

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ufkumu açan, akademik çalışma disiplini adına bana yol gösteren, “Betonarme Konsol Dayanma Duvarı Tasarımında Güncel Optimizasyon Algoritmaları Kullanılması” isimli tez çalışmamı öneren, hiçbir zaman yardım ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. S. Banu İKİZLER’e içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez aşamam süresince bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, değerli önerileriyle çalışmama destek olan hocam Prof. Dr. Tayfun DEDE’ye teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim ve tez aşamam süresince hiçbir sorumu yanıtsız bırakmayan hocam Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU’ya çok teşekkür ederim.

Lisans eğitimim boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Dostluklarıyla bana destek olan, her zaman güven ve cesaret veren, beni hep öğrenmeye teşvik eden kıymetli arkadaşlarıma yüreктen teşekkür ederim.

Beni yetiştirip bugüne getiren, tüm hayatım ve yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda olan annem ve babama ve beni her zaman motive eden, bana hep moral veren kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Elif Nur KALEMCİ

Trabzon 2021

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak “Betonarme Konsol Dayanma Duvarı Tasarımında Güncel Optimizasyon Algoritmaları Kullanılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. S. Banu İKİZLER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/01/2021

Elif Nur KALEMCI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Literatür Özeti.....	3
1.4. Dayanma Duvarları.....	8
1.4.1. Dayanma Duvarının Tarihçesi .....	10
1.4.2. Dayanma Duvarı Çeşitleri.....	11
1.4.2.1. Ağrlık Dayanma Duvarları .....	11
1.4.2.2. Konsol Dayanma Duvarları .....	13
1.4.2.3. Payandalı Dayanma Duvarları .....	14
1.4.2.4. Sandık (Crib) Dayanma Duvarları .....	15
1.4.2.5. Gabyon (Kafes) Dayanma Duvarları .....	16
1.4.2.6. Kazıklı Perdeler .....	17
1.4.2.7. Diyafram Duvarlar .....	19
1.4.2.8. Palplanş Perdeleri.....	20
1.4.2.9. Donatılı Zemin (Toprakarme) Dayanma Duvarları .....	21
1.4.3. Dayanma Duvarı Tasarımı .....	23

1.4.3.1.	Dayanma Duvarı Ön Tasarımı .....	24
1.4.3.2.	Dayanma Duvarına Etkiyen Kuvvetler .....	26
1.4.3.3.	Yanal Toprak Basıncı Teorileri .....	27
1.4.3.3.1.	Elastik ve Plastik Denge Durumu .....	28
1.4.3.3.2.	Rankine Toprak Basıncı Teorisi .....	32
1.4.3.3.3.	Coulomb Toprak Basıncı Teorisi .....	41
1.4.3.4.	Dayanma Duvarlarında Stabilite Analizleri .....	44
1.4.3.4.1.	Dış Stabilite Analizleri .....	44
1.4.3.4.1.1.	Devrilme Tahkiki .....	44
1.4.3.4.1.2.	Kayma Tahkiki .....	45
1.4.3.4.1.3.	Temel Zeminin Taşıma Gücü ve Eksantrisite Tahkiki .....	47
1.4.3.4.1.4.	Toptan Göçme Tahkiki .....	51
1.4.3.4.1.5.	Oturma Tahkiki .....	53
1.4.3.4.2.	İç Stabilite Analizleri .....	53
1.4.3.4.2.1.	Eğilme Tahkiki .....	55
1.4.3.4.2.2.	Kesme Tahkiki .....	61
1.4.3.5.	Donatı Hesabı .....	63
1.5.	Optimizasyon .....	65
1.6.	Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması .....	66
1.7.	Optimizasyon Teknikleri .....	67
1.8.	Etkili Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması .....	70
1.9.	Bozkurt Algoritması .....	74
1.10.	Rao Algoritmaları .....	78
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	82
2.1.	Betonarme Konsol Dayanma Duvarı Tasarımı Optimizasyonu .....	82
2.2.	Tasarım Örnekleri .....	89
2.2.1.	Birinci Örnek .....	89
2.2.2.	İkinci Örnek .....	97
3.	SONUÇLAR .....	106

