



**SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İSTİNAT
DUVAR TASARIMI**

Berke BÜTÜN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği
Danışman: Babak Karımı**

**2023
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İSTİNAT DUVAR TASARIMI

Berke BÜTÜN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Babak Karımı

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

19 / 10 / 2023

Berke BÜTÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İSTİNAT DUVAR TASARIMI

Berke BÜTÜN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Babak KARIMI

İstinat duvarları, arkasında kalan zemin hacmini göçmeden güvenli bir şekilde tutmak amacıyla yapılan yapılardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile kullanılan istinat duvarlarının ön boyutlandırılması dikkate alınarak 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğinde istinat duvarları modellenmiştir. Analizler üç farklı duvar yüksekliğinde, taban genişliğinin 0, 1, 2, 3 ve 4 katı olacak şekilde değişen yeraltı su seviyelerinde yapılmıştır. Ayrıca 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında yeraltı suyunun olmadığı kum zeminde 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 ve 225 cm olarak değişen ön taraf dolgu zemin yükseklikleri ile analizi yapılmış, ön dolgunun etkisi duvarda oluşan eksenel, moment ve kesme kuvvetlere açısından incelenmiştir. Sonuçlara göre duvar yüksekliği arttıkça duvara aktarılan yüklerin artması elde edilmiştir. Aynı zamanda ön dolgu malzemesinin yüksekliği artınca duvara aktarılan yüklerin azalması görülmektedir. Bundan dolayı bir istinat duvarın yüksekliği artması nedeniyle duvarda güçlendirme yapmak yerine, duvara aktarılan yüklerin azaltılması için ön dolgu kullanmak bir alternatif çözüm olarak kullanılabilir.

2023, 134 sayfa

Anahtar Kelimeler: İstinat Duvar, Plaxis 3D, Sonlu Elemanlar Yöntemi, 3 Boyutlu Tasarım,

ABSTRACT

MS. Thesis

DESIGN OF RETAINING WALL USING FINITE ELEMENT METHOD

Berke BÜTÜN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Babak KARIMI

Retaining walls are structures built to keep the ground volume behind safely without collapsing. In this study, 3, 4.5 and 6 meter high retaining walls were modeled by taking into account the preliminary dimensioning of the retaining walls used with the finite element method. Analyzes were made at three different wall heights, at varying groundwater levels of 0, 1, 2, 3 and 4 times the floor width. In addition, the 4.5 meter high retaining wall was analyzed with front fill ground heights varying as 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 and 225 cm on sandy ground where there is no groundwater. and were examined in terms of cutting forces. According to the results, as the wall height increases, the loads transferred to the wall increase. At the same time, as the height of the front filling material increases, the loads transferred to the wall appear to decrease. Therefore, instead of strengthening the wall as the height of a retaining wall increases, using pre-fill can be used as an alternative solution to reduce the loads transferred to the wall.

2023, 134 page

Keywords: Retaining Wall, Plaxis 3D, Finite Element Method, 3D Design

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi birikimini ve tecrübesini benden esirgemeyen, her konuda yanımda olup benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve geotekniğe ilgi duymamı sağlayan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi. Babak KARIMI' ye;

Tez savunma jürimde yer alıp yüksek lisans tezimi detaylı bir şekilde inceleyen ve tez çalışmamda bulunan eksikliklerle gidermem için önerilerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Mahyar MAALI'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Necmi Yarbaşı'na;

Eğitim öğretim hayatım boyunca benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve hayatta ahlaklı ve vicdanlı olmayı öğrettikleri için canım annem ve babama;

Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ün "Büyük Türk milletine özgürlük ve bağımsızlık temin etmek azim ve kararlılıkla çalışmakla mümkündür." sözü, çalışmamı tamamlarken beni motive eden ve yönlendiren bir ilham kaynağı oldu. Bu söz, beni daha da cesaretlendirdi ve araştırmama olan inancımı pekiştirdi. Eğitim ve öğretim hayatım boyunca bende emeği olan herkese; sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Berke BÜTÜN
Kasım 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.2. İstinat Yapılarının Kullanıldığı Yerler	2
1.3. İstinat Duvarı Çeşitleri	4
1.3.1. Rijit istinat yapıları.....	4
1.3.1.1. Ağırlık istinat duvarları	5
1.3.1.2. Yarı Ağırlıklı İstinat Duvarları.....	6
1.3.1.3 Konsol istinat duvarları	7
1.3.1.4. Payandalı istinat duvarları.....	8
1.3.2. Yarı rijit istinat yapıları	9
1.3.3. Esnek istinat yapıları	10
1.4. Betonarme İstinat Yapıları	11
1.4.1. Betonarme nervürlü istinat duvarları	12
1.5. Prefabrike İstinat Yapıları	13
1.6. İstinat Duvarlarının Çökme Nedenleri	14
1.7. Dayanma Yapılarının Hesap İlkeleri.....	15
1.7.1. Tasarımın ilkeleri	15
1.7.2. İstinat duvarına etkiyen kuvvetler.....	15
1.7.3. İstinat Duvarına etkiyen yanal toprak basıncı.....	19
1.7.3.1. Sükûnet halindeki yanal toprak basıncı.....	20
1.7.4. Aktif ve pasif toprak basıncı	22
1.7.4.1. Aktif toprak basıncı.....	22
1.7.4.2. Pasif toprak basıncı	23
1.7.5. Klasik statik toprak basıncı teorileri	25

1.7.5.1. Rankine teorisi	25
1.7.5.2. Sükûnet durumu (elastik denge).....	26
1.7.5.3. Plastik denge durumu	27
1.7.5.3.1. Aktif rankine durumu.....	27
1.7.5.3.2. Pasif rankine durumu	29
1.7.6. Coulomb kama teorisi	35
1.7.6.1. Coulomb aktif durum	36
1.7.6.2. Coulomb pasif durum.....	38
1.8. Rankine ve Coulomb Yöntemleri Arasında Karşılaştırma	41
1.9. Culmann Yöntemi	41
1.10. İstinat Duvarlarının Hesap Tahkikleri.....	43
1.10.1. Devrilme tahkiki.....	44
1.10.2. Kayma tahkiki	45
1.10.3. Taşıma gücü tahkiki	50
1.10.4. Toptan göçme (veya şev kayması) tahkiki.....	51
1.10.6. Diğer tahkikler	56
1.10.5. Oturma tahkiki	57
2. KAYNAK ÖZETLERİ	60
2.1. İstinat Duvar Tasarımıyla İlgili Literatür Çalışmaları	60
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	70
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	70
3.2. Plaxis 3D/2D Paket Programı	71
3.3. İstinat Duvarlarının Ön Boyutlandırılması.....	73
3.4. İstinat Duvarlarının Tasarımında Kullanılan Zemin Parametreleri	75
3.5. Yöntem.....	77
3.5.1. Model tanıtımı.....	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	87
4.1. Duvar Yüksekliği ve Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi	87
4.2. Yeraltı Su Seviyesinin İstinat Duvarına Etkisi.....	107
4.3. Ön Taraf Dolgu Zemin Derinliğinin İstinat Duvarına Etkisi	121
4.4. İstinat Duvarının Temelinde Meydana Gelen Oturma Miktarları.....	127
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Alan
B	İstinat duvarının temel taban genişliği (kısa kenar veya çap, m)
b_i	Her bir dilimin yatay uzunluğu
c	Kohezyon
cm	santimetre
D	Ön taraf zemin yüzeyi derinliği
d	Kalınlık
E	Elastisite/Young Modülü
E_1	Elastisite Modülü
$\Sigma F_{(kaydıran)}$	Kaydırmaya çalışan kuvvetlerin toplamı
$\Sigma F_{(kaymaya karşı koyan)}$	Kayma durumuna karşı koyan kuvvetlerin toplamı
G_{12}	Kayma Modülü
G_s	Güvenlik katsayısı
H	İstinat duvarının yüksekliği
h_i	Dilimin düşey uzunluğu
K_0	Sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı
K_a	Aktif Rankine toprak basıncı katsayısı
K_p	Pasif Rankine toprak basıncı katsayısı
k_1, k_2	Temel şekil katsayıları
kN	KiloNewton
kNm	KiloNewton Metre
kPa	Kilopascal
m	Metre
mm	Milimetre
m^2	Metre kare
M_d	Kaymaya neden olan moment
$M_{(karşı koyan)}$	İstinat duvarının burun noktası etrafında dönmesine karşı koyan kuvvetlerin burun noktasına göre momenti

$M_{(deviren)}$	Burun noktası etrafında duvarı devirmeye çalışan kuvvetlerin burun noktasına göre momenti
$Model$	Zemin Modeli
MPa	Megapascal
$\sum N$	Duvarın en altına gelen bütün düşey yöndeki ağırlıkların toplamı
N_G	İstinat duvarının kendi ağırlığı
N_Z	İstinat duvarının tabanı üzerinde bulunan zeminin ağırlığı
N_c, N_q, N_γ	Temel zemininin, ϕ içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları
P	İtki kuvveti
P_0^I	Temel taban düzeyindeki efektif gerilme
P_h	Aktif duvar basıncının yatay bileşkesi
P_V	Aktif duvar basıncının düşey bileşkesi
P_a	Aktif bileşke kuvveti
P_{as}	Statik durumda aktif basınç itkisi
P_p	Pasif bileşke itkisi
R	Bileşke kuvveti
r	Kayma dairesinin yarıçapı
R_{inter}	Arayüz Azaltma Faktörü
u	Hidrostatik su basıncı
μ	Sürtünme katsayısı
$V (m^2)$	İstinat duvarının kesit alanı
ν	Zeminin poisson oranı
ν_{12}	Poisson Oranı
z	Duvarın arka tarafındaki dolgu seviyesinden itibaren derinlik
z_0	Derinlik
$\%$	Yüzde
W_c	Beton duvarın ağırlığı
W_i	Her bir dilimin ağırlığı
W_s	Topuğun üstündeki zemin ağırlığı
$W (ton)$	Duvarın kendi ağırlığı
q	Sürşarj yükü
q_{em}	Emniyetli taşıma gücü
$q_{sınır}$	Sınır taşıma gücü

γ	Temel zemininin birim hacim ağırlığı
γ_i	Zeminin birim hacim ağırlığı
$\gamma_m(t/m^3)$	Duvarda kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığı
γ_n	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık
γ_{unsat}	Kuru birim hacim ağırlık
σ_0	Sükûnet halindeki yatay gerilme
σ_a	Aktif toprak itkisi
σ_a	Aktif yatay zemin basıncı
σ_h	Yatay gerilme
σ_p	Pasif toprak itkisi
σ_d	Büyük asal gerilme
σ_v	Düşey gerilme
σ_y	Yatay gerilme
σ_p	Pasif yanal zemin basıncı
$\emptyset$	Zemine ait içsel sürtünme açısı
$^{\circ}$	Derece
Tip	Drenaj Tipi
x	Aktif basınç itkisinin O merkez noktasına göre moment kolu
ψ	Dilatasyon Açısı
α	Zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı
β	Duvar arkasının yatayla yaptığı açı
δ	Duvarın arka yüzü ile zemin yüzeyi arasında oluşan sürtünme açısı
η	AC hattının düşey AB ile yaptığı açı
φ	İçsel Sürtünme Açısı

Kısaltmalar

2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

V22

Versiyon 22

YASS

Yeraltı Su Seviyesi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı düzeylerdeki zemin yüzlerinin dayanma yapısı ile düzenlenmesi	2
Şekil 1.2. İstinat duvarı genel görünümü	2
Şekil 1.3. (a): Yol inşaatlarında yarma veya dolgu oluşturmak. (b): kanal ya da su deposu olarak oluşturmak. (c): köprülerde yaklaşım duvarı olacak şekilde. (d): şev stabilitesini sağlamak amaçlı. (e): bina ön kısmının sığ kaymasını önlemek için. (f): rıhtım duvarı olacak şekilde.	3
Şekil 1.4. Dayanma (istinat) duvarlarının sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.5. Rijit istinat duvarı tipleri; (a): ağırlık, (b): yarı ağırlık, (c): konsol, (d): payandalı.....	5
Şekil 1.6. Ağırlık istinat duvarları	6
Şekil 1.7. Ağırlık istinat duvarı en kesitleri	6
Şekil 1.8. Yarı ağırlık istinat yapısının en kesit tipleri ve asal donatılarının gösterimi	7
Şekil 1.9. Konsol istinat duvarları ve ana donatıların yerleştirilmesi	7
Şekil 1.10. Payandalı istinat duvarı (an engineering postgraduate course on heuristic design of different types of retaining walls, 2015).....	8
Şekil 1.11. Kafes tipi istinat duvarı.....	9
Şekil 1.12. Gabion duvar	11
Şekil 1.13. Betonarme istinat duvarının en kesiti	12
Şekil 1.14. Betonarme nervürlü istinat duvarı	13
Şekil 1.15. Prefabrike istinat duvarı.....	14
Şekil 1.16. İstinat duvarlarına gelen yükler	15
Şekil 1.17. İstinat duvarlarına etki eden yükler	18
Şekil 1.18. Bir zemin elemanına etkiyen yatay ve düşey gerilmeler	20
Şekil 1.19. Sükunetteki toprak basıncı.....	21
Şekil 1.20. Aktif toprak basıncı durumu.....	23
Şekil 1.21. Pasif toprak basıncı durumu	24
Şekil 1.22. İki boyutlu koşullarda, z derinliğinde bir eleman.....	25
Şekil 1.23. Kohezyon bulunmayan zemin tabakasında istinat duvarının arkasındaki aktif durumun gösterimi	28

Şekil 1.24. Kohezyonsuz bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan pasif rankine durumu	29
Şekil 1.25. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan aktif durum....	31
Şekil 1.26. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan pasif durum ...	32
Şekil 1.27. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasındaki dolgunun yatayla açılışturması durumu.....	33
Şekil 1.28. Kohezyon bulunan ve kohezyon bulunmayan zemin tabakaları için aktif ve pasif basınç değerleri.....	36
Şekil 1.29. Coulomb aktif toprak basıncı.....	37
Şekil 1.30. Coulomb pasif toprak itkisi ve duvara etkiyen kuvvetler	39
Şekil 1.31. Culmann yönteminde statik aktif toprak basıncının gösterimi	42
Şekil 1.32. Culmann yönteminde statik pasif toprak basınçlarının gösterimi	43
Şekil 1.33. İstinat duvarlarında devrilme tahkiki.....	45
Şekil 1.34. İstinat duvarında kayma (taban üzerinde)	46
Şekil 1.35. İstinat duvarlarında kayma tahkiki	47
Şekil 1.36. İstinat yapılarında kayma durumuna karşı kullanılan dış çeşitleri.....	49
Şekil 1.37. Kayma güvenliği durumunun sağlanması için alınan güvenlik tedbirleri....	49
Şekil 1.38. İstinat yapısında taşıma gücü göçmesi durumu	50
Şekil 1.39. İstinat duvarında toptan göçme (şev kayması)	52
Şekil 1.40. İstinat duvarlarının İsveç Dilim Yöntemi ile toptan göçme kontrolü.....	53
Şekil 1.41. Betonarme dayanma duvarları.....	57
Şekil 1.42. Dayanma duvarının farklı oturması	58
Şekil 3.1. Betonarme konsol istinat duvarının ön boyutlandırılması için genel oranlar.	74
Şekil 3.2. Plaxis 3D programında girilen Project Properties değerleri	77
Şekil 3.3. İstinat duvarının ön ve arkasında kullanılan dolgu zemin parametreleri, (a) general, (b) parameters, (c) groundwater, (d) interfaces, (e) initial.....	78
Şekil 3.4. Sondaj kuyusunun oluşturulması.....	81
Şekil 3.5. İstinat duvarı ve yüzeylerin oluşturulması.....	82
Şekil 3.6. Zeminin ve istinat duvarının ‘mesh’ bölümünde daha küçük bölgelere ayrılması, (a) zemin, (b) istinat duvarı.	83
Şekil 3.7. Flow conditions ayarları	84
Şekil 3.8. Staged construction bölümünde fazların tanımlanması.....	85
Şekil 3.9. Analiz sonuçlarının görüntülenmesi	86

Şekil 4.1. 3 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.	87
Şekil 4.2. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.	90
Şekil 4.3. 6 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.	93
Şekil 4.4. Duvar yüksekliği ve yeraltı su seviyesinin artmasıyla değişen duvar deplasman değerleri, (a) 3 metre, (b) 4,5 metre, (c) 6 metre.	96
Şekil 4.5. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	98
Şekil 4.6. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	101
Şekil 4.7. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	104
Şekil 4.8. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 0B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	108
Şekil 4.9. 3,4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 1B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	111
Şekil 4.10. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 2B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	113

Şekil 4.11. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 3B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.....	116
Şekil 4.12. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 4B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.....	119
Şekil 4.13. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında don derinliğinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	122
Şekil 4.14. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesinde duvarda meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel Yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.	125
Şekil 4.15. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen oturma değerleri.	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Zemin tipine göre aktif toprak basıncının oluşması için gereken yer değiştirme miktarları.....	23
Çizelge 1.2. Pasif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler	24
Çizelge 1.3. Zeminin cinsine göre tipik K₀ değerleri	27
Çizelge 1.4. Rankine aktif toprak basıncı katsayıları, K_a (düz zemin yüzü).....	29
Çizelge 1.5. İstinat duvarlarında aktif basınç oluşturan minimum kayma ve dönme miktarları.....	34
Çizelge 1.6. Eğik zemin için bir Rankine K_a tablosu	34
Çizelge 1.7. Bir Coulomb K_a tablosu (Bağıntı 1.26).....	38
Çizelge 1.8. Bir Coulomb K_p tablosu (Bağıntı 1.29).....	40
Çizelge 1.9. Duvarın tabanında bulunan zemin için sürtünme katsayıları	46
Çizelge 1.10. Duvarın tabanında bulunan zeminin kohezif mukavemetleri.....	47
Çizelge 3.1. İstinat duvarının ön ve arka tarafında kullanılan dolgu zeminin özellikleri	76
Çizelge 3.2. Tasarlanan istinat duvarının temelini altında kullanılan zeminin özellikleri	76
Çizelge 3.3. İstinat duvarının yapılacağı beton malzemenin özellikleri.....	77
Çizelge 4.1. 3 metre yüksekliğinde 0B, YASS istinat duvarına etkiyen kuvvetler	90
Çizelge 4.2. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetler.	93
Çizelge 4.3. 6 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetler.	96
Çizelge 4.4. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.....	99
Çizelge 4.5. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.....	100
Çizelge 4.6. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.....	100
Çizelge 4.7. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.....	102

Çizelge 4.8. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.....	103
Çizelge 4.9. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.....	103
Çizelge 4.10. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	105
Çizelge 4.11. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.	106
Çizelge 4.12. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	107
Çizelge 4.13. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	109
Çizelge 4.14. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	109
Çizelge 4.15. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	110
Çizelge 4.16. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	112
Çizelge 4.17. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	112
Çizelge 4.18. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	113
Çizelge 4.19. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	115
Çizelge 4.20. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	115
Çizelge 4.21. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	115
Çizelge 4.22. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	118
Çizelge 4.23. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	118
Çizelge 4.24. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	118

Çizelge 4.25.	Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	120
Çizelge 4.26.	Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	121
Çizelge 4.27.	Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	121
Çizelge 4.28.	Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.	123
Çizelge 4.29.	Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.	124
Çizelge 4.30.	Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.	124
Çizelge 4.31.	Değişen duvar yüksekliklerinde ve yeraltı su seviyelerinde temelde meydana gelen oturma değerleri.	128

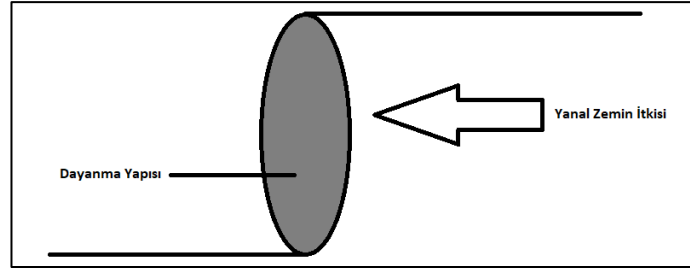
1. GİRİŞ

İstinat duvarı, çeşitli amaçlarla kullanılan bir yapıdır. Temel işlevi, eğimli zeminlerde zemin hacmini tutmak ve kayma, göçme gibi zemin problemlerini önlemektir. Ayrıca, binalarda bodrum duvarları oluşturmak, köprü kenarları ve kıyıları korumak gibi diğer önemli kullanım alanları da bulunmaktadır (Day 2004).

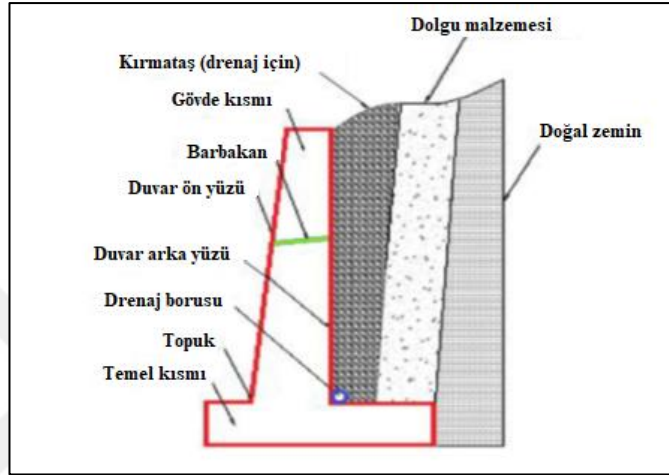
Statik durumlarda, istinat duvarları üzerine gelen toprak basınçları kolaylıkla hesaplanabilir. Ancak dinamik koşullarda doğru analiz yapmak daha zorlu bir süreçtir. Mononobe-Okabe tarafından geliştirilen yarı-statik yöntem, bu tür analizler için bir başlangıç noktası olarak kabul edilir. Yarı-statik yöntemler, deprem gibi dinamik yükler altında istinat duvarlarına etki eden kuvvetleri belirlemek için kullanılır (Yenidoğan 2006).

İstinat duvarları, ani seviye farkları olan bölgelerde zeminin doğal şev açıları ile yayılmasını engellemek için kullanılır. İstinat duvarının arkasındaki zemin duvara yanal bir kuvvet uygulayarak yerinden hareket ettirmeye veya bulunduğu yerde yıkmaya çalışır. Ancak istinat yapıları, bu itkiyi karşılayacak şekilde kalıcı ve rijit yapılar olarak inşa edilir (Özaydın 2010).

Özetle, istinat duvarları zeminin tutulması, kayma ve göçmeyi önlemek, bodrum duvarları oluşturmak, köprü kenarları ve kıyıları korumak için kullanılan yapılar olarak tanımlanır. Statik koşullarda toprak basınçları kolaylıkla hesaplanabilirken, dinamik koşullarda doğru analiz için yarı-statik yöntemler kullanılır. Bu yapılar ani seviye farkları olan bölgelerde zemini koruyarak, yanal etkiyle oluşan itkiye karşı koyarlar. Şekil 1.1. de dayanma yapısının üzerine zeminden kaynaklı oluşan yanal zemin itkisinin etkimesi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Farklı düzeylerdeki zemin yüzlerinin dayanma yapısı ile düzenlenmesi



Şekil 1.2. İstinat duvarı genel görünümü (Yıldırım 2019)

Geoteknik mühendisliğinde, farklı seviyelerdeki zemin tabakalarıyla çoğunlukla karşılaşılır. Bu tabakalar, şevli (eğimli) olarak birbirleri ile bağlantılı olabilir. Fakat şevler, planda kazı çevresinde geniş alanlar kaplar. Böylesine geniş alanlar genellikle görülmez. Ayrıca, şevli zemin tabakalarında büyük ölçekte kazı yapılması gerekebilir. Eğer düşey bir yan yüzey gerekirse bir seçenek olarak, farklı iki zemin yüzü bir istinat duvarı ile bağlanabilir (Uzuner 2016a). Şekil 1.2.de bir istinat duvarının genel görünümü ve elemanları gösterilmiştir.

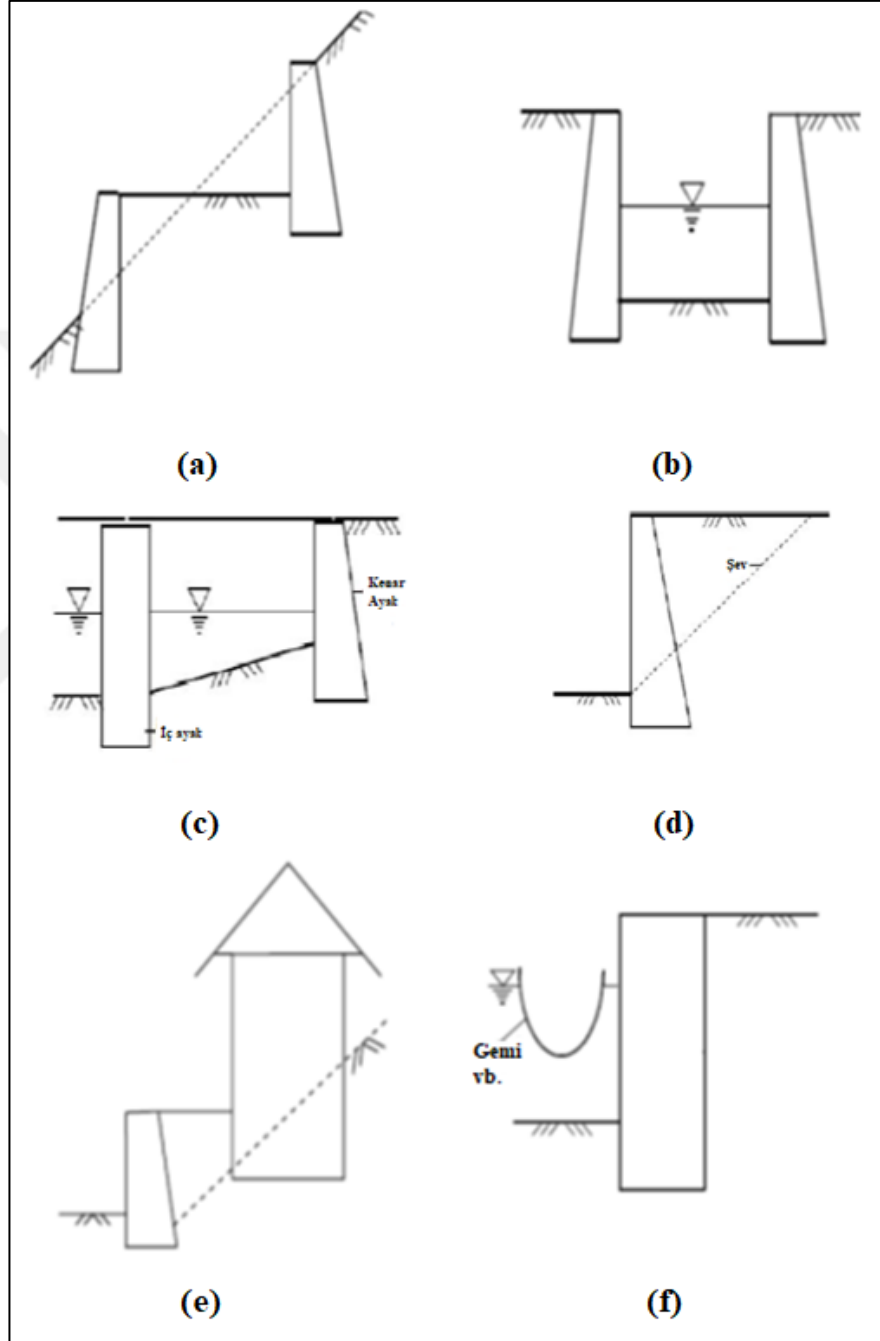
1.2. İstinat Yapılarının Kullanıldığı Yerler

İstinat yapıları, şevli (eğimli) arazilerde zemini dik açıyla tutmak, kayma ve göçmeyi önlemek, bodrum duvarları oluşturmak, kıyıların erozyondan ve taşkınlardan korunması, kanallar, eklüzler, köprü kenarları ve derin kazılarda yan zemin yüzeylerini tutmak gibi amaçlarla yapılan dikey veya dikeye yakın toprağı tutan yapılar olarak tanımlanır. Ayrıca yol yapımında şev düzenlemesi, malzeme depolama olarak kullanım ve yamaç yollarında kullanım gibi çeşitli amaçlara da hizmet verirler. İstinat duvarları,

1. GİRİŞ

toprak hacmini tutarak arazi düzenlemesi ve güvenliğini sağlayan önemli yapılardır (Özaydın 2010).

İstinat yapılarının farklı kullanım alanları Şekil 1.3' de gösterilmektedir.



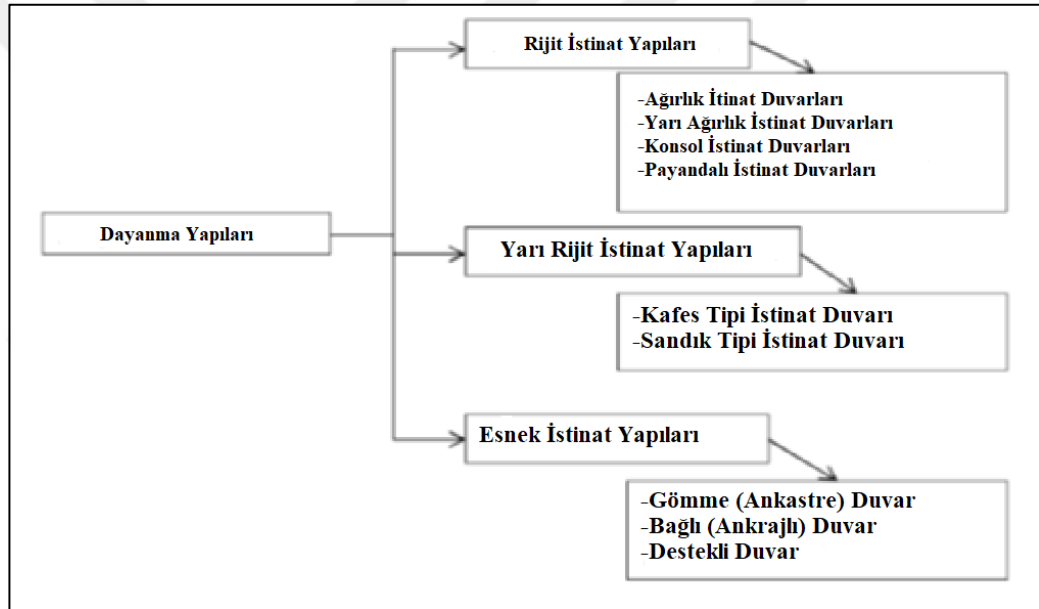
Şekil 1.3. (a): Yol inşaatlarında yarma veya dolgu oluşturmak. (b): kanal ya da su deposu olarak oluşturmak. (c): köprülerde yaklaşım duvarı olacak şekilde. (d): şev stabilitesini sağlamak amaçlı. (e): bina ön kısmının sığ kaymasını önlemek için. (f): rıhtım duvarı olacak şekilde.

1.3. İstinat Duvarı Çeşitleri

İstinat yapıları,

- Rijit istinat duvarı,
- Yarı rijit istinat duvarı ve
- Esnek istinat duvarı

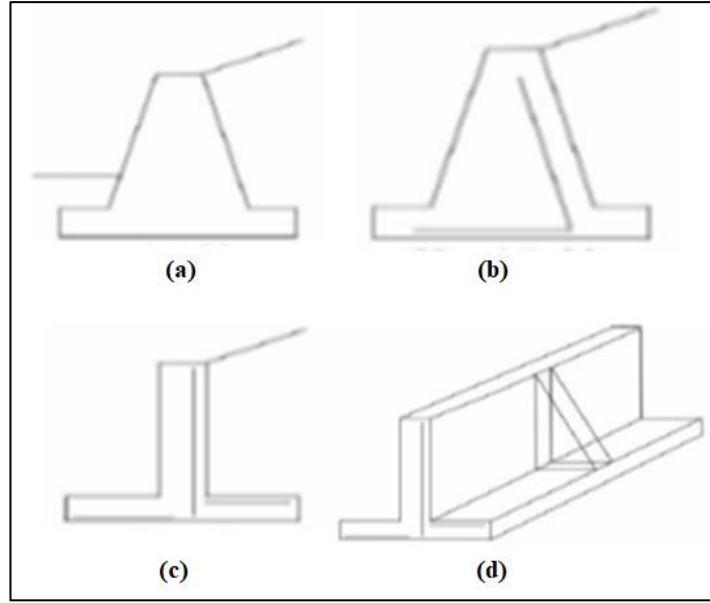
Olmak üzere üç sınıf içerisinde incelenmektedir. İstinat yapılarının genel olarak sınıflandırılması ise Şekil 1.4’ de ki gibidir.



Şekil 1.4. Dayanma (istinat) duvarlarının sınıflandırılması (Öztürk 2014)

1.3.1. Rijit istinat yapıları

Rijit istinat duvarları, en eski ve günümüzde hala yaygın olarak kullanılan istinat yapısı türüdür. Bu duvarlar, zeminin dik açıyla tutulması ve kayma önleme gibi işlevleri yerine getirir. Rijit istinat yapıları, büyük eğilme rijitliğine sahip oldukları için çok az deformasyona uğrarlar. Ağırlık, yarı ağırlık, konsol ve payandalı olmak üzere dört grupta incelenirler. Bu yapılar, çeşitli amaçlar için kullanılmakta ve zemin düzenlemesi ve güvenliği sağlama açısından önemlidir. Aşağıda Şekil 1.5. de rijit istinat duvarının tipleri gösterilmiştir.



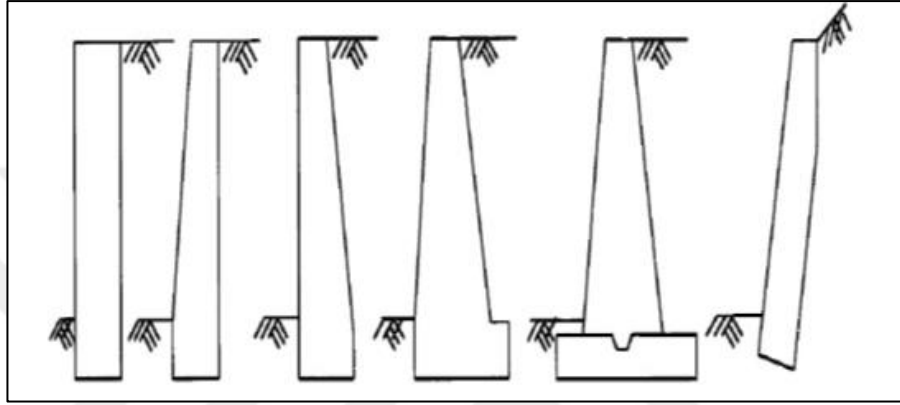
Şekil 1.5. Rijit istinat duvarı tipleri; (a): ağırlık, (b): yarı ağırlık, (c): konsol, (d): payandalı (Yıldırım 2009).

1.3.1.1. Ağırlık istinat duvarları

Ağırlık istinat yapıları, Şekil 1.6. da gözüktüğü gibi genellikle taş, kaya veya beton gibi malzemelerden yapılan duvarlar olup, zeminden kaynaklı yatay kuvvetleri karşılaması amacı ile çalışırlar. Fakat bu tür duvarların çekme kuvvetlerine karşı dayanımı düşük olduğundan, 4-5 metreden daha yüksek yapılmaları güvenlik açısından risk teşkil edebilir. Yükseklikleri arttıkça, duvara etkiyen zemin basıncı da artar ve duvarın ağırlığının zeminden kaynaklı kuvvetleri karşılayacak şekilde yükseltilmesi gerekir. Bu tarz durumlarda ağırlık istinat duvarlarının seçilmesi ekonomik yönden olumsuz olabilir. Şekil 1.7. de ağırlık istinat duvarlarının en kesitlerine yer verilmiştir. Ağırlık istinat duvarları, yapım şekliyle harçlı yapılması veya harçsız yapılması gibi iki grupta incelenir (Bell 2012).



Şekil 1.6. Ağırlık istinat duvarları

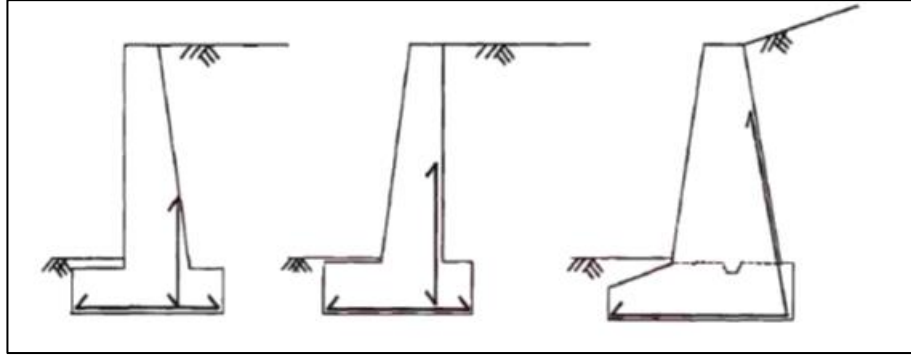


Şekil 1.7. Ağırlık istinat duvarı en kesitleri (Gül den 2014)

1.3.1.2. Yarı Ağırlıklı İstinat Duvarları

Yarı ağırlık istinat yapıları, çekme gerilmelerinin meydana geldiği bölgelerde beton miktarını azaltmak için çelik donatıyı az miktarda eklenmesiyle yapılan istinat yapılarıdır. Çelik donatı eklendiğinde betonun miktarı azalır ve bu sayede ağırlık istinat yapılarına göre gövde kesiti büyük oranda azaltılır. Fakat duvarın gövdesi küçüldüğü zaman duvara ait temelin boyutları da stabiliteyi sağlamak amacıyla artırılır. Yarı ağırlık istinat duvarları, ağırlık istinat duvarlarına göre daha ekonomik ve verimli bir seçenek olabilir. Yarı ağırlık istinat duvarlarının kullanımında ekonomik yükseklik $5,0 \text{ m} \leq H \leq 6,0 \text{ m}$ olarak kabul edilmektedir (Önalp ve Arel 2013).

Yarı ağırlık istinat yapılarına örnek Şekil 1.8’ de görülmektedir (Gül den 2014).



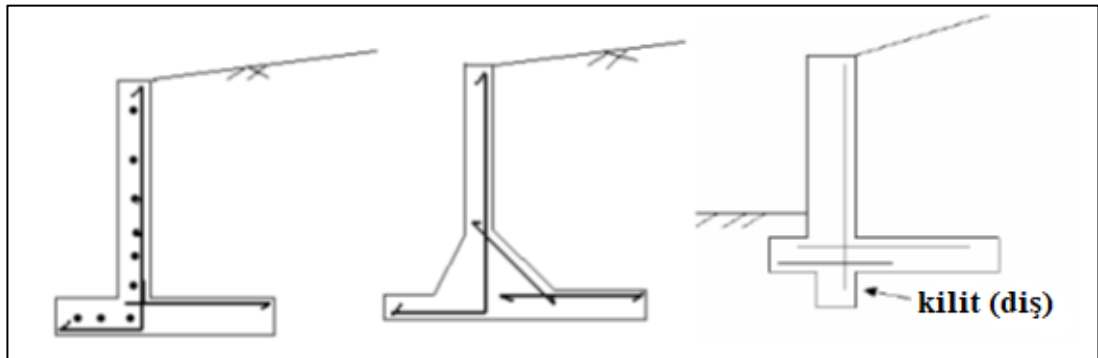
Şekil 1.8. Yarı ağırlık istinat yapısının en kesit tipleri ve asal donatılarının gösterimi (Gül den 2014).

1.3.1.3 Konsol istinat duvarları

Konsol istinat duvarları, genel olarak beton ve demirin beraber kullanılmasıyla yani betonarme olarak inşa edilen ve yanal basınçları bir konsol gibi dengeleyerek çalışan yapılar olarak tanımlanır. Bu duvarlar, dolgunun kendi ağırlığından da yararlanarak denge sağlamaya çalışır. Eğer direnen kuvvetler yeterli değilse, duvarın ön tarafa doğru hareket etmesini engel olabilmek için duvarın temeline dış yapılabilir.

Konsol istinat duvarları en çok tercih edilen istinat duvarı tipidir ve ekonomik maksimum yükseklikleri 8,0 metreye kadar çıkabilir. Bu duvarlarda çekme gerilmeleri donatı ile karşılandığı için kesitler küçültülebilir. Konsol istinat duvarları, betonun basınca dayanımı ve donatının çekmeye dayanımı yüksek olduğu için önemli bir seçenek olarak öne çıkar.

Şekil 1.9’ da konsol istinat duvarı örneklerine yer verilmiştir. (Gül den 2014).

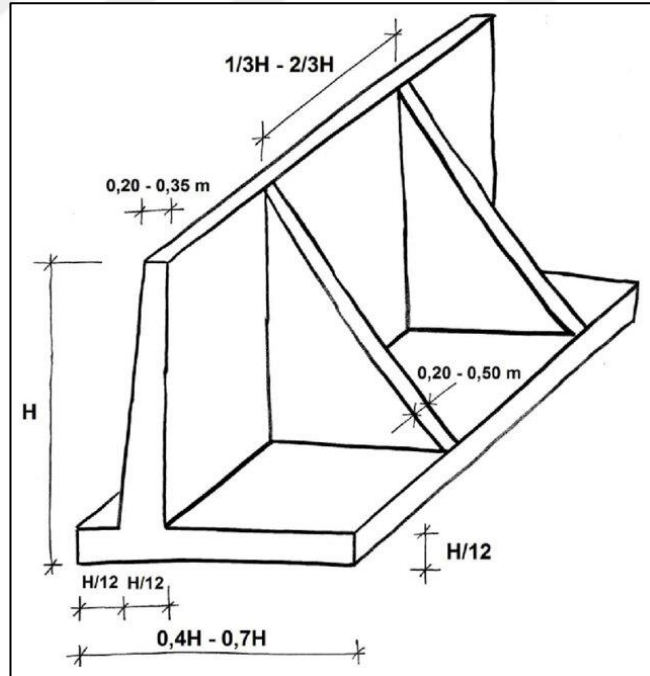


Şekil 1.9. Konsol istinat duvarları ve ana donatıların yerleştirilmesi (Bilgin 2006)

1.3.1.4. Payandalı istinat duvarları

Payandalı istinat duvarları, konsol istinat duvarları ile benzerlik gösterir. Yüklerin artması veya net yüksekliğin 8,0 metreden fazla olduğu durumlarda, payandalı istinat duvarları tercih edilir. Payandalı istinat duvarları, temeli ve gövdesi konsol istinat duvarlarına benzer şekilde yapılarak, payandalı duvarın arka veya ön kısmında aralıklarla payandalar (destekler) eklenerek inşa edilir. Bu tür duvarlara aynı zamanda nervürlü veya kontrfor istinat duvarları da denir. Payandalı istinat duvarları, daha büyük yükleri taşıyabilmek ve daha yüksek net yüksekliklerde stabilite sağlamak için kullanılır (Gülden 2014).

Yüklerin arttığı zaman veya yükseklik konsol duvarlar için fazla olduğu zamanda payandalı tipine geçilebilir. Boyutlandırılmaları konsol istinat duvarlarına benzer ve payanda aralıkları duvar yüksekliğine göre $(1/3)$ ile $(2/3)H$ arasında değişkenlik gösterir. (Bilgin 2006). Şekil 1.10. da payandalı istinat duvarlarının ön boyutlandırılmasında kullanılan değerler gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Payandalı istinat duvarı (an engineering postgraduate course on heuristic design of different types of retaining walls, 2015).

