gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın geometrik sınırları, Şekil 5.1’ de gösterilen referans doğrultusunda; yatay uzaklık  $x_{max}=320$  m, düşey derinlik  $y_{min}=-260$  m olarak belirlenmiştir (Berilgen, 2011).



Şekil 5.1: Sonlu eleman analizleri için geometrik sınır şartları.

Tasarımda zeminin tabakalanması ve yeraltı su seviyesi Şekil 5.2’ de gösterildiği şekliyle sondaj verisi olarak girilmiştir. Homojen tek bir tabaka olarak varsayılan, CL-CI sınıfı zemin ortamında, yeraltı suyu, -2,5 m seviyesindedir. Zemin malzeme modeli “Mohr-Coulomb (MC)” olarak varsayılmış ve malzeme özellikleri için drenajlı efektif parametreler kullanılmıştır (Tablo 5.1).



Şekil 5.2: Plaxis programında zemin profili (Model-1).

Tablo 5.1: Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-1).

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL (orta katı)	-	-
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	-	-
Drenaj tipi	Drenajlı		
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m <sup>3</sup>
Elastisite modülü	$E'$	4500	kN/m <sup>2</sup>
Poisson oranı	$\nu'$	0,4	-
Kohezyon	$c'$	12	kN/m <sup>2</sup>
İçsel sürtünme açısı	$\phi'$	19	°
Dilatasyon açısı	$\Psi$	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	$R_{inter}$	0,65	-

Perde duvar ve zemin arasındaki etkileşim,  $R_{inter}$  ara yüzey dayanım azaltma katsayısı ile ifade edilir. Bu katsayı, kazı aşamaları ile duvar ve ankraj imalatı esnasında, yapı-zemin etkileşimindeki mukavemet kaybını ifade eder. İnşaat uygulamalarındaki olası hataları hesaba katmaktadır. Diyafram duvar 0,5 m kalınlığında “Plate” elaman olarak

tanımlanmış, C25 beton sınıfı mekanik özellikleri kullanılmıştır. Diyafram duvar malzeme özellikleri Tablo 5.2’ de gösterilmiştir.

**Tablo 5.2:** Plaxis programında diyafram duvar malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Zımbalamanın önlenmesi	-	Evet	-
Normal rijitlik	EA	$15 \times 10^6$	kN/m
Eğilme rijitliği	EI	$312 \times 10^3$	$\text{kNm}^2/\text{m}$
Ağırlık	w	2	$\text{kN/m}^3$
Poisson oranı	$\nu'$	0,15	-

Ankraj serbest boyu ve kök bölgesi için tanımlanan malzeme özellikleri Tablo 5.3 ve 5.4 de gösterilmiştir. Ankraj serbest boyu “node to node anchor” yapısal elemanı ve ankraj kök bölgesi “embedded beam row” yapısal elemanı ile modellenmiştir. Ankraj kökünde kullanılacak harcın elastisite modülü  $E=10000$  MPa varsayılmıştır. Ankraj kök çevresi direnci, Tablo 3.4 referans alınarak 0,13 Mpa seçilmiş ve bu değer kök çevresi ile çarpılarak, birim uzunluğa gelen kuvvet cinsinden 80 kN/m olarak hesaplanmıştır.

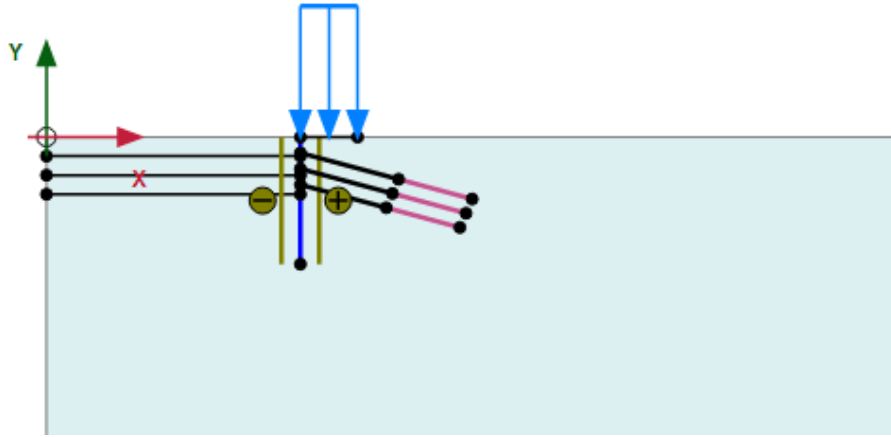
**Tablo 5.3:** Plaxis programında ankraj serbest boyu için malzeme özellikleri

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Normal rijitlik	EA	$203.5 \times 10^5$	kN
Ankrajlar arası yatay mesafe	$L_s$	1,3	m

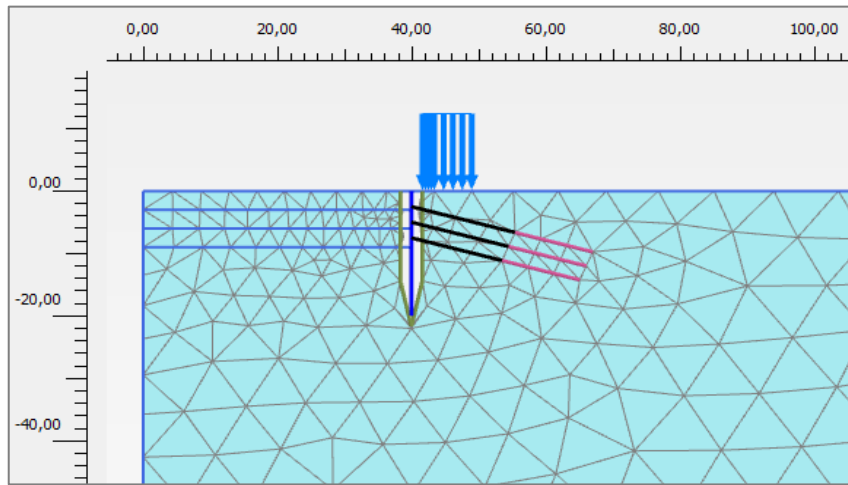
Malzeme özelliklerinin tanımlanmasının ardından, perde duvar, ankraj serbest boyları, ankraj kök bölgesi ve kazı aşamaları için hesaplanmış koordinatlar girilerek geometrik model oluşturulmuştur. Ankrajların uygulama açısı  $15^\circ$  ve uygulama derinlikleri sırasıyla 2,5 m, 5 m, 7,5 m şeklindedir. Aşamalı inşaat kazı derinlikleri 3 m, 6 m ve 9 m seviyelerindedir. Yüzeyde sürşarj yükü,  $20 \text{ kN/m}^2$  büyüklüğünde ve 9 m uzunluğunda uygulanmıştır. Ankrajlı duvar geometrik modeli Şekil 5.3’ de gösterilmiştir. Geometrik modelin sonlu elemanlar ağı, “orta” büyüklükte üçgen elemanlar seçilerek oluşturulmuştur (Şekil 5.4).