4.	ÖNERİLER.....	108
5.	KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME KONSOL DAYANMA DUVARI TASARIMINDA GÜNCEL OPTİMİZASYON  
ALGORİTMALARININ KULLANILMASI

Elif Nur KALEMCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER  
2020, 118 Sayfa

Dayanma duvarı tasarımı, tahmini boyutların seçilmesiyle başlamakta ve duvar stabilitesi güvenli hale gelinceye kadar boyutların tekrar tekrar değiştirilmesiyle devam etmektedir. Bu deneme yanılma süreci özel bir tecrübe ve önsezi gerektirmektedir. Tasarımdaki en ufak değişiklikler bile maliyet yükü açısından büyük farklar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle optimum bir dayanma duvarı tasarımı oldukça kazançlıdır. Bu çalışmada taban plağı dişli ve dişsiz betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonu konu edilmiştir. Minimum ağırlık ve minimum maliyete ulaşmak amacıyla iki ayrı amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu bağlamda belirlenen tasarım değişkenleri ve kısıtlarla problem modellenmiştir. MATLAB programında yazılmış bozkurt algoritması (GWO), etkili bir diferansiyel gelişim algoritması (AEDE), Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması tasarım optimizasyonu için kullanılmıştır. Sonuç olarak; tabanında diş bulunmayan bir konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonunda amaç fonksiyonu düşük ağırlık olarak seçildiğinde öne çıkan Rao\_1 algoritması onu takip eden GWO algoritmasına göre %0,148 oranında daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Yine aynı kesitte amaç fonksiyonu düşük maliyet olarak seçildiğinde de öne çıkan Rao\_1 algoritması onu takip eden GWO algoritmasına göre %0,03'lük oranında daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Tabanında diş bulunan bir konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonunda amaç fonksiyonu düşük ağırlık olarak seçildiğinde ise öne çıkan GWO algoritması AEDE algoritmasına göre %7,47 daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Aynı kesitte amaç fonksiyonu düşük maliyet olarak seçildiğinde yine öne çıkan GWO algoritması onu takip eden AEDE algoritmasına göre %2,87 daha başarılı bir sonuç elde etmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dayanma duvarı, optimizasyon, dayanma yapıları, tasarım, metasezgisel, gwo, Rao\_1, Rao\_3, aede



Master Thesis

SUMMARY

USE OF CURRENT OPTIMIZATION ALGORITHMS IN REINFORCED CONCRETE  
CANTILEVER RETAINING WALL DESIGN

Elif Nur KALEMCI

Karadeniz Technical University  
Institute of Science and Technology  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Sabriye Banu İKİZLER  
2021, 118 Page

Reinforced concrete cantilever retaining wall (RCCRW) design, starts with choosing the approximate dimensions and continues with changing the dimensions repeatedly until the stability of the wall becomes safe. This trial and error process entails a significant experience and intuition. However, at this process it may not be possible to say that the engineer can reach the most successful design. Even the smallest modifications can make big differences especially about the cost burden. Therefore, an optimum retaining wall design is very profitable. RCCRW with and without shear key design optimization was subjected to this study. Two objective functions were constituted with the aim of reaching the low weight and the low cost. Hereof, the problem was modelled with the determined design variables and constraints. Grey wolf optimization (GWO) algorithm, an efficient differential evolution (AEDE) algorithm Rao\_1 algorithm and Rao\_3 algorithm, which they written in MATLAB program, were used for the design optimization. As a result of RCCRW without shear key design optimization when the objective function selected as low weight, Rao\_1 algorithm which is the best one, gave 0,148% more succesful results than GWO which is the second best. When the objective function selected as low cost Rao\_1 algorithm which is the best one, gave 0,03% more succesful results than GWO which is the second best. As a result of RCCRW with shear key design optimization when the objective function selected as low weight, GWO algorithm which is the best one, gave 7,47% more succesful results than AEDE which is the second best. When the objective function selected as low cost, GWO algorithm which is the best one, gave 2,87% more succesful results than GWO which is the second best.