1.3.2. Yarı rijit istinat yapıları

Toprak basıncını karşılayarak görevlerini yerine getiren ancak belirli sınırlamaların dışında hareket göstererek veya yanal basıncın büyük miktarını zemine aktararak çalışan yapılar yarı rijit istinat duvarları olarak tanımlanır. Kafes ve sandık tipi, kazıklı perde ve diyafram duvarları, yarı rijit istinat duvarlarına örnek olarak gösterilebilir. Bu duvarlar, kendi içlerinde drenaj sağlamaları, sökülüp takılabilir olmaları, tamamlandığında hemen yük taşıyabilecek yapıda olmaları, küçük miktardaki oturmalarından etkilenmemeleri ve kolay bakım yapılabilmesi gibi üstünlüklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde tercih edilebilir yapılar olarak öne çıkarlar (Karakaya 2019). Şekil 1.11.de kafes tipi istinat duvarı örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Kafes tipi istinat duvarı

1.3.3. Esnek istinat yapıları

Zeminden kaynaklı kuvvetlerin altında uçlarından dönmeyen ve stabilitenin hesaplanmasında kendi ağırlıklarının ihmal edildiği istinat duvarları farklı tiplere ayrılabilir. Bunlar arasında taş dolgu duvarlar, tel örgü duvarlar, kafes tipi ve donatılı zemin duvarları yer almaktadır.

- Taş dolgu duvarlar: Büyük taş parçalarından yapılan duvarlardır ve şevli zeminlerde stabiliteyi sağlamak için inşa edilirler.
- Gabion (tel örgü=sandık) duvarlar: Esnek ve geçirgen yapıya sahip bu duvarlar, şevli zeminlerin ve dikey yarmalardaki stabiliteyi sağlamak için kullanılır. Çelik tel örgü kutularına taş doldurularak inşa edilirler (Gunawan 2022).

Gabion duvarlar, kolay taşınabilir ve prizma şekline getirilebilirler. Ancak bu tür duvarların sıkışabilirlik özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Sıkışabilirlik sonucu duvarın bazı bölgeleri aşağıya doğru hareket edebilir ve duvarın arkasındaki dolgu zemin ile duvarın arasında yukarı yönlü kesme kuvveti oluşabilir.

Bu tür istinat duvarları ekonomik ve estetik çözümler sunar ve son yıllarda daha fazla kullanılmaktadır.

Genellikle 1x1 m kesitli ve 2 ila 4 metre uzunluğa sahip tel sepetlerin içine 100 ila 250 milimetre boyutundaki taş parçaları ile doldurulur. Bu tel sepetler çalışma sahasına kapalı bir halde getirilir, yamacın yan tarafına doğru getirildikten sonra açılarak prizma şekline getirilip daha sonrasında içi taş doldurularak istenen konuma getirilir. Bu boyutlardaki bir sandıkta 0,45 civarında boşluk oranı sağlanır. Bunun sonucunda sandıkların sıkışabilirlik özelliklerini ve bundan dolayı oluşabilecek problemleri göz önünde bulundurmak gerekir. İstinat duvarının bazı kısımları bu sıkışabilirlik sonucunda aşağı yönlü hareket edeceğinden dolayı rijit duvarların tersine doğru, duvarın arasındaki dolgu ile duvar yüzeyi arasında aşağı yönlü değil, yukarı yönlü bir kesme kuvveti meydana gelir (Yıldırım 2019). Şekil 1.12. de gabion istinat duvarı örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Gabion duvar (Yıldırım 2019)

1.4. Betonarme İstinat Yapıları

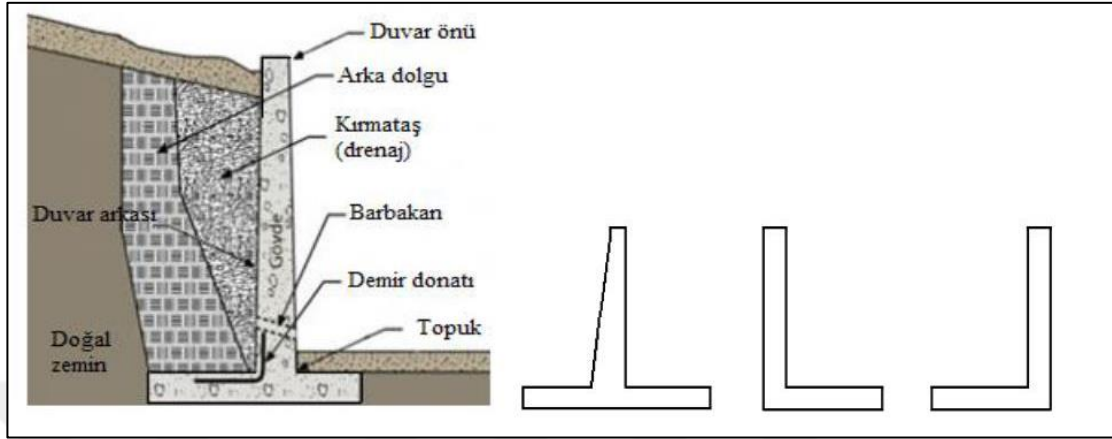
Betonarme istinat duvarları 7-8 metre yüksekliklere kadar yapılması ekonomik olan ve çalışma sahasının konumuna göre L veya ters L, T şeklinde inşa edilen betonarme istinat duvarları olarak tanımlanır. Eğer 7-8 metreden daha yüksek konsol istinat duvarı yapılması gerekiyorsa, hafifletme konsolu kullanılarak gövdeye etkiyen yanal kuvvet ve moment dağılımı düşürülebilir.

Duvarın yerleştirileceği bazı alanların sınırlı ve yetersiz olabileceği durumlarda stabilitenin sağlanması için duvarın kesitlerine yeterli boyut ve ağırlık verilemez. Bu durumda istinat duvarının arka tarafına ya da ön tarafına duvarın temelinde bir pabuç yapılması gerekeceğine dikkat çekilir. Eğer pabuç ön tarafında ise, duvarın devrilmeye karşı direnç momentini artırarak büyütür. Pabuç arka tarafında ise, duvarın arkasındaki zemin dolgusundan kaynaklanan yükleri de hesaba katarak devrilmeye karşı direnç momentini artırmış olur.

Pabucun konumu, yer darlığının hangi yönde olduğuna bağlı olarak belirlenir ve bu pabucun yerleştirilmesiyle duvar temel kitlelerinde eğilme momentleri oluşabilir. Ancak oluşan bu momentler için duvarın altındaki temeli betonarme yaparak önlem alınabilir. Duvarın kesitlerinin küçük olması nedeniyle, basınç çizgisi kesit çekirdeği

1. GİRİŞ

dışına çıkacağından, kesitlerde eksantrik kuvvet ve çekme gerilmeleri oluşabilir. Şekil 1.13.de betonarme istinat duvarı en kesiti verilmiş, duvarda ve dolgu zeminde olması gereken özellikler kesit üzerinden gösterilmiştir (Önalp ve Sert 2016).



Şekil 1.13. Betonarme istinat duvarının en kesiti

1.4.1. Betonarme nervürlü istinat duvarları

Yükseklikleri 7 ila 8 metreden daha yüksek olan konsol istinat duvarının kesitleri de büyük olacağı için ekonomik olmamakta ve bu nedenle yükseklik arttıkça nervürlü istinat duvarları da bir seçenek olabilmektedir. Duvarın yüksekliği arttıkça topuk kısmına gelen moment değerleri de artacağından ve bu momentleri karşılayabilmek için belirli aralıklarla nervürler eklenir. Nervürler, istinat duvarının önünde veya arkasında arazinin durumuna göre konumlandırılır. Şekil 1.14. de yapım henüz tamamlanmamış bir betonarme nervürlü istinat duvarı örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Betonarme nervürlü istinat duvarı

1.5. Prefabrike İstinat Yapıları

İstinat duvarları, yapılacağı yer ve yapım amacına bağlı olarak duvara birçok yük etki eder. İstinat duvarına etkiyen bu yükler proje-yapım aşamasında doğru bir şekilde tespit edilmesi önemlidir. Dikkate alınmayan yükler, duvarın stabilitesine zarar verebilir veya gereksiz yük alımı istinat duvarını ekonomik olmaktan çıkarabilir. İstinat duvarına etki eden yükleri sıralamak gerekirse; duvarın mevcut ağırlığı, arka yüzeyindeki aktif itki, ön yüzeyindeki pasif etki, yeraltı suyunun etkisi, depremden kaynaklı oluşabilecek etkiler ve sürşarj yükleri bulunur. Duvarın bulunduğu yerin şartlarına göre demiryolu, karayolu titreşim etkileri veya don tesiri etkileri de göz önünde bulundurulabilir (Doğangün 2021). Şekil 1.15. de prefabrike istinat duvarı örneği verilmiştir.



Şekil 1.15. Prefabrike istinat duvarı

1.6. İstinat Duvarlarının Çökme Nedenleri

İstinat duvarlarının yıkılması üzerine yapılmış olan araştırmalarda, büyük bir kısmının (%33) duvarın arka tarafındaki drenajın yetersizliğinin sebep olduğu belirlenmiştir. Diğer önemli sebepler ise %25 oranında eksik istinat temeli, %19 oranında yetersiz istinat perdesi ve %10 oranında hatalı üretimdir. İnşaat firmalarının istinat duvarı inşası sırasında uygun zemin etütleri yapmayıp zemine uygun projelendirme yapılmayıp tahmin ve tecrübelerle göre inşa edildikleri düşünülürse, meydana gelen çökme olaylarının yaklaşık olarak %87 oranında dikkatsizlik ve yapım aşamasındaki hatalardan kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır. Bu tür çökmelerde can kayıpları ve maddi kayıpların olduğu ülkemizde, denetlemelerin artırılması ve şirketlerin daha vicdani bir tutum sergilemeleri önemlidir. Ayrıca, bazı istinat duvarlarında olması gereken barbakan yapısının bile bulunmaması durumu dikkat çekmektedir. Bu tür önlemler alınarak istinat duvarı yıkılmalarının önüne geçilebilir ve güvenli yapılar inşa edilebilir.

1.7. Dayanma Yapılarının Hesap İlkeleri

1.7.1. Tasarımın ilkeleri

Zemin tabakalarında yanal ve düşey gerilmeler oluşmaktadır. Zeminlerde düşey gerilmeler oluşması sebebiyle yanal gerilmeler de meydana gelir. Bu yatay yöndeki gerilmeler, istinat yapılarına etkiyen yanal toprak basınçlarını oluşturur. İstinat yapılarının projelendirilmesi için hem düşey hem de yanal gerilmelerin hesaplanması önemlidir. Bu sayede istinat yapılarına maruz kalacak yanal toprak basınçları doğru bir şekilde belirlenir ve yapıların güvenliği sağlanır (Yenidoğan 2006).

Toprak tabakaları hem statik hem de dinamik durumlarda duvara etki eden düşey ve yanal toprak basınçlarına neden olur. Depremsiz durumlarda etkili olan toprak basıncı "statik toprak basıncı" olarak adlandırılırken, deprem etkisiyle ortaya çıkan ilave basınçlar ise "dinamik toprak basıncı" olarak bilinir. İstinat yapılarının projelendirilmesi için, düşey veya düşeye yakın eğimdeki zeminlerin tutulması ve desteklenmesi gereklidir. Bu süreçte, etkiyen yanal toprak basıncının doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir (Yıldız 2015).

1.7.2. İstinat duvarına etkiyen kuvvetler

İçerisinde bulundukları durumlara göre istinat yapıları birçok kuvvete maruz kalır. İstinat duvarına etki eden bu çeşitli kuvvetlerin doğru bir şekilde saptanabilmesi, istinat duvarının güvenli ve ekonomik olabilmesi için oldukça önem teşkil eder. İstinat duvarlarına gelen kuvvetler Şekil 1.16' da gösterilmektedir (Güliden 2014)



Şekil 1.16. İstinat duvarlarına gelen yükler (Güliden 2014)

Duvarın kendi ağırlığı: İstinat yapılarında, yanal kuvveti engelleyen en büyük kuvvetlerden biri istinat duvarının mevcut ağırlığıdır. Duvarın kendi ağırlığı, taban ile zemin arasındaki sürtünme sayesinde tabana etki eder ve bu sürtünme kuvvetleri, duvara gelecek yatay kuvvetleri karşılar. Bu şekilde istinat duvarının stabilitesi sağlanmış olur (Güliden 2014).

W (ton): İstinat duvarının ağırlığı

γ_m (t/m³): Duvarda kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığı

V (m²): İstinat duvarının kesit alanı ise

İstinat duvarının ağırlığı,

$$W \text{ (ton)} = \gamma_m \cdot V \cdot 1^m \quad (1.1)$$

Formülü ile hesaplanmaktadır.

İstinat duvarının arka tarafındaki yanal toprak basıncı teorilerinin uygulanması: İstinat duvarının arka tarafındaki yanal toprak basıncının teorileri, iki sınır değeri içerir. Birincisi, duvarın öne doğru az bir miktar yer değiştirdiğinde, duvarın arkasındaki zeminin çökmesi veya göçmesi sonucu meydana gelen "Aktif Zemin Basıncı" dır. İkincisi ise, duvarın arkaya (dolguya) doğru hareket etmesi durumunda, duvarın arkasındaki zeminin kabarması ile oluşan "Pasif Zemin Basıncı"dır. Bu iki zemin basıncı, istinat yapılarına etki eden ve stabiliteyi etkileyen önemli faktörlerdir (Orhan 2022).

İstinat duvarının arkasındaki zemin, mevcut halindeki özelliklerine göre duvarda yanal bir itki uygular. Bu yükleri hesaplayabilmek için Rankine (1857), Coulomb (1776), Mononobe-Matsuo (1929), Okabe (1926) ve Richards-Elms tarafından teoriler geliştirilmiştir. Zemin duvarın öne doğru hareketi durumunda duvara pasif direnç uygular, bu dirence "pasif toprak basıncı" denir. İstinat duvarının temeli zemin içerisine gömülü halde olduğundan, duvarın öne tarafa doğru hareket etmesi esnasında temel de

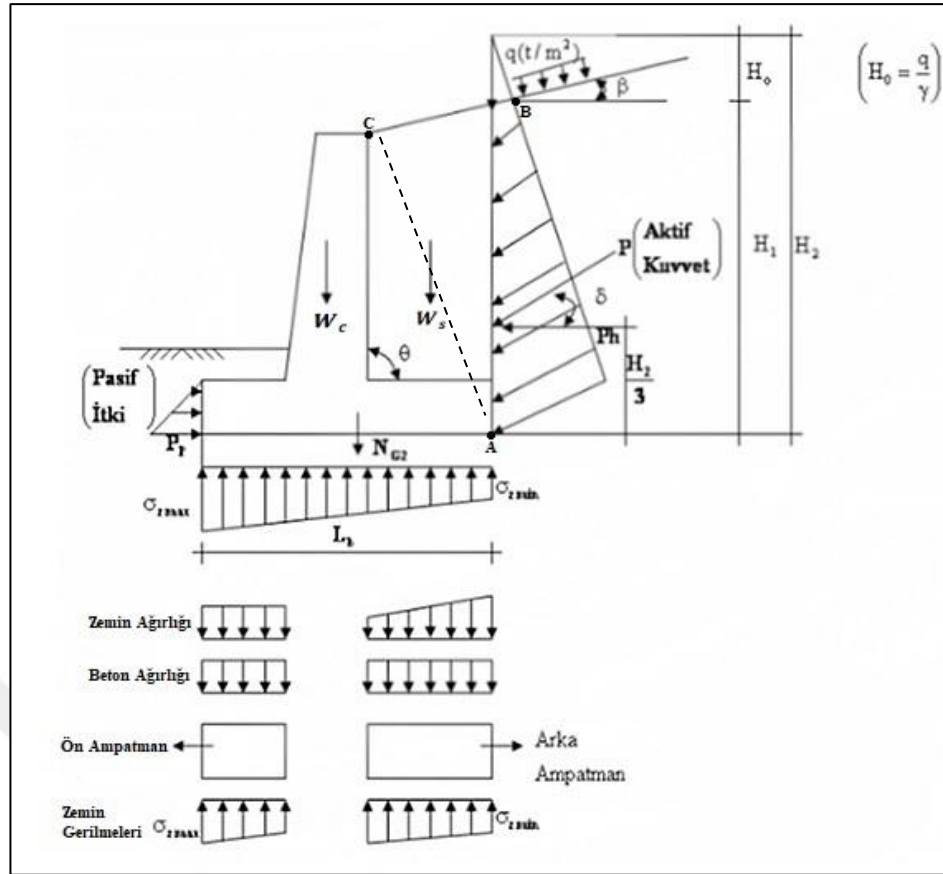
zemine doğru hareket gerçekleştirir, bu da temel üzerinde olumlu etki yapan pasif basınç gerilmelerinin ortaya çıkmasına neden olur.

Su ve sızıntı suyu basınçları: Su ile teması olan istinat yapılarında hidrostatik ve hidrodinamik su basıncı, yer altı suyundan kaynaklanan bir basınç istinat duvarına etki edebilir. Bu nedenle, istinat duvarının arka tarafında yeraltı ve yerüstü sularının birikmesi istenilen bir durum değildir. Eğer basınç yeraltı suyundan dolayı meydana geliyorsa, suyun zemin taneciklerini yüzdürme kuvveti hesaplamalara katılmalı ve suyun istinat duvarına yapacağı kaldırma basıncı da dikkate alınması gerekir. (Yıldırım 2019)

Deprem tesiri: İstinat duvarına deprem sırasında yatay ve düşey ivmelere bağlı olarak yatay kuvvet etki eder. Yatay ivmenin etkisiyle istinat duvarında yaklaşık olarak %10'luk bir yanal basınç artışı meydana gelebilir (Yıldırım 2019).

Don tesiri: Suyun donması veya çözülmesi, zeminde hacim değişikliklerine neden olabilir ve istinat duvarının yıkılmasına yol açabilir. Bu sebeple duvarın don derinliği seviyesinin aşağısında inşa edilmesi ile zemin drenajının sağlanması önemlidir (Yıldırım 2019).

Üst yük (sürşarj) etkisi: Malzemenin depo edilmesi, bina inşası gibi hallerde istinat duvarının arka tarafındaki zemin üzerine ilave yükler gelebilir. Bu yükler, dolgu üzerindeki konumlarına göre yatay yönde bir kuvvet olarak hesaba katılması gerekir (Yıldırım 2019).



Şekil 1.17. İstinat duvarlarına etki eden yükler (Güliden 2014)

Betonarme konsol istinat duvarı durumunda, “Rankine Toprak Basıncı Teorisi” ni stabilite kontrolleri için kullanılması durumunda, Şekil 1.17’ de gözüktüğü üzere, A noktasından (temel topuk sınırından) AB doğrultusunda düşey bir çizgi çizelim. Rankine aktif koşulu, AB düşey düzlemi boyunca varsayılmaktadır. Rankine aktif toprak basıncı denklemleri, duvarın AB yüzündeki yanal basınç etkilerinin hesabında kullanılabilir. (Orhan 2022).

Duvarın stabilite hesaplarında; (P) itki kuvveti, topuğun üstündeki zemin ağırlığı (W_s) ve beton duvarın ağırlığı (W_c) göz önünde bulundurulmalıdır. AB hattı yüzeyi boyunca Rankine aktif basıncının gelişmesi varsayımı, AC hattı ile sınırlanan kayma bölgesi, duvarın gövdesi tarafından engellenmiyorsa teorik olarak doğrudur. AC hattının düşey (AB) ile yaptığı açı (η) ile tanımlanırsa;

$$\eta = 45 + \left(\frac{\beta}{2}\right) + \left(\frac{\beta^I}{2}\right) - \left[\frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\sin \beta}{\sin \beta^I}\right)\right] \quad (1.2)$$

1.7.3. İstinat Duvarına etkiyen yanal toprak basıncı

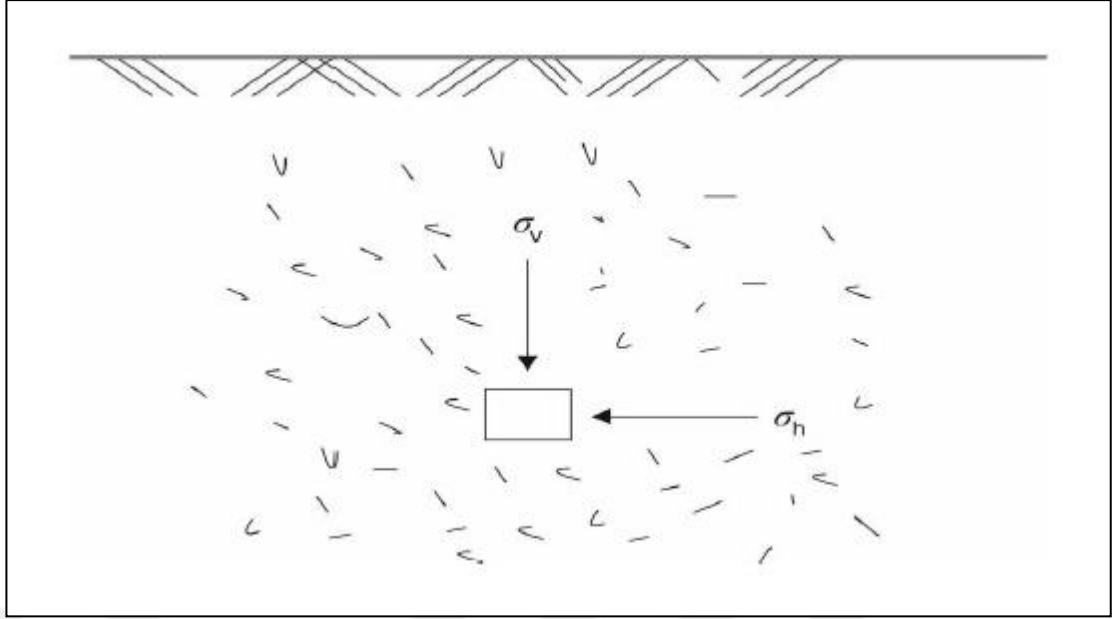
İstinat duvarları, düşey yönde ve şevli arazilerde zemin tabakasının bir arada tutulması veya desteklenmesi için kullanılan çözüm yöntemlerindendir. Doğru bir tasarım için istinat duvarına etkiyen yanal toprak basıncının doğru edilmesine dikkat edilmelidir. Bu toprak basıncı; istinat duvarının tipi, istinat duvarının hareket miktarı, zemin tabakasının kayma mukavemeti, birim hacim ağırlığı ve drenaj koşullarına bağlıdır.

İstinat duvarları, üç sınır değere maruz kalabilir:

- İstinat duvarının hiçbir şekilde hareketine izin verilmediği durumda oluşan sükûnet halindeki toprak basıncı.
- İstinat duvarının dışa doğru hareket etmesiyle zeminin harekete geçtiği aktif toprak basıncı.
- İstinat duvarının dolguya doğru yeterli miktarda hareket etmesiyle zeminin harekete geçtiği pasif toprak basıncı.

Aktif basınç, duvarın dolgudan uzaklaşmasıyla meydana gelirken, pasif basınç zeminin kabarmasıyla göçmeye neden olur. Aktif ve pasif toprak basınçlarıyla ilgili Coulomb ve Rankine teorileri, istinat duvarının arkasındaki dolgu zeminde kırılma yüzeyi oluşuncaya kadar zemin tabakalarının yatay doğrultuda yeterince hareket etmesine dayanır (Yenidoğan 2006).

Şekil 1.17' de gösterilen zemin tabakasında yatay toprak basıncını hesaplamak için yatay gerilme (σ_h) ve düşey gerilme (σ_v) olarak yatay gerilme ile düşey gerilme arasındaki oran (1.16) de gösterildiği gibi toprak basıncı katsayısını ifade etmekte ve yatay gerilme ise (1.17) de gösterildiği gibi kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bir zemin elemanına etkiyen yatay ve düşey elemanlar Şekil 1.18. de gösterilmiştir.



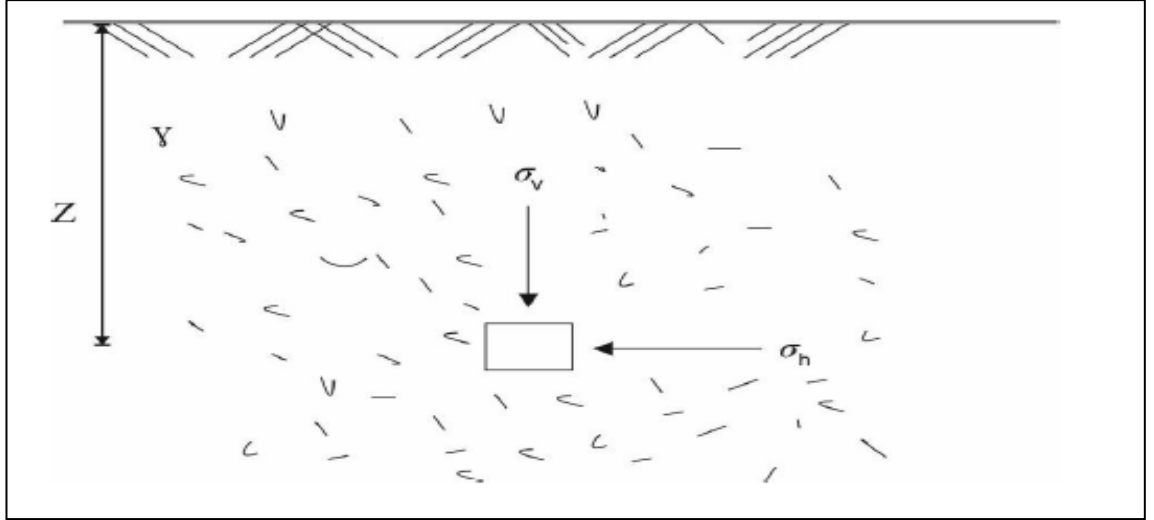
Şekil 1.18. Bir zemin elemanına etkiyen yatay ve düşey gerilmeler (Yıldız 2015)

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1.3)$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \quad (1.4)$$

1.7.3.1. Sükûnet halindeki yanal toprak basıncı

İstinat duvarlarının hiçbir şekilde hareketine müsaade edilmediği durumda, yanal toprak basıncının hesaplanabilmesi için öncelikle düşey yönde gerilmeler tespit edilmelidir. Düşey gerilmeler, zemin tabakaları içerisinde mevcut ağırlıklarından ve düşey yönde uygulanan yükler sebebiyle oluşan gerilmelerdir. Düşey gerilmelerin hesaplanmasıyla birlikte, duvarın tabanında oluşacak yatay sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan yatay toprak basıncı da belirlenebilir. Bu şekilde, duvarın hiçbir şekilde hareketine müsaade edilmediği durumdaki yanal toprak basıncı hesaplanmış olur. İncelenen istinat duvarının hareketine hiçbir şekilde müsaade edilmiyorsa belli bir derinlik seviyesinde meydana gelecek yanal toprak basıncının hesaplanabilmesi için öncelikle düşey yöndeki gerilme değerinin hesaplanması gerekir (Özaydın 2006).



Şekil 1.19. Sükunetteki toprak basıncı (Yıldız 2015)

$$\sigma_v = q + \gamma \cdot z \quad (1.5)$$

q = sürüşarj yükü

γ = zeminin birim hacim ağırlığı

z = duvarın arka tarafındaki dolgu seviyesinden itibaren derinlik

Zemin ortaya çıkan yanal gerilmeler, zeminin mevcut ağırlığı ile uygulanmakta olan dış kuvvetlerden kaynaklı meydana gelir. Hesaplanan düşey gerilmelerin yardımı ile yanal gerilmeler aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir. K_0 toprak basıncı katsayısı parametre olarak boyutsuz olmakla beraber zeminin cinsi ve gerilme durumu gibi bileşenlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v + u \quad (1.6)$$

K_0 = sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı

u = hidrostatik su basıncı

1. GİRİŞ

K_0 katsayısının belirlenmesi için literatürde birçok yaklaşım mevcuttur. Bu çeşitli yaklaşımlar aşağıda gösterildiği gibidir.

Kumlar için (Jacky, 1944):

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (1.7)$$

Normal konsolide killer için

$$K_0 = 0,4 + 0,007 \cdot (PI) \quad PI=0-40 \text{ (Broker ve Ireland, 1965)} \quad (1.8)$$

$$K_0 = 0,64 + 0,001 \cdot (PI) \quad PI=40-80 \text{ (Broker ve Ireland, 1965)} \quad (1.9)$$

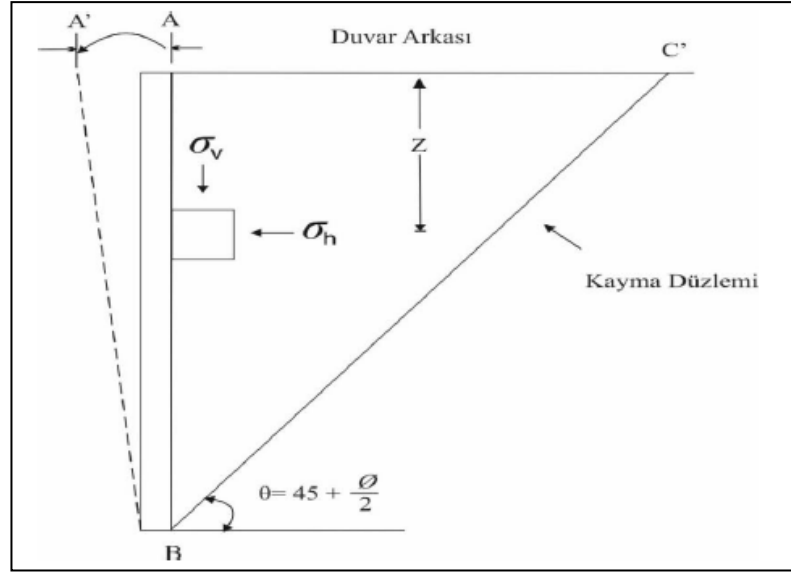
Aşırı konsolide killer için (Broker ve Ireland, 1965):

$$K_{0(ak)} = K_{0(nk)} \cdot \sqrt{AKO} \quad (1.10)$$

1.7.4. Aktif ve pasif toprak basıncı

1.7.4.1. Aktif toprak basıncı

İstinat yapılarına etki eden statik toprak basınçları, duvarın ve zeminin hareketinden etkilenir. Duvar, arkasındaki zemini tutar ve itkiye maruz kalır. Eğer istinat yapısı, dolgunun dışına doğru çok az hareket ederse meydana gelen düşey gerilmelerde bir değişim gerçekleşmez. Ancak sükûnet halindeki yatay doğrultuda oluşan zemin gerilmeleri azalmaya başlar ve belirli bir seviyeyi aştığında kayma yüzeyi oluşur. Yatay gerilmelerin en az olduğu yerde göçme meydana gelecektir. Bu kayma yüzeyi doğrultusunca dışarı yönlü hareket etmeye çalışan zemin kaması duvarda yatay doğrultuda toprak basıncı oluşturur ve buna da aktif toprak basıncı denir. Şekil 1.20’de yatay ile $45+\phi/2$ açısı yapan zemin kamasındaki kayma düzlemleri gösterilmiştir (Yıldız 2015).



Şekil 1.20. Aktif toprak basıncı durumu (Das 2013)

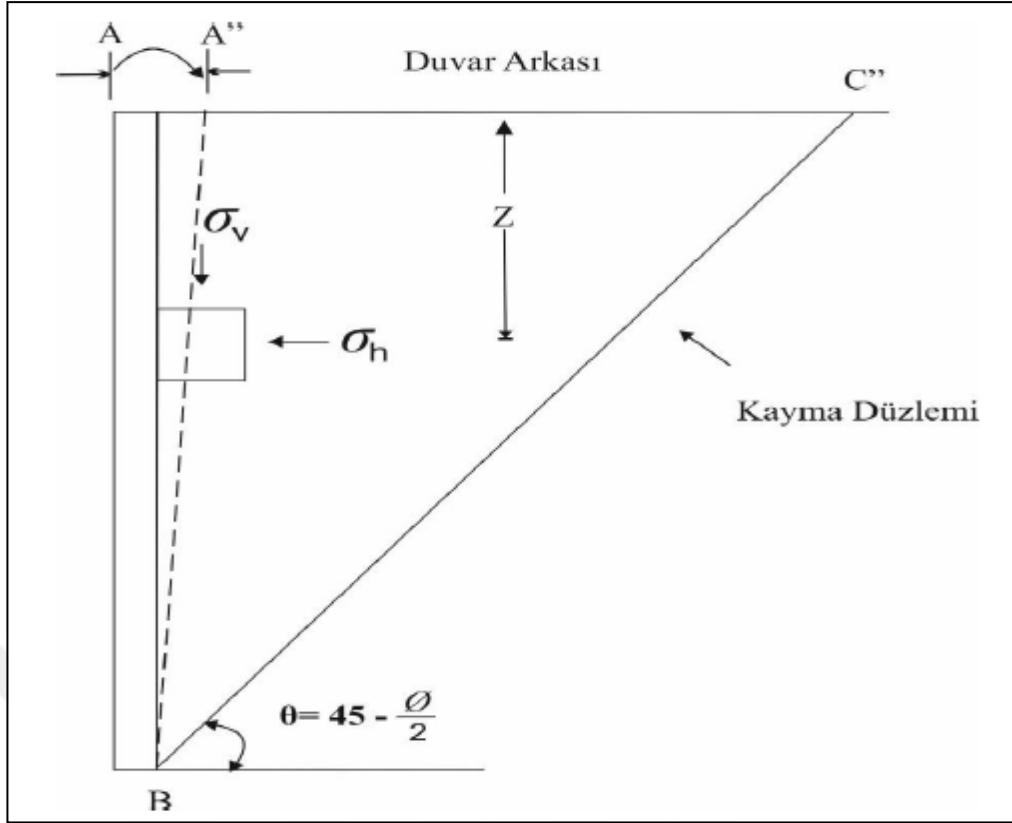
İstinat duvarının çok az hareket etmesi aktif toprak basıncının oluşması için yeterlidir. Farklı zemin tipleri için gerekli yer değiştirme miktarları istinat duvarı yüksekliği olan H ile ilişkilendirilerek Çizelge 1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Zemin tipine göre aktif toprak basıncının oluşması için gereken yer değiştirme miktarları (Das 2013).

Zemin Tipi	Yer Değiştirme
Gevşek Kum	0,001H-0,002H
Sıkı Kum	0,0005H-0,001H
Yumuşak Kil	0,02H

1.7.4.2. Pasif toprak basıncı

İstinat yapısı arkasında bulunan dolgu zemine doğru hareket gerçekleştirirse zemin kaması duvara pasif basınç uygular. Kamanın istinat yapısına uygulamış olduğu pasif direnç, pasif toprak basıncı olarak adlandırılır. Şekil 1.21’de yatay ile $45 - \frac{\phi}{2}$ açı yapan zemin kamasındaki kayma düzlemleri gösterilmektedir (Yıldız 2015).



Şekil 1.21. Pasif toprak basıncı durumu (Das 2013)

Zeminde oluşan pasif toprak basıncı, aktif toprak basıncı ve sükûnet halindeki toprak basıncından daha büyük değerlere sahiptir. Pasif toprak basıncının meydana gelmesi için istinat duvarının bir miktar yer değiştirmesi gerekir. Farklı zemin tipleri için gereken yer değiştirme miktarları istinat yapısının zeminden itibaren yüksekliği olan H ile ilişkilendirilerek Çizelge 1.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.2. Pasif toprak basıncının oluşması için gereken tipik yer değiştirmeler (Das 2013).

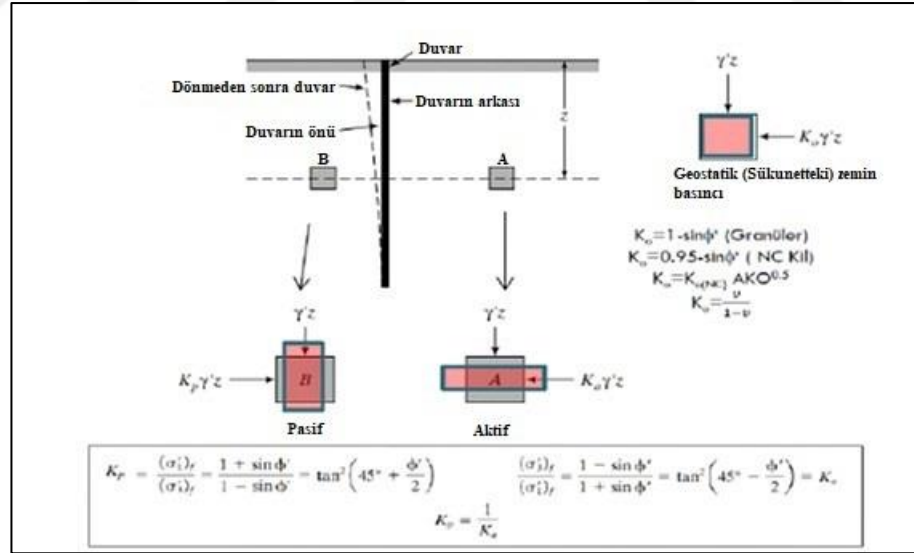
Zemin Tipi	Yer Değiştirme
Gevşek Kum	0,01H
Sıkı Kum	0,005H
Yumuşak Kil	0,04H
Sert Kil	0,02H

1.7.5. Klasik statik toprak basıncı teorileri

Yanal zemin (toprak) basınçları ile ilgili olarak Coulomb (Kama) Teorisi ve Rankine Teorisi olmak üzere iki ana teori bulunmaktadır. Coulomb Teorisi, daha önce ortaya atılmış olsa da, anlatım kolaylığı açısından önce Rankine Teorisi (1857) açıklanacaktır (Uzuner 2016b).

1.7.5.1. Rankine teorisi

Rankine Teorisi, başlangıçta kohezyon bulunmayan zemin tipleri için önerilmiş olup sonrasında kohezyon bulunan zeminler ve başka durumlar için genel hale getirilmiştir. Bu teori, plastik denge durumuna ulaşan bir zemin tipinde meydana gelen gerilmeleri inceler. Plastik denge durumu, zemin ortamının her noktasında kırılma olduğu durumu ifade eder. Zeminin deformasyona uğratılmamış durumuna elastik denge (sükûnet durumu) denir. İki boyuttaki durumlarda, yarım sonsuz ortamda, z derinliğindeki bir elemanı ele alalım (Şekil 1.22) (Uzuner 2016b).



Şekil 1.22. İki boyutlu koşullarda, z derinliğinde bir eleman (Uzuner 2007)

İki boyutta z derinliğindeki bir elemanda, yatay yönlü ve düşey yönlü yüzlerindeki kayma gerilmeleri sıfır (0) olup, elemana asal gerilmeler etki etmektedir. Yarım sonsuz ortamda teorik olarak birbirinden farklı 2 durum meydana gelebilir.

1.7.5.2. Sükûnet durumu (elastik denge)

Zeminin deformasyona uğratılmamış durumuna elastik denge (sükûnet hali) denir. Sükûnet halinde yatay yöndeki gerilme, aşağıda ifade edilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$\sigma_0 = \sigma_y = K_0 \cdot \sigma_d \quad (1.11)$$

Burada:

σ_0 : Sükûnet halindeki yatay gerilme

σ_y : Yatay gerilme

σ_d : Düşey gerilme

K_0 : Sükûnet halindeki toprak basıncı katsayısı

$$K_0 = \frac{v}{1-v} \quad (1.12)$$

Veya

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (1.13)$$

Burada:

v : Zeminin poisson oranı

K_0 ' ın belirlenmesi güçtür. Çizelge 1.3' de, K_0 için bazı tipik değerler verilmektedir.

Çizelge 1.3. Zeminin cinsine göre tipik K_0 değerleri (Uzuner 2016a)

Zemin Cinsi	K_0
Gevşek Kum	0,4
Sıkı Kum	0,6
Yumuşak Kil	0,6
Sert Kil	0,5

1.7.5.3. Plastik denge durumu

Zeminde plastik denge durumu, zeminin içindeki tüm noktalarda kırılma olduğu anlamına gelir. Bu durumda, zemin artık daha fazla deformasyon yaşamaz ve istikrarlı bir yapıya ulaşır. Plastik denge durumu, genellikle zemine uygulanan yüklerin belirli bir seviyeyi aştığı veya zeminin taşıma kapasitesini aştığı anlarda meydana gelir. Plastik denge durumunda zeminin taşıma gücü sınırına ulaşıldığı için zeminde herhangi bir hareket devam etmez ve bu durumda zeminin gerilmeleri ve deformasyonları sabitlenir. Plastik denge durumu, zemin mekaniğinde önemli bir kavramdır ve temelde istinat duvarları, zemin stabilizasyonu ve temel tasarımında dikkate alınması gereken bir durumdur (Krabbenhoft 2019).

1.7.5.3.1. Aktif rankine durumu

Aktif Rankine durumu, zeminin istinat duvarına doğru dışarı doğru hareket etmeye çalıştığı durumu ifade eder. Zeminin duvara uyguladığı yanal toprak basıncının maksimum olduğu durumdur. Aktif Rankine durumunda, zemin istinat duvarının hareketine izin vermez ve duvar üzerinde en büyük yatay basınç gerilmeleri oluşur. Bu durum genellikle istinat duvarlarının dolgu tarafına doğru yük bindiğinde ve zeminin duvara itme kuvveti uyguladığında ortaya çıkar. Aktif Rankine durumu, duvarın yıkılma riski altında olduğu ve stabiliteyi sağlamak için önlemler alınması gereken bir durumdur.

Aktif durumda elemana etkiyen düşey gerilme ($\sigma_d = \sigma_1 = \gamma_n \cdot z$, büyük asal gerilme) sabit kalırken, yanal gerilmenin değeri gitgide düşerek, sabit bir değere ulaşır ($\sigma_y = \sigma_3 = \sigma_a$, küçük asal gerilme). Bu koşulda, zemin ortamı, yatay doğrultuda $45^\circ + \phi/2$ lik açılar yapan düzlemler boyunca kırılır. Aktif halde, düşeydeki ve yataydaki gerilmeler arasında aşağıdaki gibi hesap bağıntıları vardır (Uzuner 2015, 2016a).

$$\sigma_a = K_a \cdot \sigma_d = K_a \cdot \gamma_n \cdot z \quad (1.14)$$

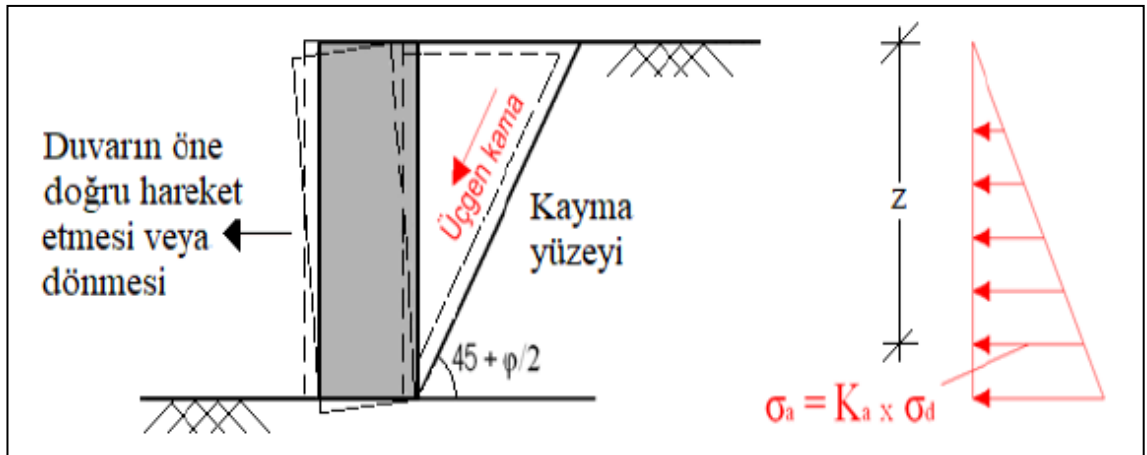
$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (1.15)$$

K_a : Aktif toprak (zemin) basınç katsayısı

σ_a : Aktif yatay zemin basıncı

σ_d : Büyük asal gerilme

Arka yüzü düşey ve sürtünmesiz ($\delta = 0$, δ : Duvarın arka yüzü ile zemin yüzeyi arasında oluşan sürtünme açısı) rijit bir istinat yapısının, zemin tabakasından uzağa doğru yer değiştirmesi veya istinat yapısının ön tarafa doğru bir miktar döndürülmesi ile yapının arka tarafından bulunan dolgu zeminde, aktif durum meydana gelir ve bu koşulda, yapıya aktif yanal zemin basınçları etki eder (Şekil 1.23). Bağıntı 1.15' de görüleceği üzere, aktif yanal basınç dağılışı, derinlik arttıkça doğrusal olarak artış gösterir (üçgen şekil).