**Tablo 5.4:** Plaxis programında ankraj kök bölgesi için malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Elastisite modülü	E	$10 \cdot 10^6$	$\text{kN/m}^2$
Birim ağırlık	$\gamma$	0	$\text{kN/m}^3$
Kiriş tipi	-	Öntanımli	-
Öntanımli kiriş tipi	-	Masif dairesel kiriş	-
Çap	D	0,2	m
Yatay mesafe	$L_s$	1,3	m
Eksenel çevre direnci	$T_s$	80	$\text{kN/m}$
	$T_e$	80	$\text{kN/m}$
Yanal çevre direnci	-	Sınırsız	-
Uç direnci	$F_{\max}$	0	$\text{kN}$
Ara yüzey rijitlik faktörü	-	Varsayılan değer	-



**Şekil 5.3:** Plaxis programında ankrajlı duvar geometrik modeli



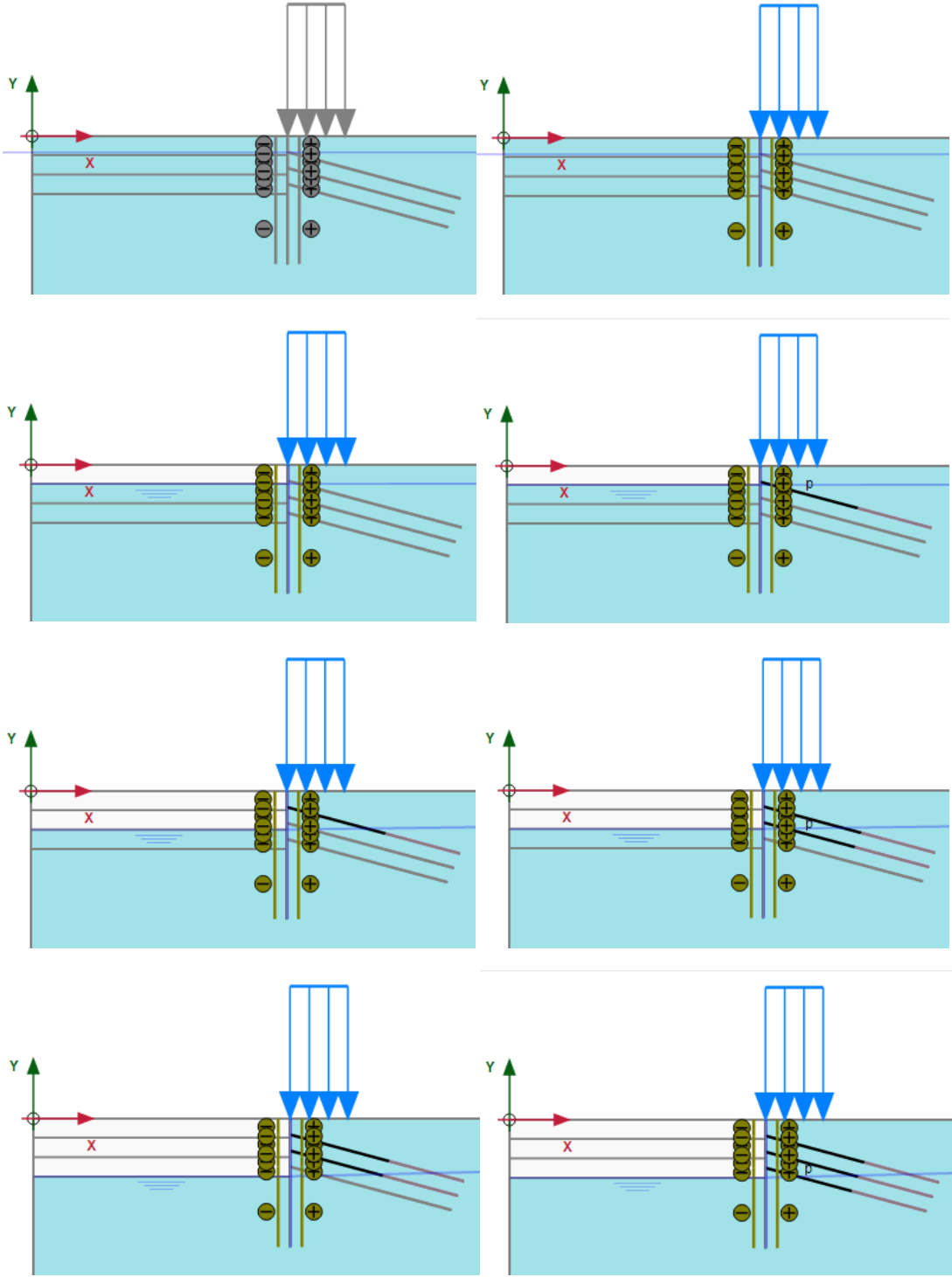
**Şekil 5.4:** Plaxis programında geometrik modelin sonlu elemanlar ağı

Geometrik modeli ve sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş modelin aşağıda belirtilen hesap adımları 7 aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.5). Her kazı aşamasında, yeraltı su seviyesi düşürülmüştür.