Şekil 1.23. Kohezyon bulunmayan zemin tabakasında istinat duvarının arkasındaki aktif durumun gösterimi (Yıldırım 2019).

Aktif (Rankine) koşulunda, yatay doğrultulu zemin basınçları, düşey yüzü duvar arkasına yatay olarak etki eder ve duvar arkasında herhangi bir sürtünme kabul edilmez. Bu kabul, hesaplamaları kolaylaştırır ancak gerçekte duvar arkasında sürtünme oluşabilir. Özellikle duvar öne doğru hareket ederken, istinat duvarının arka tarafında meydana

1. GİRİŞ

gelen üçgen kaması aşağı yönlü kayar ve istinat duvarının arkasına aşağı yönde sürtünme kuvveti uygular. Bu nedenle gerçek uygulamalarda sürtünmenin de dikkate alındığı hesap yöntemleri kullanılmalıdır (Uzuner 2016b).

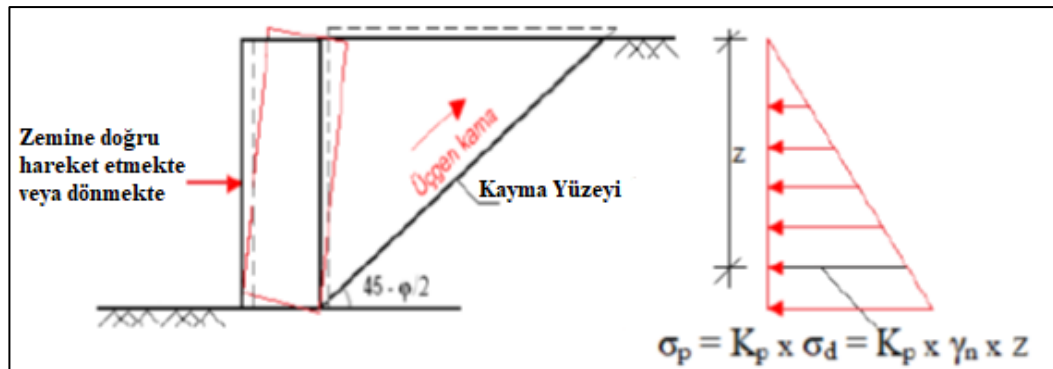
Coulomb Teorisinde bu sürtünme dikkate alınır. Çizelge 1.4' de bir K_a tablosu görülüyor. Tablodan görüleceği üzere ϕ arttıkça, K_a azalır.

Çizelge 1.4. Rankine aktif toprak basıncı katsayıları, K_a (düz zemin yüzü)

ϕ°	20	21	22	23	24	25	26	27	28
K_a	0,490	0,472	0,455	0,438	0,422	0,406	0,390	0,376	0,361
ϕ°	29	30	31	32	33	34	35	36	37
K_a	0,347	0,333	0,320	0,307	0,295	0,283	0,271	0,260	0,249
ϕ°	38	39	40	41	42	43	44	45	46
K_a	0,238	0,228	0,217	0,208	0,198	0,189	0,180	0,172	0,163

1.7.5.3.2. Pasif rankine durumu

Eğer, yarım sonsuz ortam, yatay yönde sıkışmaya maruz bırakılırsa, zemin tabakasında pasif durum oluşturulur (Uzuner 2016b). Aşağıda Şekil 1.24. de kohezyon bulunmayan bir zemindeki istinat duvarının arka tarafından oluşan pasif rankine durumu gösterilmiştir.



Şekil 1.24. Kohezyonsuz bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan pasif rankine durumu (Yıldırım 2019).

Pasif Rankine durumu, istinat duvarının arka dolguya doğru hareket etmesi veya dönmesi sonucu zeminin duvara pasif bir şekilde etki ettiği durumdur. İstinat duvarının arkasında oluşan üçgen şeklindeki zemin kaması, aşağı yönlü hareket ederek istinat duvarına pasif bir sürtünme kuvveti uygulamış olur. Pasif Rankine teorisi, istinat duvarının arkasında sürtünmesiz bir yüzeyin olduğu ve zeminin serbestçe hareket edebildiği kabulüne dayanır, ancak gerçekte istinat duvarının arkasında bir miktar sürtünme bulunabilir. Pasif durumda, yatay yönlü ve düşey yönlü gerilmelerin arasında, aşağıda gösterilen hesap bağıntıları vardır (Yıldırım 2019).

$$\sigma_p = K_p \cdot \sigma_v = K_p \cdot \gamma_n \cdot z \quad (1.16)$$

$$K_p = \tan^2 \left[45 + \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (1.17)$$

K_p : Pasif zemin basınç katsayısı

σ_p : Pasif yanal zemin basıncı

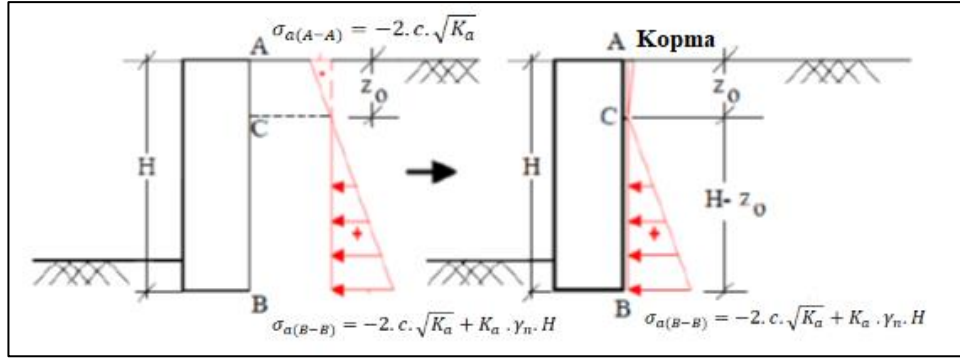
γ_n : Zeminin birim hacim ağırlığı

ϕ : İçsel sürtünme açısı

σ_v : Düşey gerilme

z : Derinlik

Kohezyon bulunan bir zemin tabakasında ($c \neq 0, \phi \neq 0$) rankine teorisine göre, istinat yapısına etkiyen aktif yanal zemin basıncı Şekil 1.25' de gösterilmiştir.



Şekil 1.25. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan aktif durum (Yıldırım 2019).

Şekil 1.25’ de zemin tabakasında AC derinliği boyunca çekme gerilmeleri (-) meydana gelir. Pratik halde zemin tabakası çekme gerilmesi almadığı için, AC derinliğinde istinat duvarının arkasında yanal zemin basıncı meydana gelmez.

$$\sigma_{a(A-A)} = -2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} \quad (1.18)$$

$$\sigma_{a(B-B)} = -2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} + K_a \cdot \gamma_n \cdot H \quad (1.19)$$

σ_a = Aktif toprak itkisi

K_a = Aktif toprak basıncı katsayısı

H = Duvar yüksekliği

γ_n = Zeminin birim hacim ağırlığı

c = Kohezyon

z_0 = Derinlik

$$-2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a} + K_a \cdot \gamma_n \cdot z_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad z_0 = \frac{2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a}}{K_a \cdot \gamma_n} \quad (1.20)$$

1. GİRİŞ

Genel bir zemin tabakasında yani kohezyon bulunan bir zemin tabakasında ($c \neq 0, \phi \neq 0$) rankine teorisine göre, istinat yapısının maruz kaldığı pasif yanal zemin basınçları Şekil 1.26' da gösterilmiştir.

$$\sigma_{P(A-A)} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \quad (1.21)$$

$$\sigma_{P(B-B)} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p} + K_p \cdot \gamma_n \cdot H \quad (1.22)$$

σ_P = Pasif toprak itkisi

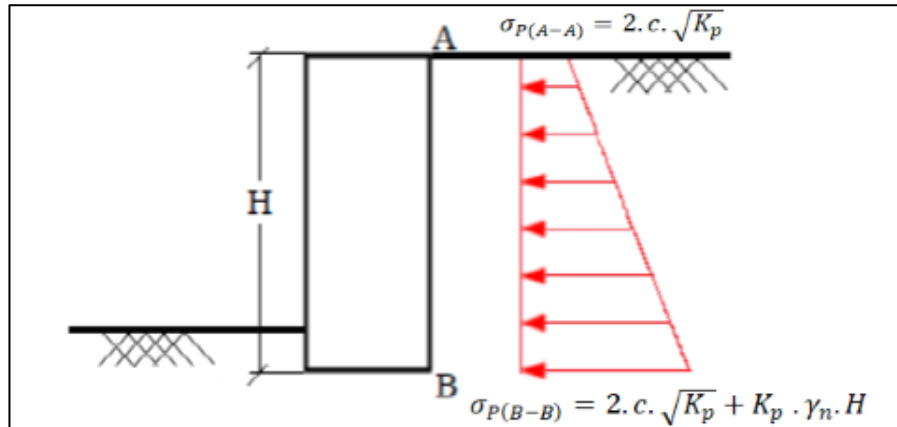
H = Duvar yüksekliği

γ_n = Zeminin birim hacim ağırlığı

c = Kohezyon

z_0 = Derinlik

K_p = Pasif Rankine toprak basıncı katsayısı



Şekil 1.26. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasında oluşan pasif durum (Yıldırım 2019).

1. GİRİŞ

Rankine Teorisi'nde açıklanan aktif yatay zemin basınç katsayısı K_a 'yı veren hesap bağıntısı (4.13) ve pasif yanal zemin basıncı katsayısı K_p 'yi veren bağıntı (1.17), duvarın arkasında bulunan dolgunun yatay bir durumda olması koşuluyla geçerlidir. İstinat duvarının arkasında bulunan dolgunun yatayla β açısı yapması durumunda K_a ve K_p değerlerinin hesaplamak için gerekli formüller (1.23 ve 1.24) gösterilmiştir (Şekil 1.27).

$$K_a = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (1.23)$$

$$K_p = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (1.24)$$

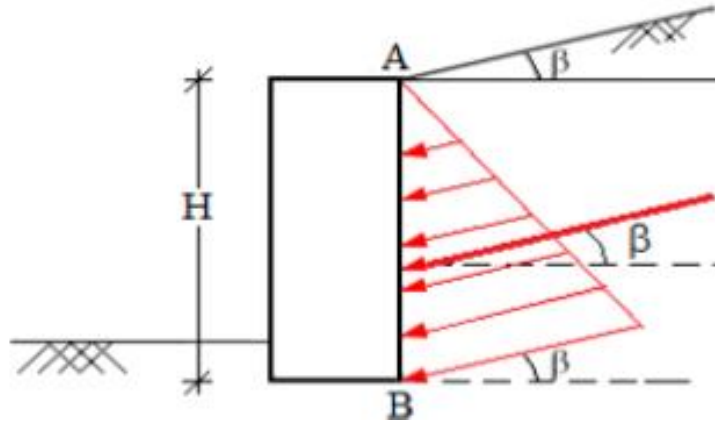
K_a = Aktif Rankine toprak basıncı katsayısı

K_p = Pasif Rankine toprak basıncı katsayısı

ϕ = Zemine ait içsel sürtünme açısı

β = Duvar arkasının yatayla yaptığı açı

α = Zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı



Şekil 1.27. Kohezyonlu bir zeminde istinat duvarının arkasındaki dolgunun yatayla açısı oluşturması durumu (Yıldırım 2019).

1. GİRİŞ

İstinat yapılarında, aktif basıncının meydana gelebilmesi için gereken minimum kayma ve dönme miktarları Çizelge 1.5’ de gösterilmiştir.

Çizelge 1.5. İstinat duvarlarında aktif basınç oluşturan minimum kayma ve dönme miktarları (Tunç 2002).

Zemin Cinsi	Kayma	Dönme
Kum	(0,001-0,002) H	0,001
Sert Kil	(0,01-0,02) H	0,004
Yumuşak Kil	(0,02-0,05) H	0,004

Eğik bir zemin için Rankine K_a tablosu Çizelge 1.6. da gösterilmiştir.

Çizelge 1.6. Eğik zemin için bir Rankine K_a tablosu (Uzuner 2016a)

$\beta = 10^\circ$

ϕ°	20	21	22	23	24	25	26	27	28
K_a	0,531	0,509	0,408	0,468	0,449	0,431	0,413	0,396	0,380
ϕ°	29	30	31	32	33	34	35	36	37
K_a	0,365	0,350	0,335	0,321	0,307	0,294	0,282	0,270	0,258
ϕ°	38	39	40	41	42	43	44	45	46
K_a	0,246	0,235	0,225	0,214	0,204	0,195	0,186	0,177	0,168

$\beta = 20^\circ$

ϕ°	20	21	22	23	24	25	26	27	28
K_a	0,940	0,748	0,677	0,625	0,583	0,547	0,515	0,487	0,460
ϕ°	29	30	31	32	33	34	35	36	37
K_a	0,436	0,414	0,393	0,374	0,355	0,338	0,322	0,306	0,291
ϕ°	38	39	40	41	42	43	44	45	46
K_a	0,277	0,263	0,250	0,238	0,226	0,215	0,204	0,193	0,183

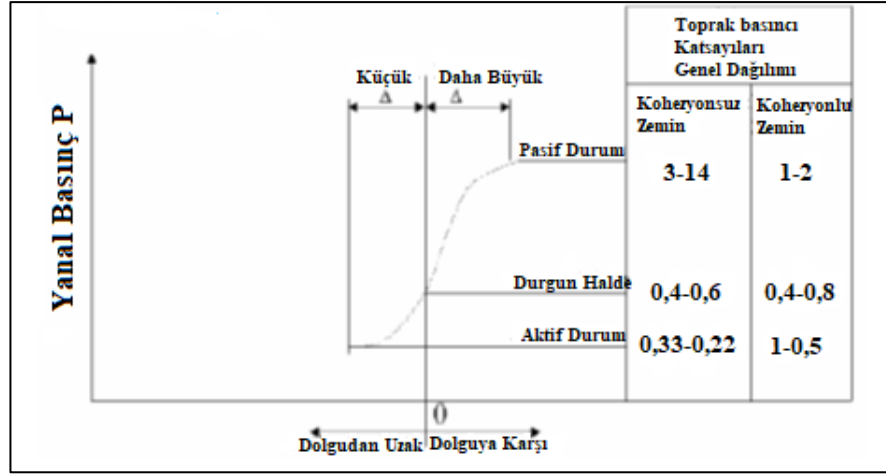
1.7.6. Coulomb kama teorisi

Coulomb (1776), duvarın ön tarafa veya arka tarafa doğru hareket yaptığı esnada, duvarın arka tarafında meydana gelen kayan zemin kütesinin dengesini dikkate alarak incelemiştir. Kohezyon bulunmayan zemin tabakalarında, duvarın arka tarafında oluşan kayan kütle üçgen biçimindedir ve bu kütle bir kayma düzleminin üzerinde kayma hareketi gerçekleştirir. Coulomb'un teorisinde, duvar arkasında sürtünme olduğu kabul edilir (sürtünme açısı δ). Gerçekte duvar arkası pürüzlü olduğundan ve zeminle arasında sürtünme var olduğundan, δ değeri genellikle $\phi/3 - 2\phi/3$ arasında seçilir (Uzuner 2016b).

1776' da Coulomb tarafından öne sürülen toprak basıncı ile ilgili kabuller (Coulomb toprak basıncı teorisi) şöyledir (Bilgin 2006);

1. Zemin izotropik ve homojendir. Ayrıca içsel sürtünme ve kohezyonu da içermektedir.
2. Göçme yüzeyi düzlemseldir Coulomb bunun böyle olmadığını fark etmiştir fakat hesapları kolaylaştırmak için kullanmıştır. Arka dolgu yüzeyi düzlemseldir.
3. Sürtünme kuvvetleri göçme yüzeyine üniform bir şekilde dağıtılmıştır ve $\phi = \tan \delta$ (sürtünme katsayısı= ϕ)
4. Göçme kaması rijit bir kütledir.
5. Duvar sürtünmesi vardır; göçme kaması duvar arkası boyunca hareket eder ve duvar sınırı boyunca sürtünme oluşturur.
6. Göçme düzlemsel bir eğilmedir, sonsuz uzun kütlelerin birim uzunluğu göz önüne alınacaktır.

Aşağıda kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin tabakaları için aktif ve pasif basınç değerleri Şekil 1.28' de gösterilmiştir.



Şekil 1.28. Kohezyon bulunan ve kohezyon bulunmayan zemin tabakaları için aktif ve pasif basınç değerleri (Bowles 1982).

1.7.6.1. Coulomb aktif durum

Aktif durumdaki kohezyonsuz zeminlerde, istinat yapısı ön tarafa doğru hareket ederken, istinat duvarının arka tarafında meydana gelen üçgen kamada, aşağıya doğru kayar (Şekil 1.29).

ABC zemin kamasını düşünelim. ABC zemin kaması, etkiye yükler altında denge durumunda olmakla beraber, kamaya etki eden diğer kuvvetler aşağıdaki ifade edilmiştir:

- ABC kamasının kendi ağırlığı (W),
- BC kayma düzlemi boyunca etkiyen R bileşke kuvveti ve AB düzlemi boyunca etkiyen P_a aktif bileşke kuvveti.

İstinat duvarının arka tarafında oluşan üçgen kama aşağı yönlü hareket ettiği için P_a ve R kuvvetleri, sürtünme kuvvetleri sebebiyle, yüzey normalleriyle beraber hareket yönünün tersine doğru, sırasıyla δ ve ϕ açıları yaparlar (Şekil 1.28). Bilindiği üzere sürtünme kuvvetlerinin yönü, hareket yönünün tersi yönündedir.

BC kayma düzlemi üzerinde, zeminin zeminle sürtünme açısı ϕ dir. 3 kuvvetin dengesi yazılıp, P_a aktif bileşke kuvvetinin minimum olması şartı kullanıldığında, bazı işlemlerden sonra aşağıdaki bağıntı elde edilir (Uzuner 2016b).

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a \quad (1.25)$$

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (1.26)$$

$$K_a = f(\phi, i, \beta, \delta) \quad (1.27)$$

β = Duvar arkasının yatayla yaptığı açı

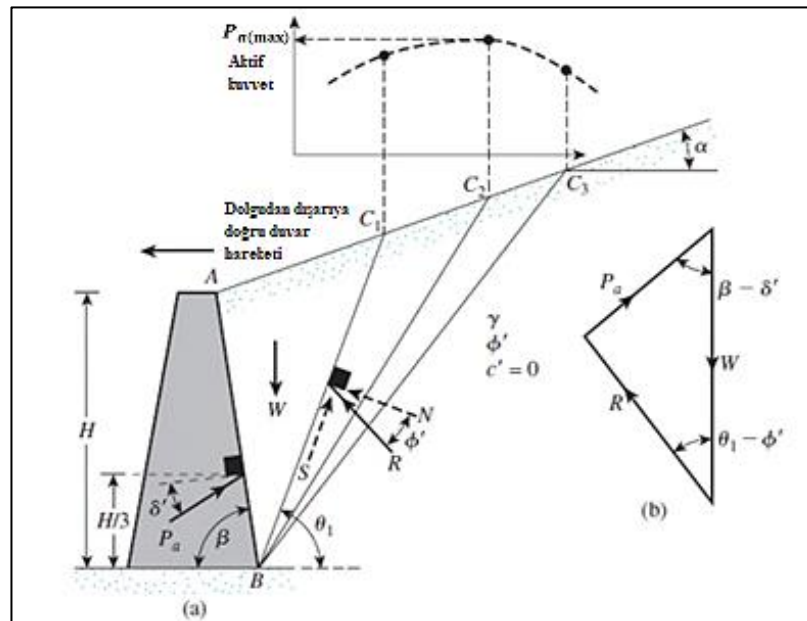
α = Zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı

Örneğin $\phi = 34^\circ$, $\alpha = 75^\circ$, $\beta = 20^\circ$, $\delta = 18^\circ$, için

$K_a = 0,5232$ olur.

Çizelge 1.7’ de bir Coulomb K_a (Bağıntı 1.26) tablosu görülüyor.

Aşağıda Şekil 1.29’ da Coulomb aktif toprak basıncı durumu gösterilmiştir.



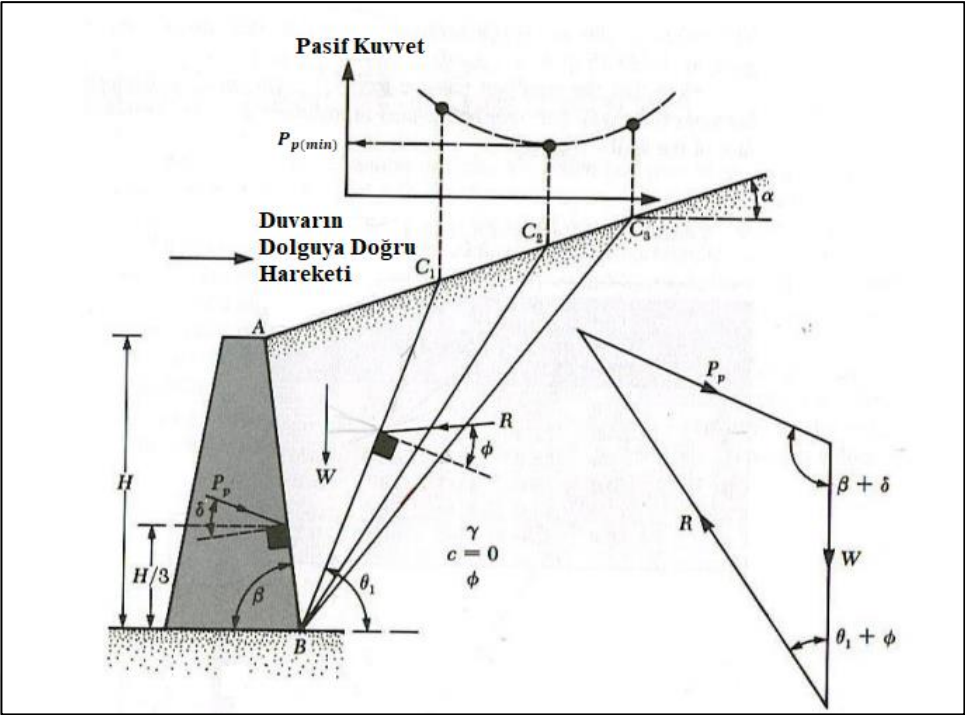
Şekil 1.29. Coulomb aktif toprak basıncı (Yenidoğan 2006)

Çizelge 1.7. Bir Coulomb K_a tablosu (Bağıntı 1.26) (Uzuner 2016a)

$\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$			$\alpha = 90^\circ, \beta = 10^\circ$			$\alpha = 90^\circ, \beta = 20^\circ$		
$\emptyset^\circ$	δ°		$\emptyset^\circ$	δ°		$\emptyset^\circ$	δ°	
	15	25		15	25		15	25
25	0,3631	0,3551	25	0,4228	0,4187	25	0,5456	0,5532
30	0,3014	0,2959	30	0,3432	0,3399	30	0,4150	0,4170
35	0,2478	0,2445	35	0,2771	0,2752	35	0,3226	0,3234
40	0,2011	0,1995	40	0,2215	0,2208	40	0,2511	0,2519
45	0,1604	0,1601	45	0,1744	0,1747	45	0,1936	0,1948
$\alpha = 80^\circ, \beta = 0^\circ$			$\alpha = 80^\circ, \beta = 10^\circ$			$\alpha = 80^\circ, \beta = 20^\circ$		
$\emptyset^\circ$	δ°		$\emptyset^\circ$	δ°		$\emptyset^\circ$	δ°	
	15	25		15	25		15	25
25	0,4409	0,4401	25	0,5202	0,5276	25	0,6788	0,7083
30	0,3784	0,3790	30	0,4368	0,4425	30	0,5345	0,5513
35	0,3227	0,3246	35	0,3661	0,3714	35	0,4317	0,4433
40	0,2729	0,2759	40	0,3051	0,3105	40	0,3505	0,3598
45	0,2284	0,2321	45	0,2521	0,2575	45	0,2837	0,2917

1.7.6.2. Coulomb pasif durum

Pasif koşulda, kohezyon bulunmayan bir zemin tabakasında istinat duvarının arka tarafa doğru hareket ederken, üçgen kama yukarı yönlü hareket eder (Şekil 1.30) (Uzuner 2016b).



Şekil 1.30. Coulomb pasif toprak itkisi ve duvara etkiyen kuvvetler (Yenidoğan 2006)

Yine ABC kamasının dengesi ile P_p pasif bileşke itkisinin minimum olması koşulu kullanılırsa, aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_p \quad (1.28)$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \emptyset)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\emptyset + \delta) \cdot \sin(\emptyset + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)} \right]^2} \quad (1.29)$$

$\alpha = 90^\circ, \delta = 0, \beta = 0$ için, Bağntı 1.29, Rankine pasif toprak basıncı katsayısına ($\tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$) eşit olur. İstinat duvarının arka tarafına etki eden, P_p , Coulomb pasif itki kuvvetinin yönü ve etkiği kısım, Şekil 1.29' de görülmektedir.

Bir örnek olarak Bağntı 1.29' a göre $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 20^\circ$, $\delta = 15^\circ$, $\emptyset = 30^\circ$ için $K_p = 9,2$ dir.

Kohezyon bulunan zemin tabakalarında; aktif koşulda $\delta < \phi/3$ için BC gene düzlemdir. Ancak, AB ve BC düzlemleri üzerinde adezyon ve kohezyon kuvvetleri etkir.

1. GİRİŞ

Ayrıca zemin tabakasının yüzeyinden itibaren, duvar arkasında z_0 kadar bir kopma meydana gelir.

$\delta > \phi/3$ için, pasif durumda, BC düzlek değil, eğridir. Pasif itkin belirlenmesi daha karmaşık bir şekilde olur.

Rankine Teorisi, duvar arkasındaki sürtünmesiz bir yüzeyi kabul ederken, Coulomb Teorisi sürtünme etkisini dikkate alır ($\delta \neq 0$). Rankine Teorisi, zemin ortamında bir elemandan hareket ederken, Coulomb Teorisi bir kama düşünür. Rankine Teorisi, birden fazla tabakası olan zeminlerde, kohezyon bulunan zeminlerde, yer altı suyu vb. durumlarına daha kolay uygulanabilir. Rankine Teorisi, yatay zemin basınç dağılışını verirken, Coulomb Teorisi doğrudan bileşke kuvvetini verir (Uzuner 2016b). Aşağıda Çizelge 1.8’ de Coulomb K_p tablosu verilmiştir.

Çizelge 1.8. Bir Coulomb K_p tablosu (Bağıntı 1.29) (Uzuner 2016a)

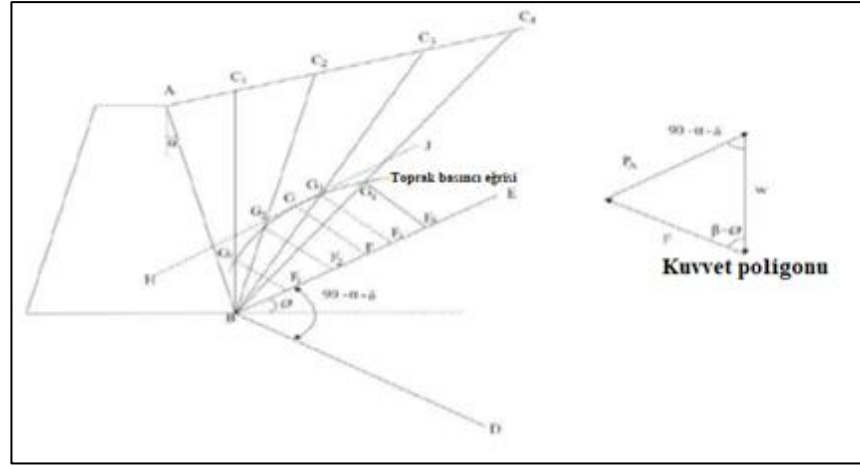
$\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$			$\alpha = 90^\circ, \beta = 10^\circ$			$\alpha = 90^\circ, \beta = 20^\circ$		
ϕ°	δ°		ϕ°	δ°		ϕ°	δ°	
	15	25		15	25		15	25
25	3,8548	5,5991	25	5,9692	10,1805	25	9,9487	22,1049
30	4,9765	7,7036	30	8,1447	15,3845	30	15,0036	41,2594
35	6,5547	10,979	35	11,536	25,1175	35	24,4574	97,0934
40	8,8720	16,472	40	17,225	46,4739	40	45,1974	-----
45	12,465	26,695	45	27,812	----- -	45	-----	-----
$\alpha = 80^\circ, \beta = 0^\circ$			$\alpha = 80^\circ, \beta = 10^\circ$			$\alpha = 80^\circ, \beta = 20^\circ$		
ϕ°	δ°		ϕ°	δ°		ϕ°	δ°	
	15	25		15	25		15	25
25	3,0939	4,1267	25	4,5279	6,7585	25	6,8103	11,8950
30	3,8021	5,2989	30	5,7669	9,1478	30	9,1999	17,7606
35	4,7301	6,9373	35	7,5041	12,8535	35	12,9073	28,6770
40	5,9810	9,3294	40	10,044	19,0394	40	19,0967	52,5133
45	7,7258	13,020	45	13,968	30,4999	45	30,5637	-----

1.8. Rankine ve Coulomb Yöntemleri Arasında Karşılaştırma

Coulomb yöntemi, zemini kuru ve kohezyonsuz kabul ederek istinat duvarlarına etkiyen toprak basınçlarını hesaplar. Rankine teorisi ise zemin tabakasındaki kohezyonu da hesaba katarak statik koşulda istinat yapılarına etkimekte olan toprak basınçlarını hesaplayabilir. İki teori de zemin tabakasının sükûnet durumunda kullanılabilir. Rankine yöntemi, istinat yapısı ile duvarın arkasındaki dolgu zemin arasında sürtünme açısını $\delta = 0^\circ$ olarak kabul ederken, Coulomb teorisi sürtünme kuvvetlerini dikkate almaktadır. Rankine yöntemi birden fazla tabakaya sahip zeminlerde, kohezyon bulunan zeminlerde ve yer altı suyu koşulları göz önünde bulundurulduğu zaman daha basit uygulama imkânı tanır. Rankine yöntemi zemin elemanının plastik denge halinden başlayarak toprak basıncını gerilme temelli olarak bulurken, Coulomb toprak basıncı teorisi, Coulomb döneminde trigonometrik fonksiyonlar bilinmediği için problem geometrik yöntemler ile çözülmüş ve kamanın dengesinden yola çıkılarak bileşke kuvvet hesaplanmıştır. Sonrasında geliştirilen teorik ve grafik yöntemlerle bugünkü haline getirilmiştir (Coduto 2006, 2011).

1.9. Culmann Yöntemi

Cullmann yöntemi, istinat duvarlarının tasarımında kullanılan bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntem, istinat duvarının zemine olan etkileşimini hesaplamak için Rankine ve Coulomb teorilerini birleştirir. Duvarın hareketine izin verilen bir açığa göre belirli bir sürtünmeli yüzey kabul edilir. Pasif ve aktif zemin basıncı arasındaki fark bu sürtünmeli yüzeyin belirlediği denge açısı ile ilişkilendirilir. Yöntem, farklı zemin parametreleri göz önünde bulundurarak hem sürtünmeli hem de kohezyonlu zeminlerde geçerlidir ve daha gerçekçi sonuçlar sağlar. Bu yöntemde, bir BC kayma yüzeyi alınır (Şekil 1.31) (Uzuner 2016b).



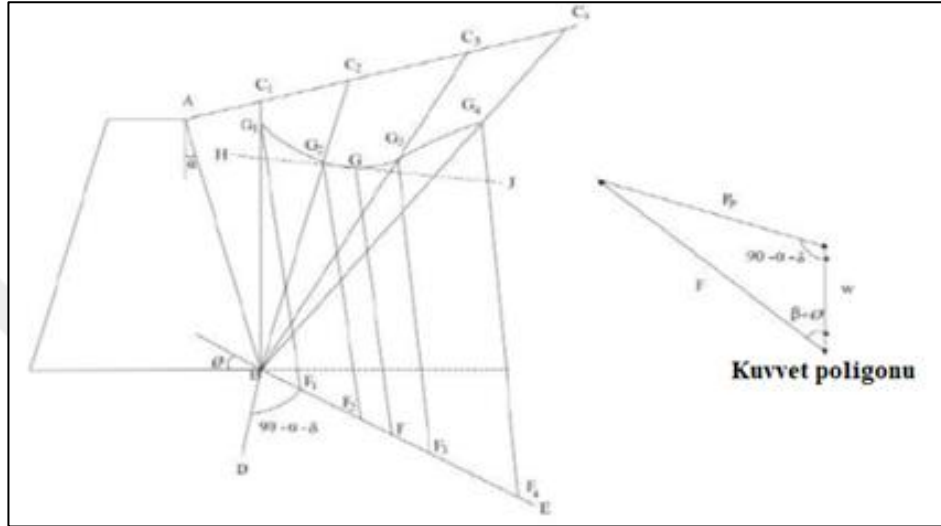
Şekil 1.31. Culmann yönteminde statik aktif toprak basıncının gösterimi (Özcan 2007)

Aktif toprak basınçlarını belirlenmede yöntemin kullanılması aşağıda maddeler halinde ifade edilmektedir (Yıldız 2015).

- Bütün geometrik veriler uygun bir ölçekle gösterilir.
- İstinat yapısının topuk kısmı B noktasından yatayla 0 açısı yapan BE doğrusu çizilir.
- BE doğrusu ile $90 - \alpha - \delta$ yapan BD doğrusu çizilir.
- Deneme maksadıyla en az 3 olmak şartıyla BC_1, BC_2, BC_3 kayma yüzeyleri meydana getirilir. Böylelikle yumuşak bir toprak basıncı eğrisi elde edilecektir.
- ABC_1, ABC_2, ABC_3 kayma kamalarının ağırlıkları W_1, W_2, W_3 bir metre için geometrik yollardan ya da planimetre ile ölçüm yoluyla hesaplanır.
- Yük eksenini için bir ölçek belirlenir.
- Belirlenen ölçekle, $BF_1 = W_1, BF_2 = W_2, BF_3 = W_3$ doğruları çizilir.
- BD doğrusuna paralel F_1G_1, F_2G_2, F_3G_3 doğruları çizilir. Oluşan üçgenleri BFG_i deneme kamalarının kuvvet poligonlarıdır.
- G_1, G_2, G_3 noktaları düzgün bir eğri ile birleştirilir.
- BE doğrusuna paralel HJ doğrusu çizilir. G noktası, HJ doğrusuna teğet olan noktadır.
- BD doğrusuna paralel GF doğrusu çizilir.
- $P_a = GF \times \text{Yük eksenini ölçeği}$

1. GİRİŞ

Culmann teorisi ile pasif toprak basınçlarının hesabının yapılabilmesi için çizilen kuvvet poligonu Şekil 1.32’de gösterilmiştir. Birkaç deneme kaması çizilerek en küçük pasif toprak basıncı (P_p) bulunmaya çalışılır. Uygulanan hesap adımları aktif durum için gösterilenler ile aynıdır. Farklı olan nokta BD ve BD doğruları açısının farklı oluşudur. Nedeni pasif durum için oluşturulan kuvvet poligonundaki açılarının farkından meydana gelmektedir.



Şekil 1.32. Culmann yönteminde statik pasif toprak basınçlarının gösterimi (Özcan 2007)

1.10. İstinat Duvarlarının Hesap Tahkikleri

İstinat duvarlarının tasarımında, öncelikle ön boyutlandırma yapılır ve ardından duvara etki eden kuvvetler belirlenir. Bu kuvvetler arasında istinat yapısının mevcut ağırlığı, dış yükler ve statik zemin etkileri yer alır. Deprem durumunda ise dinamik zemin etkileri ve duvarın ve duvarın arkasındaki dolgunun mevcut ağırlığından dolayı oluşan yanal kuvvetler de dikkate alınmalıdır. İstinat duvarları her iki durum için stabilite hesapları sağlamalıdır.

Stabilite hesapları yapılırken devrilme, kayma, temel tabanı altındaki zemin gerilmeleri, toptan göçme, oturma ve diğer tahkikler yapılır:

1. **Devrilme tahkiki:** Duvarın devrilme riski hesaplanır.
2. **Kayma tahkiki:** Duvarın zemine kayma riski değerlendirilir.

3. **Temel tabanı altındaki zemin gerilmelerinin tahkiki:** Duvarın temel tabanında oluşan gerilmeler incelenir.
4. **Toptan göçme tahkiki:** Duvarın toplu göçme durumları değerlendirilir.
5. **Diğer tahkikler:** Özel durumlar için ek tahkikler yapılabilir.
6. **Oturma tahkiki:** Duvarın oturma davranışı analiz edilir.

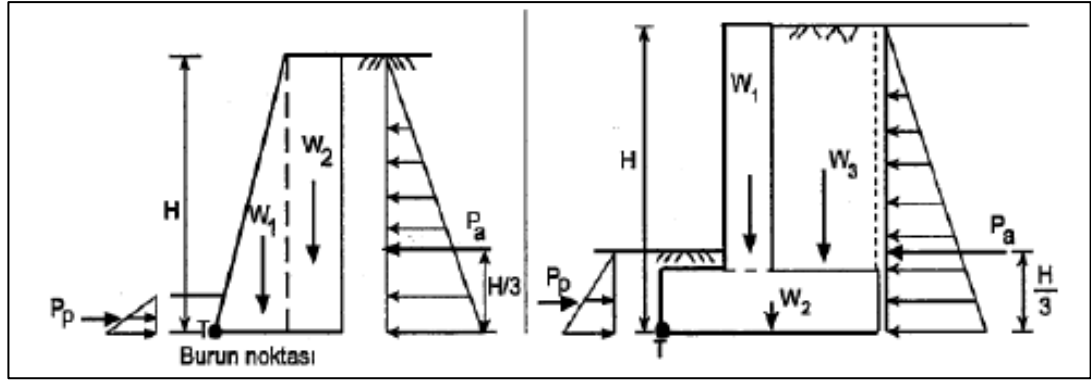
1.10.1. Devrilme tahkiki

İstinat duvarları, yanal zemin basınçları etkisiyle devrilmeye karşı dönme eğilimindedir. Bu durum, duvarın kendi ağırlığı ve taban üzerindeki zemin ağırlığı ile dengelemeye çalışılır. Ancak devrilme güvenliği sağlanamazsa, farklı yöntemler kullanılabilir. İstinat duvarının taban boyutu arttırılarak devrilmeye karşı koyan kuvvetin moment kolu arttırılabilir veya ankraj yapılabilir. Ankraj uygulamaları en etkili yöntem olmakla birlikte, tabanın uzatılması daha ekonomik bir tercih olabilir. Ayrıca, dolgu zemin için kullanılan malzemenin parametreleri değiştirilerek de devrilme güvenliği sağlanabilir. İstinat duvarlarının stabilitesini artırmak için bu tarz yöntemler kullanılır. İstinat duvarının burun noktası etrafında dönmesine karşı koyan kuvvetlerin burun noktasına göre momenti $M_{(karşı\ koyan)}$, burun noktası etrafında duvarı devirmeye çalışan kuvvetlerin burun noktasına göre momenti $M_{(deviren)}$ olarak ifade edildiği zaman, devrilme riskine karşı güvenlik katsayısı, G_s ;

$$G_s(devrilme) = \frac{\sum M_{T(karşı\ koyan)}}{\sum M_{T(deviren)}} \quad (1.30)$$

Olarak ifade edilebilir. Devrilme riskine karşı güvenliğin korunabilmesi için $G_s \geq 1.5 \sim 2.0$ olması gerekir (TBDY 2018).

Genel olarak G_s 1.5 dolaylarında seçilir. Kohezyon bulunmayan zemin tabakaları için güvenlik katsayısı 1.5, kohezyon bulunan zemin tabakaları için bu katsayı 2 olarak seçilebilir. Deprem durumunda G_s minimum 1.2; $G_s \geq 1.2$ olması gerekir (Gülten 2014). Aşağıda şekil 1.33' de devrilme tahkiki gösterilmiştir.



Şekil 1.33. İstinat duvarlarında devrilme tahkiki (Gül den 2014)

1.10.2. Kayma tahkiki

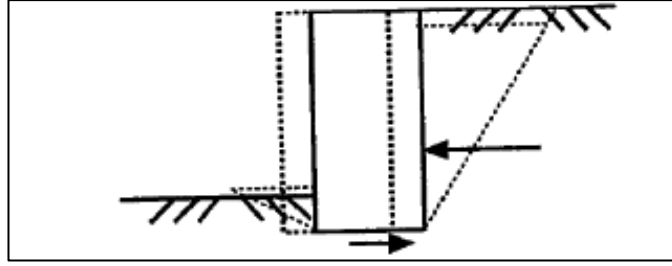
İstinat duvarları, yatay itkilerin etkisiyle temel zemininde kaymaya mecbur bırakılır. Bu kaymaya karşı koymak için duvar önünde belli bir güvenlik sağlanmalıdır. Duvara yanal olarak etkiyen kuvvetler duvarı kaydırmaya çalışan kuvvetlerdir. Kayma durumuna engel olmaya çalışan kuvvetler ise duvarın tabanı ile zemin tabakası arasında oluşan sürtünme kuvveti, duvarın tabanı ile zemin tabakası arasındaki adezyon kuvveti ve duvarın ön tarafındaki dolgu zeminin pasif itkisidir. Duvarın kaymasını engellemek için pasif toprak itkisi genel olarak dikkate alınmaz. Kayma durumuna karşı güvenlik katsayısı (G_s), kayma durumuna karşı koyan kuvvetlerin kaydırmaya çalışan kuvvetlere oranı ile hesap edilir. Şekil 1.34' de istinat duvarında meydana gelen kayma durumu gösterilmiştir.

$$G_s = \frac{\sum F_{(kaymaya\ karşı\ koyan)}}{\sum F_{(kaydıran)}} \quad (1.31)$$

G_s = Kayma durumuna karşı güvenlik katsayısı

$\sum F_{(kaymaya\ karşı\ koyan)}$ = Kayma durumuna karşı koyan kuvvetlerin toplamı

$\sum F_{(kaydıran)}$ = Kaydırmaya çalışan kuvvetlerin toplamı



Şekil 1.34. İstinat duvarında kayma (taban üzerinde) (Gül den 2014)

Kayma durumuna karşı güvenlik katsayısı deprem durumunda minimum 1,0 alınması gerekir. Kayma durumuna karşı koyan sürtünme kuvveti, duvarın en altına gelen bütün düşey yöndeki ağırlıkların ($\sum N$), sürtünme katsayısı (μ) ile çarpımı şeklinde ifade edilir.

$$\sum F_{(karşı koyan)} = \sum N \cdot \mu \quad (1.32)$$

$$\sum F_{(karşı koyan)} = \text{Kayma durumuna karşı koyan sürtünme kuvveti}$$

$$\sum N = \text{Duvarın en altına gelen bütün düşey yöndeki ağırlıkların toplamı}$$

$$\mu = \text{Sürtünme katsayısı}$$

Kohezyon bulunmayan zemin tabakaları için μ sürtünme katsayısı Çizelge 1.9' da gösterilmiştir.

Çizelge 1.9. Duvarın tabanında bulunan zemin için sürtünme katsayıları

Taban Zemin Türü	μ
İri kum ve çakıl (%5'ten az siltli)	0,50-0,70
İnce kum ve çakıl (%5'ten az siltli)	0,40-0,60
Siltli kum ve çakıllı killi zemin	0,30-0,50
Sert kil (ancak tırnakla çizilebilen)	0,30-0,50
Yarı sert kil veya silt	0,20-0,30
Sağlam kaya (kaba yüzeyli)	0,60

1. GİRİŞ

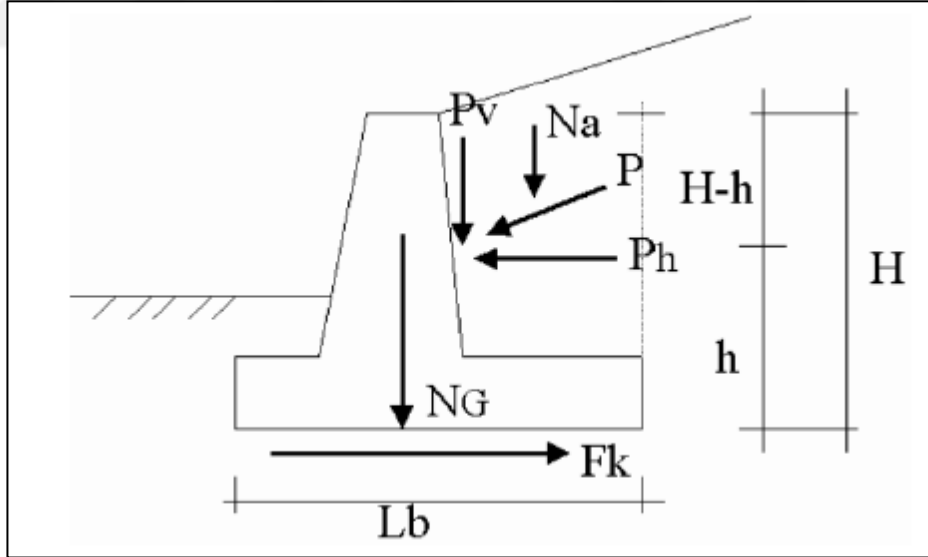
Kohezyon bulunan zemin tabakalarında ise kaymaya karşı koyan kuvvet,

$$\sum F_{(karşı\ koyan)} = c \times \sum N \quad (1.32)$$

Olarak ifade edilmektedir. Burada c , taban zemin tabakasının kohezif mukavemetini ifade etmektedir. Kohezyon bulunan zemin tabakaları için taban zemin kohezif mukavemetleri Çizelge 1.10'da verilmektedir. Aşağıda şekil 1.35' de istinat duvarı üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir.

Çizelge 1.10. Duvarın tabanında bulunan zemininin kohezif mukavemetleri

Taban Zemin Türü	$C \text{ (t/m}^2\text{)}$
Hafif bir parmak basıncı ile şekil değiştiren çok yumuşak kil	1
Kuvvetlice parmak basıncı ile şekil değiştiren yumuşak kil	2
Başparmak ile basılınca iz bırakabilen orta sertlikte kil ile tırnakla çizilebilen sert killer	3



Şekil 1.35. İstinat duvarlarında kayma tahkiki (Güliden 2014)

$$\sum N = N_G + N_Z + P_V \quad (1.33)$$

N_G = İstinat duvarının kendi ağırlığı,

N_Z = İstinat duvarının tabanı üzerinde bulunan zeminin ağırlığı,

P_V = Aktif duvar basıncının düşey bileşkesi,

P_h = Aktif duvar basıncının yatay bileşkesi,

Olmak üzere kayma durumuna karşı güvenlik emniyeti,

$$G_s = \frac{\Sigma F}{P_h} \geq 1.5 \quad (1.34)$$

G_s = Kayma durumuna karşı güvenlik katsayısı

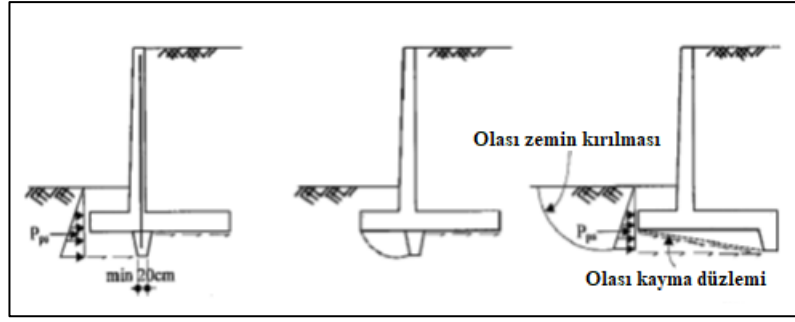
$\Sigma F_{(karşı koyan)}$ = Kayma durumuna karşı koyan sürtünme kuvveti

P_h = Aktif duvar basıncının yatay bileşkesi

Koşulunu sağlaması gerekmektedir.

Kayma tahkikinin sağlanmaması durumunda, istinat duvarının kayma güvenliği için çeşitli çözümler bulunmaktadır:

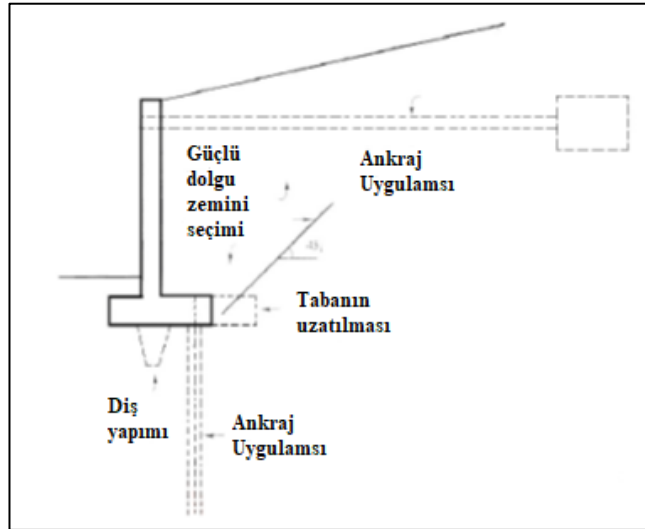
- Ekonomik bir çözüm olarak taban plağına dış (çıkıntı) yapılabilir. Dış eklenmesi ile pasif itkinin hesaba dahil edilmesi sağlanmış olur ve duvar önündeki pasif direnç artar. Şekil 1.36' da istinat yapılarında kayma durumuna karşı kullanılan dış tipleri görülmektedir.



Şekil 1.36. İstinat yapılarında kayma durumuna karşı kullanılan dış çeşitleri (Gülden 2014).

- Taban plağı uzatılarak istinat yapısının tabanına etki eden dolgu ağırlığından kaynaklı normal kuvvet arttırılabilir. Böylece kaymaya karşı koyan sürtünme kuvvetini arttırır.
- Dolgu zemin tabakasının bir parametresi olan içsel sürtünme katsayısı ϕ 'nin artması ile kayma güvenliği sağlanabilir.
- Ankraj yapılarak kaymaya karşı koyan kuvvetler arttırılabilir.

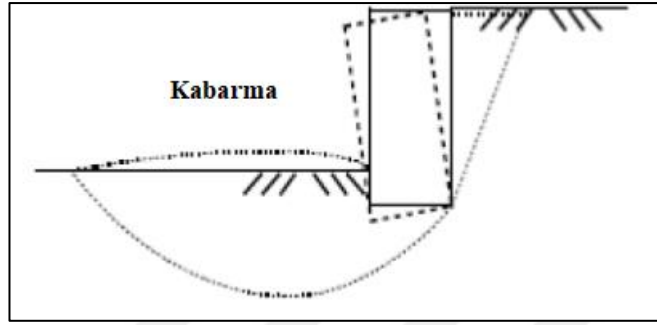
Kayma güvenliği durumunun sağlanmadığı hallerde uygulanabilen çözüm yolları Şekil 1.37' de gösterilmiştir.



Şekil 1.37. Kayma güvenliği durumunun sağlanması için alınan güvenlik tedbirleri (Gülden 2014).

1.10.3. Taşıma gücü tahkiki

Taşıma gücü koşulu istinat yapısının tabanında sağlaması gerekir ve Şekil 1.38’de görüldüğü gibi, istinat duvarında göçme meydana gelmemelidir (Holtz, Kovacs ve Sheahan 2002).



Şekil 1.38. İstinat yapısında taşıma gücü göçmesi durumu (Uzuner 2005)

Temel zemini, eksantrik yüklü istinat duvarını güvenli bir şekilde taşıyabilmek için temel taban basınç değerleri belirlenmelidir. Bu amaçla, Geleneksel Yöntem, Azaltılmış Genişlik (Meyerhof) Yöntemi, Azaltma Katsayıları Yöntemi gibi yöntemler kullanılır.

Zeminlerin taşıma gücünü belirlemek için Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi yaygın olarak kullanılır.

Terzaghi Taşıma Gücü Formülü’ nün genel hali şöyledir:

$$q_{sınır} = (k_1 \cdot c \cdot N_c) + (P_0^I \cdot N_q) + (k_2 \gamma B N_\gamma) \quad (1.35)$$

Dayanma duvarının temeli, şerit temeldir ve eksantrik olarak yüklenir. Şerit temeli için $k_1 = 1$ ve $k_2 = 0,5$ değerleri Bağıntı 1.35’de yerine yazılırsa, Bağıntı 1.36’da ki şerit temeli için Terzaghi Taşıma Gücü Formülü elde edilir.

$$q_{sınır} = (c \cdot N_c) + (P_0^I \cdot N_q) + (0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma) \quad (1.36)$$

Burada;

$q_{sınır}$: Sınır taşıma gücü (kN/m^2)

c : Temel zemininin kohezyonu (kN/m^2)

P_0^I : Temel taban düzeyindeki efektif gerilme (kN/m^2)

γ : Temel zemininin birim hacim ağırlığı (kN/m^2)

B : Temel genişliği (kısa kenar veya çap, m)

k_1, k_2 : Temel şekil katsayıları

N_c, N_q, N_γ : Temel zemininin, ϕ içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları' dır.

Zemin tabakasının taşıma gücü, zemin tabakasında kırılma meydana gelmeden ve üzerinde bulunan yapıya zarar verebilecek oturmalar meydana gelmeden, temelin altında bulunan zemin tabakasının güvenli bir şekilde taşıyabileceği gerilme değerini ifade eder. Bu teori temel zemini tasarımında önemli bir rol oynar ve temel taban basınç değerlerinin belirlenmesine yardımcı olur. Zeminin taşıma gücünü belirledikten sonra elde edilen sınır taşıma gücü ($q_{sınır}$), güvenlik katsayısına (G_s) bölünmesiyle zemin tabakasının emniyetli taşıma gücü elde edilir.

$$q_{em} = \frac{q_{sınır}}{G_s} \quad (1.37)$$

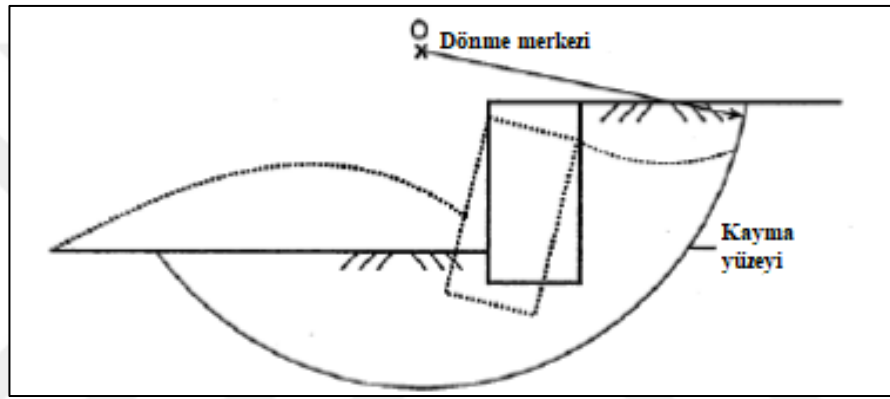
1.10.4. Toptan göçme (veya şev kayması) tahkiki

İstinat yapısının içerisinde olduğu şevde, duvarı içerisine alacak bir biçimde kayma durumunun oluşmaması (Şekil 1.39) ve kayma durumuna karşı belli bir önlem

1. GİRİŞ

alınması önemlidir. Bu amaçla, şevin stabilitesi için analiz gerçekleştirilir. Çeşitli dönme merkezi ve yarıçap değerleri denenerek elde edilen minimum güvenlik katsayısı, istinat yapısının tasarımı için seçilmiş olan güvenlik katsayısıyla karşılaştırma yapılır. Bu analizler genellikle bilgisayar programları kullanılarak yapılır.

Dayanma duvarları, şevlerde yüzeysel (sığ) kaymaları önlemek için etkilidir, ancak derin kaymalar için tam bir önlem sağlamazlar. Bu nedenle, dayanma duvarlarının tasarımı ve yerleştirilmesi, şevin durumuna, zemin koşullarına ve güvenlik gereksinimlerine dikkatlice göre yapılmalıdır (Uzuner 2016b).



Şekil 1.39. İstinat duvarında toptan göçme (şev kayması) (Güliden 2014)

Toptan göçme, kazı, yeraltı suyu ve deprem gibi nedenlerle duvarın yapıldığı alanda zeminin stabilitesini kaybederek duvar ile birlikte alt zemin tabakasının üstünde kayarak meydana gelebilir. Bu durumu etkileyen kritik durumlar şunlardır:

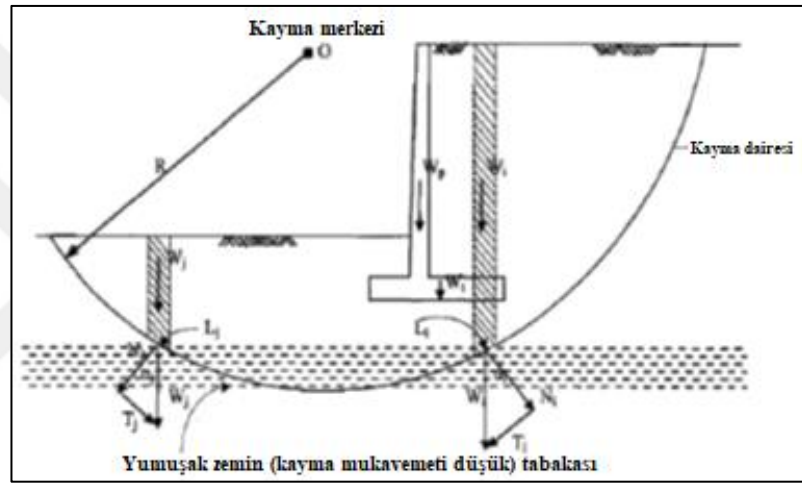
- İstinat duvarının üstüne oturduğu zeminin drenajsız koşullarda bulunan yumuşak veya orta sertlikte kil olması
- Zeminin tamamının veya bir bölümünün depremde sıvılaşma riski taşıyan doygun durumda gevşek kum ya da killi kum malzemeden oluşması
- İstinat duvarının altındaki zayıf zemin tabakası kalınlığının, istinat duvarı taban genişliğinin 1-1,5 katı veya daha fazla olması

Bu durumlardan herhangi biri mevcut olduğunda, istinat duvarının toptan göçme riskine sahip olması söz konusu olabilir. Toptan göçme, genellikle şev stabilitesi problem

1. GİRİŞ

özelliği taşır ve zemin kayma yüzeyinin dairesel bir yüzey olduğu kabul edilir (Babuçcu ve Mollamahmutoğlu 2006).

Zemin kayma yüzeyi, duvarın temeli altından geçmediği sürece, duvarı toptan göçme açısından güvenli sayabiliriz. Kohezyonlu zeminlerde meydana gelen dairesel kayma göçmesi toptan göçme hesaplarına en uygun olanıdır. İstinat duvarlarının toptan göçme hesaplarında İsveç Dilim Yöntemi kullanılır. Bu yöntem, göçme kontrolünde genel olarak kullanılabilen bir yöntemdir ve homojen, tabakalı, tamamen veya kısmen su altındaki zemin ve su akımı durumlarında uygulanabilir.



Şekil 1.40. İstinat duvarlarının İsveç Dilim Yöntemi ile toptan göçme kontrolü

İsveç Dilim Yöntemi, toptan göçme hesaplamalarında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, kayma yüzeyi O merkezi etrafında dönen dairesel bir yüzey olarak kabul edilir ve istinat duvarı da içine alacak şekilde duvar tabanının arka ucundan geçtiği kabul edilir. Şekil 1.40' da kayma mukavemeti düşük yumuşak bir zemin tabakasındaki kayma dairesi gösterilmiştir.

İlk olarak kritik kayma dairesi belirlenir, bu dairesel yüzeydeki en kritik noktalar tespit edilir. Daha sonra kayma dairesi içinde kalan kısımlar sol baştan itibaren genellikle 1 m genişlikli dilimlere ayrılır. Her bir dilimin ağırlığı W_i ve ağırlık merkezlerinin O merkez noktasına göre yatay uzaklıkları belirlenir.

1. GİRİŞ

Bu bilgilere göre, her dilimin O merkez noktasına göre toptan göçmeye çalışan momenti M_d hesaplanır. Bu sayede toplam göçme momenti belirlenir ve duvarın kayma güvenliği değerlendirilir. Bu yöntem, toptan göçmeye karşı dayanma duvarının stabilitesini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır.

$$W_i = b_i \cdot h_i \cdot \gamma_i \quad (1.38)$$

Eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada,

b_i : Dilimin yatay uzunluğu,

h_i : Dilimin düşey uzunluğu,

γ_i : Zeminin birim hacim ağırlığı

Olarak ifade edilmektedir. İsveç Dilim Yönteminde, zemin dilimlerinin kayma dairesi üzerine düşen dairesel kısımları doğrusal kabul edilir. Her bir dilimin ağırlığı W_i , doğrusal yüzeyin normaliyle yaptığı α_i açıları belirlenir.

$$M_d = (\sum W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot r + P_{as} \cdot x \quad (1.39)$$

Olarak kaymaya neden olan moment elde edilir. Burada,

M_d = Kaymaya neden olan moment

W_i : Her bir dilimin ağırlığı

r : Kayma dairesinin yarıçapı

P_{as} : Statik durumda aktif basınç itkisi

x : Aktif basınç itkisinin O merkez noktasına göre moment kolu

Olarak ifade edilmektedir.

Sürşarj durumunda, sürşarjdan dolayı ortaya çıkan ek zemin etkileri de bu denklemde dikkate alınarak hesaba katılmalıdır.

Kayma düzlemi boyunca direnen kuvvetler, kohezyon etkisi ve ağırlığın karşı koyan bileşeni ile meydana gelmektedir. O halde kayma düzlemi boyunca direnen kuvvetlerin O dairesel kayma merkezine göre momenti;

$$M_r = \left(\sum \frac{c \cdot b_i}{\cos \alpha_i} + \sum W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi \right) \cdot r \quad (1.40)$$

İfade edilmektedir.

Burada,

M_r = Kayma düzlemi boyunca direnen kuvvetlerin O dairesel kayma merkezine göre momenti

c : Kohezyon katsayısı

b_i : Her bir dilimin yatay uzunluğu

olarak gösterilmektedir.

Göçme durumuna karşı emniyet katsayısının hesaplanması ise;

G_s = Toplam devrilmeye karşı koyan moment/Deviri moment

$$G_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_r = (\sum \frac{c.b_i}{\cos \alpha_i} + \sum W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi) \cdot r}{(\sum W_i \cdot \sin \alpha_i) \cdot r + P_a \cdot x} \quad (1.41)$$

Olmaktadır. Göçme için güvenlik sayısının kumlu zeminlerde $G_s \geq 2$ ve killi zeminlerde $G_s \geq 3$ koşulunu sağlaması gerekmektedir.

1.10.6. Diğer tahkikler

Ağırlık istinat yapılarında, istinat duvarının kendisi yatay yöndeki kesme kuvvetine karşı güvenliği sağlamalıdır. Ayrıca beton temelli ve kaya gövdeli duvarlarda, gövde-temel birleşim bölgesi kritik bir kesit olmakla beraber dikkate alınması gerekir.

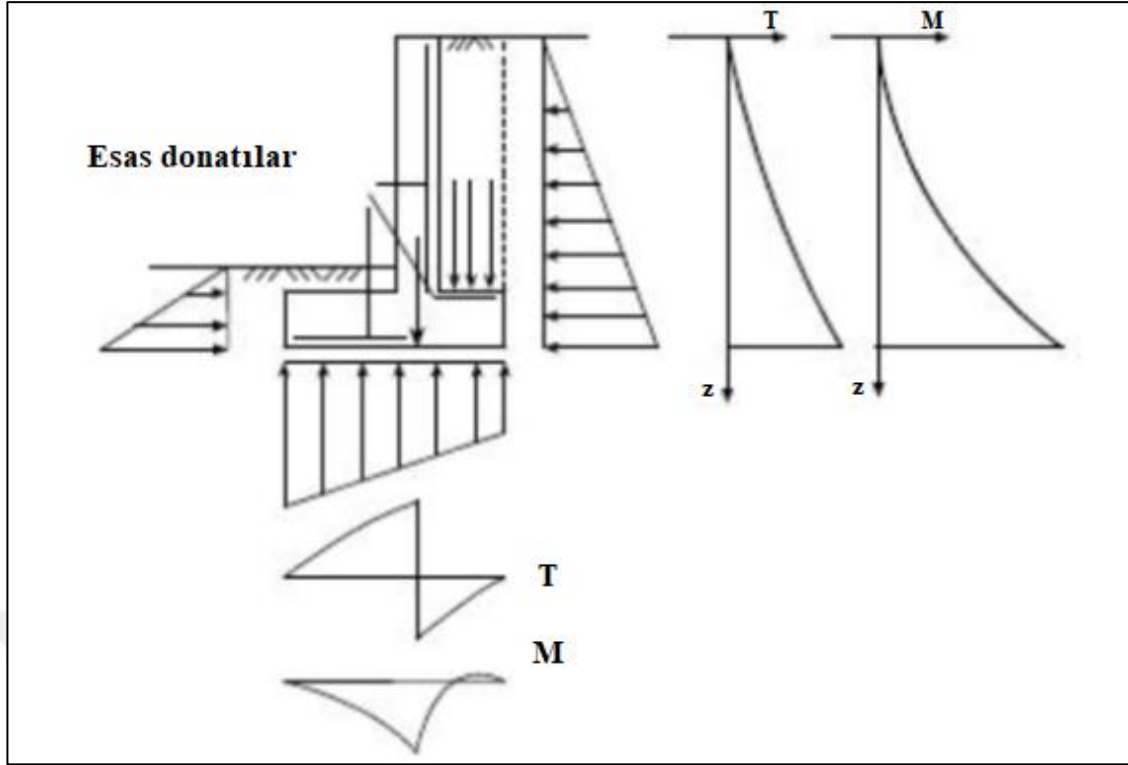
Ağırlık dayanma duvarlarının gövdesi, yanal etkiler nedeniyle eğilme momentlerine maruz kalır. Bu eğilme momentleri duvarın arka yüzünde çekme gerilmelerine yol açabilir ve çekme gerilmeleri duvar arkasında çatlakların oluşmasına neden olabilir. Bu olaylar araştırılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Eğer çatlaklar meydana gelecekse, duvarın genişliği arttırılabilir veya duvar arkasına donatı konulabilir (Yarı ağırlık dayanma duvarı).

Bu tür önlemlerle dayanma duvarlarının kesmeye, eğilmeye ve çatlama gibi durumlara karşı güvenliği arttırılabilir ve istenmeyen hasarlar önlenebilir. Uygun tasarım ve yapısal güçlendirme ile dayanma duvarlarının uzun süreli ve güvenli bir şekilde hizmet etmesi sağlanabilir (Uzuner 2016a).

$$\sigma_{b-b} = \frac{\sum N_o}{A} \pm \frac{\Delta M_{b-b_o}}{W_{b-b}} \quad (1.42)$$

$$\sigma_{b-b_{min}} \leq \sigma_{b\check{c}em}, \sigma_{b\check{c}em}: \text{Betonun çekme emniyet gerilmesi} \quad (1.43)$$

Betonarme istinat yapıları; zemin tabakalarında oluşan yatay yöndeki basınçlar ile duvarın tabanındaki basınç dağılışı belirlendikten sonra, betonarmenin bilinmekte olan standartlarına göre, boyutlandırılır ve donatılandırılması yapılır. Aşağıda Şekil 1.41' de betonarme istinat duvarına ait moment ve kesme kuvveti diyagramları gösterilmiştir.



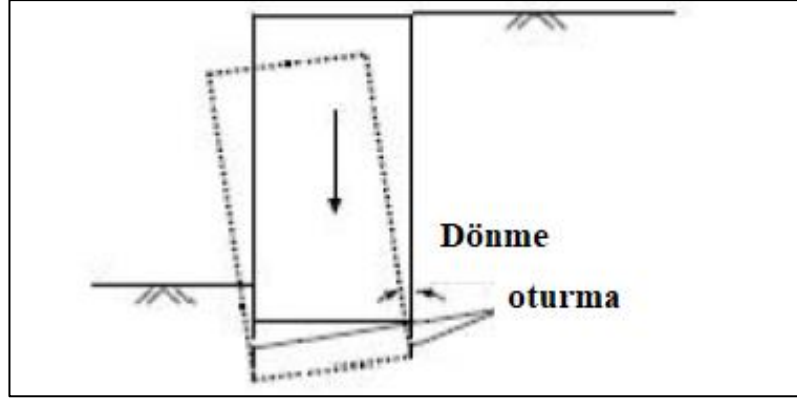
Şekil 1.41. Betonarme dayanma duvarları (Uzuner 2005)

1.10.5. Oturma tahkiki

Şekil 1.42’de görüldüğü gibi; Temel zemininin düzgün ve istikrarlı bir şekilde taşıma gücüne ulaşması önemlidir. Ancak bazı durumlarda temel zemininde oturma veya farklı oturmalar meydana gelebilir. Bu oturmalar, yapıda istenmeyen sonuçlara yol açabilir.

İzin verilebilir oturma değerlerini aşan durumlarda, yapılarda çatlaklar, deformasyonlar hatta yapısal kırılmalar meydana gelebilir. Oturma sorunları, yapıların dayanıklılığını azaltabilir ve yapıya zarar verebilir. Bu nedenle, temel zemininde meydana gelebilecek oturmaların kontrol edilmesi ve izin verilebilir sınırlar içinde tutulması önemlidir.

Yapıların sağlıklı ve güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi için temel zemininin uygun bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi gereklidir. Yapıların oturma değerleri düzenli olarak izlenmeli ve olası sorunlar zamanında tespit edilerek gerekli önlemler alınmalıdır. Bu şekilde, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı sağlanabilir (Özaydın 2010).



Şekil 1.42. Dayanma duvarının farklı oturması (Uzuner 2005)

Dayanma duvarları, altındaki zeminin yükleme altında sıkışması nedeniyle oturmaya uğrar. Oturmanın izin verilebilir oturma değerlerini aşmadığı gösterilir. İzin verilebilir oturma değerleri, yapıların türüne ve zemin koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Turan (2006), dayanma yapıları için izin verilebilir oturmayı, dayanma duvarlarının kaba yapılar olmasını gerekçe göstererek killerde, betonarme binaların şerit temelleri için verilen değerin (65 mm) 2 katı olarak 130 mm; Çolak (2007), dayanma duvarları için mutlak oturmayı kohezyonsuz zeminlerde, betonarme binaların şerit temelleri için verilen değerin (40 mm) 2 katı olarak 80 mm olarak önerdi.

Duvar arkasında biriken su, duvara hidrostatik basınç uygulayarak olumsuz etkiler yapabilir. Bu nedenle, istinat duvarının arka tarafında suyun birikme problemine karşı drenaj önlemleri alınır. Duvar gövdesinde drenaj delikleri veya geotekstiller kullanılabilir. Ayrıca, duvar arka alt kısmında eğimli bir drenaj sistemi oluşturulması uygun olabilir. Duvar gövdesinde 0.10-0.20 m çapında dikdörtgen veya dairesel drenaj delikleri (güvercin delikleri, barbakanlar) teşkil edilir. Bunlar yatay ve düşeyde 1-2 m aralıklarla duvar gövdesinde oluşturulur. Son yıllarda geotekstiller (bir tür sentetik, gözenekli dokumalar) de filtre olarak kullanılmaktadır. Duvar arka alt kısmında, uzunluğa paralel, suları toplayıp uzaklaştıran eğimli bir drenaj sisteminin de oluşturulması uygun olur.

Yüksek istinat yapılarında, yükseklik boyunca 10 ila 20 metrede bir, 30-60 mm vb. genişlikte düşey ayırma (dilatasyon) aralıkları (derzler) meydana getirilir. Düşey yöndeki aralıklar, istinat yapılarında farklı oturma, genleşme, büzülme (sıcaklık) vb.

olaylar için gereklidir. Bu olaylar duvarda düzensiz çatlak veya kırılmalar oluşturabilir. Bu aralıklar temelden (temel dahil) en üst düzeye kadar devam ederler (Uzuner 2016a).

Sonuç olarak, dayanma duvarları tasarlanırken oturma ve drenaj önlemleri dikkate alınmalı, uzun duvarlarda düşey ayırma aralıkları eklenmelidir. Bu önlemler, duvarın stabilitesini ve dayanıklılığını artırarak olumsuz etkilerin önlenmesine yardımcı olur.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışmasında istinat duvarların davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak istinat duvar tasarımında değişen duvar boyutlarının ve yeraltı su seviyesinin etkilerini incelemekten önce, bu konu hakkında daha önce yapılmış literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş olup bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

2.1. İstinat Duvar Tasarımıyla İlgili Literatür Çalışmaları

Greene (2021) Yumuşak killi zeminlerde, kazılar genellikle istinat duvarlarıyla desteklenir ve aşamalı bir şekilde kazı yöntemi kullanılarak yapısal hareketler azaltılmaya çalışılır. Yer değiştirme ve güvenlik ile ilgili ihtiyaçları karşılamak için sayısal modelleme yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kazıların değerlendirilmesi aslında üç boyutlu bir problem ama bu hesaplamalar zaman alıcı ve karışık olabilir. Hesaplama süresini azaltmak için modelleme iki boyutlu da yapılabilir ama iki boyutlu modeller genellikle gelenekçi varsayımlara dayanmakta olup bu da ek inşaat maliyetlerine sebep olabilir. Greene Plaxis 3D kullanılarak killi zeminde kazı ve istinat duvarı çalışmasında, yumuşak kil zeminlerdeki kazıların desteklenmesi için istinat duvarları kullanıldığı ve aşamalı bir şekilde kazı yönteminin yapısal hareketleri azaltmak için kullanıldığı ifade ediliyor. Sayısal modelleme, güvenlik gereksinimlerinin karşılanması ve yer değiştirmelerin hesaplanması için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Modellemenin hem iki hem de üç boyutta yapılabilmesine rağmen, üç boyutlu modellemenin daha karışık olduğuna dikkat çekiliyor. Hesaplama süresini kısaltmak için iki boyutlu modeller kullanılabileceğini ama bu modellerin muhafazakâr varsayımlara dayanarak daha yüksek inşaat maliyetlerine sebep olabileceği vurgulanıyor. Üç boyutlu modelde sadece tek bir bağlantı hattı olan 'wailing beam' in kullanıldığı ve diğer kesitlerin etkisinin sınırlı kaldığı açıklanıyor. Wailing kirişi ilk iki kazı aşamasında henüz devreye girmediği için, daha stabil ek kesitlerden herhangi bir fayda elde edilemedi. Üç boyutlu modelin toprak kayma dayanımını veya duvarın rijitliğini simüle eden daha fazla bağlantı hattının uygulanmasıyla beraber daha faydalı olabileceği ifade edilebilir. Üç boyutlu modelin

etkisi böylece inşaat süreci boyunca açık bir şekilde görülebilirdi. Ancak, bu projenin amacı, çok fazla hesaplama süresi gerektirmeyen basit bir model oluşturmak olduğu için tasarlanan üç boyutlu modelin yeterli olduğu düşünülmüştür.

Özcan (2021) “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Betonarme İstinat Duvarının Optimum Tasarımı” isimli yüksek lisans tezi çalışmasında, betonarme konsol istinat duvarlarının statik ve deprem durumunda meydana gelen yükler altında en düşük maliyet ile tasarımını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen tasarım programı, dış yükler, güvenlik faktörleri, deprem bilgileri gibi girdilerle kullanıcıya optimum duvar kesiti boyutları, donatı oranları ve minimum maliyeti sağlayan tasarımı sunmaktadır. Rankine yöntemi kullanılarak geoteknik ve yapısal stabilite analizlerinde statik yüklerin hesaplanması ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirtilen esasların dinamik yükler için uygulanması dikkate alınmıştır. Yapılan tüm analizlerde duvarın arka yüzü dik ve geri dolgu eğimi ise sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapısal istinat duvarlarının tasarımı ile ilgili ilk olarak temel tabanı altında çekme gerilmelerinin tamamen serbest bırakılması veya hiç oluşmaması durumunun dezavantajlarına değinilmiştir. Sonuç olarak, belirli bir miktarda çekme gerilmesine izin veren bir yaklaşımın, deprem ivmeleri ve dönüş periyodu göz önünde bulundurularak makul ve uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yatay statik eşdeğer deprem katsayısının duvarın maliyetini artırdığı ve duvar yüksekliğindeki artışın bu etkiyi daha da artırdığı tespit edilmiştir. Duvar arkası dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının artmasıyla hem katsayının etkisi azalmakta hem de stabilite sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, dolgunun içsel sürtünme açısına bağlı olarak maksimum katsayı değerlerinin belirlendiği ve dinamik koşulların, deprem durumunda statik duruma göre daha baskın hale geldiği vurgulanmıştır.

Gowda (2018) yapmış olduğu çalışmada, geleneksel bir yöntemle karşılaştırılarak, 8 metre yüksekliğinde bir payandalı istinat duvarı, yumuşak hesaplama teknikleri kullanılarak analiz edilmektedir. Çalışmada, basınç rahatlatma raftının konumu, genişliği ve toprağın güvenli taşıma kapasitesi gibi parametrelerin optimum tasarımı belirlenmektedir. Payandalı istinat duvarı, her durumda basınç rahatlatma raftına sahip olduğunda, geleneksel olanla karşılaştırıldığında daha iyi bir performans sergilemektedir. Manuel yaklaşımla yapılan analiz, yumuşak hesaplama tekniklerine

kıyasla oldukça zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, SAP-2000 adlı sonlu eleman paketi kullanılarak payandalı istinat duvarının analizi gerçekleştirilmiştir. SAP-2000 programı kullanarak yapılan analiz, manuel tekniklere göre avantajlıdır ve zaman kazandırır. 2H/3 konumunda basınç rahatlatma raftına sahip payandalı istinat duvarının tasarımında uygun bir seçenek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yavan (2014) yapmış olduğu çalışmada, Plaxis 2D Dinamik Modülü ve Sta4CAD kullanılarak konsol tipi istinat duvarın dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada Van depremi kayıtları dinamik analiz için kullanılmıştır. Sonuç olarak, deprem yükleri altında doymuş kilin davranışının kohezyon değerleriyle değiştiğini tespit edilmiştir. Deprem yükleriyle birlikte yer değiştirmelerin arttığı ve bu nedenle mühendislerin güvenli ve stabil tasarımlar için dinamik analizler yapması gerektiği tespit edilmiştir. Yer değiştirmeler yüksek değerler gösteriyorsa, gerekli önlemler alınmalı ve özellikle yatay yer değiştirmeler için güvenlik faktörü değerleri ve duvar boyutları daha yüksek seçilmeli, dikey yer değişmeler için ise duvar altında zemin iyileştirmeleri yapılmalı sonuca varılmıştır.

Yavan (2022) yapmış olduğu bir başka çalışmada ise statik ve dinamik yükler altında istinat duvarlarının davranışını incelenmiştir. Suyu doymuş kil ve kum zeminlerde farklı tür ve boyutlarda istinat duvarları tasarlanmıştır. Plaxis 2D yazılımı kullanılarak analizler yapılmış ve duvarların devrilme, kayma ve taşıma kapasitesi faktörleri belirlenip aktif basınç değerleri hesaplanmıştır. Dinamik analizler için farklı büyüklükteki depremler kullanılmıştır. Sonuç olarak 5,0 m ve 10,0 m yüksekliğindeki istinat duvarlarının 7,0 büyüklüğüne kadar olan deprem durumlarına karşı güvenilir bir şekilde yapılabilir olduğunu ortaya koyarken, 15,0 m yüksekliğindeki duvarların yetersiz boyutlarından dolayı güvenilir bir şekilde yapılamayacağı sonucu tespit edilmiştir.

Geosentetikler, son zamanlarda toprakarme yapı veya diğer bir ismiyle donatılı zemin duvarı, sütun destekli dolgular, toprak eğimleri ve asfaltlı/asfaltlanmamış yollar gibi toprak yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takviyeler, özellikle zayıf zemin koşullarında, ekonomik ve teknik açıdan geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sağlamaktadır. Ayuluri ve Ramulu (2017) yılında yapmış oldukları çalışmada, donatılı zemin duvarlarının davranışını incelemek için örnek senaryolar üzerinden

analizler yapmıştır. Duvarların statik yük altındaki davranışı, Plaxis adlı sonlu eleman programı kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, geosentetik takviyeli istinat duvarlarının analizi ve tasarımında sayısal modellemenin rolünü vurgulamakta ve pratik uygulamalara işaret etmektedir. Bu araştırmada yapılan statik analizler sonucunda donatılı zemin duvarının davranışı bazı faktörlere bağlıdır. Gevşek kum, yoğun kuma göre benzer şekilde şekil değiştirir. Donatılı zemin duvarında dolgu malzemesi ve temel malzemesi olarak kullanılan gevşek ve yoğun kumlar daha yüksek seviyelerde kararsızlık gösterir. Toprak takviyesinin katkısı analizle belirlenebilir. Duvarın her iki toprak koşulunda da davranışı benzerdir. Sonuç olarak donatılı zemin duvarın kararlı olabilmesi için jeogridlerin sertliği ile toprağın iç sürtünme açısı arasında bir denge durumuna ulaşılması gerektiği görülmüştür. Bu denge durumu sağlandığında, ek bir sertliğin gereksiz ve ekonomik olmadığı sonucuna varılmıştır.

Manasa et al. (2021) yapmış oldukları çalışmada, beşik duvarların tarihi, kapsamı ve tipleri, kullanımı ve önemi ile yapılan analizleri üzerinde durulmuştur. Beşik istinat duvarı veya kiriş istinat duvarı, ahşap, beton ve plastik/elyaf malzemelerden yapılmış kirişler veya hücrelerden oluşan eski bir istinat duvarıdır. Kirişler veya hücreler, drenajı serbest olan malzemeler veya toprak dolgu ile doldurulur ve suyun serbestçe akmasını sağlar. Kiriş istinat duvarlarının kullanımı ve önemi de ele alınmıştır. Kiriş duvarlar, farklı malzemelerden yapılmış bir çerçeve içinde yerel dolgu malzemesi kullanılarak inşa edilen bir yerçekimi istinat yapısı olarak tanımlanır. Bitkili kiriş duvarı ise kiriş tabakaları arasında canlı bitkilerin bulunduğu bir yapıdır. Bu çalışmada, ahşap kütükler ve bambu gibi malzemeler kullanılarak bitkili kiriş duvarı oluşturulması ele alınmıştır. Bu çalışma, bitkili kiriş duvarlarının tasarımı ve inşaatıyla ilgili detaylı bilgi sunarak sürdürülebilir eğitim yönetimi uygulamalarına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak beşik duvarlarının performansı, yamaç yönetiminde iyi ve faydalı bir seçenek olduğu görülmüştür. Bitki yetiştirme olasılığı varsa, beşik duvarlarına bitkiler eklenerek duvarın ömrü artırılabilir. Beşik duvarları, yerel malzemelerle yapılarak gabion duvarlarına alternatif olabilir ve hava ve su kalitesi gibi gezegenimiz için uzun vadeli faydalar sağlayabilir.

Suradi et al. (2016) yapmış oldukları çalışmanın amacı eğim yüksekliği ve zemin kesme mukavemeti gibi istinat duvarı tasarım parametrelerinin, çakılan kazık derinliği

üzerindeki etkisini incelemektir. Sonuç olarak, düşük içsel sürtünme açısına sahip granüler zeminlerde eğim yüksekliği arttıkça kazık derinliğinin daha belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir. Yüksek içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde ise eğim yüksekliği arttıkça kazık derinliğindeki artış daha azdır. Aynı içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde, içsel sürtünme açısının azalmasıyla kazık derinliğinde daha büyük bir artış gözlenmiştir. Ancak içsel sürtünme açısının farklı olduğu durumlarda, içsel sürtünme açısının azalmasıyla kazık derinliğindeki artış daha düşüktür. Bu çalışma, düşük içsel sürtünme açısına sahip granüler topraklarda eğim yüksekliğinin kazık derinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koyuyor. İçsel sürtünme açısı yüksek olan topraklara göre, düşük içsel sürtünme açısına sahip topraklarda eğim yüksekliği arttıkça kazık derinliği daha fazla artıyor. Ayrıca, aynı içsel sürtünme açısına sahip alt zemin ve eğimli topraklarda toprakların kayma dayanımı etkisi kazık derinliği üzerinde farklılık gösteriyor. Bu nedenle insanlar, çok yüksek eğimleri tutmak için düşük içsel sürtünme açısına sahip topraklarda kazık temel yapımından kaçınmalı sonucuna varılmıştır.

Dhamdhere et al. (2018) yapmış oldukları çalışmada, 3 metreden 10 metreye kadar değişen yüksekliklerde ve $SBC 160 \text{ kN/m}^2$ ile çekme kuvveti oluşturan platformlu bir perde duvarının analizini ve tasarımını ele almışlardır. İki farklı duvar türü arasında maliyet, ekonomi, bükme momenti, devrilmeye ve kaymaya karşı direnç gibi faktörler bakımından yapılan karşılaştırmalı çalışmada, en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, rahatlatıcı platformlu perde duvarının daha ekonomik ve daha stabil olduğunu, ayrıca topuk kısmındaki bükme momentini hafiflettiğini göstermiştir. Bu araştırma, perde duvarının çeşitli parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Sonuçlar göstermiştir ki rahatlatıcı platformlu perde duvarı, çelik perde duvara göre daha az bükme momentine sahiptir. Ayrıca inşaat maliyeti 5,5 m yüksekliğindeki çelik perde duvardan daha fazla olmasına rağmen sonrasında daha azdır ve 5,5 m'den sonra daha ekonomik olduğu görülmüştür. Sonuç olarak rahatlatıcı platformlu destek duvarında kayma ve devrilme karşısındaki güvenlik faktörü, kiriş tipi destek duvarına göre neredeyse iki kat daha fazladır. Rahatlatıcı platformlu destek duvarı, kiriş tipi destek duvara göre devrilme ve kayma karşısında çok daha güvenli olduğu tespit edilmiştir.

Alsirawan and Alnmr (2022) yaptıkları çalışmada yerçekimi segmental duvarların avantajlarını ve dinamik davranış analizini araştırmışlardır. Kararlılık analizi, kayma ve

devrilme başarısızlığına karşı güvenlik faktörleri sağlayan yarı-statik Mononobe-Okabe teorisi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, iç kararlılık için önemli olan güvenlik faktörünün devrilme karşı güvenlik faktörü olduğunu göstermiştir. Pozitif duvar eğim açısı, segmental duvarların kararlılığında bir iyileşmeye katkıda bulunurken dikey deprem katsayısının stabilite üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Ayrıca, bu çalışma sonucunda segmental duvarların temel tasarımı için yeni bir denklem önerilmiştir.

Gabar et al. (2018) yaptıkları çalışmada Libya'daki binaların temellerinde meydana gelen oturmaların neden olduğu sorunları incelemişlerdir. Zayıf taşıma kapasitesine sahip zeminler ve kötü sıkıştırma temel oturmalarının en yaygın nedenleridir. Bu çalışmanın amacı, üzeri yoğunlaştırılmış kilin şap temelinin davranışı üzerindeki etkisini incelemektir. Sayısal modelleme ve analizler için PLAXIS 3D adlı sonlu elemanlı yazılım paketi kullanılmıştır. Sonuçlar, şap temelinin altındaki zemin ve taban kayalık koşullarının, temel oturmasının dikey yer değiştirmeleri (U_y), gerilmeler ve kayma gerilmeleri gibi davranışları üzerinde önemli ölçüde etkileyebileceğini ve temel tasarımı sırasında dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Çalışmada incelenen durumlar için elde edilen sonuçlar; Temel altında meydana gelen oturma, farklı su tablası derinlikleri ve kayalık derinlikleri, dikey yer değiştirmeleri, gerilmeler ve kayma gerilmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Young Modülü ile zemindeki gerilmeler ve deformasyonlar arasında bir ilişki olduğu için zeminin Young Modülü arttıkça, bu etkiler azalır. Ancak, farklı döşeme özellikleri kullanılarak benzer davranışlar elde edildiği için zeminin Young Modülü ve kohezyonunun artması, şap temelleri için çok az etkiye sahiptir. Gelecekte yapılacak araştırmalar için ise bu çalışmadan elde edilen sonuçları doğrulamak için alan gözlemleri yapılmasının gerekli olduğu ve temelin altındaki kayalık eğilimlerin temelde meydana gelen oturmalar üzerindeki etkilerinin incelenmesinin önemli olduğu önerilmiştir.