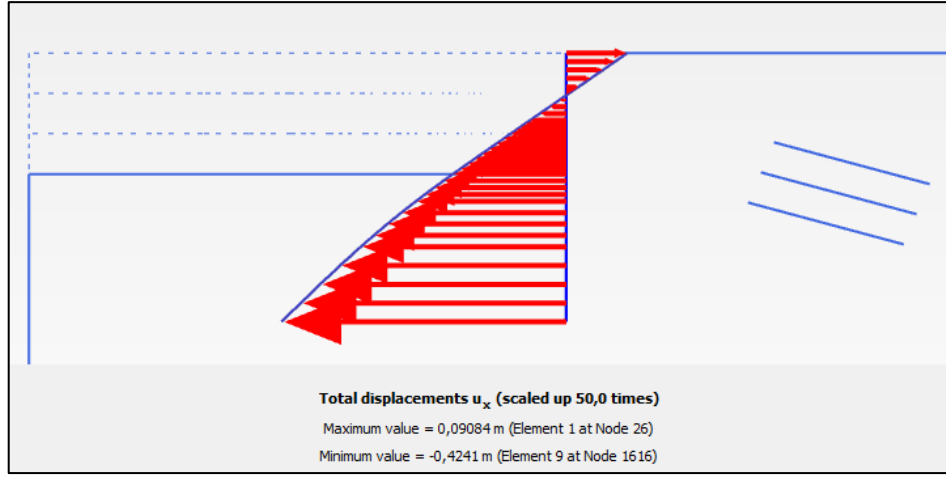
- Başlangıç aşaması: plaxis tarafından oluşturulmaktadır.
- 1.Aşama: Sürşarj yükünün ve duvarın aktif edilmesi
- 2.Aşama: İlk 3 m kazı aşaması
- 3.Aşama: Birinci ankrajın uygulanması ve öngerme yapılması
- 4.Aşama: Kazı seviyesinin 6 m ye indirilmesi
- 5.Aşama: İkinci ankrajın uygulanması ve öngerme yapılması
- 6.Aşama: Nihai kazı seviyesine inilmesi
- 7.Aşama: Üçüncü ankrajın uygulanması ve öngerme yapılması

Aşamalı inşaat analizleri sonucu, duvardaki maksimum yatay deplasmanlar incelenmiştir. Duvardaki yatay deplasmanın maksimum değeri  $u_{x-maks.}=424,1$  mm elde edilmiştir (Şekil 5.6). Bu değer, Geo5 programında hesaplanan maksimum yatay deplasman ( $u_{x-maks.}=33$  mm) ile karşılaştırıldığında hem sayısal olarak hem de maksimum deplasmanın yeri açısından büyük farklar olduğu görülmektedir. Ayrıca Geo5 programında belirlenen maksimum yatay deplasman izin verilebilir aralıkta kalırken, Plaxis programında belirlenen deplasmanların izin verilebilir bir aralıkta olmadığı belirlenmiştir. İzin verilebilir deplasmanlar, proje kısıtlamalarına bağlı olarak, duvar ve zemin hareketlerinin kontrolü açısından değişiklik göstermektedir (Sabatini vd. 1999). Örneğin, granüler zeminlerde inşa edilen ve yakınında herhangi bir yapı bulunmayan kalıcı ankrajlı duvarlar, hareketler açısından çok az endişe yaratır. Bununla birlikte, büyük bir kentsel alanda bulunan geçici bir kazı destek sistemi için duvar ve zemin hareketleri daha önemli olabilir. Duvar ve zemin hareketlerinin tahminleri tipik olarak geçmiş performans verilerinden geliştirilen yarı deneysel ilişkiler kullanılarak yapılır. Kumlarda ve sert killerde inşa edilen ankrajlı duvarlar için maksimum yanal duvar hareketleri, kazı derinliğine (H) kıyasla yaklaşık %0,2 H ile %0,5 H arasında kabul edilebilir seviyelerdedir. Bu doğrultuda H=9 m' lik kazı derinliğine sahip uygulamamız için izin verilen maksimum yanal hareket sınırı  $0,05H=45$  mm hesaplanmıştır.





Şekil 5.5: Plaxis programında aşamalı inşaat adımları.



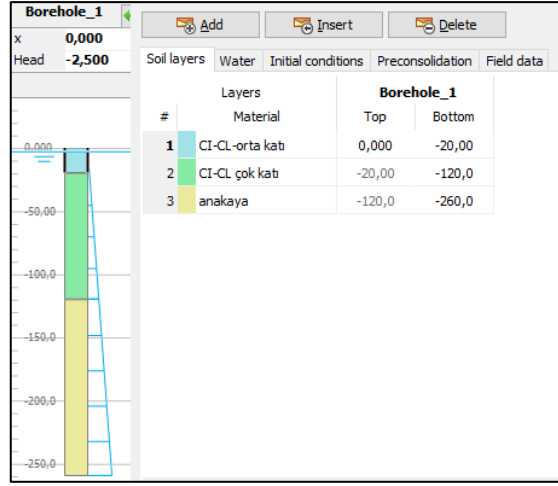
**Şekil 5.6:** Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-1).

## 5.2 Plaxis Programında Zemin Profili ve Malzeme Modelinin Etkisi

Bu iki bilgisayar programı ile yürütülen analiz sonuçlarının farklı olmasının sebepleri şu şekilde yorumlanabilir. Plaxis programındaki sınır şartı koşullarında, homojen tek tabaka zemin varsayımıyla, derinlik artışı ile rijitlik artışının gözönüne alınmamış olması ve Mohr-Coulomb malzeme modelinin yetersiz kalması, modelin ve analiz sonuçlarının gerçekçilikten uzaklaşmasına neden olmuştur. Çalışmanın bu aşamasında tasarımın daha gerçekçi olabilmesi için, zeminin derinlikle uyumlu olacak şekilde tabakalı olarak tasarlandığı ve/veya zemin modelinin “HS-Pekleşen zemin” olarak seçildiği farklı modeller için Plaxis analizleri tekrarlanmıştır.

### Model-2

Homojen 260 m derinliğinde tek bir zemin tabakası tanımlamanın gerçekçilikten oldukça uzak bir modelleme olacağı ifade edilebilir. Model-2 uygulamasında, “orta katı” kıvamdaki CI-CL sınıfı zemin için 20 m’ den sonra kıvam “çok katı” kabul edilmiş ve 120 m derinliğinde anakaya varsayımı yapılmıştır (Şekil 5.7). Zemin malzeme özellikleri Tablo 5.5’ de gösterilmiştir. Diğer tüm aşamalar Model-1 ile aynıdır.