Frydrych et al. (2021) yaptıkları çalışmada tutma yapılarının tasarımı ve uygulaması için alternatif ve yenilikçi bir yaklaşımı göstermişlerdir. Yazarlar, bilinen teknolojik yöntemleri yer altı inşası için uyarlamışlardır. Plaxis ve Sofistik yazılımlarını kullanarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sonucunda, yatay yer değiştirmelerin azaltılması ve iç kuvvetlerin dağılımında değişiklikler gösterilmiştir. Donatı çeliği miktarının azaltılmasının mümkün olduğu ve bu durumun diyagram duvar

yapım maliyetini düşüreceği ortaya konmuştur. Bu yöntemin avantajları arasında basit hesaplamalar, donatı kullanımının sınırlandırılması, güvenlik artışı ve sürdürülebilir inşaat kolaylaştırılması yer almaktadır.

Jiang et al. (2018) yapmış oldukları çalışmada ikincil takviye katmanlarıyla inşa edilen bir geosentetik takviyeli istinat duvarının sonuçlarını analiz etmek için iki boyutlu sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Sayısal simülasyon tahminleri, duvar çökmesi, dikey zemin basınçları, yanal zemin basınçları ve takviye katmanlarında gerilmeler ile saha test sonuçlarıyla karşılaştırıldı. İkincil takviye katmanları olmayan aynı geosentetik takviyeli istinat duvarı için de bir sayısal model oluşturuldu. Genel olarak, sayısal simülasyonlar, duvar çökmesi, zemin basınçları ve takviye katmanlarında gerilmeler gibi davranışların tahmininde başarılı oldu. İkincil takviye katmanlarının kullanımının duvar çökmesini azalttığı ve geosentetik takviyeli istinat duvarlarının performansını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Butterfield and Michela (2017) yaptıkları bu çalışmada, bir istinat duvarının tabanının boyutlarının seçilmesiyle birlikte, istinat duvarının çalışma ömrü boyunca deplasmanının da değerlendirilmesi gerektiğini vurguladılar. Sunulan analiz, dikey deplasman sertleşmesini içeren bir plastisite modeli kullanarak, duvarın yük altındayken meydana gelen deplasmanını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu modele dahil edilen sertleşme kuralı, duvarın dikey merkez yükü ve dikey deplasmanı arasındaki ilişkiye bağlı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Sonuç olarak, model yatay, dönel ve dikey deplasmanların birbirleriyle çok basit bir şekilde ilişkili olacağını öngörmekte ve yoğun kum üzerine yapılan testlerle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, idealize edilmiş bir dolgu işlemi sırasında üzerine monotonik olarak artan yükler uygulanan bir istinat duvarının deplasmanlarını tahmin etmenin zorluğunu vurguluyor. Ancak, dikey yük ve dikey deplasman tepkisine bağlı olan basit bir sertleşme-plastisite modeline dayalı bir sistemli yöntem, herhangi bir monotonik yük kombinasyonunda duvarın yatay ve dönel deplasmanları ile ilişkilendirilebilir ve pratik bir tasarım yardımı olarak kullanılabilir. Çalışmada sunulan yöntemin öngörü kapasitesi, uygun verilerin eksikliği nedeniyle küçük ölçekli ayak testleri serisi üzerinde gösterilmiştir ve bu parametrelerin istinat duvarının yük-deplasman tepkisine uygulanabilir olduğu kabul edilmiştir.

Badr and Shafiqu (2022) yaptıkları çalışmada, Plaxis yazılımıyla sismik yükler altında istinat yapısının performansını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu çalışma, istinat yapılarının dinamik tepkisini, özellikle de deprem yüklemesi altında, tahmin etmek için PLAXIS 3D programının etkinliğini araştırmaktadır. PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak, sıkıştırılmış malzemelerin istinat duvarı zeminine dolgu olarak yerleştirilmesi durumu analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla ve PLAXIS 2D yazılımının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Araştırmanın amacı, deprem yükleri altında istinat duvarlarının performansını tahmin etmektir. Sonuçlar, zaman geçtikçe yer değiştirmenin PLAXIS 2D programına göre daha az olduğunu göstermektedir. Farklı analitik araçların karşılaştırılması sonucunda, PLAXIS 3D programının daha doğru, daha güvenilir ve gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Jia et al. (2019) yaptıkları çalışmada bu çalışmada, log spiral kayma yüzeyi varsayımı ile takviyeli istinat duvarının deprem yükleri altındaki kararlılığı, yatay dilimleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada, takviyenin çekme kuvvetini hesaplamak için formüller oluşturulmuştur. Parametrik çalışmalar normalleştirilmiş takviye çekme kuvvetinin artan deprem ivmesi katsayısı ve toprak birim ağırlığı ile arttığını, ancak toprak sürtünme açısının artmasıyla çekme kuvvetinin azaldığını ortaya koymuştur. Log spiral kayma yüzeyi, farklı durumlarda benzerlik göstermektedir. Takviyeli duvarın kayma yüzeyi, deprem yükü, toprağın adezyonu, birim ağırlığı veya sürtünme açısının artmasıyla duvar tarafına doğru hareket edecektir. Bu çalışmanın sonuçları, takviyeli yer tutma duvarlarının tasarımında teorik bir temel ve rehberlik sağlayabilir. Deprem koşullarını dikkate alarak takviyeli bir istinat duvarının güvenliğini artırabilir.

Jie et al. (2020) yaptıkları çalışmada, kafes tipi esnek istinat duvarı, düşük maliyeti ve kolay kurulumu sayesinde geniş bir pazar potansiyeline sahip olan yeni bir taşkın kontrol ekipmanı olduğunu söylüyorlar. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve yapısal istikrar/sızdırmazlık testleri yapılarak kafes tipi esnek istinat duvarının gerçek çalışma davranışı incelenmiştir. Sonuçlar, yapının gereksinimleri karşıladığını göstermiştir. Ayrıca, yapısal tasarımda değişiklikler önerilerek malzeme özelliklerinden daha iyi yararlanılabileceği ve proje maliyeti tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür. Yapının genel istikrarının korunduğu ve neredeyse hiç deformasyon üretmediği, bu da yapının

taşkın mevsimi boyunca kullanılabileceğini göstermiştir. Duvarın temeli ile çamur arasındaki mukavemetin artırılması için kum torbaları kullanılması önerilmiştir.

Rezaie et al. (2022) yaptıkları çalışmada, zorlu bir zemin durumu, su yüksekliği, antik yapılar, işgücü ve malzeme eksikliği gibi zorluklarla karşılaşılacak kumlu zeminde 15 m derinliğinde bir kazı örneği incelenmiştir. Ankraj, destekleyici çelik iskele ve bunların kombinasyonu gibi geçici istinat yapıları teknik ve mali açıdan karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, ankrajın duvarın üstünde deformasyonu kontrol etmek için daha iyi olduğunu gösterirken, ankrajın su tablasının altında uygulanmasının zorlu ve riskli olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle yüksek duvarlarda ankraj ve destekleyici çelik iskele kombinasyonu önerilmektedir. Aşamalı kazı, deformasyonu azaltmak için destekleyici çelik iskeleye göre rekabetçi bir prosedür olarak sunulmuştur. 2 boyutlu ve 3 boyutlu sayısal modeller arasındaki karşılaştırma, duvarın ortasındaki deformasyonun benzer olduğunu ancak köşelere yaklaşıldıkça sonuçların farklı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar, duvar deformasyonunun köşelerden etkilendiğini ve köşelere doğru 35 m mesafede yatay deplasmanın yarıya indirildiğini göstermektedir. İzleme verileri ile sayısal analizler arasındaki karşılaştırma, Plaxis 3D'nin kazı duvarlarında deformasyonu tahmin etmek için yeterince hassas olduğunu göstermiştir.

Chikute and Sonar (2019) yapmış oldukları çalışmada, belirli bir yerel koşul için yanlış seçilen geleneksel yöntemlerle yapılan istinat duvarı inşaatının zaman alıcı ve maliyetli olduğu vurgulanmıştır. Yığma taş duvarı, konsol duvarı, payandalı duvarı ve gabion istinat duvarı gibi mevcut tipler arasından en uygun, güvenli ve düşük maliyetli sistemin seçilmesi zordur. Tasarım prosedürü sırasında, dört farklı tip istinat duvarı için yükseklik, doldurma malzemesi, temel tabakası ve yükleme koşulları gibi girdi verileri sabit tutulmuştur. Bu çalışmada yapılan analizlerin sonuçlarına göre, Gabion Duvarı diğer geleneksel tutma duvarlarına göre daha az inşaat maliyetine sahiptir. Yerel olarak bulunan malzemelerin kullanımı ve hızlı iş ilerlemesi nedeniyle tercih edilebilir. Kırılma süresi gerektirmez ve ekonomik bir seçenektir. Dar tepe noktaları olan alanlar, nehir ve kanal bankaları gibi yerlerde uygun bir seçenektir. Uzak bölgelerde iyi işçilik, ileri teknoloji ekipman ve malzemenin zor bulunması durumlarında ideal bir seçenek olduğu görülmüştür.

El-Sherbiny et al. (2018) yapmış oldukları çalışmada, kalın kil birimi olan zayıf zeminlerde geçici bir toprak banketi kullanılarak desteklenen gömülü tutma yapılarının stabilitesini ve performansını incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak izlenen bir istinat duvarının ön yüzünde bir banket bulunan bir vaka çalışması simüle edilmiştir. Çalışmada, zemini ve duvarı modellemek için kullanılan farklı parametrelerin analizi ve doğrulaması açıklanmıştır. Toprak dayanımı ve rijitliğinin gerilime bağımlılığını hesaba katmak için iki farklı analiz yaklaşımı uygulanarak karşılaştırılmıştır. Hesaplanan deformasyonlar ile izleme sonuçları karşılaştırılarak sonuçların uygulanabilirliği ve yazılımın yeterliliği doğrulanmış ve iyi bir uyum elde edilmiştir. Ayrıca, banket kaldırma işlemi sırasında duvar performansının değerlendirilmesi için diyafram duvarlarının anizotropisi dikkate alınmıştır, çünkü bu inşaat sürecinde en kritik aşama olarak kabul edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez aşamasının bu kısmında sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis Paket Programı, tasarlanan istinat duvarlarının boyutsal bilgileri ve duvarın önünde ve arkasında kullanılan dolgu zeminin parametreleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yönteminin ilk kullanımı 1950’de inşaat mühendisliği alanında olmuştur. Bu yöntemin temelini Ritz Yöntemi (1909) oluşturmaktadır. Günümüzdeki haliyle etkin kullanımı ise bilgisayar teknolojisinin gelişimiyle mümkün hale gelmiştir (Nath 1993).

Teknolojinin ilerlemesiyle karmaşık hale gelen icatların atması çözüm sistematüğinde sonlu elemanlar kullanımını artırdı. Bu çok kullanışlı yöntem birçok analiz programına da entegre edilerek farklı kullanım alanlarında da kendine yer buldu. Sonlu elemanlar makine, uçak, inşaat, otomotiv mühendislikleri uygulamaları, gerilme analizi, ısı iletimi, akışkanlar mekaniğı, biyomekanik uygulamaları, medikal uygulamaları, statik ve dinamik elastisite problemleri gibi konularda uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli mühendislik ve matematiksel modellerde kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan ve sıklıkla kullanılan bir sayısal çözüm yöntemidir (Güler ve Sadri 2015).

Bir sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) olarak bilinmektedir. Yöntem ilk kez 1940’lı yıllarda öne sürülmüş ve 1950’li yıllarda uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) adı verilen sayısal tekniğın kullanıldığı herhangi bir fiziksel olgunun simülasyonudur. Mühendisler, daha iyi ürünler geliştirmek için fiziksel prototip ve deneylerin sayısını azaltmak ve bileşenleri tasarım aşamasında optimize etmek için bu yöntemi kullanırlar (Bhoyar ve Awachat 2019).

Avantajlarından bahsetmek gerekirse sonlu elemanlar yöntemi (FEM), geometrisi karmaşık olan şekillerin incelenmesine imkân sağlar. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve gerektiğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir. FEM

değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örnek vermek gerekirse anizotropi, non-lineer, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir ve sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, oldukça basit satır sütun işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilir. FEM matematiksel olarak genelleştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir (Chandrupadla and Belegundu 2017).

Dezavantajlarından bahsetmek gerekirse bazı problemlere uygulanması noktasında birtakım zorluklar olduğu görülür. Öncelikle bir bilgisayara ihtiyaç duyar ve elde edilecek sonucun doğruluğu verilerin doğru girilmesine bağlıdır. Diğer yaklaşık yöntemlerde olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonucun doğruluğu konusunda da dikkat edilmesi ve fiziksel problemlerin iyi incelenmesi gerekir. Çıkabilecek olası sonuçlar önceden tahmin edilmeli ve sonuçlar ona göre değerlendirilmelidir (Babu ve Gowda 2016).

3.2. Plaxis 3D/2D Paket Programı

1987 yılında Hollanda'nın Delft Teknik Üniversitesinde geliştirilmiş geoteknik mühendisliği projelerinde kompleks problemleri sonlu elemanlar yöntemi ile çözebilmeye yarayan, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranışlar ve yapı ile zemin arasındaki ilişkiyi modelleyen bir yazılımdır. Plaxis 3D, üç boyutlu zemin ve kaya mekaniği problemlerini çözmek için kullanılırken Plaxis 2D iki boyutlu olanlar için kullanılır. Plaxis V22 de son sürüm ve tüm güncel özellikleri içermektedir. Temelden yapıya kadar tüm özellikleri analiz edebilmemizi sağlar.

Plaxis 2D, V22 de son sürüm ve güncel özellikleri içermesine rağmen iki boyutlu zemin davranışları için tasarlanmıştır. Yeni özellikler arasında tarama simülasyonları, otomatik ölçeklendirme özelliği ve daha fazlası yer alır (PLAXIS 2D - Tutorial Manual 2022).

Her iki programda karmaşık zemin davranışlarını modelleyebilir ve mühendislerin çeşitli projelerin de geoteknik tasarımlarını yapmalarına yardımcı olabilir.

Yeraltı yapılarının davranışını modellerken kullanılan yazılım Plaxis 3D V22'dir. 3D sayesinde karmaşık geometrileri yüksek hassasiyetle ele alabilir. Plaxis 3D, zemin ve yapıların gerçek davranışını taklit etmek için malzeme modelleri, yük modelleri, sınırlayıcı koşullar ve analiz yöntemleri sunar. Ayrıca, zaman bağımlı analizler, stabilite analizleri gibi birçok özelliğe sahiptir.

Plaxis 2D, V22'de yeraltı yapılarının davranışını modellerken kullanılabilir. Plaxis 2D, düzlem gerilme durumunda zemin ve yapıların davranışını modelleyerek analiz yapar. Bu analiz yerin yatay düzlemdeki hareketini anlamak için yeterli sayılır. Plaxis 2D, Plaxis 3D'de olduğu gibi malzeme modelleri, yük modelleri, sınırlayıcı koşullar ve analiz yöntemleri sunar. Ayrıca, zaman bağımlı analizler, stabilite analizleri gibi birçok özelliğe sahiptir.

Her iki yazılımda mühendislerin zemin yapılarının davranışlarını anlamalarına ve tasarım sürecinde doğru sonuçlara ulaşmaları için güçlü analitik yeteneklere sahiptir. Plaxis 3D, V22 ve Plaxis 2D, V22, kullanıcı dostu bir arayüze ve geniş bir analiz yeteneğine sahiptir. Aşağıda, Plaxis 3D, V22 ile gerçekleştirilebilecek bazı işlemleri bulabilirsiniz:

1. Kazı Analizleri: Plaxis 3D, kazıların stabilitesini değerlendirebilir ve destek sistemlerinin etkinliğini analiz edebilir. Kazı deformasyonları gibi birçok davranışı simüle edebilir.
2. Temel Analizleri: Yapı temellerinin zemin üzerindeki davranışını analiz edebilir ve temel taşıyıcı deformasyonlarını tahmin etmek için kullanılır.
3. Tünel Analizleri: Yer altı tünellerinin tasarımı, geçişleri, tünel etrafındaki zeminin deformasyonları gibi birçok özelliği analiz edebilir.
4. Geoteknik Yapı Analizleri: Plaxis 3D, duvarlar, bentler, kazıklar ve diğer geoteknik yapının davranışını simüle ederken bu yapıların stabilitesini ve taşıma kapasitesini analiz edebilir.
5. Dinamik Analizler: Dinamik, deprem ve titreşimli yükler altında yapıların performansını ve davranışlarını analiz eder.

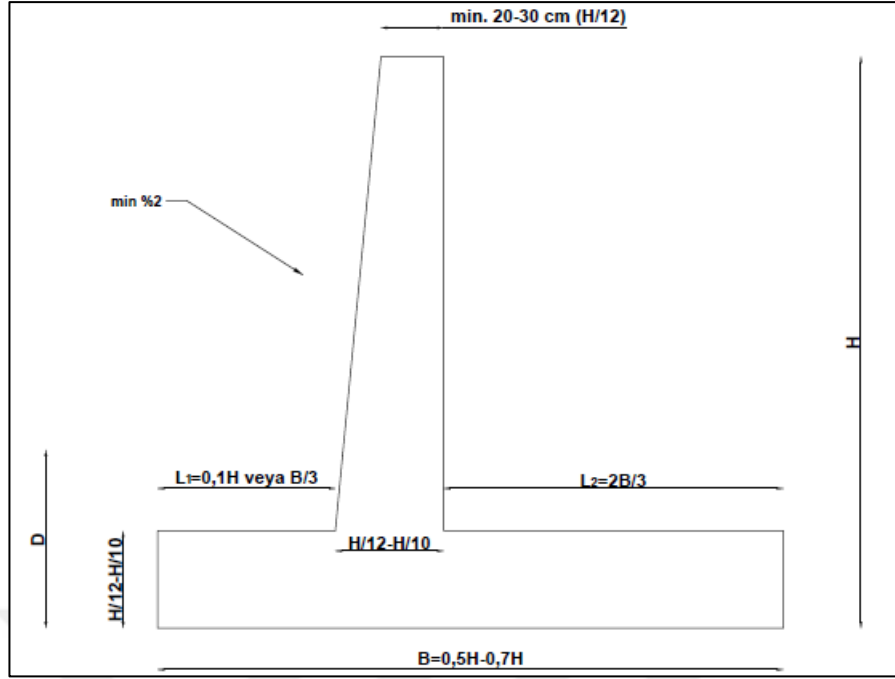
6. Zemin-Geçiş Etkileşimi Analizleri: Yapıların zemin üzerindeki etkisi ve zemin-yapı etkileşimlerini analiz eder. Yapıların deformasyonları ve zemin üzerindeki gerilimlerini tahmin etme de kullanılır.

Plaxis paket programı sayesinde birçok zemin iyileştirme projesi tasarlanıp zemin parametreleri girilerek programın içindeki “PHASE” bölümü sayesinde aşamalı bir şekilde çoğu olası senaryolar analiz edilip değerlendirilebilir. Bu sayede herhangi bir proje henüz tasarım aşamasında değerlendirilip oluşabilecek sorunlar önceden görülebilir. Bu program ile yüzeysel ve derin temellerin tasarım ve analizi, farklı tipteki istinat duvarların tasarım ve analizi, bir akarsu setinin inşası ve şev stabilitesi analizleri, bir yol setinin inşası ve zemin iyileştirme yöntemleri, bir yerleşim yerinin altında tünel inşası ve analizleri, zemin ve yapı arasındaki dinamik etkileşimler, eksenel ve eğilme rijitliği hesaplamaları ve bir su tankının altındaki kazık grubunun oturma analizi gibi birçok mühendislik problemi analiz edilebilir (Birand 2006, 2007).

Bu tez kapsamında incelenen istinat duvarlarının tasarımını Plaxis paket programı ile yapılmış olup değişen yeraltı su seviyeleri ve duvar boyutlarının analiz edilip elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir (Plaxis 3D - Tutorial Manual 2022).

3.3. İstinat Duvarlarının Ön Boyutlandırılması

Konsol istinat duvarların ön boyutlandırılması ile ilgili genel kabul gören boyutlandırma oranları Şekil 3.1’ deki gibidir (Orhan 2022).



Şekil 3.1. Betonarme konsol istinat duvarının ön boyutlandırılması için genel oranlar

Konsol istinat duvar ön boyutlandırma;

- H: İstinat duvarının yüksekliği
- $B(\text{İstinat duvarının temel taban genişliği}) = 0,5H \sim 0,7H$ (1.44)
- $L_1(\text{topuk}) = 0,1 * H \text{ veya } B/3$ (1.45)
- $L_2(\text{burun}) = 0,1 * H \text{ veya } 2B/3$ (1.46)
- D: Ön taraf zemin yüzeyi derinliği

İstinat duvarı tasarımı yapılırken tasarımın boyutlarını önceden tahmin ederek işe başlanabilir. Bu boyutlar genel olarak farklı tasarımlar yapıldıktan sonra bir yaklaşık tahmin olarak kullanılmaktadır.

Bu varsayımlar değer göz önüne alarak duvarın boyutların tahmin edip ve analiz yaparak boyutlar en optimum hale getirile bilir. Bu analizler sonucunda yapılan

kontrollerde istenmeyen sonuçlar elde edilirse tahmini boyutlar değiştirilebilir ve tekrar kontrol edilebilir. Şekil 3.1’ de ön boyutlandırma için verilen oranlar ilk kontroller için kullanılabilir. Bir istinat duvarının gövde kısmının tepesi, uygun bir şekilde beton yerleştirilmesi için yaklaşık 30 cm’ den az olmaması tavsiye edilir. Ön taraf zemin yüzeyi derinliği (D) minimum temel tabanının yüksekliğinde olmalıdır. Ancak, temel taban kotu, mevsimsel don seviyesinin altına yerleştirilmelidir.

Konturforlu-Payandalı istinat duvarları için, gövdenin ve taban döşemesinin ön boyutlandırılması için verilen genel oranlar betonarme konsol istinat duvarları ile aynıdır. (Orhan 2022).

Bu tez kapsamında ele alınan istinat duvarlarının boyutlandırılması Şekil 3.1’de verilen tahmini boyutlara göre yapılmıştır. 3 farklı duvar yüksekliği ve 5 farklı yeraltı su seviyesinde, Plaxis 3D ile tasarlanan istinat duvarları analize tabii tutulmuş olup sonuçlar ve değerlendirilmesi 4. ve 5. bölümlerde yapılmıştır.

Tasarlanan istinat duvarları sırasıyla 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğinde olup her bir duvarın temel genişliğine (B) göre yeraltı su seviyeleri (YASS) 0B, 1B, 2B, 3B ve 4B derinliğinde toplamda 15 adet istinat duvarı tasarlanmıştır.

4,5 m yüksekliğindeki istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde değişen ön taraf dolgu seviyesi yüksekliklerinde duvarda meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri sonuçlar ve değerlendirilmesi 4. ve 5. bölümlerde yapılmıştır.

3.4. İstinat Duvarlarının Tasarımında Kullanılan Zemin Parametreleri

Bu bölümde, istinat duvarı tasarımında kullanılan zeminin özellikleri verilmiştir. Duvarın ön ve arka tarafında dolgu zemin kullanılmış olup alt tarafında ise kum zemin üzerine inşa edilecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Çizelge 3.1’de duvarın ön ve arka tarafında kullanılan dolgu zeminin parametreleri, Çizelge 3.2’de tasarlanan istinat duvarının temelinin altında kullanılan kum zeminin özellikleri ve Çizelge 3.3’de istinat duvarının yapılacağı beton malzemenin parametreleri verilmiştir. Kullanılan değerler genelde zeminlerde ve beton istinat duvarlarda rastlayabileceğimiz değerlerdir ve farklı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

kaynaklarda kullanılan değerler sınırında yer almaktadır (Baradan, Yazıcı, ve Aydın 2015).

Çizelge 3.1. İstinat duvarının ön ve arka tarafında kullanılan dolgu zeminin özellikleri

Parametre	İsim	Değer	Birim
Genel Özellikler			
Zemin Modeli	Model	Mohr-Coulomb	-
Drenaj Tipi	Tip	Drenajlı	-
Kuru birim hacim ağırlık	γ_{unsat}	18,0	kN/m^3
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{sat}	19,5	kN/m^3
Mekanik Özellikler			
Elastisite/Young Modülü	E	12.000	kN/m^2
Poisson Oranı	ν	0,25	-
Kohezyon	c	5	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	φ	35	°
Dilatasyon Açısı	Ψ	5	°
Arayüz Azaltma Faktörü	R_{inter}	0,80	
K_0 Belirleme	Automatic	Automatic	Automatic

Çizelge 3.2. Tasarlanan istinat duvarının temelinin altında kullanılan zeminin özellikleri

Parametre	İsim	Değer	Birim
Genel Özellikler			
Zemin Modeli	Model	Mohr-Coulomb	-
Drenaj Tipi	Tip	Drenajlı	-
Kuru birim hacim ağırlık	γ_{unsat}	18,0	kN/m^3
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{sat}	19,5	kN/m^3
Mekanik Özellikler			
Elastisite/Young Modülü	E	20.000	kN/m^2
Poisson Oranı	ν	0,25	-
Kohezyon	c	5	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	φ	32	°
Dilatasyon Açısı	Ψ	2	°
Arayüz Azaltma Faktörü	R_{inter}	0,70	
K_0 Belirleme	Automatic	Automatic	Automatic

3. MATERYAL ve YÖNTEM

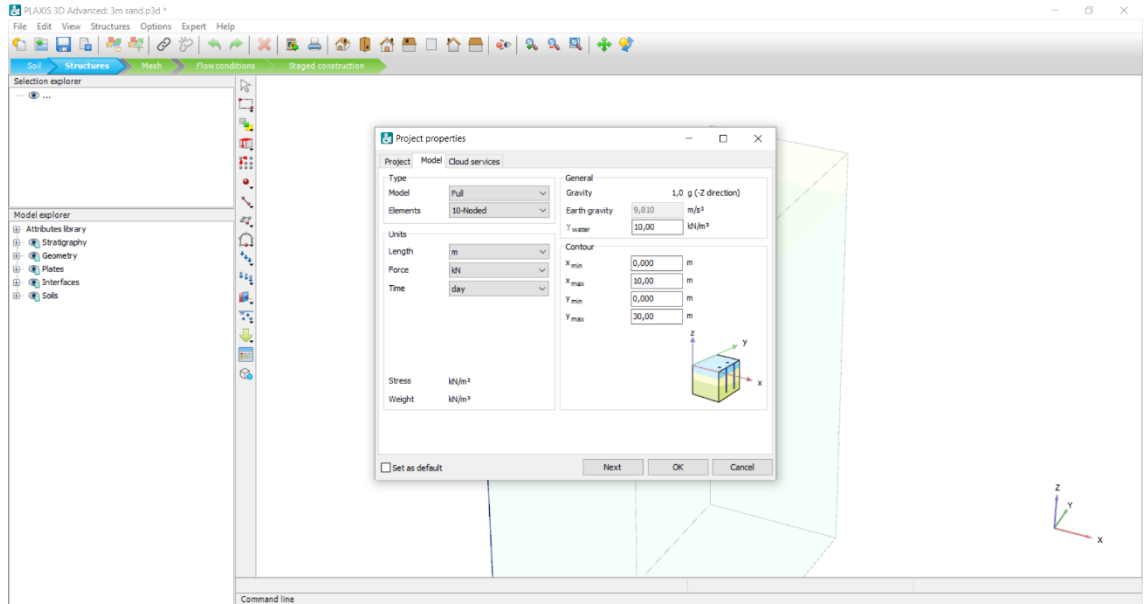
Çizelge 3.3. İstinat duvarının yapılacağı beton malzemenin özellikleri

Parametre	İsim	Değer	Birim
Genel Özellikler			
Materyal Tipi	Plate	Elastik	-
Birim Hacim Ağırlık	γ	25	kN/m^3
Mekanik Özellikler			
İzotropik	-	Yes	-
Elastisite/Young Modülü	E_1	$32 \cdot 10^6$	kN/m^2
Poisson Oranı	ν_{12}	0,2	-
Kalınlık	d	0,3	m
Kayma Modülü	G_{12}	$13,33 \cdot 10^6$	kN/m^2

3.5. Yöntem

3.5.1. Model tanıtımı

İstinat duvarının tasarımını yapmadan önce Plaxis 3D programında ilk aşama olarak “Project Properties>Model” kısmında çalışma alanının özellikleri girilir. Bu kısımda tasarımda kullanılacak olan birimler ve çevre modelinin boyutları tanımlanır. Aşağıda Şekil 3.2’ deki görselde hangi değerlerin girildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Plaxis 3D programında girilen Project Properties değerleri

Sonraki aşama olarak program içerisinde tasarım sahasının boyutları belirlendikten sonra istinat duvarının tasarımına başlamadan önce önünde ve arkasında

3. MATERYAL ve YÖNTEM

kullanılacak olan dolgunun ve duvarı üstüne yapacağımız zeminin parametreleri program içerisinde bulunan “Material Sets>Soil and Interfaces” bölümünde girilmiştir. Aynı şekilde istinat duvarının yapılacağı beton malzeme “Material Sets>Plates” bölümünde tanımlandı.

Aşağıdaki Şekil 3.2’ de program içerisinde kullanılan dolgu zeminin parametreleri gösterilmiştir.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Fill
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 236, 232, 156
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,50
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0

(a)

Şekil 3.3. İstinat duvarının ön ve arkasında kullanılan dolgu zemin parametreleri, (a) general, (b) parameters, (c) groundwater, (d) interfaces, (e) initial.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Soil - Mohr-Coulomb - Fill

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	12,00E3
ν' (nu)		0,2500
Alternatives		
G	kN/m ²	4800
E_{oed}	kN/m ²	14,40E3
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ' (phi)	°	35,00
ψ (psi)	°	5,000
Advanced		
Set to default values ☒		
Stiffness		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Strength		
c'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		☒
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9833
ν_u		0,4950

Next OK Cancel

(b)

Soil - Mohr-Coulomb - Fill

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Model		
Data set		Standard
Soil		
Type		Coarse
< 2 μ m	%	10,00
2 μ m - 50 μ m	%	13,00
50 μ m - 2 mm	%	77,00
Flow parameters		
Use defaults		None
k_x	m/day	0,000
k_y	m/day	0,000
k_z	m/day	0,000
α_{unsat}	m	10,00E3
e_{init}		0,5000
S_s	1/m	0,02126E-3
Change of permeability		
c_k		1000E12

Soil Graphs

Next OK Cancel

(c)

Şekil 3.3. (devam)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Soil - Mohr-Coulomb - Fill

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
Stiffness	Standard	
Strength		
Strength	Manual	
R_{inter}		0,8000
Consider gap closure		☒
Real interface thickness		
δ_{inter}		0,000
Groundwater		
Cross permeability	Impermeable	
Drainage conductivity $1, dk$	$m^3/day/m$	0,000
Drainage conductivity $2, dk$	$m^3/day/m$	0,000

Next OK Cancel

(d)

Soil - Mohr-Coulomb - Fill

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
K0 settings		
K_0 determination	Automatic	
$K_{0,x} = K_{0,y}$		☒
$K_{0,x}$		0,4264
$K_{0,y}$		0,4264

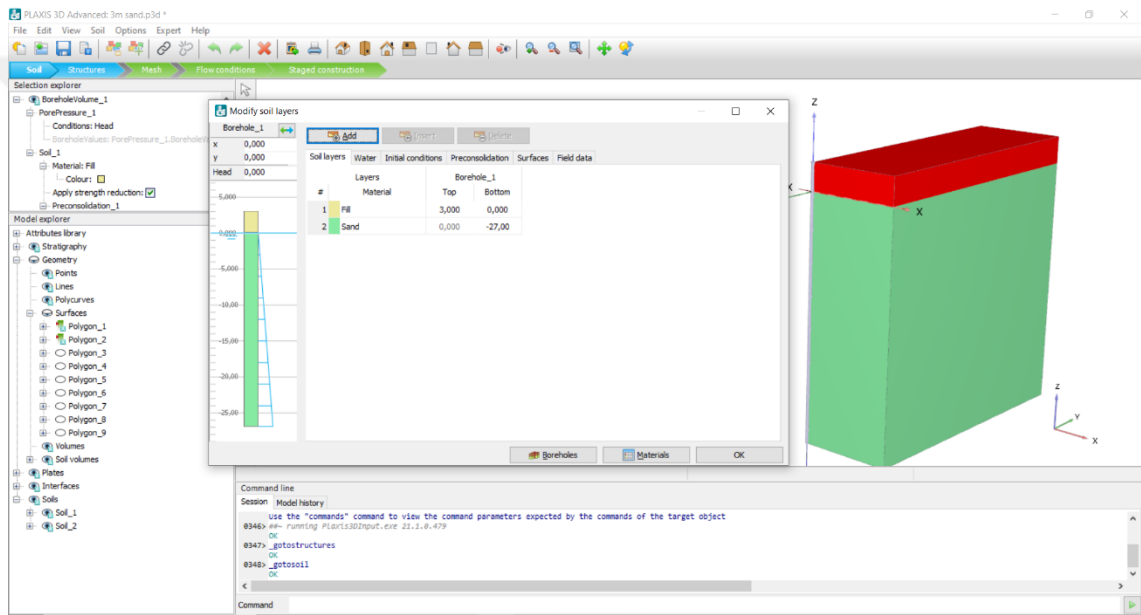
Next OK Cancel

(e)

Şekil 3.3. (devam)

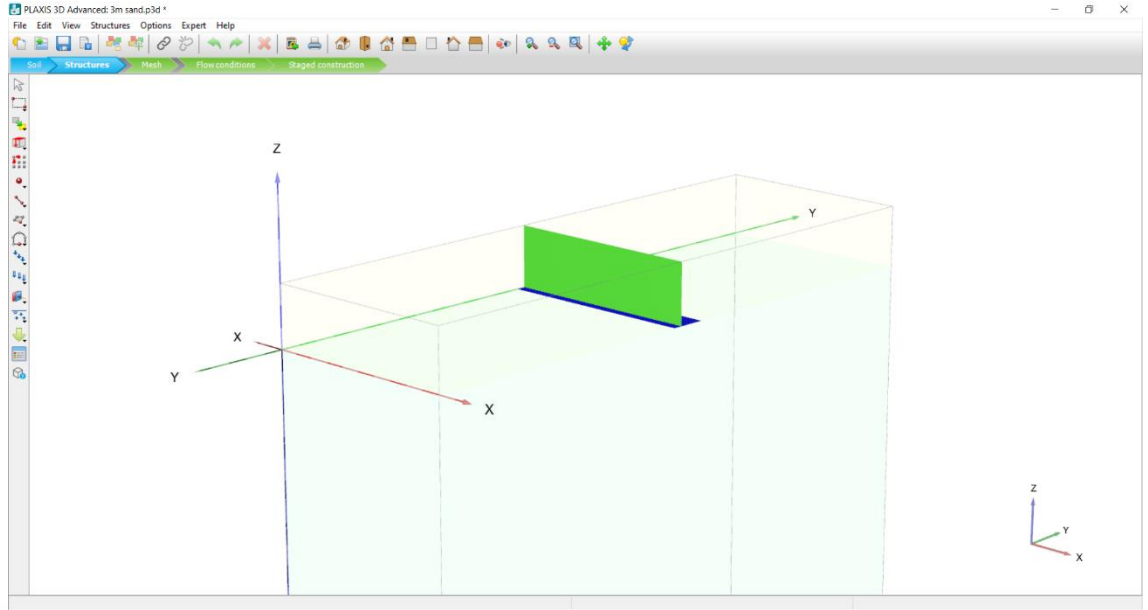
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Plaxis 3D programında tasarımlar aşamalı bir şekilde yapılır. Öncelikle programda içerisinde yapılacak olan istinat duvar tasarımı için çalışma alanının boyutları belirlendi. Sonrasında zemin parametrelerini girip kullanılacak olan dolgu ve kum zeminler program içerisinde tanımlandı. Buraya kadar tasarıma başlamadan önce program içerisinde yapılması gereken bazı hazırlıklar olarak değerlendirebiliriz. Tasarıma başlarken ilk olarak “Soil” bölümünde bir adet sondaj kuyusu (borehole) oluşturulması gerekir. Bu sayede tanımlanan zeminlerin ve yeraltı su seviyesinin derinliğini belirleyebiliriz. Şekil 3.4’ de program içerisinde sondaj kuyusunun tanımlandığı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sondaj kuyusunun oluşturulması

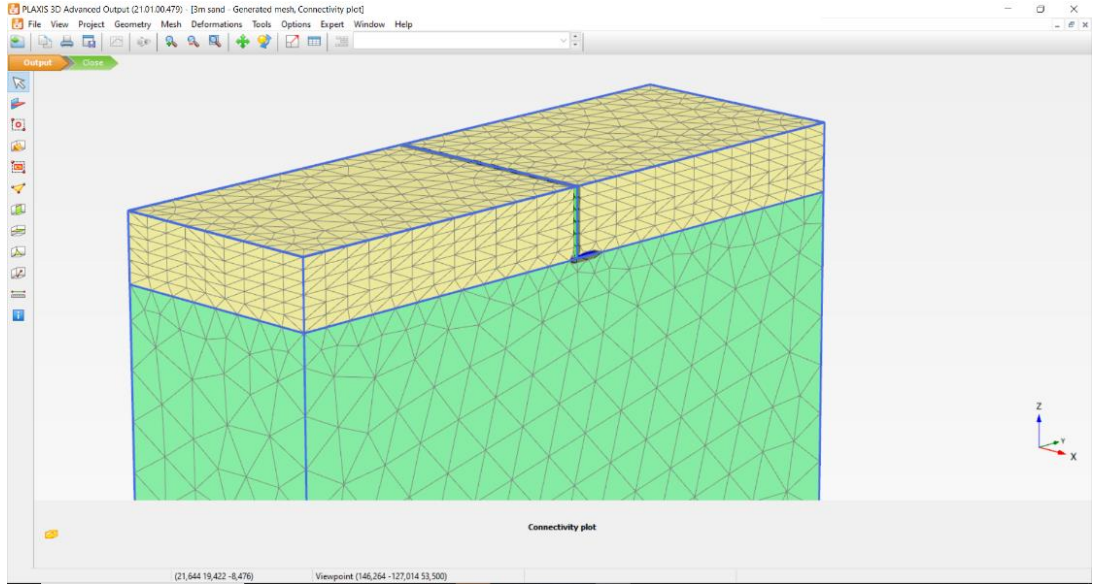
Şekil 3.4’ de gösterilen aşamada bir adet sondaj kuyusu oluşturulmuş ve bu sayede tasarımda kullanılan dolgu ve kum zeminin derinlikleri ve yeraltı su seviyesi tanımlanmıştır. Sonraki aşama olarak ‘Structure’ bölümüne geçip istinat duvarı ve tasarımda kullanılacak olan yüzeyler tanımlanmıştır.



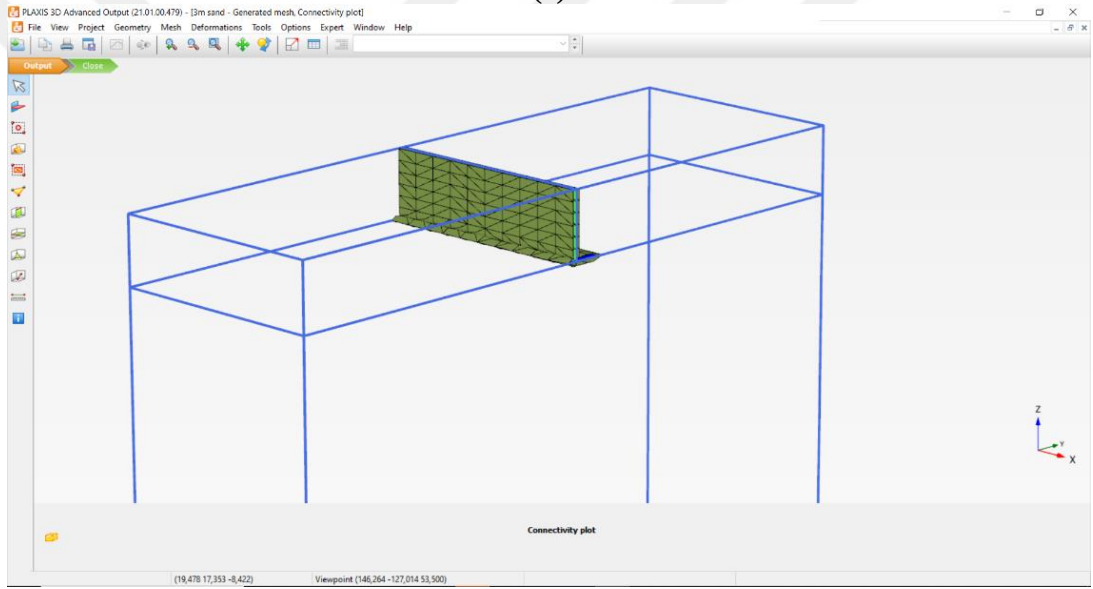
Şekil 3.5. İstinat duvarı ve yüzeylerin oluşturulması

Modelin devamında, istinat duvarının gövdesi ve temeli tanımlanır. ‘Surface’ yüzeyleri de aşamada tanımlanır. Bu yüzeyleri oluşturmamızın amacı son kısımda fazları tanımlarken zemini doldur-boşalt yapabilmek içindir. Ayrıca ‘interface’ yani arayüzeyler de bu aşamada tanımlanır. Sonraki aşama olarak ‘mesh’ bölümüne geçilir. Bu bölümde modelleme alanı üçgensel olarak bölünür. Mesh özelliği, analizi yapılacak olan zeminin ve yapı modelinin küçük elemanlara bölünmesini sağlar. Bu elemanlar, modelin daha küçük bölgelere ayrılmasını ve daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlar. Her eleman, belirli bir şekilde zeminin davranışını temsil eder. Mesh özelliği, kullanıcıya daha hassas sonuçlar elde etme imkânı sunar, çünkü model daha küçük bölgelere ayrıldığı için analiz daha detaylı olacaktır. Şekil 3.6’ da zeminin ve istinat duvarının ‘mesh’ özelliği ile daha küçük bölgelere ayrılması gösterilmiştir. Ayrıca bu özellik bu tez kapsamında yapılan bütün tasarımlarda kullanılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



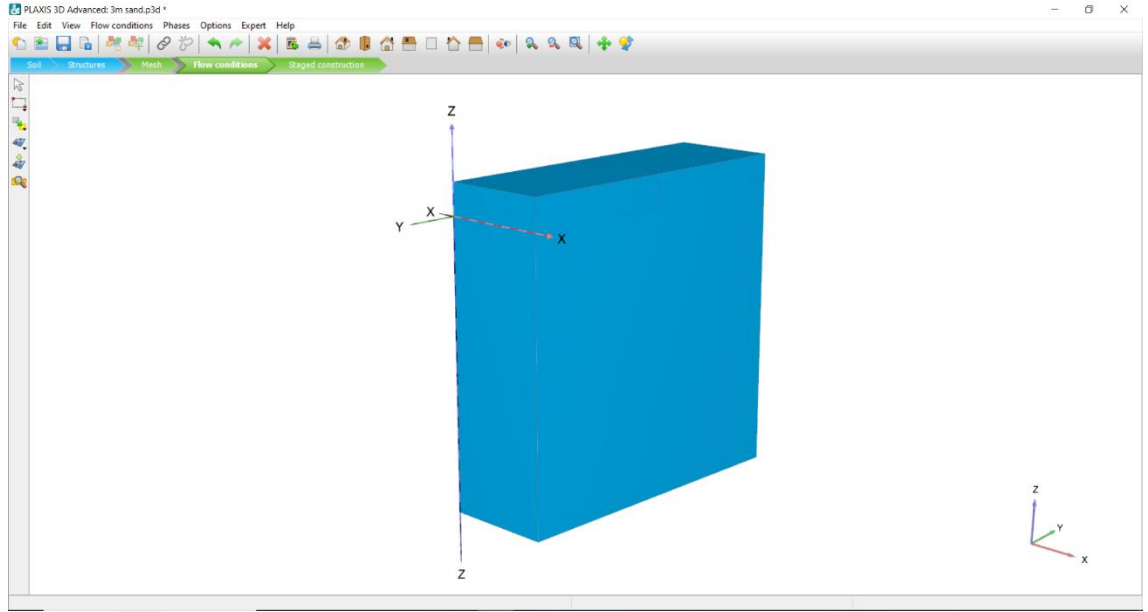
(a)



(b)

Şekil 3.6. Zeminin ve istinat duvarının ‘mesh’ bölümünde daha küçük bölgelere ayrılması, (a) zemin, (b) istinat duvarı.