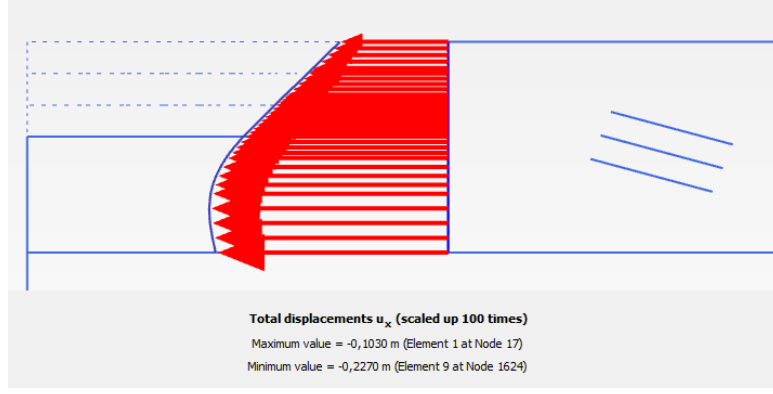


Şekil 5.7: Plaxis programında zemin profili (Model-2).

Tablo 5.5: Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-2).

Özellikler	Sembol	CL (Orta katı)	CL (Çok katı)	Ana kaya	Birim
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	✓	✓	✓	-
Drenaj tipi	Drenajlı	✓	✓	✓	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m <sup>3</sup>
Elastisite modülü	E'	4500	12500	100000	kN/m <sup>2</sup>
Poisson oranı	$\nu'$	0,4	0,4	0,4	-
Kohezyon	c'	12	24	24	kN/m <sup>2</sup>
İçsel sürtünme açısı	$\phi'$	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	$\Psi$	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R <sub>inter</sub>	0,65	0,65	0,65	-

Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasman,  $u_{x-maks.} = 227$  mm elde edilmiştir (Şekil 5.8). Model-1 ile kıyaslandığında, maksimum yatay deplasmanda %50 ye yakın oranda azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde değildir.



Şekil 5.8: Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-2).

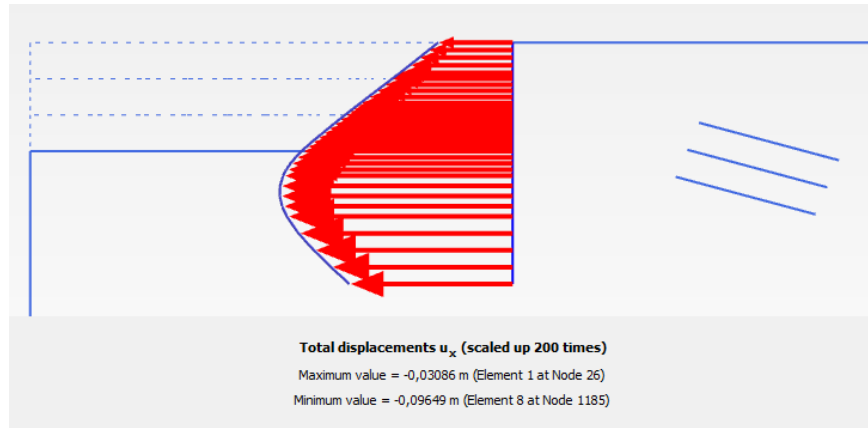
### Model-3

Bu aşamada, homojen tek zemin tabakası içeren Model-1 plaxis örneğinde, zemin malzeme modeli HS-pekleşen zemin olarak değiştirilmiştir. HS-Pekleşen zemin modeli hem yumuşak zeminler hem de sert zeminler olmak üzere farklı zemin tiplerinin davranışını simüle eden ileri bir modeldir. Model, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen aksenal deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır. Model, zeminlerin lineer olmayan (nonlinear), gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışını temsil edebilmektedir. Plastisite teorisinin kullanıldığı model, zeminlerdeki dilatasyon davranışını temsil edebilmekte ve bir akma sınırı içermektedir (Yıldız ve Laman 2002). Modelde, üç eksenli sekant rijitlik modülü  $E_{50}^{ref}$ , ödometre tanjant rijitlik modülü  $E_{oed}^{ref}$ , boşaltma/yükleme rijitlik modülü  $E_{ur}^{ref}$  ve gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri  $m$ , ek temel parametreleri kullanılmaktadır. Çeşitli zemin türleri için ortalama değerler  $E_{ur}^{ref}=3E_{50}^{ref}$  ve  $E_{oed}^{ref}=E_{50}^{ref}$  varsayılan olarak önerilmektedir (Brinkgereve vd. 2019). Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri  $m$ , için literatür çalışmalarına bakıldığında, kum ve siltlerde genellikle  $m=0,5-1$  aralığında alınabilir. Yumuşak zeminler için genellikle  $m=1$  alınmaktadır. Bazı araştırmacılar tarafından, bağımlı rijitlik için üssel değerlerin kullanılabilceği aralıklar ifade edilmiştir. Zemin cinsine göre değişen bu değer, Norveç kumu ve siltler için  $m=0,5$  (Janbu 1963), yumuşak killer için  $m=0,38-0,84$  (Kempfert 2006), farklı türde killi zeminlerde  $m=0,9-1,0$  (Soos ve Von 2001) hesaplamalarda önerilmektedir (Bahadır 2018). Bu çalışmada HS-pekleşen zemin olarak seçilen model parametreleri Tablo 5.6' da gösterilmiştir.

**Tablo 5.6** Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-3).

Özellikler	Sembol	CL (Orta katı)	Birim
Malzeme modeli	HS-pekleşen zemin	✓	-
Drenaj tipi	Drenajlı	✓	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m <sup>3</sup>
Üç eksenli sekant rijitliği	$E_{50}^{ref}$	4500	kN/m <sup>2</sup>
Ödometre tanjant rijitliği	$E_{oed}^{ref}$	4500	kN/m <sup>2</sup>
Boşaltma/yükleme rijitliği	$E_{ur}^{ref}$	13500	kN/m <sup>2</sup>
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0,9	-
Poisson oranı	$\nu_{ur}'$	0,2	-
Kohezyon	$c'$	12	kN/m <sup>2</sup>
İçsel sürtünme açısı	$\phi'$	19	°
Dilatansi açısı	$\Psi$	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	$R_{inter}$	0,65	-

Analiz sonucunda maksimum duvar yatay deplasmanı  $u_{x-maks.} = 96,5$  mm elde edilmiştir (Şekil 5.9). Duvar maksimum yatay deplasmanında Model-1 sonuçlarına kıyasla %78'e yakın oranda azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde kalmamıştır.