Sonraki aşamada Şekil 3.7’ de gösterildiği gibi Flow Conditions ayarları, Plaxis 3D programının kullanıcılarına zemin mühendisliği analizlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde etmeleri için bir araç sunar. Bu ayarlar, zemin-su etkileşimini ve suyun zemin üzerindeki etkisini belirlemek için projenin özel gereksinimlerine uygun şekilde yapılandırılabilir. Bu kısımda zeminde bir su akımı veya su seviyesinin değişimi olmadığı için herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 3.7. Flow conditions ayarları

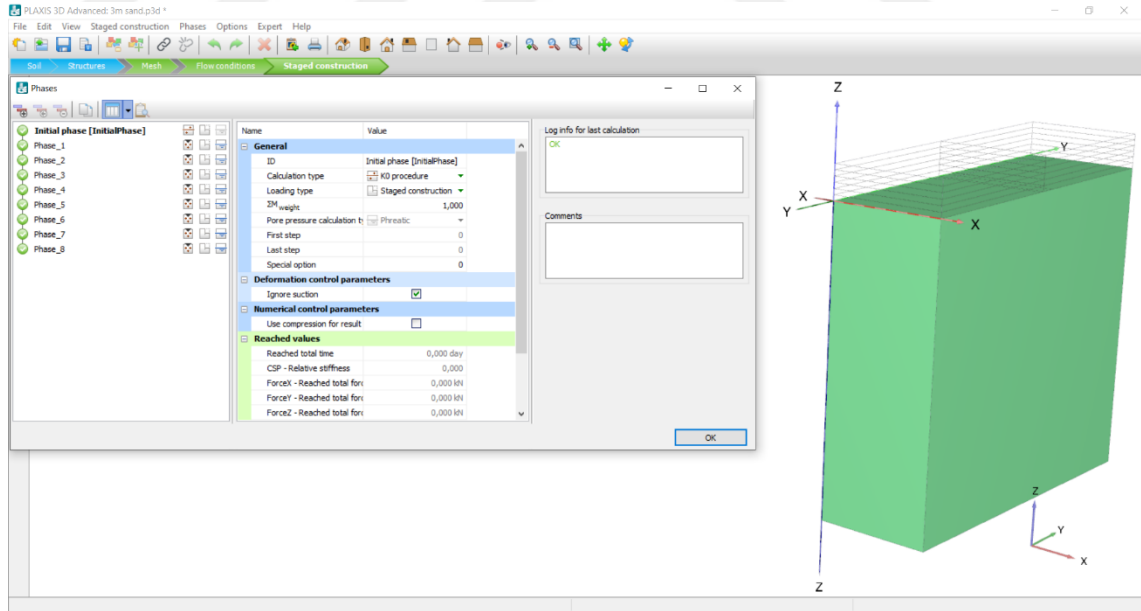
Son aşamada ‘Staged Construction’ yani aşamalı inşaat bölümünde tasarım aşamaları fazlara bölünüp sırasıyla tanımlanır. Staged Construction (Aşamalı İnşaat), bir projenin farklı inşaat aşamalarını modellemek ve analiz etmek için kullanılır. Yapıların veya yüklerin ne zaman uygulanacağı, hangi yüklerin kullanılacağı ve hangi sınırlamaların geçerli olacağı ile ilgili ayrıntılı ayarlamalar yapılabilmesine olanak tanır. Bu bölüm, projenin her aşamasındaki zemin davranışını daha ayrıntılı bir şekilde incelememizi sağlar. Aşamalı inşaat analizi, zeminin aşamalı olarak değişen koşullarda nasıl davrandığı incelemek açısından kullanışlıdır. Örneğin tasarımların analizinde zeminin doldurulmasıyla beraber duvara etkiyen yük veya zemin içindeki su seviyelerinin değiştirilmesi gibi değişiklikleri modellemek mümkündür.

Örneğin; 3 metrelik bir istinat duvarı tasarımı için “initial phase” ile beraber toplamda 9 faz tanımlanmaktadır. Gerçek uygulamadaki imalat benzer sıralamanın programa tanıtılması gerektiği için, ilk başta istinat duvarın temeli, sonra duvarın kendisi ve devamında duvarın arkasındaki dolgu zemin yerleştirilmesi gerekmektedir. Aşağıda bu fazlar 3 metrelik istinat duvar için açıklanmıştır. Aynı zamanda diğer istinat duvarları için de benzer işlemler yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

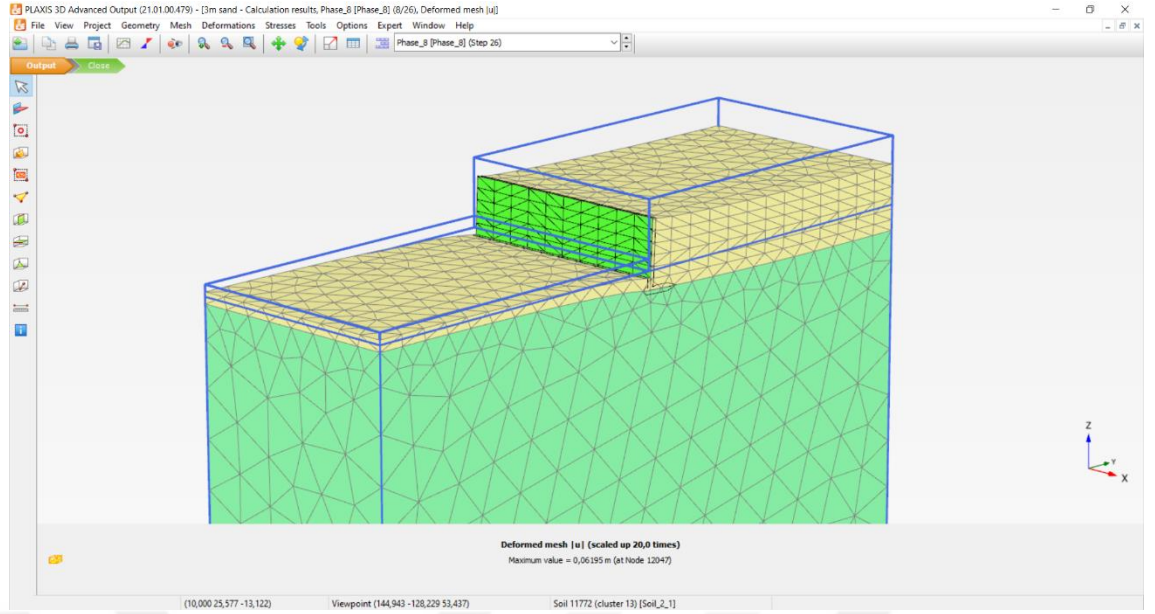
- **Initial Phase:** Başlangıç fazı, modelin henüz hiçbir işlem yapılmadan önceki mevcut durumu göstermektedir.
- **Phase 1:** Mevcut zemin modelinin üzerine istinat duvarının temeli tanımlanmıştır.
- **Phase 2:** İstinat duvarının temeli üzerine duvarın gövdesi tanımlanmıştır.
- **Phase 3:** Duvarın ön ve arka yüzeyine dolgu zemin yerleştirildi. Duvar gövdesi ve temelinde her iki yüzünde arayüzeyler tanımlanmıştır.
- **Phase 4:** Duvarın arka yüzeyine 50 cm dolgu zemin yerleştirilmiştir.
- **Phase 5:** Duvarın arka yüzeyine 50 cm dolgu zemin yerleştirilmiştir.
- **Phase 6:** Duvarın arka yüzeyine 50 cm dolgu zemin yerleştirilmiştir.
- **Phase 7:** Duvarın arka yüzeyine 50 cm dolgu zemin yerleştirilmiştir.
- **Phase 8:** Duvarın arka yüzeyine 50 cm dolgu zemin yerleştirilmiştir.

Şekil 3.8’ de gösterildiği gibi her bir tasarım için bütün fazlar tanımlandıktan sonra ‘Calculate’ butonuyla analizler yapılır ve ‘View Calculation Results’ butonuyla analiz sonuçları görüntülenir (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Staged construction bölümünde fazların tanımlanması

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.9. Analiz sonuçlarının görüntülenmesi

Bu tez kapsamında yapılan bütün tasarımlar analiz edilmiş olup çıkan sonuçların değerlendirilmesi, değişen duvar yüksekliği ve yeraltı su seviyelerinin istinat duvarını nasıl etkilediği ve bu sonuçların birbirleri ile kıyaslanması, araştırma bulguları ve tartışma bölümünde yapılmıştır.

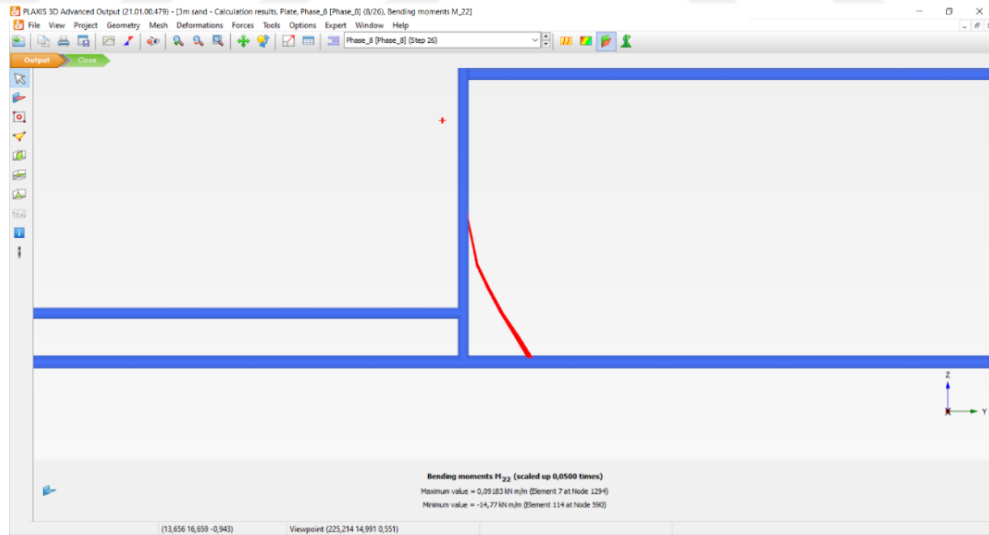
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu kısımda Plaxis 3D programında tasarımı yapılan 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarının analiz sonuçları ve bu sonuçlardan elde edilen veriler sunulmuştur.

4.1. Duvar Yüksekliği ve Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi

Şekillerde gösterilen model adlandırmalarında H ile gösterilenler duvar yüksekliğini ve yeraltı su seviyesi (YASS) ile gösterilenler ise yeraltı su seviyesini ifade etmektedir. Duvar yüksekliği ve yeraltı su seviyesi arttıkça değişen duvar deplasman hareketi, normal, moment ve kesme kuvveti değerleri incelenmiştir.

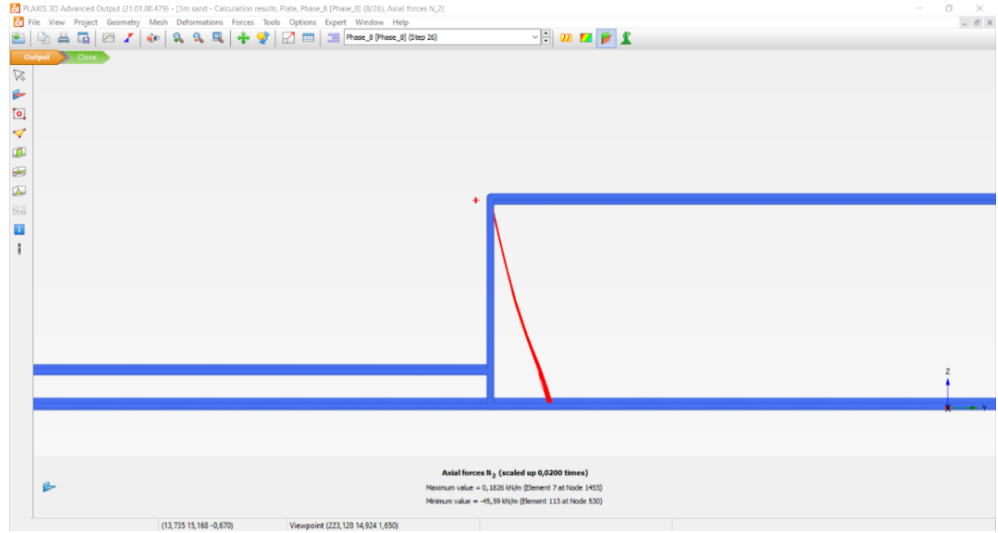
Şekil 4.1’de Plaxis 3D programında yapılan analizlerden elde edilen 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarına etkiyen moment, normal kuvvet, kesme kuvveti, yatay ve dikey yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



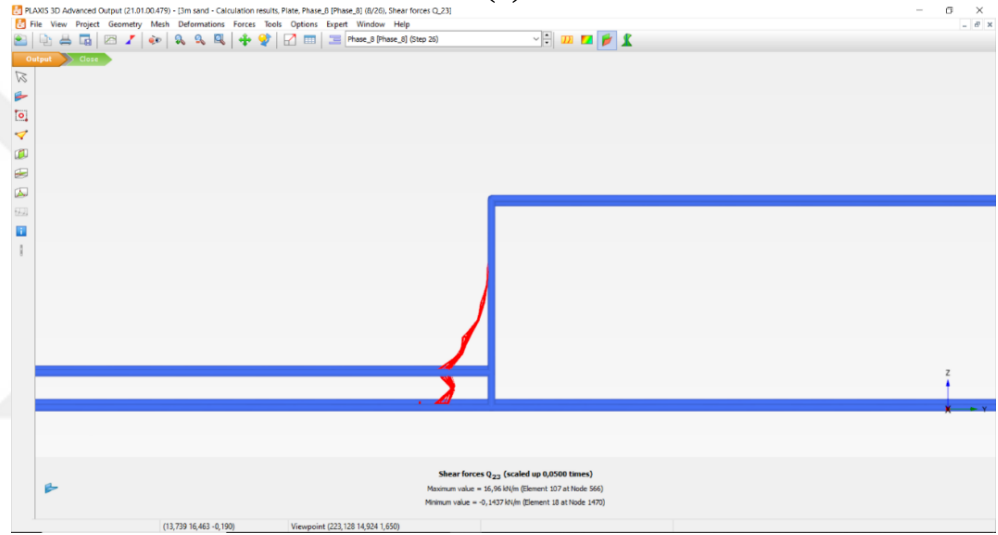
(a)

Şekil 4.1. 3 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.

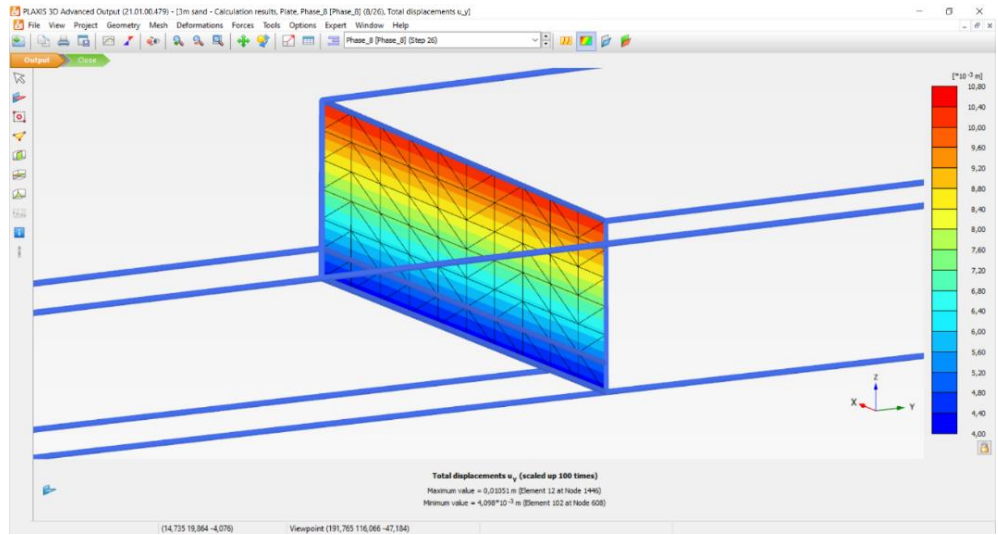
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(b)

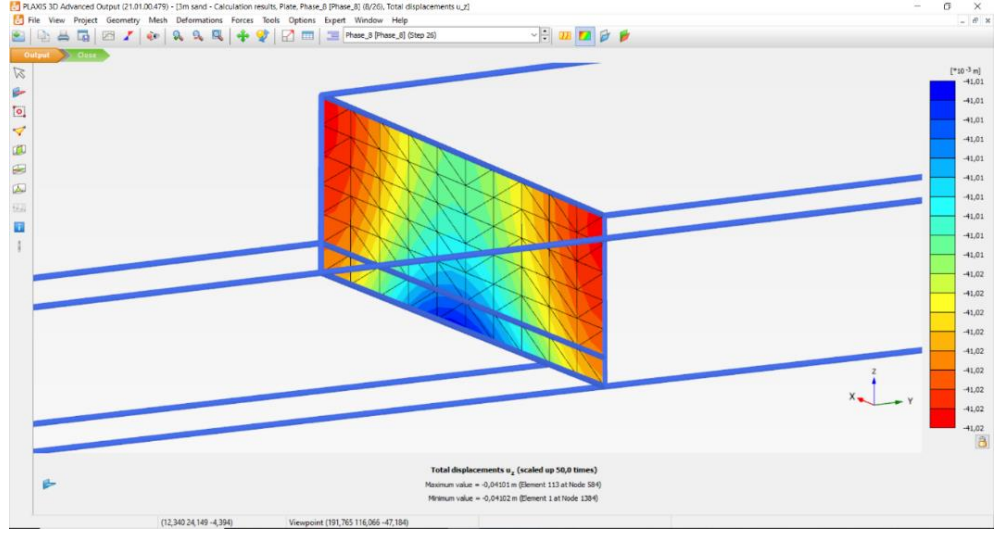


(c)



(d)

Şekil 4.1. (devam)



(e)

Şekil 4.1. (devam)

Program içerisinde yapılan analizler sonucunda 3 metre yüksekliğinde ve 0B yeraltı su seviyesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Moment değeri (max.) = $0,09183 \text{ kN m/m}$
- Moment değeri (min.) = $-14,77 \text{ kN m/m}$
- Normal kuvvet (max.) = $0,1826 \text{ kN/m}$
- Normal kuvvet (min.) = $-45,59 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (max.) = $16,96 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (min.) = $-0,1437 \text{ kN/m}$
- Yatay yer değiştirme (max.) = $0,01051 \text{ m}$
- Yatay yer değiştirme (min.) = $4,098 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Dikey yer değiştirme (max.) = $-0,04101 \text{ m}$
- Dikey yer değiştirme (min.) = $-0,04102 \text{ m}$

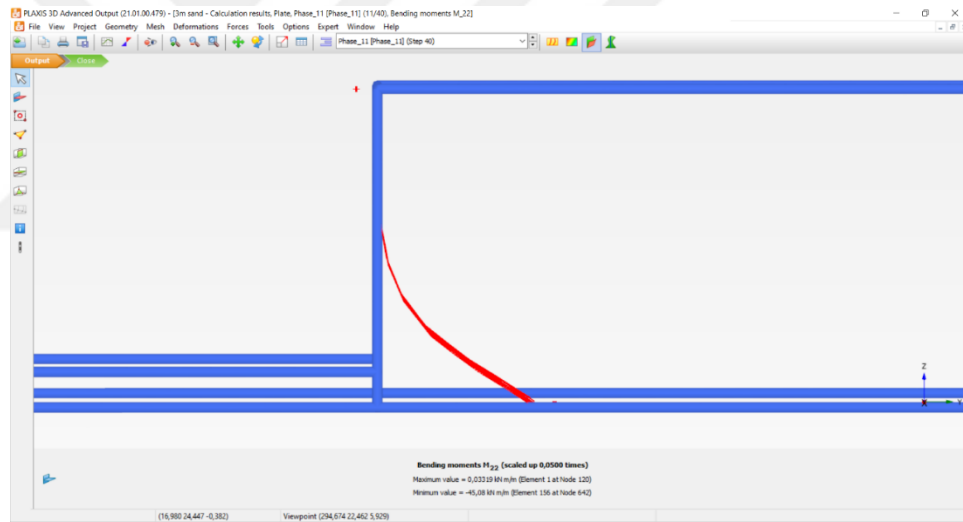
Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir. Çizelge 4.1. 3 metre yüksekliğinde 0B, YASS istinat duvarına etkiyen kuvvetleri göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.1. 3 metre yüksekliğinde 0B, YASS istinat duvarına etkiyen kuvvetler

3 Metre Yükseklik, YASS = 0B		
	Maksimum Değer	Minimum Değer
Normal Kuvvet (kN/m)	0,1826	-45,59
Moment ($kN\ m/m$)	0,09183	-14,77
Kesme Kuvveti (kN/m)	16,96	-0,1437
Yatay Yer Değiştirme (m)	0,01051	$4,098 \times 10^{-3}$
Dikey Yer Değiştirme (m)	-0,04101	-0,04102

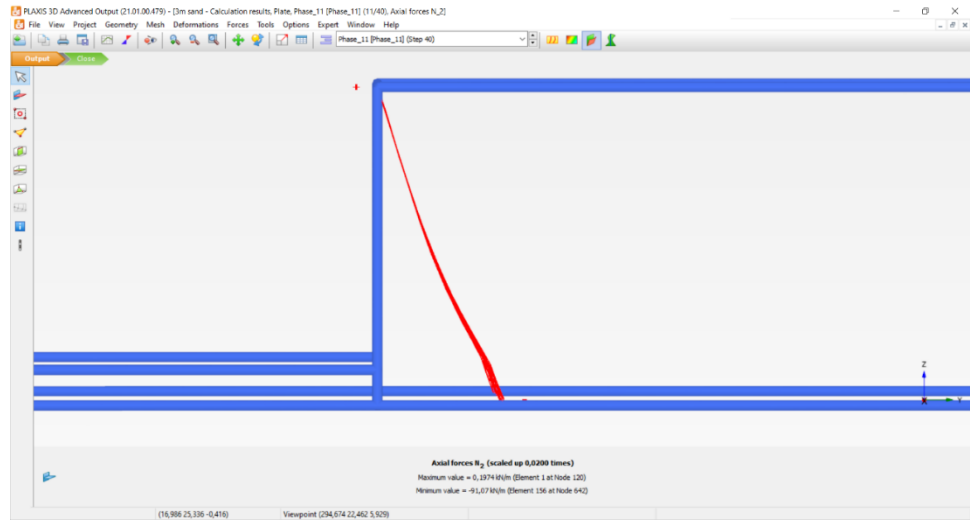
Şekil 4.2’de Plaxis 3D programında yapılan analizlerden elde edilen 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarına etkiyen moment, normal kuvvet, kesme kuvveti, yatay ve dikey yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



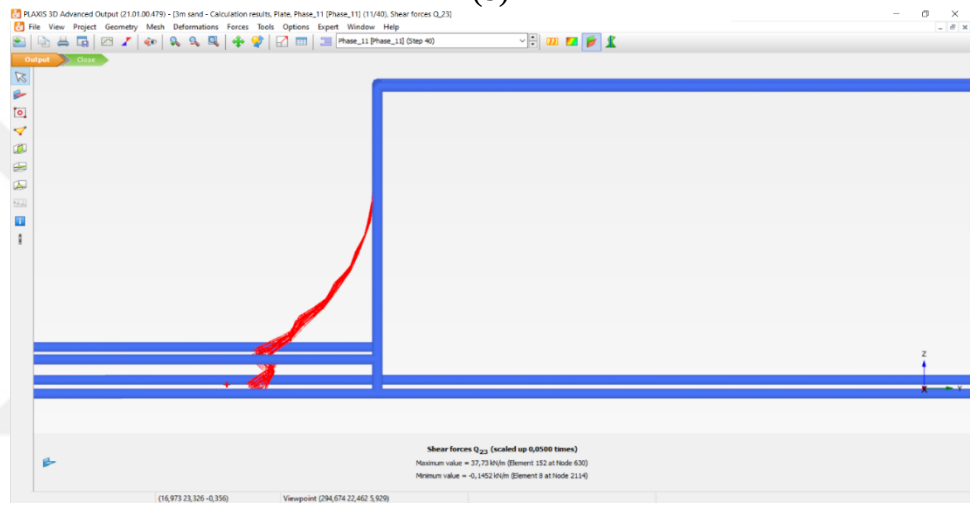
(a)

Şekil 4.2. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.

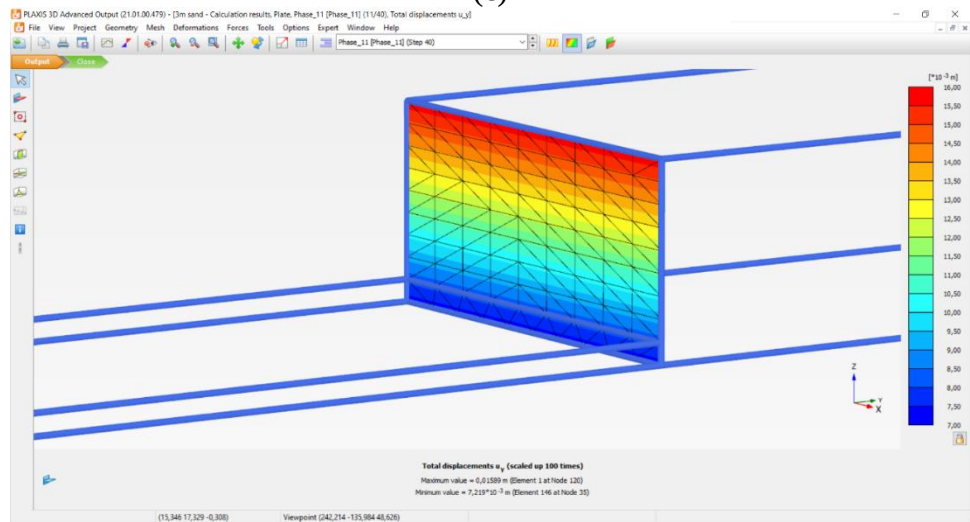
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(b)

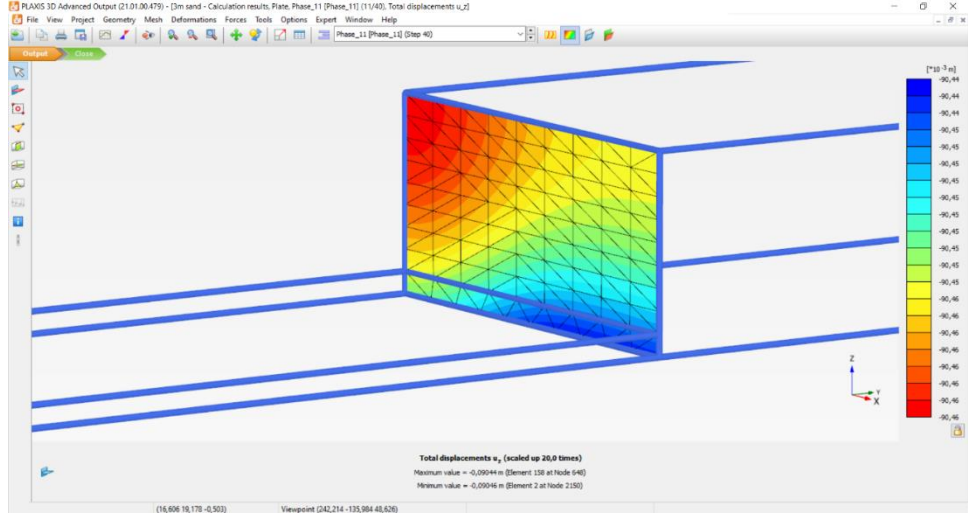


(c)



(d)

Şekil 4.2. (devam)



(e)

Şekil 4.2. (devam)

Program içerisinde yapılan analizler sonucunda 4,5 metre yüksekliğinde ve 0B yeraltı su seviyesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

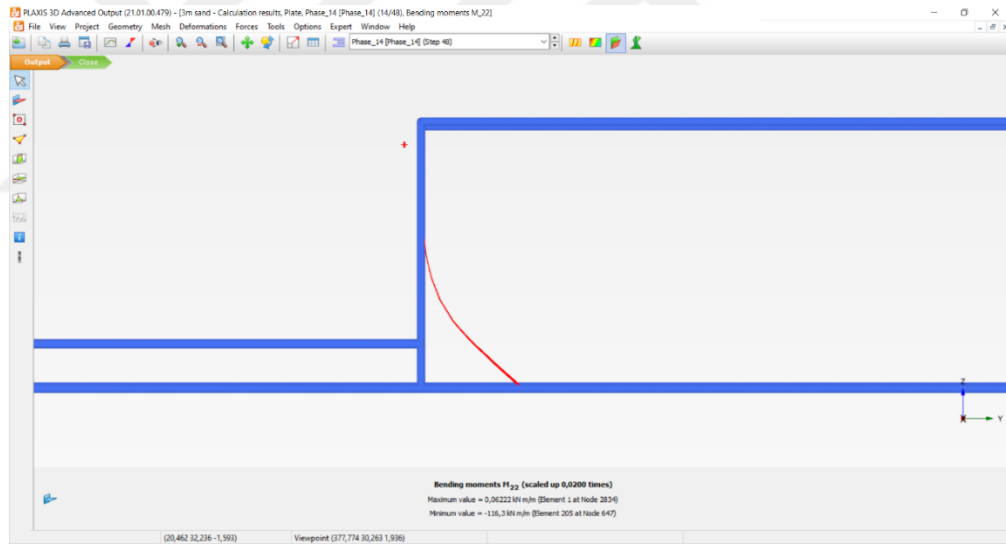
- Moment değeri (max.) = $0,03319 \text{ kN m/m}$
- Moment değeri (min.) = $-45,08 \text{ kN m/m}$
- Normal kuvvet (max.) = $0,1974 \text{ kN/m}$
- Normal kuvvet (min.) = $-91,07 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (max.) = $37,73 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (min.) = $-0,1452 \text{ kN/m}$
- Yatay yer değiştirme (max.) = $0,01589 \text{ m}$
- Yatay yer değiştirme (min.) = $7,219 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Dikey yer değiştirme (max.) = $-0,09044 \text{ m}$
- Dikey yer değiştirme (min.) = $-0,09046 \text{ m}$

Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir. Çizelge 4.2. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetleri göstermektedir.

Çizelge 4.2. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetler.

4,5 Metre Yükseklik, YASS = 0B		
	Maksimum Değer	Minimum Değer
Normal Kuvvet (kN/m)	0,1974	-91,07
Moment ($kN\ m/m$)	0,03319	-45,08
Kesme Kuvveti (kN/m)	37,73	-0,1452
Yatay Yer Değiştirme (m)	0,01589	$7,219 \times 10^{-3}$
Dikey Yer Değiştirme (m)	-0,09044	-0,09046

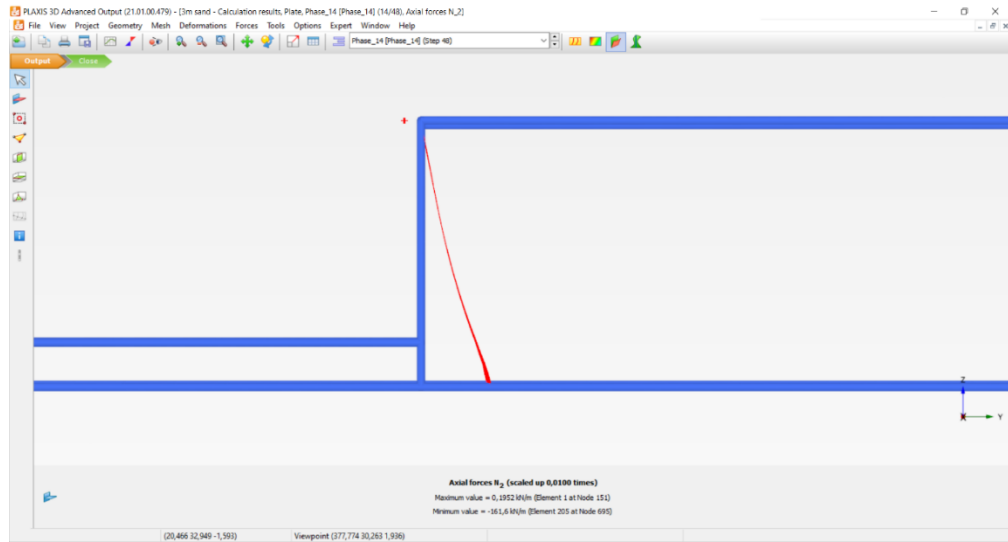
Şekil 4.3’de programda yapılan analizlerden elde edilen 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarına etkiyen moment, normal kuvvet, kesme kuvveti, yatay ve dikey yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



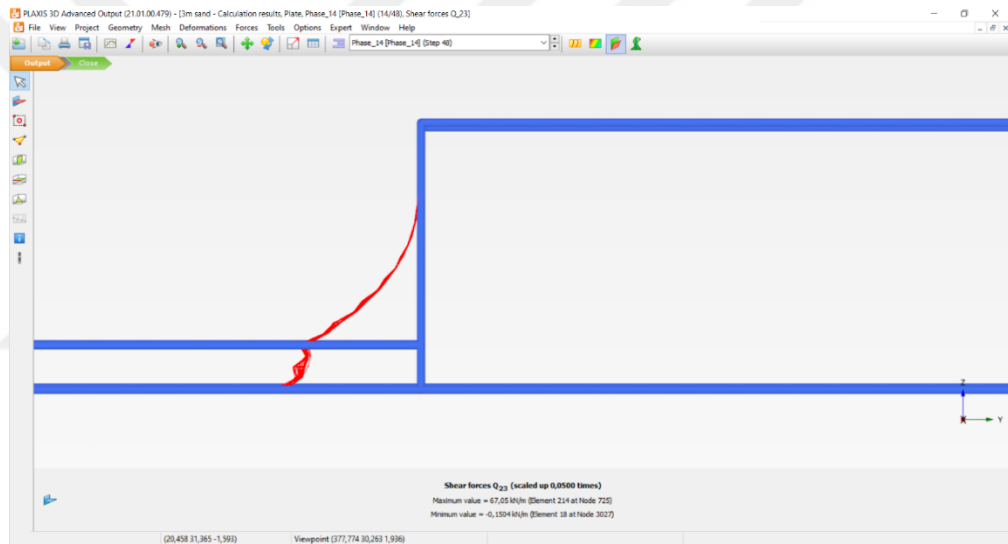
(a)

Şekil 4.3. 6 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen kuvvetler, (a) moment değerleri, (b) normal kuvvet değerleri, (c) kesme kuvveti değerleri, (d) yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler, (e) dikey doğrultuda etkiyen kuvvetler.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



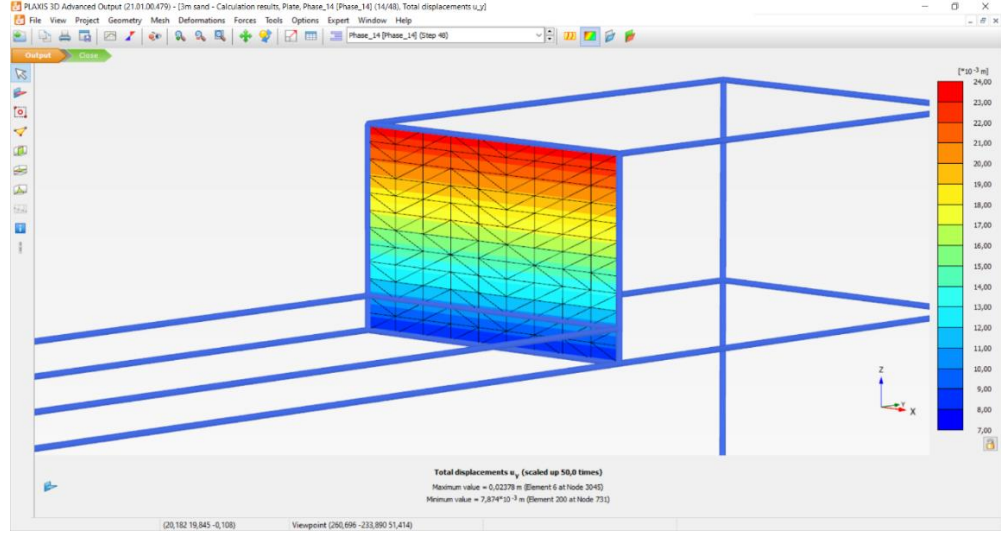
(b)



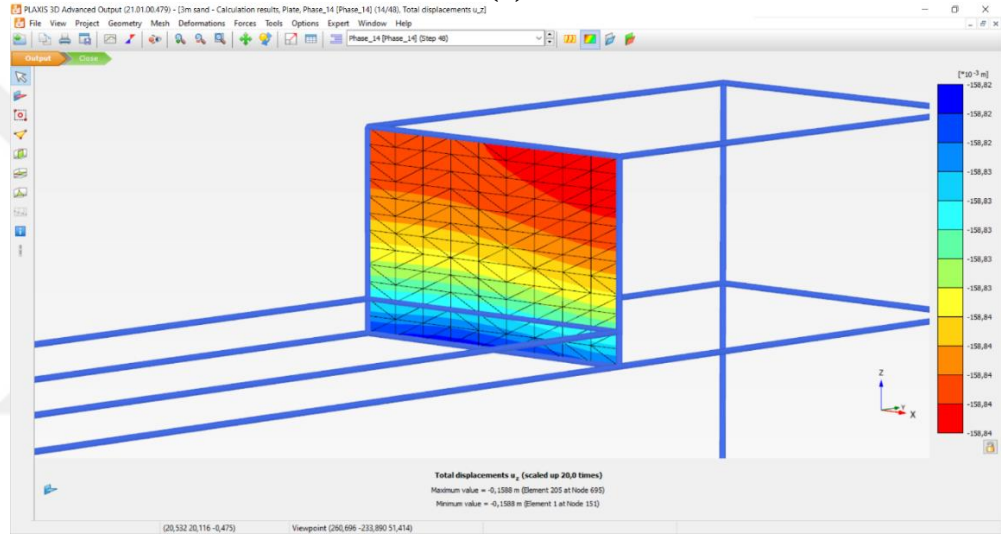
(c)

Şekil 4.3. (devam)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(d)



(e)

Şekil 4.3. (devam)

Şekil 4.3’de Plaxis 3D programında yapılan analizlerden elde edilen 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarına etkiyen moment, normal kuvvet, kesme kuvveti, yatay ve dikey yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.

- Moment değeri (max.) = $0,06222 \text{ kN m/m}$
- Moment değeri (min.) = $-116,3 \text{ kN m/m}$
- Normal kuvvet (max.) = $0,1952 \text{ kN/m}$
- Normal kuvvet (min.) = $-161,6 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (max.) = $67,05 \text{ kN/m}$
- Kesme kuvveti (min.) = $-0,1504 \text{ kN/m}$
- Yatay yer değiştirme (max.) = $0,02378 \text{ m}$
- Yatay yer değiştirme (min.) = $7,874 \times 10^{-3}$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

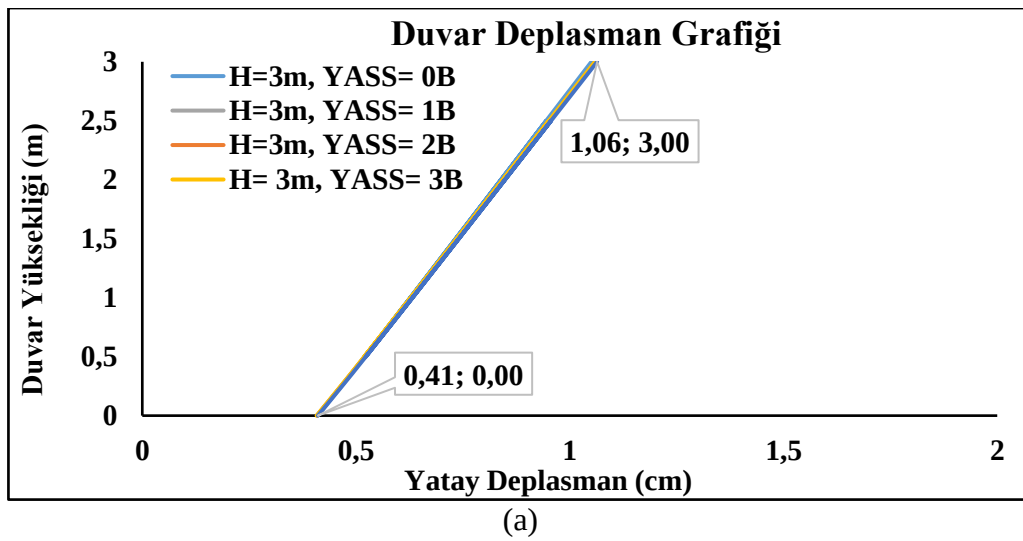
- Dikey yer değiştirme (max.) = -0,1588 m
- Dikey yer değiştirme (min.) = -0,1588 m

Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir. Çizelge 4.3. 6 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetleri göstermektedir.

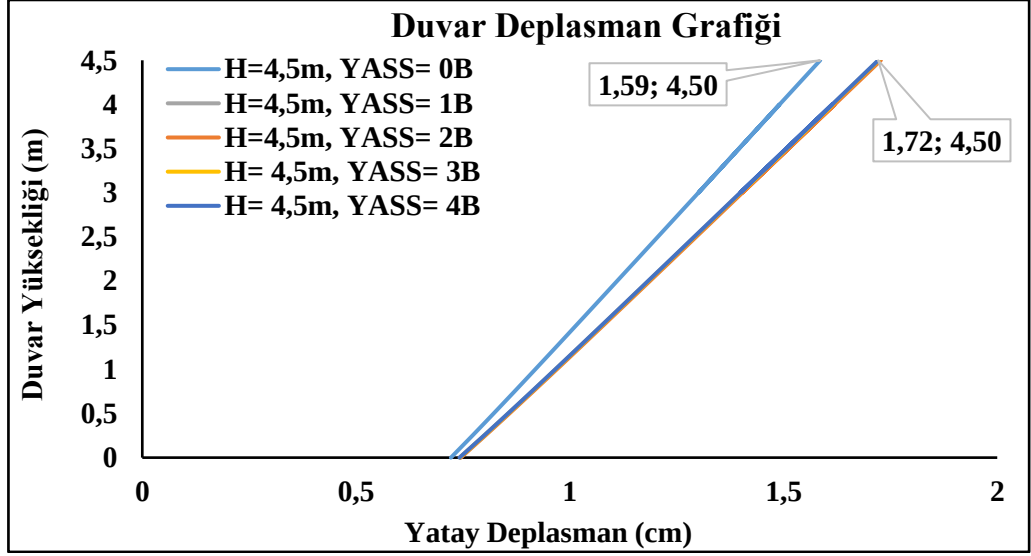
Çizelge 4.3. 6 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesindeki istinat duvarına etkiyen maksimum ve minimum kuvvetler.