**Şekil 5.9:** Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-3).

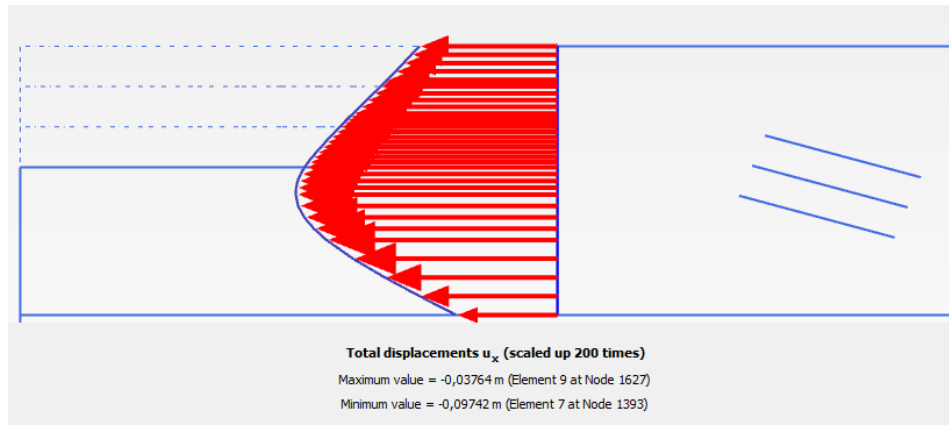
#### **Model-4**

Bu modelde hem tabakalı zemin profili (Model-2 ile aynı) hem de HS-pekleşen zemin modeli kullanılmıştır. Malzeme parametreleri Tablo 5.7' de gösterilmiştir. Maksimum duvar yatay deplasmanı  $u_{x-maks.} = 97,4$  mm elde edilmiştir (Şekil 5.10). Bu deplasman

değerinin homojen zemin profili ve HS-pekleşen zemin modelinin kullanıldığı Model-3 sonucu ile tamamen aynı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda malzeme modelinin HS-pekleşen zemin olarak seçilmesi durumunda, zemin profilinin homojen veya tabakalı olmasının fark yaratmadığı ifade edilebilir.

**Tablo 5.7** Plaxis programında zemin malzeme özellikleri (Model-4).

Özellikler	Sembol	CL	CL	Ana kaya	Birim
		(Orta katı)	(Çok katı)		
Malzeme modeli	Hardening Soil	✓	✓	✓	-
Drenaj tipi	Drenajlı	✓	✓	✓	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m <sup>3</sup>
Üç eksenli sekant rijitliği	$E_{50}^{ref}$	4500	12500	100000	kN/m <sup>2</sup>
Ödometre tanjant rijitliği	$E_{oed}^{ref}$	4500	12500	100000	kN/m <sup>2</sup>
Boşaltma/yükleme rijitliği	$E_{ur}^{ref}$	13500	37500	300000	kN/m <sup>2</sup>
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0,9	0,9	0,9	-
Poisson oranı	$\nu'$	0,2	0,2	0,2	-
Kohezyon	$c'$	12	24	24	kN/m <sup>2</sup>
İçsel sürtünme açısı	$\phi'$	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	$\Psi$	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	$R_{inter}$	0,65	0,65	0,65	-



**Şekil 5.10:** Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-4).

Plaxis programı ile tasarımda daha gerçekçi olabilmek amacıyla oluşturulan farklı 4 model ve bunlara ait analiz sonuçları Tablo 5.8’ de derlenmiştir. Model-1 ile Model-2 karşılaştırıldığında; zemin profilinin tabakalı olarak modellenmesinin, duvardaki

maksimum yatay deplasmanları yaklaşık %50 oranında azalttığı ve daha gerçekçi bir çözüme yaklaştığı söylenebilir. Model-1 ile Model-3 karşılaştırıldığında; tek tabakalı homojen bir zemin profili için, HS-Pekleşen zemin modelinin kullanılması ile duvardaki maksimum yatay deplasmanların yaklaşık %78 oranında azalması, yine tasarımın daha gerçekçi olduğunu düşündürmektedir. Model-3 ile Model-4 karşılaştırıldığında; zemin malzeme modelinin HS-Pekleşen zemin olarak seçilmesi halinde, zemin profil yapısının homojen tek tabaka ya da tabakalı olmasının duvardaki maksimum yatay deplasman değerlerinde fark yaratmadığı gözlenmiştir.

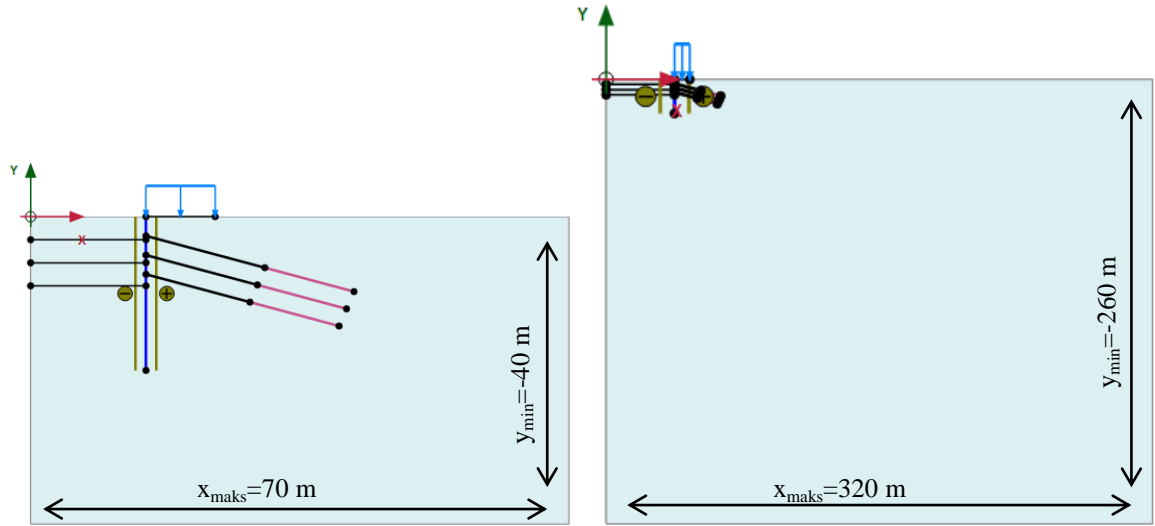
**Tablo 5.8** Plaxis programında farklı modeller ve duvar deplasmanları.