6 Metre Yükseklik, YASS = 0B		
	Maksimum Değer	Minimum Değer
Normal Kuvvet (kN/m)	0,1952	-161,6
Moment ($kN\ m/m$)	0,06222	-116,3
Kesme Kuvveti (kN/m)	67,05	-0,1504
Yatay Yer Değiştirme (m)	0,02378	$7,874 \times 10^{-3}$
Dikey Yer Değiştirme (m)	-0,1588	-0,1588

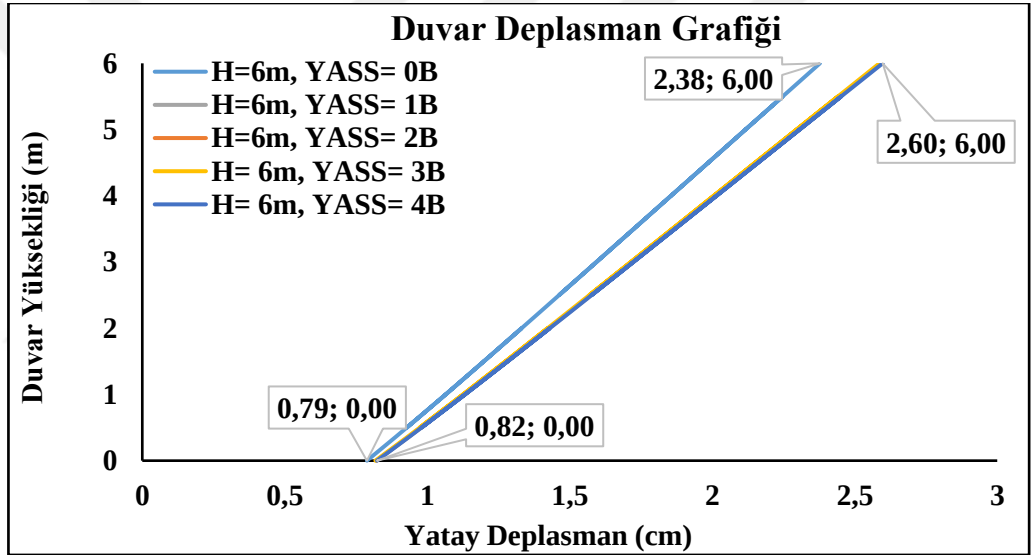
Şekil 4.4. duvar yüksekliği ve yeraltı su seviyesinin artmasıyla değişen duvar deplasman değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.4. Duvar yüksekliği ve yeraltı su seviyesinin artmasıyla değişen duvar deplasman değerleri, (a) 3 metre, (b) 4,5 metre, (c) 6 metre.



(b)

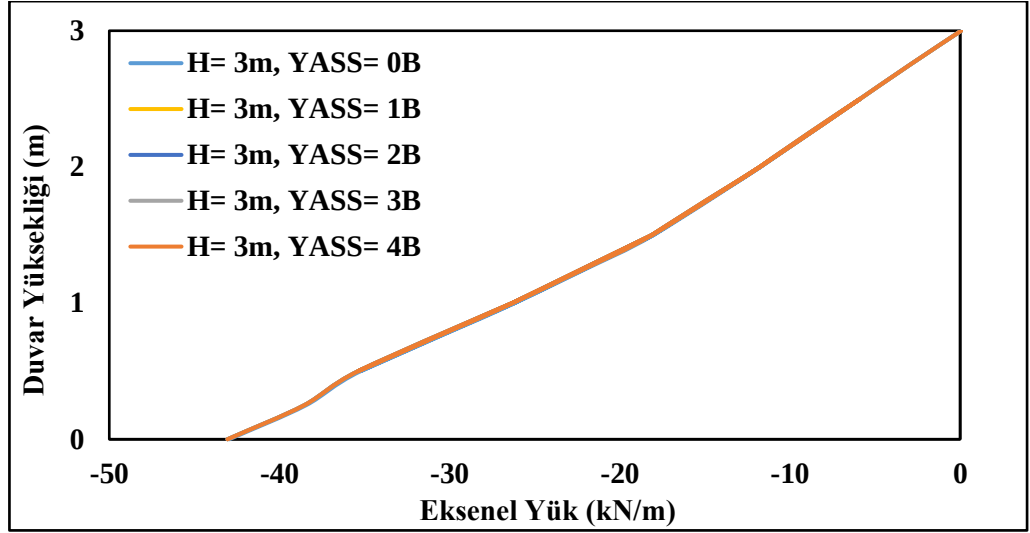


(c)

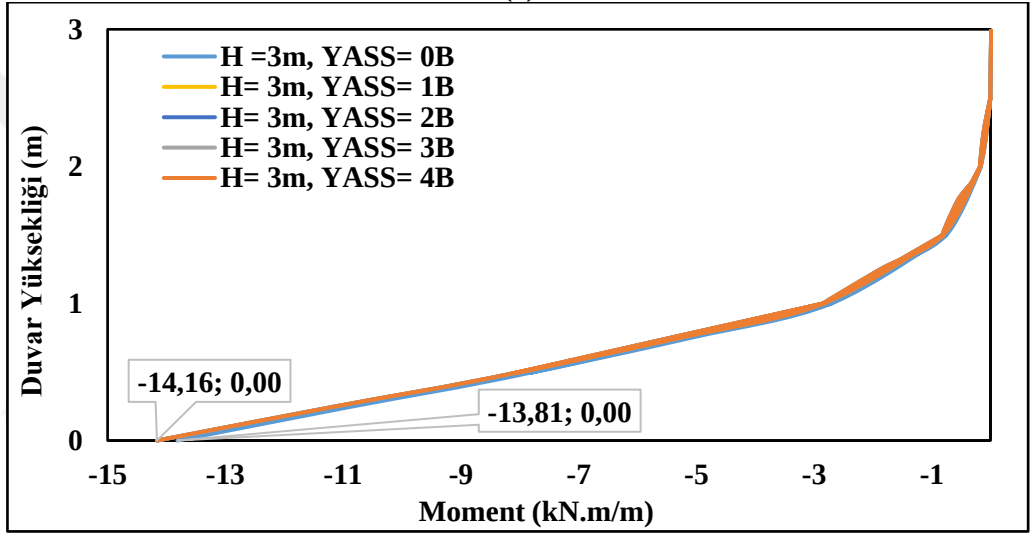
Şekil 4.4. (devam)

Tasarımı ve analizi yapılmış 3, 4,5 ve 6 metrelik istinat duvarlarında duvardaki yatay deplasman değerlerini maksimum olarak 3, 4,5 ve 6. metrelerde 2,38-2,60 cm aralığında aldığını ve minimum olarak da 0,79-0,82 cm aralığında aldığı Şekil 4.4. (a), (b) ve (c) grafiklerinde görülmektedir. Ayrıca zemin drenaj koşullarında olduğu için, yatay deplasman değerleri üzerinde değişen yeraltı su seviyesinin önemli bir etkisinin olmadığı da görülmüştür.

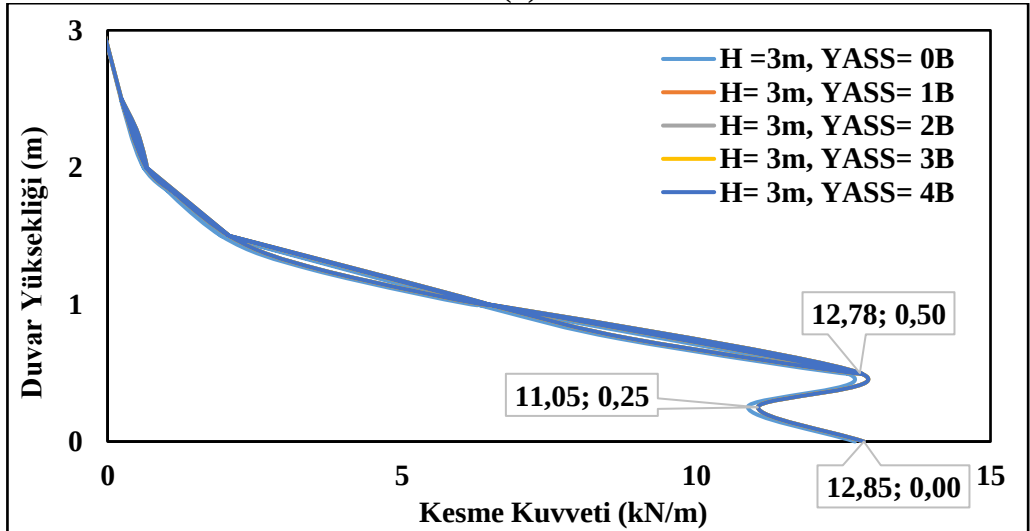
Şekil 4.5’de 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.5. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.

Tez kapsamında tasarımı yapılan 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarları üzerinde yapılan analizler sonucu tespit edilen maksimum eksenel yükün -43.05 kN/m olduğu ve istinat duvarının gövdesi ile temelinin birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği boyunca bu değer azaldığı ve duvarın tepe noktasında eksenel yükün minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.5. (a) da görülmektedir. Çizelge 4.4’de 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri verilmiştir. Zemin drenajlı durumda olduğu için, yük altında su drene olup ve bundan dolayı E , ν , ϕ ve c ’de değişiklik fazla olmadığı için duvara gelen eksenel yüklerde fazla fark oluşmamıştır.

Çizelge 4.4. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-42,94	0
1B	-43,06	0
2B	-43,06	0
3B	-43,05	0
4B	-43,05	0

Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Moment değerlerinin ise maksimum olarak -14.16 kN.m/m ile -13.81 kN.m/m arasında değiştiği analizler sonucu elde edilen Şekil 4.5. (b) de ki grafikte görülmektedir. Bu değerlerde, eksenel yük gibi istinat duvarının gövdesinin temel ile birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği arttıkça azaldığı ve duvarın tepe noktasında moment değerinin minimum ve 0 kN.m/m olduğu Şekil 4.5. (b) de görülmektedir. Değişen yeraltı su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen moment değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.5, 4.6’da sırasıyla 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment ve kesme kuvveti değerleri verilmiştir.

Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.5. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.

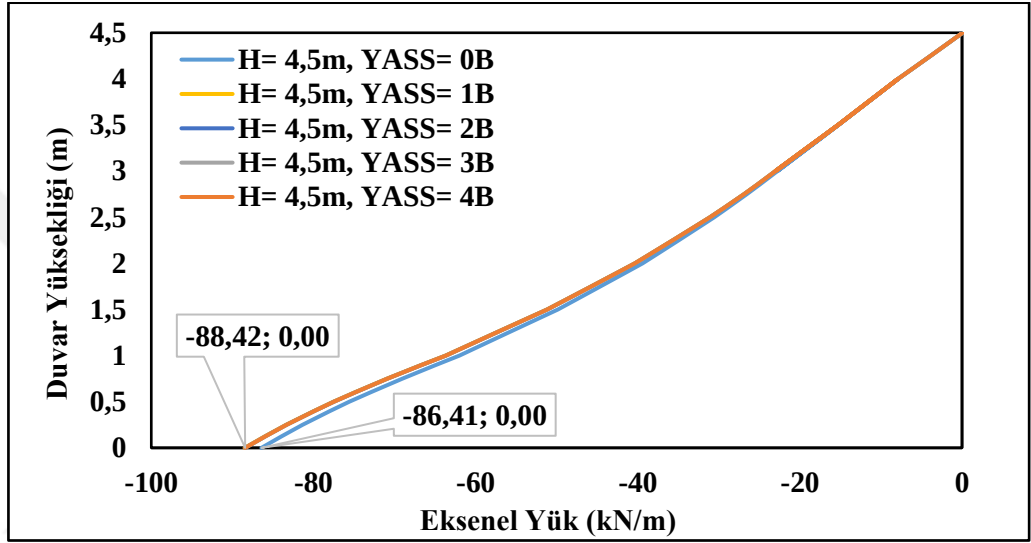
Moment ($kN.m/m$)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-13,81	0
1B	-14,16	0
2B	-14,16	0
3B	-14,16	0
4B	-14,16	0

Kesme kuvveti değerlerinin maksimum olarak istinat duvarının gövdesi ile temelini birleştirdiği noktada 11,05 kN/m ile 12,85 kN/m aralığında olduğu yapılan analizler sonucu görülmüştür. Kesme kuvveti değerlerinin duvar yüksekliği boyunca azaldığı ve duvarın tepe noktasında minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.5. (c) de görülmektedir. Duvarın ön tarafına konulan 50 cm'lik dolgu malzeme, kesme kuvvetinin olması gerekenden daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Bu durum Şekil 4.5. (c)' de istinat duvarının kesme kuvveti grafiğinde 0-0,50 m aralığında görülebilmektedir. Burada da değişen yeraltı su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen kesme kuvveti değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

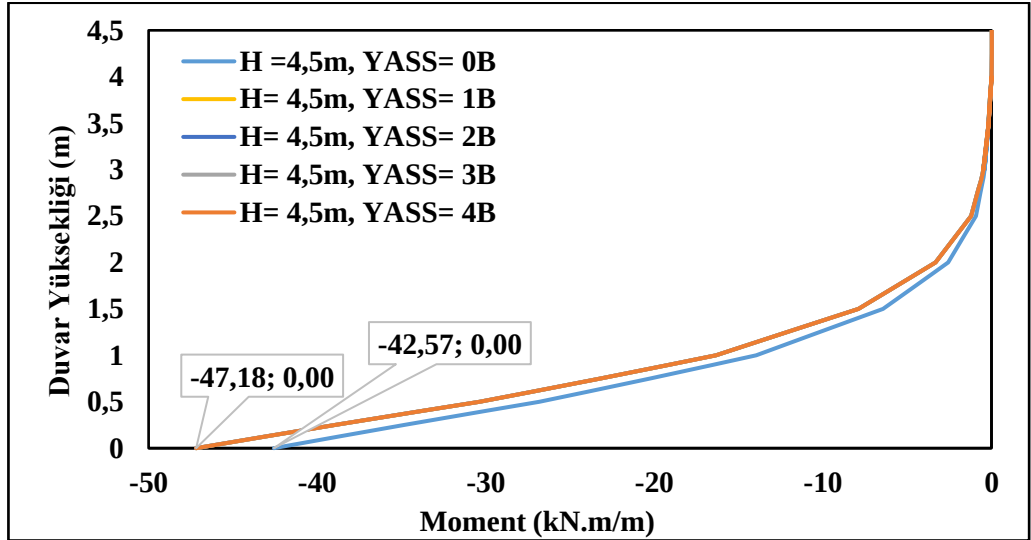
Çizelge 4.6. 3 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	12,70	0
1B	12,85	0
2B	12,85	0
3B	12,85	0
4B	12,85	0

Tez kapsamında tasarımı yapılan 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarları üzerinde yapılan analizler sonucu tespit edilen maksimum eksenel yükün -88,42 kN/m ile -86,41 kN/m aralığında olduğu ve istinat duvarının gövdesi ile temelinin birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği boyunca bu değerin azaldığı ve duvarın tepe noktasında eksenel yükün minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.6. (a) da görülmektedir. Ayrıca değişen yeraltı su seviyesinin de eksenel yük üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da görülmüştür.

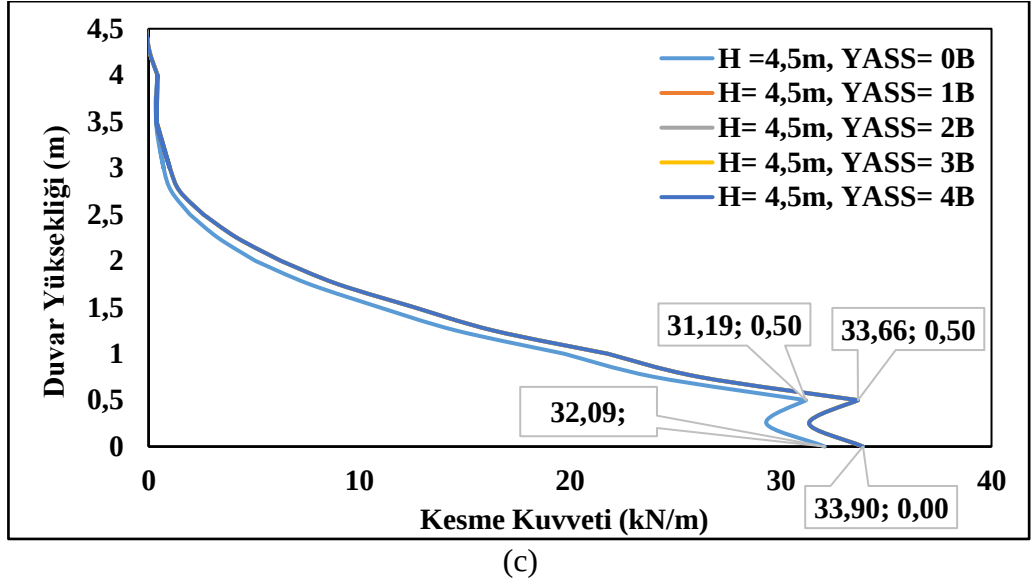


(a)



(b)

Şekil 4.6. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



Şekil 4.6. (devam)

Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9’da sırasıyla 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment, eksenel yük ve kesme kuvveti değerleri verilmiştir. Maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.7. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Moment ($kN \cdot m/m$)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-42,57	0
1B	-47,17	0
2B	-47,19	0
3B	-47,19	0
4B	-47,18	0

Moment değerlerinin ise maksimum olarak -47,18 kN m/m ile -42,57 kN m/m arasında değiştiği analizler sonucu elde edilen Şekil 4.6. (b) de ki grafikte görülmektedir. Bu değerlerin de eksenel yük gibi istinat duvarının gövdesinin temel ile birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği arttıkça azaldığı ve duvarın tepe noktasında moment değerinin minimum ve 0 kN m/m olduğu Şekil 4.6. (b) de görülmektedir. Değişen yeraltı

su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen moment değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.8. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.

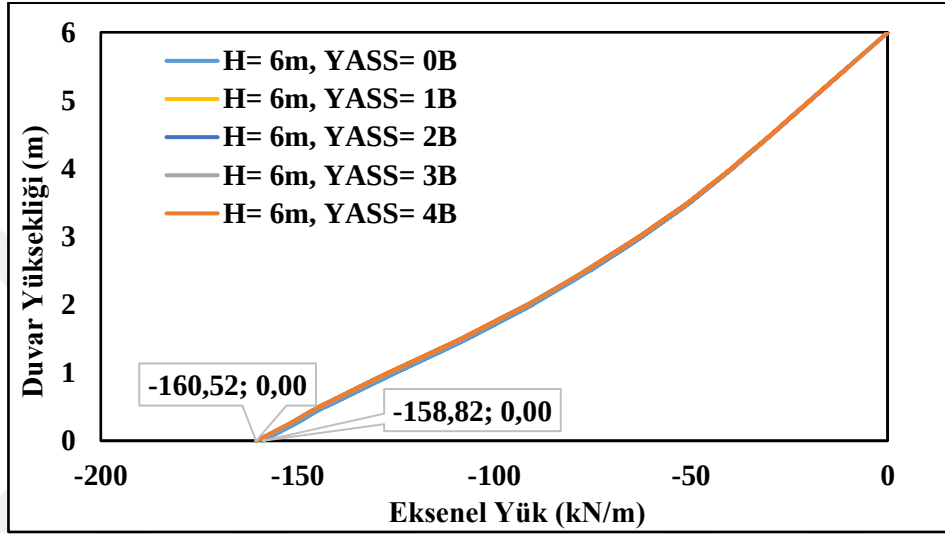
Eksenel Yük (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-86,41	0
1B	-88,50	0
2B	-88,42	0
3B	-88,43	0
4B	-88,42	0

Kesme kuvveti değerlerinin maksimum olarak istinat duvarının gövdesi ile temelini birleştirdiği noktada ve 32,09 kN/m ile 33,90 kN/m aralığında olduğu yapılan analizler sonucu görülmüştür. Kesme kuvveti değerlerinin duvar yüksekliği boyunca azaldığı ve duvarın tepe noktasında minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.6. (c) de görülmektedir. Duvarın ön tarafına konulan 50 cm'lik dolgu malzeme, kesme kuvvetinin olması gerekenden daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Bu durum Şekil 4.6. (c) de istinat duvarının kesme kuvveti grafiğinde 0-0,50 m aralığında görülebilmektedir. Burada da değişen yeraltı su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen kesme kuvveti değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

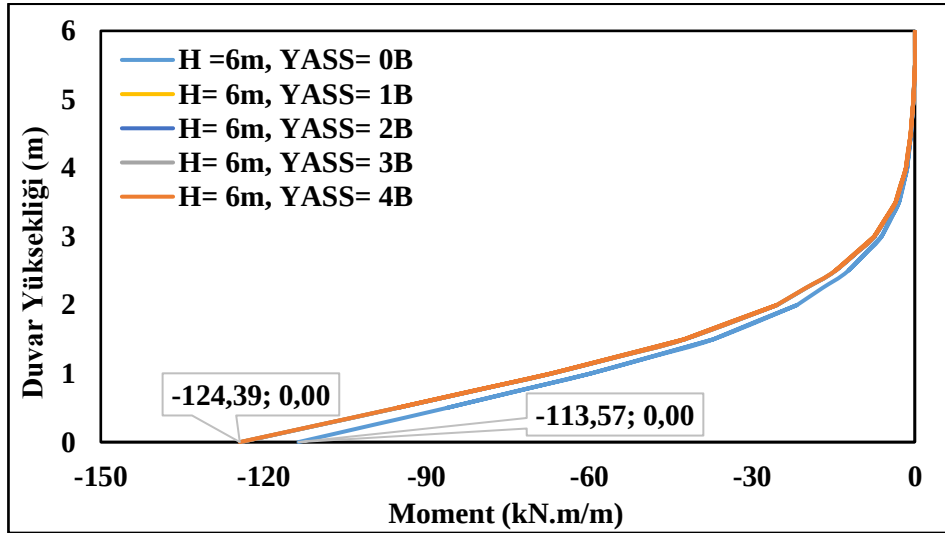
Çizelge 4.9. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	32,09	0
1B	33,90	0
2B	33,91	0
3B	33,90	0
4B	33,90	0

Tez kapsamında tasarımı yapılan 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarları üzerinde yapılan analizler sonucu tespit edilen maksimum eksenel yükün -160.52 kN/m ile -158.82 kN/m aralığında olduğu ve istinat duvarının gövdesi ile temelının birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği boyunca bu değerin azaldığı ve duvarın tepe noktasında eksenel yükün minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.7. (a) da görülmektedir. Ayrıca değişen yeraltı su seviyesinin de eksenel yük üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da görülmüştür.

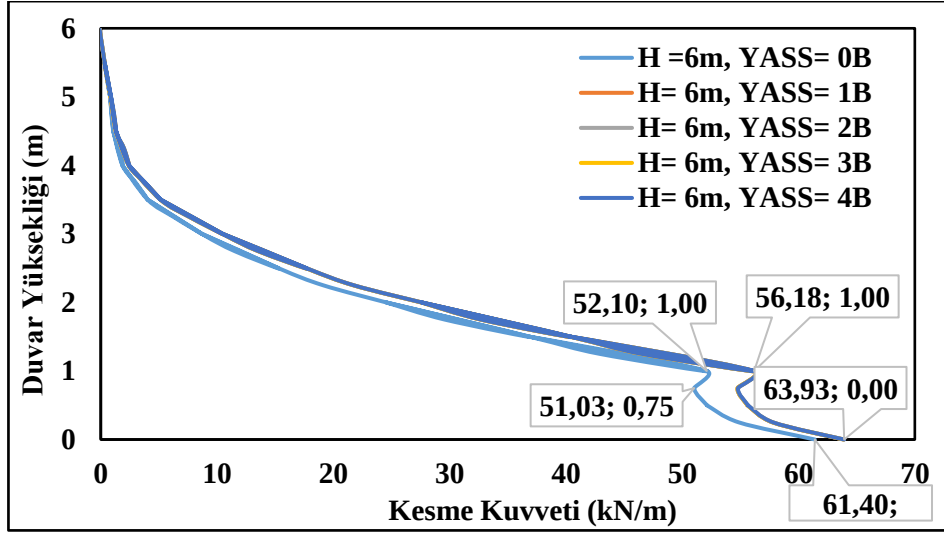


(a)



(b)

Şekil 4.7. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



(c)

Şekil 4.7. (devam)

Çizelge 4.10'da 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri görülmektedir. Bu çizelgede maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.10. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-158,82	0
1B	-160,30	0
2B	-160,44	0
3B	-160,46	0
4B	-160,52	0

Moment değerlerinin ise maksimum olarak -124,39 kN m/m ile -113,57 kN.m/m arasında değiştiği analizler sonucu elde edilen Şekil 4.7 (b) de ki grafikte görülmektedir. Bu değerlerin de eksenel yük gibi istinat duvarının gövdesinin temel ile birleştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği arttıkça azaldığı ve duvarın tepe noktasında moment değerinin minimum ve 0 kN m/m olduğu Şekil 4.7. (b) de görülmektedir. Değişen yeraltı

su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen moment değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.11, 4.12’de 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment ve kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Bu değerlerde maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.11. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen moment değerleri.

Moment ($kN.m/m$)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	-113,57	0
1B	-124,25	0
2B	-124,21	0
3B	-124,25	0
4B	-124,39	0

Kesme kuvveti değerlerinin maksimum olarak istinat duvarının gövdesi ile temelini birleştiği noktada ve 61.40 kN/m ile 63.93 kN/m aralığında olduğu yapılan analizler sonucu görülmüştür. Kesme kuvveti değerlerinin duvar yüksekliği boyunca azaldığı ve duvarın tepe noktasında minimum ve 0 kN/m olduğu Şekil 4.7. (c) de görülmektedir. Duvarın ön tarafına konulan 100 cm’lik dolgu malzeme, kesme kuvvetinin olması gerekenden daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Bu durum Şekil 4.7. (c) de istinat duvarının kesme kuvveti grafiğinde 0-100 cm aralığında görülebilmektedir. Burada da değişen yeraltı su seviyesinin duvar yüksekliği boyunca değişen kesme kuvveti değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

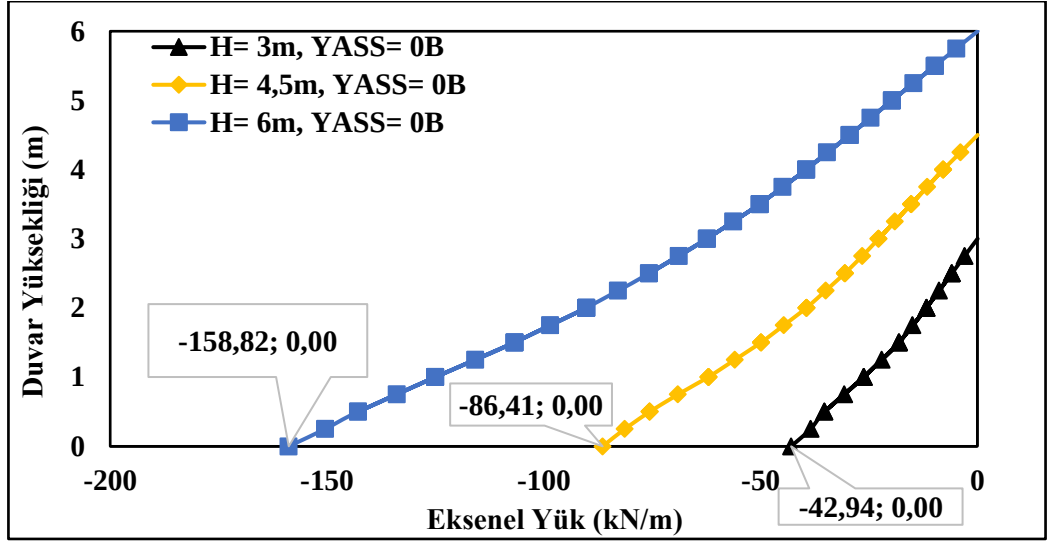
Çizelge 4.12. 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (kN/m)		
YASS	Maksimum Değer	Minimum Değer
0B	61,40	0
1B	63,90	0
2B	63,90	0
3B	63,89	0
4B	63,93	0

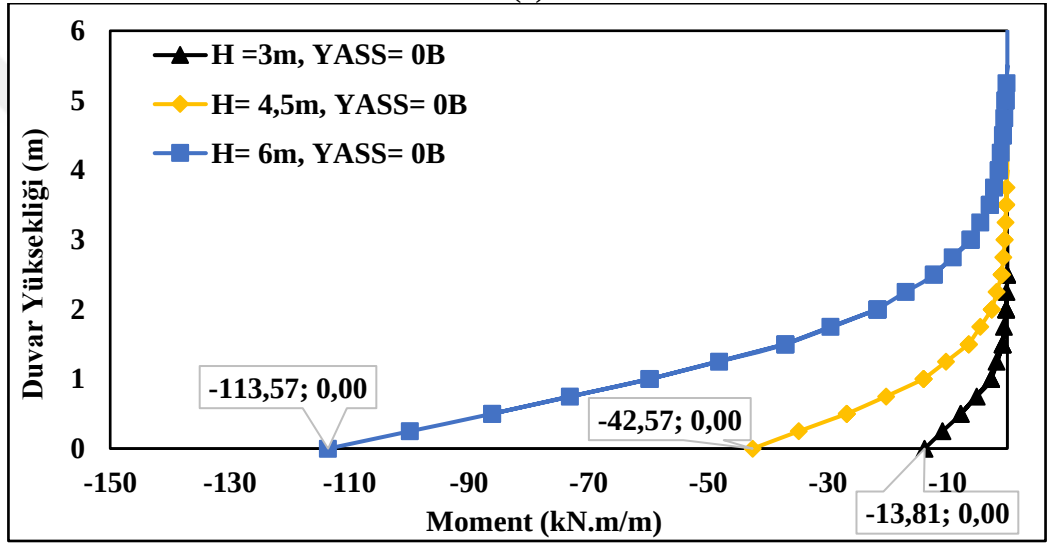
4.2. Yeraltı Su Seviyesinin İstinat Duvarına Etkisi

Bu bölümde 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarına yeraltı su seviyesinin etkisi incelenmiştir. Yeraltı su seviyeleri temel genişliğinin (B) 0, 1, 2, 3 ve 4 katı olacak şekilde değiştirilmiş olup Plaxis 3D programında analize tabi tutulmuştur. Program içerisinde yapılan analizler sonucu değişen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerleri aşağıdaki grafiklerle gösterilmiştir.

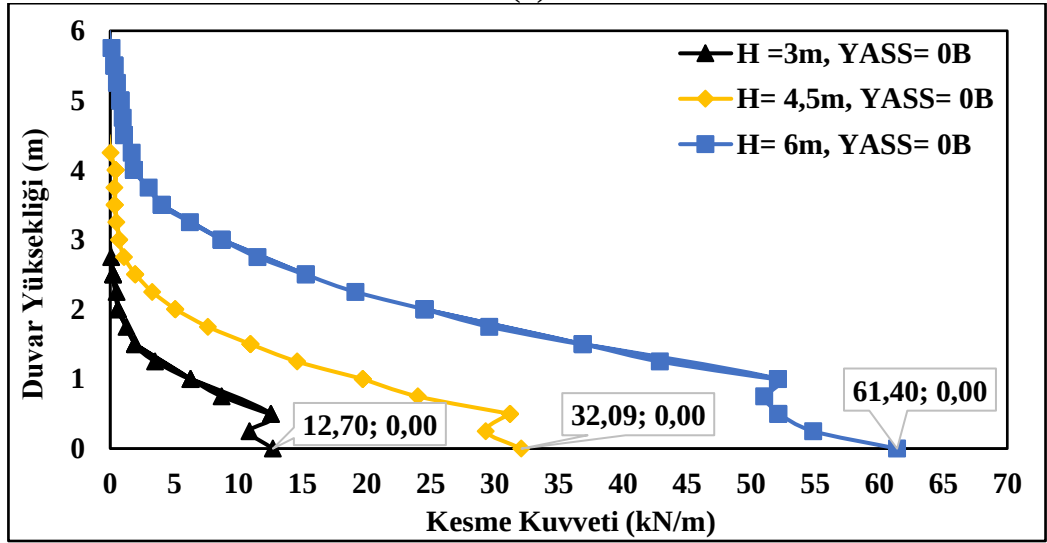
4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 0B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -86,41 kN/m, moment değeri -42,57 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 32,09 kN/m olarak analiz edilmiştir. Çizelge 4.15, değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı suyu seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerlerini göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.8. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 0B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.

3 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 0B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.8' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -42,94 kN/m, moment değeri -13,81 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 12,70 kN/m olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.13, değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı suyu seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerlerin, göstermektedir. Çizelge 4.14. değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı suyu seviyesinde meydana gelen moment değerlerini göstermektedir. Bu değerlerde maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.13. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-42,94	0
4,5 m	-86,41	0
6 m	-158,82	0

Çizelge 4.14. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

Moment ($kN.m/m$)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-13,81	0
4,5 m	-42,57	0
6 m	-113,57	0

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 0B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.8' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -158,82 kN/m,

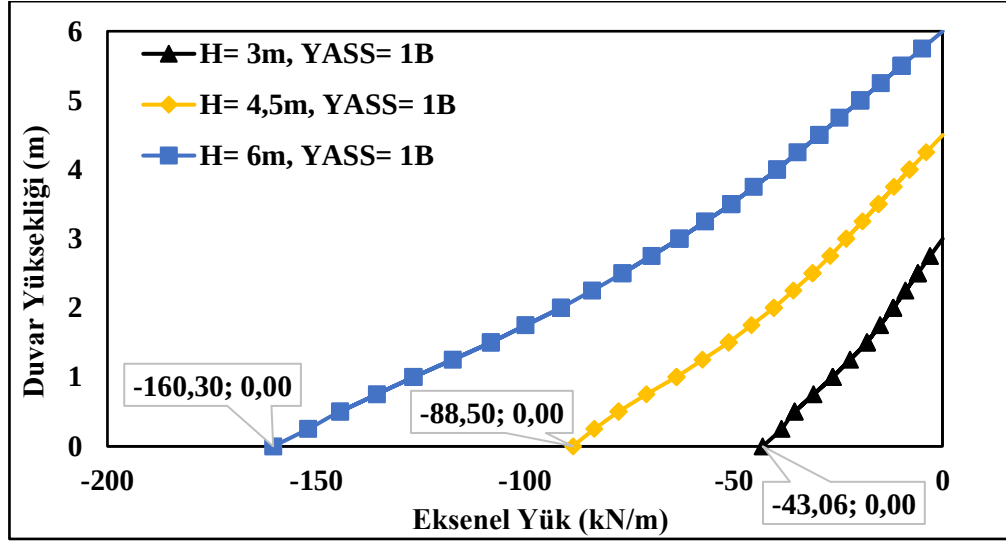
moment değeri -113,57 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 61,40 kN/m olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.15. değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.15. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

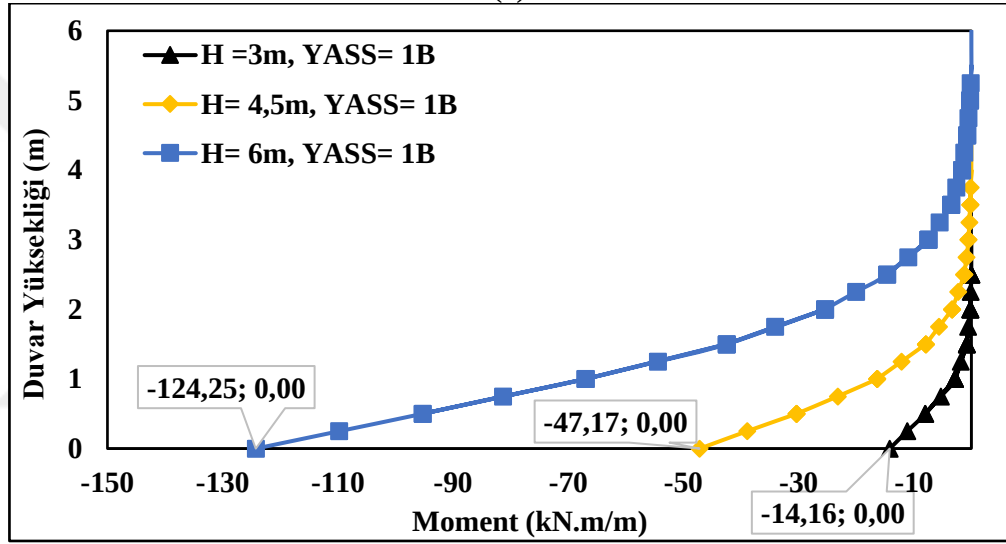
Kesme Kuvveti (<i>kN/m</i>)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	12,70	0
4,5 m	32,09	0
6 m	61,40	0

3 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 1B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.9' da görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -43,06 kN/m, moment değeri -14,16 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 12,85 kN/m olarak analiz edilmiştir.

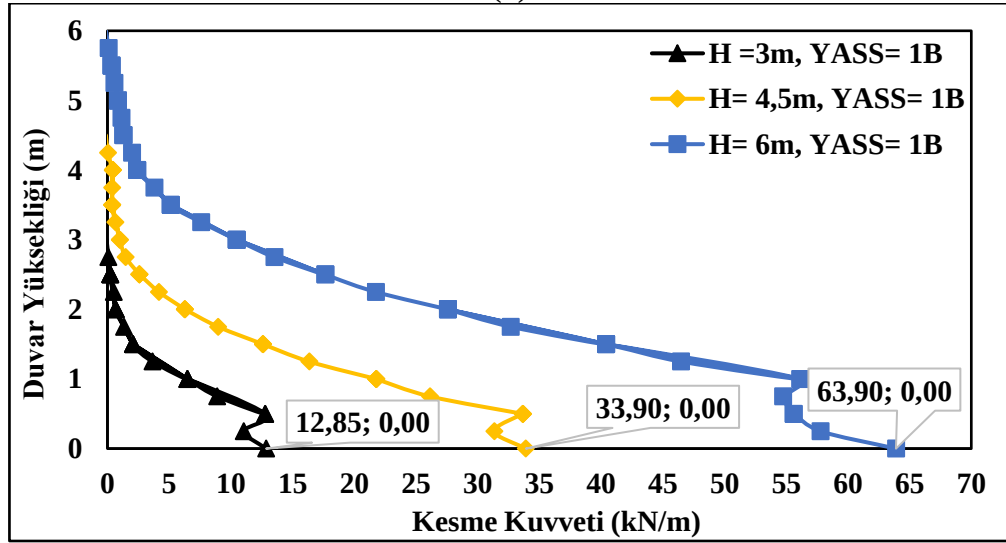
4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 1B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.9' da görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -88,50 kN/m, moment değeri -47,17 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 33,90 kN/m olarak analiz edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. 3,4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 1B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 1B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -160,30 kN/m, moment değeri -124,25 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 63,90 kN/m olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.16, 4.17 ve 4.18'de sırayla değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Değerlere bakıldığında duvar yüksekliğinin artmasıyla eksenel yük, moment ve kesme kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. Değerlerde maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.16. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-43,06	0
4,5 m	-88,50	0
6 m	-160,30	0

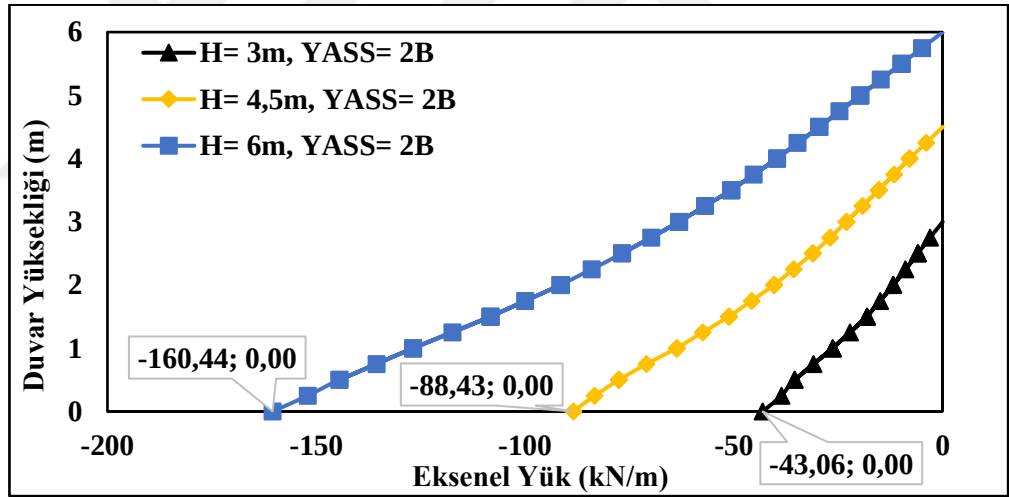
Çizelge 4.17. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

Moment ($kN.m/m$)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-14,16	0
4,5 m	-47,17	0
6 m	-124,25	0

Çizelge 4.18. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 1B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

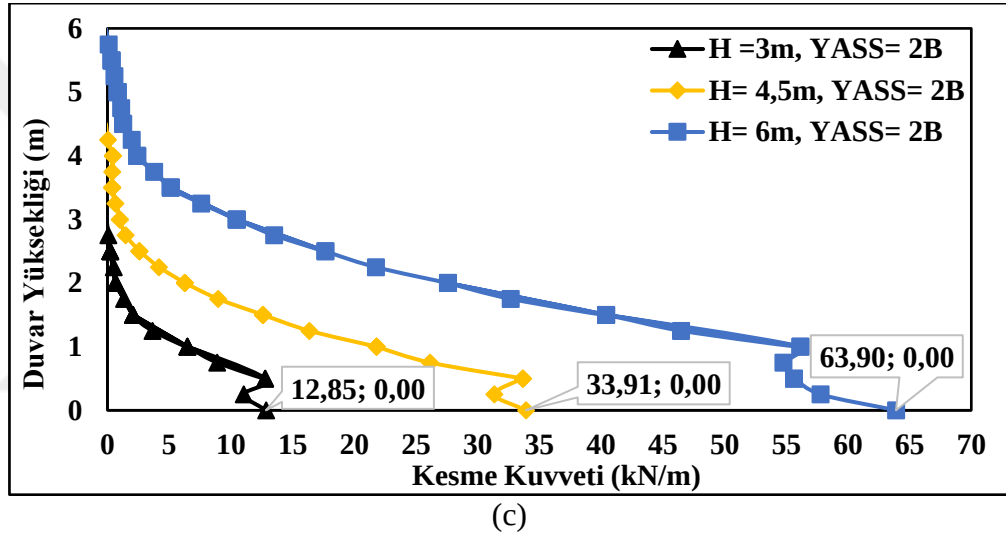
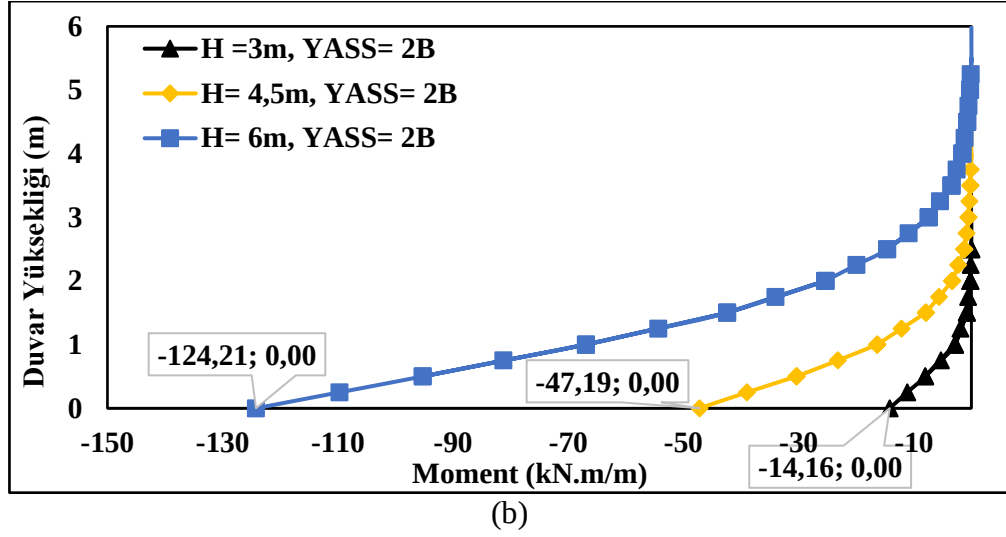
Kesme Kuvveti (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	12,85	0
4,5 m	33,90	0
6 m	63,90	0

3 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 2B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.10' da görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -43,06 kN/m, moment değeri -14,16 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 12,85 kN/m olarak analiz edilmiştir.



(a)

Şekil 4.10. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 2B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



Şekil 4.10. (devam)

4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 2B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.10' da görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -88,43 kN/m, moment değeri -47,19 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 33,91 kN/m olarak analiz edilmiştir.