Özellikler	Sembol	<u>Model-1</u>	<u>Model-2</u>	<u>Model-3</u>	<u>Model-4</u>
Malzeme modeli	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	HS-Pekleşen zemin	HS-Pekleşen zemin
Zemin profili	-	Homojen tek tabakalı	Üç tabakalı	Homojen tek tabakalı	Üç tabakalı
Maksimum duvar yatay deplasmanı	$u_{x-maks}$	424 mm	227 mm	96,5 mm	97,4 mm

Bu 4 farklı model için sonuçlar, duvardaki maksimum yatay deplasman dışında bu deplasmanın yeri ve deplasmanın duvar derinliği boyunca değişimi açısından da karşılaştırılabilir. Model-1 ve Model-2 için maksimum deplasmanlar duvarın alt ucunda iken Model-3 ve Model-4 için maksimum deplasmanlar kazı tabanı civarında gözlenmektedir. Bu açıdan da farklılığın zemin malzeme modeline bağlı olabileceği düşünülebilir.

### 5.3 Plaxis Programında Geometrik Sınır Şartlarının Etkisi

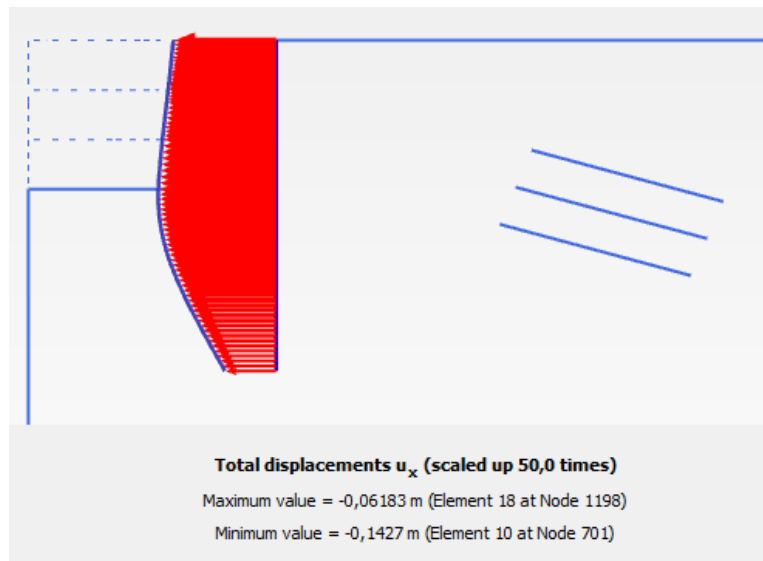
Bölüm 5.1’ de geometrik sınır şartları, kazı genişliği dikkate alınarak  $B=80$  m varsayımı ile tasarlanmıştır. Ancak literatür araştırmalarına ve örnek saha çalışmalarına bakıldığında sınır şartlarının daha minimal olduğu ifade edilebilir. Bu aşamada geometrik sınır şartları Şekil 5.1’ referansı ile 9 m olan kazı yüksekliği göz önüne alınarak hesaplanmış ve  $x_{max}=70$  m,  $y_{min}=-40$  m olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda kazı genişliği  $B=30$  m varsayımı ile değiştirilmiştir (Şekil 5.11). Geometrik sınır şartlarının, duvardaki maksimum yatay deplasman üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Model-5 ve Model-6 oluşturulmuştur.



**Şekil 5.11:** Plaxis programında geometrik model için farklı sınır şartları.

### **Model-5**

Model-5 analizleri, homojen tek tabakalı zemin profili için HS-Pekleşen zemin malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer bir ifade ile Model-5, Model-3 tasarımında yalnızca sınır şartlarının değiştirildiği analiz sonuçlarını kapsamaktadır. Daha küçük geometrik sınır şartlarında modellenmiş olan tasarımda, duvardaki yatay deplasmanlar Şekil 5.12’ de gösterilmiştir. Maksimum yatay deplasman,  $u_{x-maks.}=142,7$  mm elde edilmiştir. Bu değer Model-3 ile kıyaslandığında, duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir.

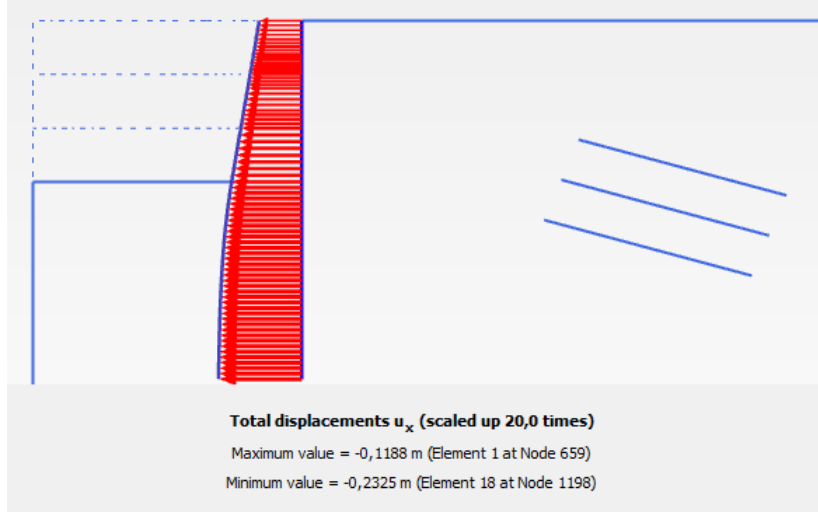


**Şekil 5.12:** Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-5).



### **Model-6**

Model-6 analizlerinde, homojen tek tabakalı zemin profili ve Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Bu şekliyle Model-1 ile uyumludur ancak sınır şartları küçültülmüştür. Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasman,  $u_{x\text{-maks.}}=232,5$  mm elde edilmiştir (Şekil 5.13). Bu sonuçlar, Model-1 sonuçları ile kıyaslandığında duvarın maksimum yatay deplasmanında büyük oranda azalma gözlenmiştir.