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 2B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.10' da görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -160,44

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kN/m, moment değeri -124,21 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 63,90 kN/m olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.19, 4.20 ve 4.21’de sırayla değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Değerlere bakıldığında duvar yüksekliğinin artmasıyla eksenel yük, moment ve kesme kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. Değerlerde maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.19. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (<i>kN/m</i>)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-43,06	0
4,5 m	-88,43	0
6 m	-160,44	0

Çizelge 4.20. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

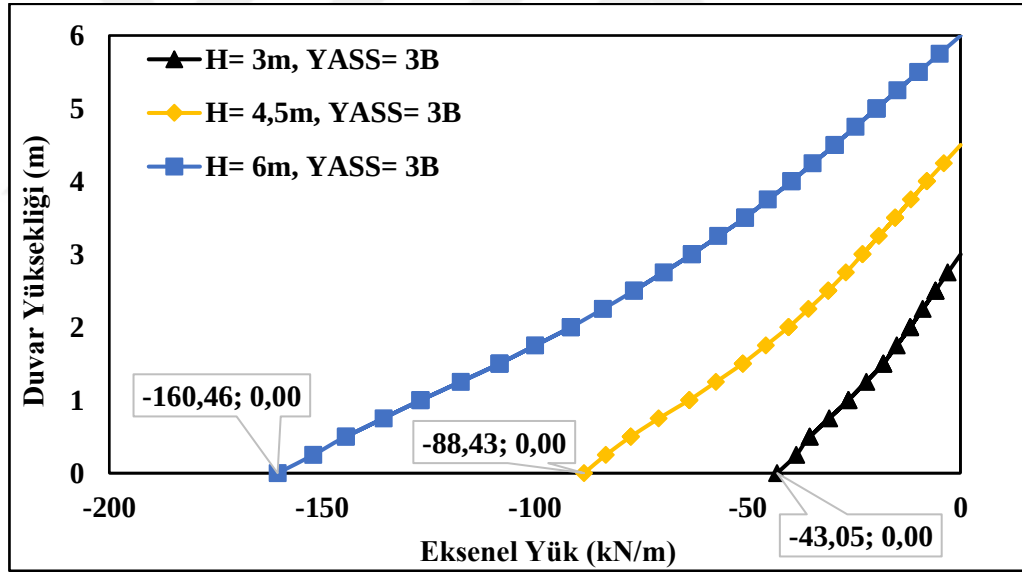
Moment (<i>kN.m/m</i>)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-14,16	0
4,5 m	-47,19	0
6 m	-124,21	0

Çizelge 4.21. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 2B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (<i>kN/m</i>)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	12,85	0
4,5 m	33,91	0
6 m	63,90	0

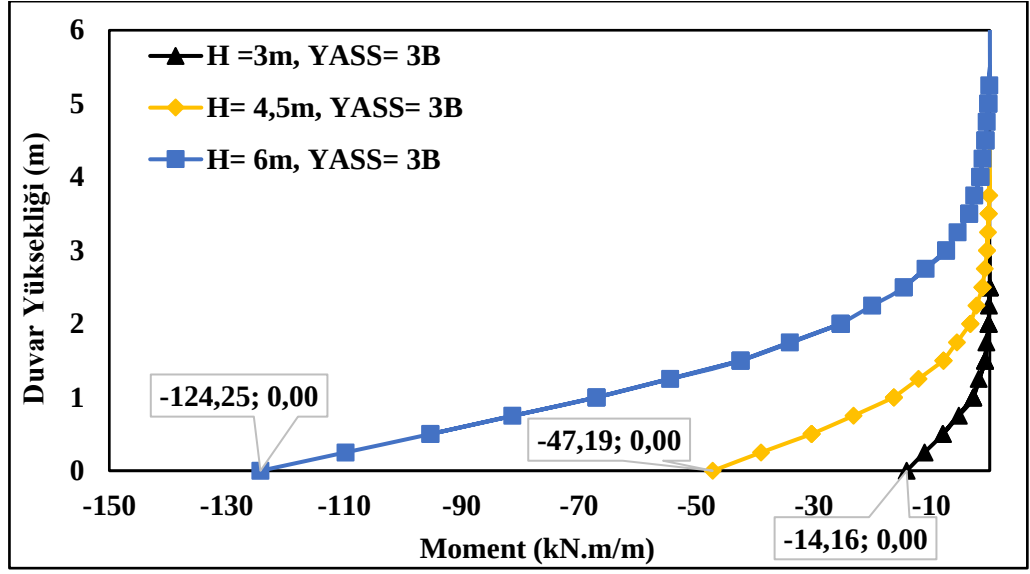
3 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 3B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.11' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -43,05 kN/m, moment değeri -14,16 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 12,85 kN/m olarak analiz edilmiştir.

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 3B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.11' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -160,46 kN/m, moment değeri -124,25 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 63,89 kN/m olarak analiz edilmiştir.

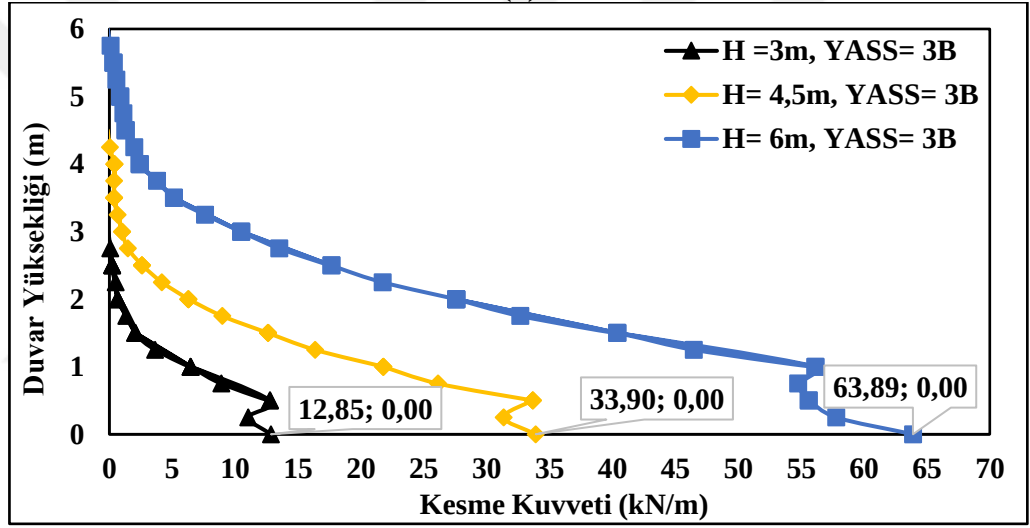


(a)

Şekil 4.11. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 3B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



(b)



(c)

Şekil 4.11. (devam)

4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 3B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.11' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -88,43 kN/m, moment değeri -47,19 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 33,90 kN/m olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.24'de sırayla değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Değerlere bakıldığında duvar yüksekliğinin artmasıyla eksenel yük, moment ve kesme kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. Değerlerde

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.22. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-43,05	0
4,5 m	-88,43	0
6 m	-160,46	0

Çizelge 4.23. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

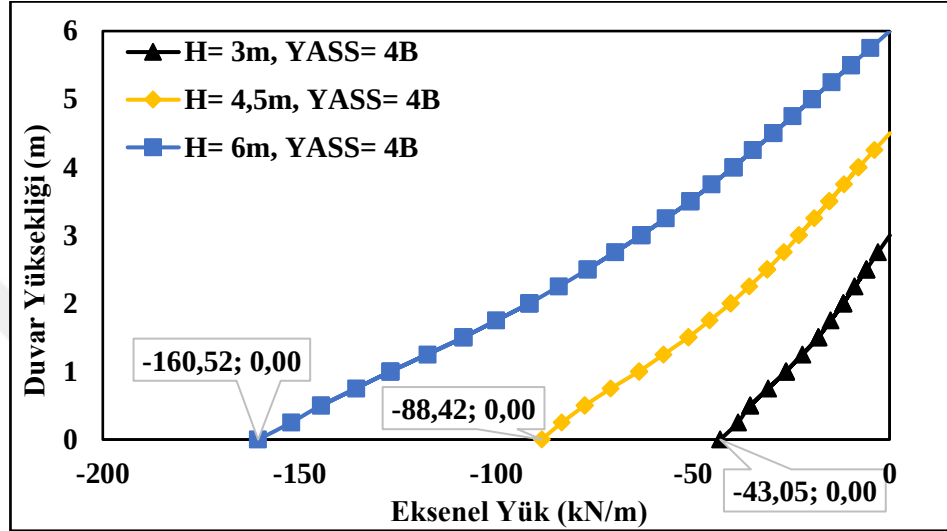
Moment ($kN.m/m$)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-14,16	0
4,5 m	-47,19	0
6 m	-124,25	0

Çizelge 4.24. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

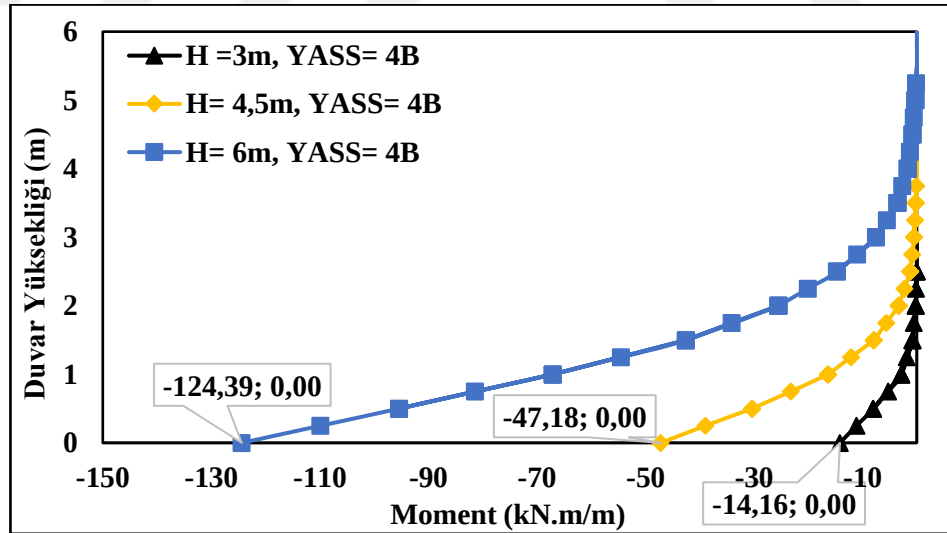
Kesme Kuvveti (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	12,85	0
4,5 m	33,90	0
6 m	63,89	0

3 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 4B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.12' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -43,05 kN/m, moment değeri -14,16 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 12,85 kN/m olarak analiz edilmiştir.

4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 4B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.12’ de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada oluştuğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -88,42 kN/m, moment değeri -47,18 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 33,90 kN/m olarak analiz edilmiştir.

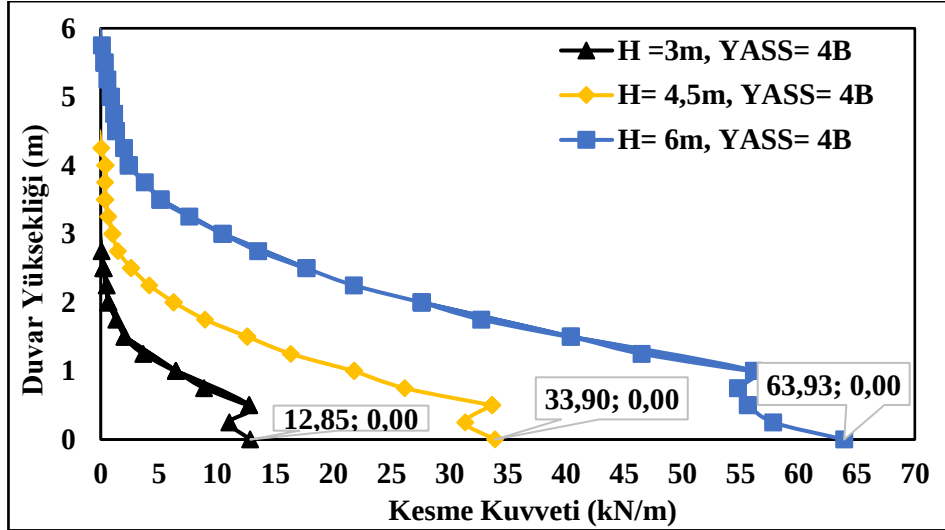


(a)



(b)

Şekil 4.12. 3, 4.5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında yeraltı su seviyesinin 4B seviyesinde olmasıyla değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



(c)

Şekil 4.12. (devam)

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarı için 4B seviyesindeki yeraltı su seviyesine bağlı olarak duvar yüksekliği arttıkça duvara etkiyen eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin de arttığı Şekil 4.12' de görülmüştür. Maksimum değerlerin duvar ile temelin kesiştiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvet değeri -160,52 kN/m, moment değeri -124,39 kN.m/m ve kesme kuvveti değeri ise 63,93 kN/m olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.25, 4.26 ve 4.27'de sırayla değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 3B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Değerlere bakıldığında duvar yüksekliğinin artmasıyla eksenel yük, moment ve kesme kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. Değerlerde maksimum veya minimum değerlerde bulunan (-) işareti negatif anlamda olmamakla birlikte kuvvetin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 4.25. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-43,05	0
4,5 m	-88,42	0
6 m	-160,52	0

Çizelge 4.26. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

Moment ($kN \cdot m/m$)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	-14,16	0
4,5 m	-47,18	0
6 m	-124,39	0

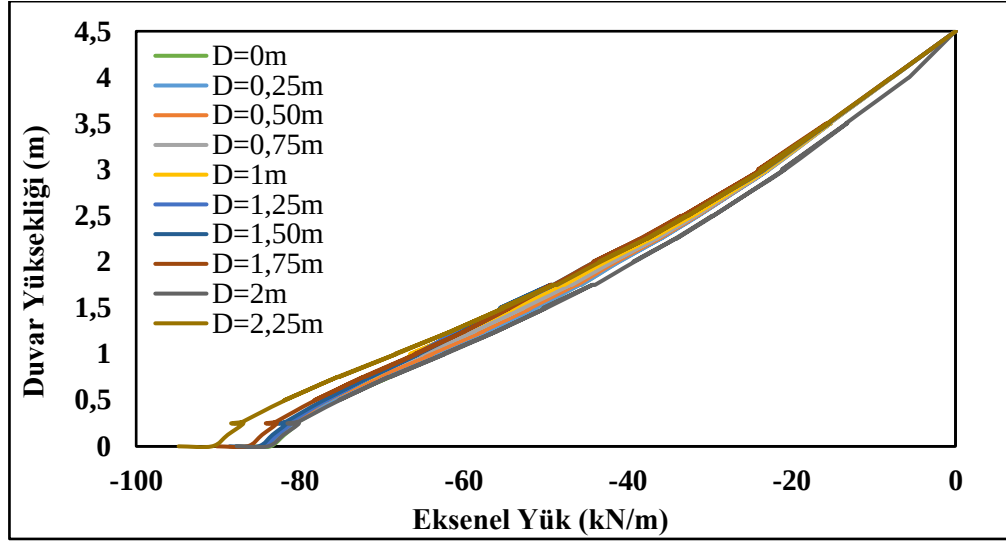
Çizelge 4.27. Değişen duvar yüksekliklerinde istinat duvarında 4B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
3 m	12,85	0
4,5 m	33,90	0
6 m	63,93	0

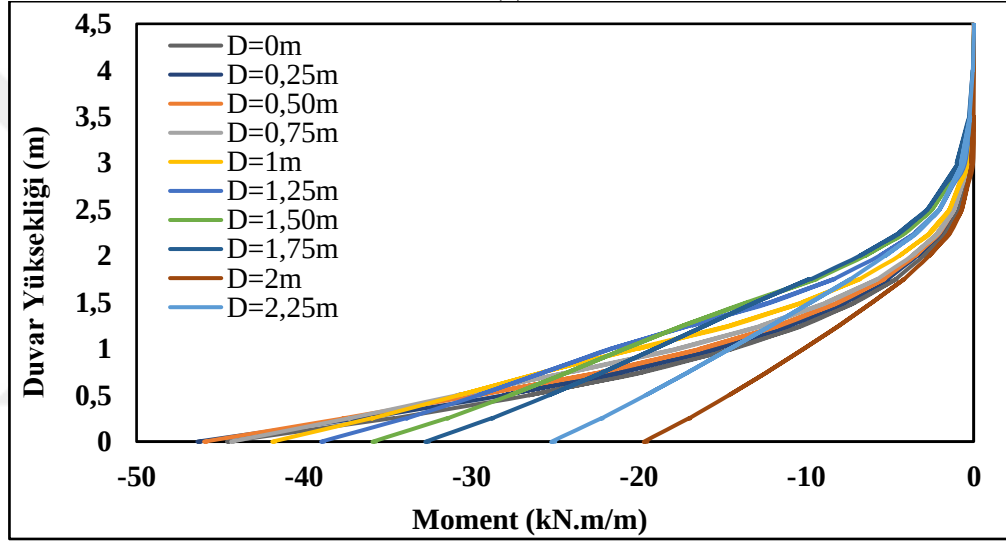
Genel olarak analizlerin sonunda duvar yüksekliğinin artmasıyla duvara aktarılan eksenel, moment ve kesme kuvvetleri arttığı tespit edilmiştir.

4.3. Ön Taraf Dolgu Zemin Derinliğinin İstinat Duvarına Etkisi

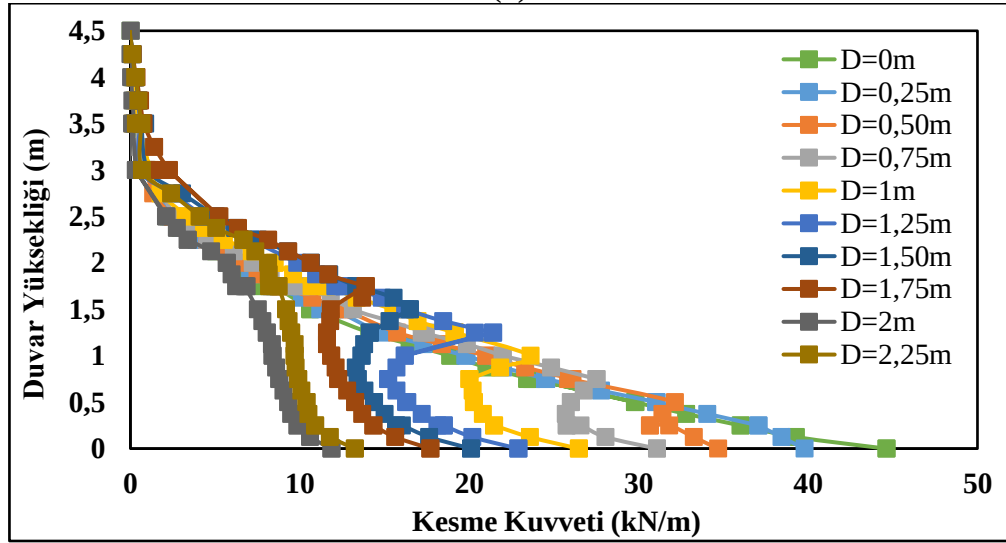
İstinat duvarı tasarımında ön boyutlandırma yaparken dikkate alınması gereken bir diğer husus ise muhakkak ki don derinliğidir. Duvarın ön tarafına atılacak dolgunun yüksekliği, duvara etkiyen moment, eksenel yük ve kesme kuvvetini de değiştirebilir. Bu değişikliği gözlemlemek için 4,5 m yüksekliğindeki bir istinat duvarında don derinliği değiştirilerek analize tabi tutulmuş ve sonuçlar Şekil 4.13' teki grafik üzerinde gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.13. 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında don derinliğinin etkisiyle değişen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.

Analizler 4,5 metre yüksekliğindeki bir istinat duvarı için yapılmıştır. Don derinlikleri sırasıyla 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 1.25, 1.50, 1.75, 2 ve 2.25 metre olarak değiştirilip Plaxis programı içerisinde yapılan analizler ile eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir.

Eksenel yük değerleri Şekil 4.13 (a) da görüleceği üzere don derinliği arttıkça duvara etkiyen eksenel yük değerleri de artış göstermiştir. Moment değerleri Şekil 4.13 (b) de görüleceği üzere don derinliği arttıkça duvara etkiyen moment değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kesme kuvveti değerleri Şekil 4.13 (c) de görüleceği üzere don derinliği arttıkça duvara etkiyen kesme kuvveti değerlerinin de arttığı görülmüştür. Eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri maksimum oldukları nokta duvarın temel ile kesiştiği yerde olduğu ve duvar yüksekliği arttıkça bu değerlerinde azaldığı ve duvarın tepe noktasında minimum değerlerine ulaştığı Şekil 4.13’de ki grafiklerde görülmektedir.

Çizelge 4.28, 4.29 ve 4.30’da sırayla, değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri, moment ve kesme kuvvetleri gösterilmektedir.

Değerlere bakıldığında, ön tarafta zemin dolgusunun artmasıyla eksenel yük 85,80 kN/m’den 94,82 kN/m’e kadar arttığı görülmektedir. Aynı zamanda dolgu yüksekliğinin artmasıyla moment değeri ön dolgusuz duvarda 44,47 kN.m/m’den 2,25m dolgulu duvarda 25,21 kN.m/m çoğalmıştır.

Çizelge 4.28. Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen eksenel yük değerleri.

Eksenel Yük (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
0 m	-85,80	0
0,25 m	-86,61	0
0,50 m	-87,41	0
0,75 m	-87,79	0
1 m	-87,81	0
1,25 m	-87,81	0

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.28. (devam)

1,50 m	-88,60	0
1,75 m	-90,15	0
2 m	-87,73	0
2,25 m	-94,82	0

Çizelge 4.29. Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen moment değerleri.

Moment ($kN.m/m$)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
0 m	-44,47	0
0,25 m	-46,15	0
0,50 m	-45,97	0
0,75 m	-44,17	0
1 m	-41,72	0
1,25 m	-38,80	0
1,50 m	-35,89	0
1,75 m	-32,53	0
2 m	-19,69	0
2,25 m	-25,21	0

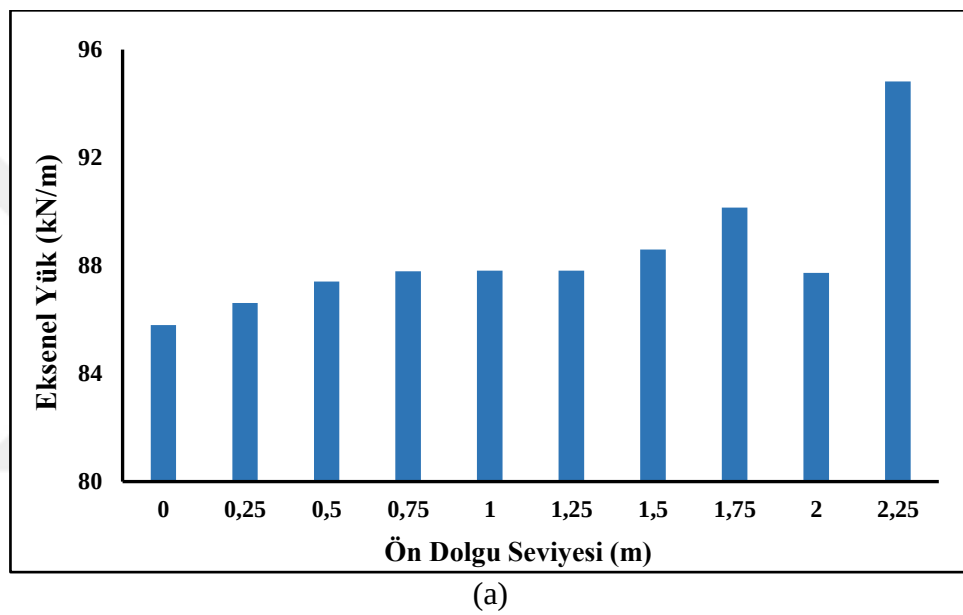
Çizelge 4.30. Değişen ön taraf dolgu zemin yüksekliklerinde 0B yeraltı su seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti değerleri.

Kesme Kuvveti (kN/m)		
Duvar Yüksekliği	Maksimum Değer	Minimum Değer
0 m	44,62	0
0,25 m	39,78	0
0,50 m	34,69	0
0,75 m	31,09	0
1 m	26,46	0
1,25 m	22,89	0
1,50 m	20,11	0

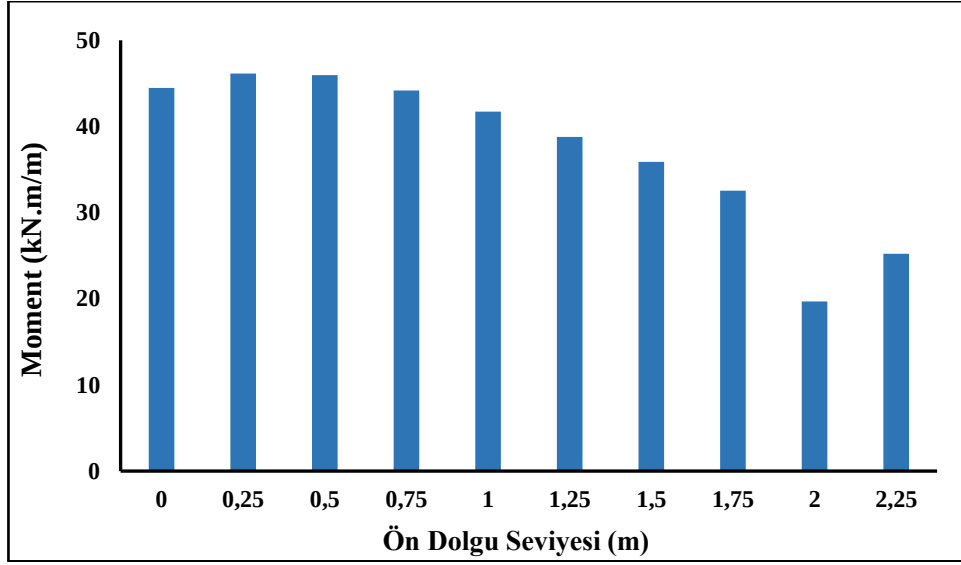
Çizelge 4.29. (devam)

1,75 m	17,70	0
2 m	11,87	0
2,25 m	13,25	0

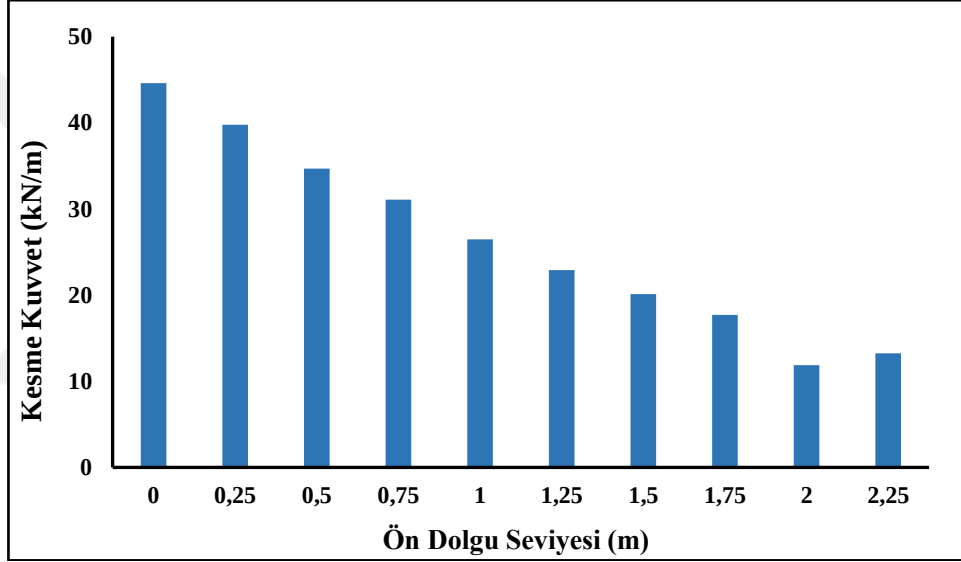
Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16’da 4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında 0B yeraltı su seviyesinde değişen ön taraf dolgu seviyelerinde duvarda meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri sütun grafiklerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.14. 4,5 metre yüksekliğinde 0B yeraltı su seviyesinde duvarda meydana gelen eksenel yük, moment ve kesme kuvveti değerleri, (a) eksenel Yük, (b) moment, (c) kesme kuvveti.



(b)



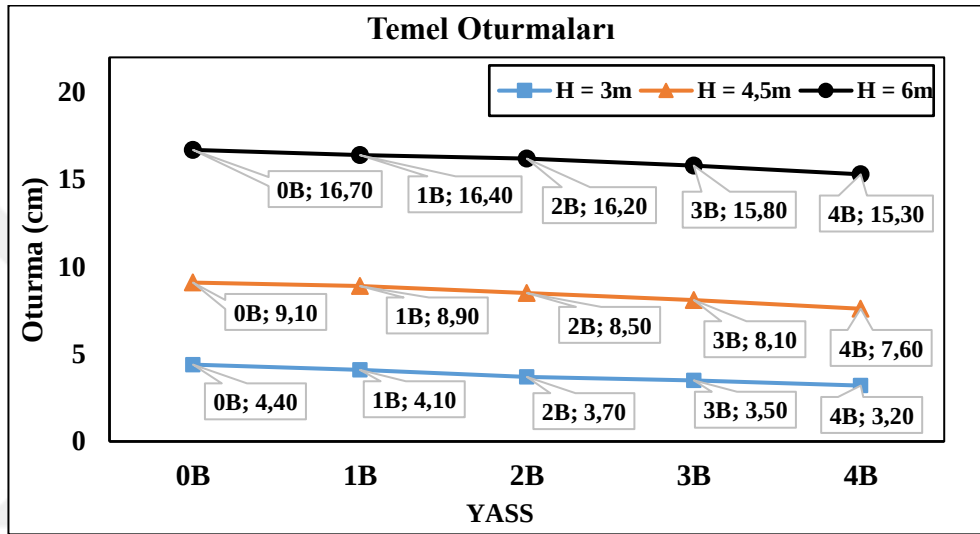
(c)

Şekil 4.14. (devam)

Şekil 4.14’de gösterilen sütun grafiklerinden de anlaşılıyor ki duvar yüksekliği 0’dan duvar yüksekliğinin % 10’u kadar ön taraf duvar dolgusu koyulduğu zaman moment değerlerinde yaklaşık %22 oranında, kesme kuvvetinde ise %23 oranında bir azalış meydana gelmiştir. Eksenel yük değerlerindeki genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla duvarın ön tarafındaki dolgu zeminin eksenel yük açısından dezavantaj olduğu ancak moment ve kesme kuvveti açısından da avantaj olarak görülebileceği söylenebilir.

4.4. İstinat Duvarının Temelinde Meydana Gelen Oturma Miktarları

Tasarımı ve analizi Plaxis 3D ile yapılan istinat duvarlarında ön ve arka tarafına atılan dolgu zeminlerden kaynaklı belli miktarlarda oturma meydana geldiği görülmüştür. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında hem değişen duvar yüksekliğinden kaynaklı hem de istinat duvarının üzerine oturduğu zeminde değişen yeraltı su seviyelerinden kaynaklı oluşan oturmalar Şekil 4.14' de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında değişen yeraltı su seviyelerinde meydana gelen oturma değerleri.

3 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında değişen yeraltı su seviyelerine göre meydana gelen oturma miktarları Şekil 4.14' deki gibidir. 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 4,40 cm, 1B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 4,10 cm, 2B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 3,70 cm, 3B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 3,50 cm ve 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 3,20 cm oturma olduğu yapılan analizlerde görülmüştür. Yeraltı su seviyesinin düştükçe oturma değerlerinin azaldığı analiz edilmiştir.

4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında değişen yeraltı su seviyelerine göre meydana gelen oturma miktarları Şekil 4.14' deki gibidir. 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 9,10 cm, 1B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 8,90 cm, 2B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 8,50 cm, 3B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 8,10 cm ve 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 7,60 cm oturma olduğu yapılan analizlerde

görülmüştür. Yeraltı su seviyesinin düştükçe oturma değerlerinin azaldığı analiz edilmiştir.

6 metre yüksekliğindeki istinat duvarlarında değişen yeraltı su seviyelerine göre meydana gelen oturma miktarları Şekil 4.14’ deki gibidir. 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 16,70 cm, 1B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 16,40 cm, 2B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 16,20 cm, 3B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 15,80 cm ve 0B derinliğindeki yeraltı su seviyesinde 15,30 cm oturma olduğu yapılan analizlerde görülmüştür. Yeraltı su seviyesinin düştükçe oturma değerlerinin azaldığı analiz edilmiştir.

Çizelge 4.31. Değişen duvar yüksekliklerinde ve yeraltı su seviyelerinde temelde meydana gelen oturma değerleri.

	H =3m	H = 4,5m	H = 6m
0B	4,4 cm	9,1 cm	16,7 cm
1B	4,1 cm	8,9 cm	16,4 cm
2B	3,7 cm	8,5 cm	16,2 cm
3B	3,5 cm	8,1 cm	15,8 cm
4B	3,2 cm	7,6 cm	15,3 cm

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan istinat duvar tasarımı yalıtı su seviyesinin değişmesiyle beraber duvarda değişen normal kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerleri incelenmiştir. Ayrıca istinat duvarının ön tarafındaki dolgu zemin derinliğinin değişmesinin duvara olan etkisi de incelenmiştir.

Tasarlanan istinat duvarları Plaxis 3D paket programında yapılmış olup analizleri de yine bu programla yapılmıştır. 3, 4,5 ve 6 metre yüksekliğinde 3 tip istinat duvarı tasarlanmış ve 5 farklı yalıtı su seviyesinde analize tabi tutulmuştur. Çıkan sonuçlar çizgi grafikleriyle bir araya getirilmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

İlk olarak ön boyutlandırma koşullarına göre yükseklikleri 3, 4,5 ve 6 metre olarak değişen istinat duvarları tasarlanmıştır. Yapılan bu tasarımlar program içerisinde temel genişliğinin 0, 1, 2, 3 ve 4 katı derinliklerde değişen yalıtı su seviyelerine göre analizleri yapılmıştır ve duvara etkiyen yatay deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu değerler sonucunda duvar yüksekliğinin arttıkça duvarın arka tarafına gelen dolgu zemin miktarı arttığı için duvarda oluşan yatay deplasman değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Değişen yalıtı su seviyelerinin yatay deplasman değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

Aynı şekilde analizler sonucu her bir istinat duvarının normal kuvvet, moment ve eksenel yük diyagramları çizilmiştir. İstinat duvarının yüksekliği arttıkça bu değerlerinde arttığı görülmüştür. Ancak değişen yalıtı su seviyelerinin bu değerleri de önemli bir ölçüde değiştirmede anlaşılmıştır. Yatay deplasman değerlerinin ve normal kuvvet, moment ve eksenel yük değerlerinin yer altı su seviyesi değişikliğinden etkilenmemesi duvarın altında kalan zemin ve yapılan tasarım ile alakalıdır. Farklı zemin tiplerinde ve farklı tasarımlarda sonuçların da değişebileceğine dikkat edilmesi gerekir.

4,5 metre yüksekliğindeki istinat duvarında yalıtı su seviyesini zemin seviyesinde tutarak duvarın ön tarafındaki dolgu zemininin yüksekliğini her seferinde 25 cm de bir arttırarak 10 farklı durum analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır. Duvarın ön tarafındaki zemin yüzeyi derinliğinin değişmesiyle eksenel yüklerde artış meydana

gelmiş ve dezvanataj sağlamıştır. Ancak moment ve kesme kuvveti değerlerinde değişikliklerin fazla olduğu ve azaldığı ve bu açıdan bir avantaj sağladığı görülmüştür. Dolayısıyla ön taraftaki dolgunun yüksekliği yapılacak olan istinat duvarı tasarımlarında dikkate alınmalıdır. Ön taraf dolgu zemin seviyesi duvar yüksekliğinin %10 ~ %15'i arasında bir değer alınabilir. İstinat duvarının temel tabanı ile ön tarafındaki dolgunun derinliği (D) minimum olmalıdır. Ancak, temel taban kotu, mevsimsel don seviyesinin altına yerleştirilmelidir.

İstinat duvarının temelindeki oturmalar da incelendiği zaman duvarın yüksekliği arttıkça altındaki zemine gelen yük de arttığı için meydana gelen oturma değerleri de artmıştır. Ayrıca yeraltı su seviyesi arttıkça oturma değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Oturma değerlerinin gittikçe azalması normal bir durumdur. Çünkü yeraltı su seviyesi düştükçe elastisite modülü azalacak ve poisson oranı artacaktır. Yapılacak olan istinat duvarı tasarımlarında oturma değerlerinde yeraltı su seviyesine dikkat edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Alsirawan, R., & Alnmr, A. 2023. Dynamic behavior of gravity segmental retaining walls. Pollack Periodica, 18(1), 94-99.
- Anonim, 2016. Web Sitesi: <https://acmuhendislikinsaat.com/ratione-voluptatem-sequi/>, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2019. Web Sitesi: https://haliciogullariinsaat.com/SubsMenu5_Tas_Duvar_12281_-9620, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://insapedia.com/istinat-duvari-nedir-cesitleri-ve-kullanım-alanlari/>, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2022a. Web Sitesi: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki-/50826/manuals-archive---plaxis>, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2022b. Web Sitesi: <https://www.bentley.com/software/plaxis-3d/>, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2022c. Web Sitesi: https://www.deepexcavation.com/downloads20/180112_DeepEX_Theory_Manual_2018.pdf, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Anonim, 2023. Web Sitesi: <https://www.sanalsantiye.com/sonlu-elemanlar-yontemini-kullan-madan-once-bilmeniz-gerekenler/>, Erişim tarihi: 3.10.2023
- Ayuluri, M. S. R. ve Ramulu, M. D. S. Behaviour of reinforced soil retaining walls under static loads by using plaxis.
- Babu, K., ve Gowda, K. 2016. Analysis of Counter fort retaining wall with and without Constraint Relief Shelf using Soft Computing Technique. Science Insights: An International Journal.
- Babuçcu, F. ve Mollamahmutoğlu, M. 2006. Zeminlerde Sıvılaşma. Gazi Kitapevi, Ankara.
- Badr, M. M., ve Mohammed Shafiqu, Q. S. 2023. Predicting the performance of retaining structure under seismic loads by PLAXIS software. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 32(1), 2-51.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S. 2015. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 825, İzmir.
- Bell, F. G. 2012. Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat. Gazi Kitapevi, 797, Ankara.
- Bhoyar, P., ve Awachat, G. 2019. Static analysis and design of retaining wall with and without shelve using software. International research journal of engineering and technology, 6(5), 348-354.

- Birand, A. A. 2006. Çözümlü Örnekler Yüzeysel Temeller ve Duvarlar. Teknik Yayınevi, 200, İstanbul.
- Birand, A. A. 2007. Kazıklı Temeller. Teknik Yayınevi, 480, İstanbul.
- Butterfield, R., ve Marchi, M. 2017. On the displacement of a traditional retaining wall when first loaded. Soils and foundations, 57(6), 1083-1087.
- Chandrupadla, T. R. ve Belegundu A. D. 2017. Mühendislikte Sonlu Elemanlara Giriş, Literatür Yayıncılık, 528, İstanbul.
- Chikute¹, G. C., ve Sonar, I. P. 2019. Techno-economical Analysis of gabion retaining wall against conventional retaining walls. Dimension, 300, 450-900.
- Coduto, D. P. 2006. Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar. Gazi Kitabevi, 760, Ankara.
- Coduto, D. P. 2011. Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar. Gazi Kitabevi, 816, Ankara.
- Day, R. W. 2004. Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı. Gazi Kitabevi, 600, Ankara.
- Dhamdhare, D. R., Rath, V. R. ve Kolase, P. K. 2018. Design and analysis of retaining wall. International Journal of Management, Technology and Engineering, 8(9), 1246-1263.
- Doğangün, A. 2021. Deprem-Zemin ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Birsan Yayınevi, 514 İstanbul.
- El-Sherbiny, M. M., El-Sherbiny, R. M. ve El-Mamlouk, H. H. 2018. Three Dimensional Analysis of Diaphragm Walls Supported by Passive Berms. In Engineering Challenges for Sustainable Underground Use: Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition, Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures, 24-28 November, Springer, 115-127, Cairo, Egypt.
- Frydrych, M., Kacprzak, G. ve Nowak, P. 2021. Modern methods of diaphragm walls Design. MDPI Journals, 13(24), 14004.
- Gabar, M., Alasefir, W. ve Amer, H. 2018. Effect of over consolidated clay on the behavior of raft foundation by using PLAXIS 3D software. International Journal of Science and Research, 9(4), 370-378.
- Gunawan, A. 2022. Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem III—stabilizing retaining wall. 5th International Conference on Eco Engineering Development, 998(1), 012010.
- Gülden, N. 2014. İstinat duvarlarının farklı yükleme ve koşullar altında analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 131, İstanbul.
- Güler, M., ve Sadri, Ş. E. N. 2015. Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 56-66.

- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. ve Sheahan, T. C. 2002. Geoteknik Mühendisliğine Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, 722, Ankara.
- Jia, L., He, S., Li, N., Wang, W., ve Yao, K. 2019. Stability of reinforced retaining wall under seismic loads. *Applied Sciences*, 9(11), 21-75.
- Jiang, Y., Han, J., Zornberg, J., Parsons, R. L., Leshchinsky, D., ve Tanyu, B. 2019. Numerical analysis of field geosynthetic-reinforced retaining walls with secondary reinforcement. *Géotechnique*, 69(2), 122-132.
- Jie, L., Yanyu, C., Yehan, G., ve Kaixuan, L. 2020. Study on Working Behavior of Cage-type Flexible Retaining Wall. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 809(1), 12-13.
- Krabbenhoft, K. 2019. Plastic design of embedded retaining walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 172(2), 131-144.
- Nath, B. 1993. Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri. Sakarya Üniversitesi Yayınları, 236, Sakarya.
- Orhan, M. 2022. Geoteknik Mühendisliği ve Temel İnşaatı. Gazi Kitabevi, 1172, Ankara.
- Önalp, A. ve Arel, E. 2013. Geoteknik Bilgisi 1 Bina Temelleri. Birsen Yayınevi, 452, İstanbul.
- Önalp, A. ve Sert, S. 2016. Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri. Birsen Yayınevi, 445, İstanbul.
- Özaydın, A. 2010. Arkasında geotekstil ile güçlendirilmiş donatılı kum zemin bulunan istinat duvarı davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 89, Kahramanmaraş.
- Özaydın, K. 2005. Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, 261, İstanbul.
- Özcan, B. 2007. Yayılı yük etkisindeki istinat duvarlarına etkiyen dinamik toprak basınçlarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 151, İstanbul.
- Özcan, M. M. 2021. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Betonarme İstinat Duvarının Optimum Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 101, Kütahya.
- PLAXIS 2D - Tutorial Manual, 2022
- PLAXIS 3D - Tutorial Manual, 2022
- Rezaie, M., Ahmadvand, M., ve Khoshvaght, H. 2022. Technical, economic, and executive survey of retaining wall using three-dimensional numerical analysis and observational data in a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(17), 1427.

- Suradi, M., Nabi, A., Hasanuddin, H. A., Muktediri, A. M., ve Ridhatullah, A. 2016. Design Analysis of Driven Pile Foundations of Retaining Walls in Granular Soils. INTEK: Jurnal Penelitian, 3(2), 77-81.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Uzuner, B. A. 2015. With Solved Problems Fundamentals of Soil Mechanics. Derya Kitabevi, 742, Trabzon.
- Uzuner, B. A. 2016a. Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, 408, Trabzon.
- Uzuner, B. A. 2016b. Temel Zemin Mekaniği. Derya Kitabevi, 740, Trabzon.
- Yavan, O., Onur, M. İ., ve Tuncan, A. 2022a. Behavior of cantilever retaining walls under static and dynamic loads constructed in saturated clay soil. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 253-272.
- Yavan, O., Tabak, T., ve Tuncan, A. 2022b. Behavior of retaining walls constructed in the saturated clay and water-saturated sand soils under the dynamic loads. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 253-272.
- Yıldırım, E. 2019. Betonarme konsol istinat duvarları ile geogrid donatılı istinat duvarlarının teknik ve ekonomik yönden araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 174, Konya.