**Şekil 5.13:** Plaxis programında duvarın yatay deplasmanı (Model-6).

Bu aşamada gerçekleştirilen Model-5 ve Model-6 analiz sonuçları, Model-3 ve Model-1 sonuçlarına kıyasla incelendiğinde, geometrik sınır şartlarındaki azalmanın zemin malzeme modeline göre farklı etki yarattığı gözlenmiştir. HS-Pekleşen zemin modelinde sınır şartları küçüldüğünde duvarın maksimum yatay deplasmanı artar iken, Mohr-Coulomb zemin modelinde sınır şartlarının küçülmesi duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olmuştur.

Plaxis analizlerinde tüm farklı model sonuçları, Geo5 programı ile yapılan analiz sonuçlarına kıyasla incelenmiştir. Bu doğrultuda, Geo5 programında geometrik sınırlar açısından, düşey olarak duvar tabanından sonraki derinliklerin bir etkisinin olmadığı, hesaplamalar sonucunda görülmüştür. Ancak Plaxis programında, yapı-zemin etkileşimini mümkün kılan sonlu elemanlar yöntemi nedeniyle, geometrik sınırların sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple geometrik sınırların tasarımlarımızda dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu ifade edilebilir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, 9 m kazı derinliği olan ankrajlı diyafram duvar modelleri üzerinde nümerik analizler doğrultusunda parametrik bir çalışma yapılmıştır. Tasarımlarda “Geo5” ve “Plaxis 2D” bilgisayar programları kullanılmıştır. Geo5 programında, ilk olarak CI-CL (orta katı) zemin sınıfında üç sıra ankrajlı bir diyafram duvar tasarımı gerçekleştirilmiştir. Duvarın maksimum yanal deplasmanı incelenmiş ve kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı gözlenmiştir. Zemin sınıfı sırasıyla ML, SC, SM olmak üzere değiştirilerek tasarımlar tekrar modellenmiş ve birbirine yakın olduğu düşünülen bu zeminler için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Beklenildiği gibi zemin rijitliklerinin artışı doğrultusunda, duvar gömülme derinliklerinin, ankraj kuvvetlerinin ve yapı elemanlarının tasarım boyutlarının azaldığı gözlenmiştir. CL ve SC zeminleri kendi arasında karşılaştırıldığında; gömülme derinliklerinde 3 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %25-%40 arasında değişen oranlarda fark belirlenmiştir. Ayrıca stabilitelerin sağlanmasında, ankraj serbest boylarında 5 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm lik farklar elde edilmiştir. ML ve SM zemin sınıfları için; gömülme derinliklerinde 2 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %18-%30 oranlarında fark belirlenmiştir. Ankraj serbest boylarında 3 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm lik fark stabilitenin sağlanması için gerekli olmuştur. Duvar deplasmanları, beklenildiği üzere artan zemin rijitlikleri ile azalmıştır. Bu karşılaştırmalı Geo5 sonuçları göz önünde bulundurularak, zemin değişikliğinin tasarım üzerinde sayısal olarak büyük farklar oluşturduğu gözlenmiştir. Zemin sınıfına karar verirken, tasarım öncesi yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarında çok hassas ve özenli davranılması gerekliliği ifade edilebilir.

Plaxis 2D programı ile ilk aşamada, CL-CI sınıfı homojen tek bir zemin tabakası için Geo5 programı ile tasarlanmış olan modelin (Model-1) analizi gerçekleştirilmiş ve iki ayrı yazılım için sonuçlar duvardaki maksimum yatay deplasmanlar cinsinden karşılaştırılmıştır. Plaxis analizi ile deplasmanın maksimum değeri  $u_{x-maks.}=424,1$  mm elde edilmiştir. Bu değer, Geo5 programında hesaplanan maksimum yatay deplasman ( $u_{x-maks.}=33$  mm) ile karşılaştırıldığında hem sayısal olarak hem de maksimum deplasmanın yeri açısından büyük farklar olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak, Plaxis programındaki geometrik sınır şartları düşünüldüğünde, homojen tek tabaka zemin varsayımıyla, derinlik artışı ile rijitlik artışının göz önüne alınmamış olması ifade edilebilir. Diğer yandan analizlerde zemin malzeme modelinin, Mohr-Coulomb yerine

daha gelişmiş, gerilme bağımlı davranış gösteren HS-Pekleşen zemin olarak tercih edilmesinin, daha gerçekçi bir yaklaşım olacağı düşünülmüştür. Bu amaçla Plaxis programında zeminin profil yapısı, zemin malzeme modeli ve sınır şartlarının etkisini değerlendirmek amacıyla farklı modeller oluşturulmuştur. Model-2’ de derinlik artışı ile rijitlik artışını temsil edebilmek için tabakalı zemin profili varsayılmıştır. Model-3’ de zemin malzeme modeli HS-pekleşen zemin olarak değiştirilmiştir. Model-4’te, hem tabakalı zemin profili hem de HS-pekleşen zemin malzeme modeli kullanılmıştır. Model-5 ve Model-6’ da literatürdeki gözlemler doğrultusunda geometrik sınır şartları değiştirilmiştir. Model-2 uygulamasında, “orta katı” kıvamdaki CI-CL sınıfı zemin için 20 m’ den sonra kıvam “çok katı” kabul edilmiş ve 120 m derinliğinde anakaya varsayımı yapılmıştır. Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasman,  $u_{x-maks.}=227$  mm elde edilmiştir. Model-1 ile kıyaslandığında, maksimum yatay deplasmanda %50 ye yakın oranda azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde değildir. Model-3 uygulamasında, homojen tek tabaka kabulü ve HS-pekleşen zemin modeli varsayımı için gerçekleştirilen analiz sonucunda, duvardaki maksimum yatay deplasman  $u_{x-maks.}=96,5$  mm elde edilmiştir. Model-1 sonuçlarına kıyasla %78’e yakın oranda azalma görülmüştür. Ancak yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde kalmamıştır. Tabakalı zemin ve HS-pekleşen zemin modeli varsayımı ile Model-4 için duvardaki maksimum yatay deplasman  $u_{x-maks.}=97,4$  mm elde edilmiş ve bu değer Model-3 sonucu ile tamamen aynı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, malzeme modelinin HS-pekleşen zemin olarak seçilmesi durumunda, zemin profilinin homojen veya tabakalı olmasının fark yaratmadığı şeklinde ifade edilebilir. Bu 4 farklı model için sonuçlar, duvardaki maksimum yatay deplasman dışında bu deplasmanın yeri ve deplasmanın duvar derinliği boyunca değişimi açısından da farklılık göstermektedir. Model-1 ve Model-2 için maksimum deplasmanlar duvarın alt ucunda iken Model-3 ve Model-4 için maksimum deplasmanlar kazı tabanı civarında gözlenmektedir. Bu açıdan da farklılığın zemin malzeme modeline bağlı olabileceği düşünülebilir. Model-5, homojen tek tabakalı zemin ve HS-Pekleşen zemin malzeme modeli varsayımıyla Model-3 ile aynı olup sınır şartlarının değiştirildiği analiz sonuçlarını kapsamaktadır. Daha küçük geometrik sınır şartlarında duvardaki maksimum yatay deplasman  $u_{x-maks.}=142,6$  mm elde edilmiştir. Bu değer, Model-3 sonucu ile kıyaslandığında, duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir.

Model-6, homojen tek tabakalı zemin ve Mohr-Coulomb malzeme modeli varsayımıyla Model-1 ile uyumludur ancak sınır şartları küçültülmüştür. Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasman,  $u_{x-maks.}=232,5$  mm elde edilmiştir. Bu değer, Model-1 sonucu ile kıyaslandığında duvarın maksimum yatay deplasmanında büyük oranda azalma gözlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, geometrik sınır şartlarındaki azalmanın zemin malzeme modeline göre farklı etki yarattığı gözlenmiştir. HS-Pekleşen zemin modelinde sınır şartları küçüldüğünde duvarın maksimum yatay deplasmanı artar iken, Mohr-Coulomb zemin modelinde sınır şartlarının küçülmesi duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olmuştur. Geometrik sınırlar açısından, Geo5 programında düşey olarak duvar tabanından sonraki derinliklerin bir etkisinin olmadığı, hesaplamalar sonucunda görülmüş iken Plaxis programında, yapı-zemin etkileşimini mümkün kılan sonlu elemanlar yöntemi nedeniyle, geometrik sınırların sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple geometrik sınırların tasarımlarımızda dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu ifade edilebilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Aslan, V. ve Yağcı, B. (2018). *Derin Kazı Destek Sistemlerinin Analizinde Geoteknik Modelleme Farklılıkları*. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi. Balıkesir.
- Aslan, V. ve Yağcı, B. (2018). *Konsol Dıyafram Duvarların Yatay Deplasmanı için Parametrik Bir Çalışma*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. Afyonkarahisar.
- Bahadır A.A. ve Onur M.İ. (2017). *Derin Kazı Destek Sistemi Tasarımında Zemin Modeli Seçimi: Bir Vaka Analizi*. 7. Geoteknik Sempozyumu 22-23-24 Kasım 2017, İstanbul
- Brinkgereve R.B.J., Zampich L.M., Manoj N.R., (2019). “*PLAXIS CONNECT Edition V20*” Manuel, Hollanda.
- Berilgen M.M. (2011). *Model sınırları*. Plaxis Eğitimi, İstanbul
- Coduto D.P. (2006). *GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ İlkeler ve Uygulamalar*. (Çev. Mollamahmutoğlu M. ve Kayabalı K.). Gazi Kitabevi. Ankara.
- Dayıoğlu (2010). *Derin Kazıların İncelenmesi Ve Derin Kazı Uygulaması Üzerine Bir Örnek: Harbiye Kongre Merkezi Derin Temel Kazısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Nossan A.S., Sokolić I., Plepelić G., (2007). *Design of anchored retaining structures by numerical modelling*. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. (s.1381-1384).
- Sabatini P. J., Pass, D. G., Bachus, R. C., (1999). *Ground Anchors and Anchored Systems*. FHWA-IF-99-015, Office of Bridge Technology Washington D.C., 281s.
- Şen (2021). *Bir Ankrajlı İksa Sistemi Geoteknik Tasarımında malzeme Modeli Etkisinin İncelenmesi Ve Aletsel Ölçüm Sonuçları İle Karşılaştırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Tan, Y.C., Liew, S.S., Gue, S.S., Taha, M.R. (2012). *A Numerical Analysis of Anchored Diaphragm Walls for a Deep Basement in Kuala Lumpur, Malaysia*.

- T.C Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü 84122464-755.01-E.150340 Sayılı 31.08.2018 Tarihli *Kazı Güvenliği Ve Alınacak Önlemler Hakkında Yönetmelik*.
- Uçar, G. (2020). *Öngermeli Ankrajlı Kesişen kazıklı İksa Sistemi: Bir Vaka Analizi Ve Nümerik Olarak İncelenmesi*. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Vural, U. ve Işık, N.S. (2019). *Ankrajlı İksalarda Analiz Sonuçlarının Saha Deneyleri ile Karşılaştırılması*. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi cilt 2, sayı 1. Bayburt.
- Yalçın G. (2019) *Derin Kazılarda Ankraj Parametrelerinin Sayısal Analizi*. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Yıldız A.A. ve Yaman M. (2002). *Kumlu Zeminlerde Pekleşme Zemin Modeli Kullanımının İrdelenmesi*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Alperen CEVAHİR  
Doğum tarihi ve yeri : 06.05.1996 - BURSA  
e-posta : alperencevahir2@gmail.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	-
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2019
Lise	Bursa Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesi	2014