**Key Words:** Retaining wall, optimization, earth retaining, design, metaheuristic, gwo, Rao\_1, Rao\_3, aede

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Dayanma yapılarının sınıflandırılması .....	9
Şekil 2. Ağırlık dayanma duvarı çeşitleri .....	12
Şekil 3. Yarı ağırlık dayanma duvarı.....	12
Şekil 4. Konsol dayanma duvarı .....	13
Şekil 5. Payandalı dayanma duvarları .....	15
Şekil 6. Sandık (crib) dayanma duvarları .....	16
Şekil 7. Gabyonlar a) önden merdivenli gabyon b) arkadan merdivenli gabyon .....	17
Şekil 8. Kazıklı perdeler a) aralıklı kazıklı oluşturulan perdeler b) teğet kazıklı perdeler c) enjeksiyonlu teğet kazıklı perdeler d) bindirmeli kazıklı perdeler...	18
Şekil 9. Diyafram duvarların inşası .....	19
Şekil 10. Palplanş perdeler a) konsol palplanş b) ankrajlı palplanş .....	21
Şekil 11. Donatılı zemin dayanma duvarları .....	22
Şekil 12. Dayanma duvarı ön tasarımı a) ağırlık dayanma duvarı boyutları için yaklaşık boyutlar b) konsol dayanma duvarı için yaklaşık boyutlar .....	25
Şekil 13. Yarım sonsuz ortamda z derinliğindeki bir eleman .....	28
Şekil 14. Zeminde sükûnet durumu .....	30
Şekil 15. Aktif durumdaki zemin .....	31
Şekil 16. Pasif durumdaki zemin .....	32
Şekil 17. Mohr-Coloumb kırılma hipotezi .....	33
Şekil 18. Bir noktadaki bir düzlemde sükûnet durumunda ve aktif durumda gerilme daireleri .....	34
Şekil 19. Bir noktadaki bir düzlemde sükûnet durumda ve pasif durumda gerilme Daireleri.....	35
Şekil 20. Tek zemin durumunda aktif ve pasif yanal basınçlar.....	37
Şekil 21. Kohezyonsuz zeminde yer altı suyu ve üzerinde sürşarj yükü olma durumu ...	38
Şekil 22. Kohezyonlu zemin durumu .....	40
Şekil 23. Zemin yüzünün eğik olduğu durum .....	41
Şekil 24. Coulomb kama teorisine göre duvara gelen itkiler .....	43
Şekil 25. Dayanma duvarlarında devrilme .....	45

Şekil 26. Dayanma duvarlarında kayma.....	46
Şekil 27. Dayanma duvarlarında taşıma gücü yenilmesi .....	47
Şekil 28. Konsol dayanma duvarında taban basınçları.....	48
Şekil 29. İsveç dilim yöntemi.....	52
Şekil 30. Betonarme konsol dayanma duvarına etkiyen kuvvetler .....	55
Şekil 31. Tek tesirli betonarme kirişte eş değer gerilme dağılımı.....	56
Şekil 32. Konsol dayanma duvarı elemanları.....	59
Şekil 33. Taban üzerine etkiyen kuvvetler .....	60
Şekil 34. AEDE algoritmasının akış diyagramı.....	73
Şekil 35. Bozkurtların avlanma süreci a) takip etme, iz sürme, b-d) avı kovalama, taciz etme, etrafında daireler çizme, e) vaziyet alma ve saldırı .....	75
Şekil 36. Bozkurtların konumlarını güncellemeleri .....	77
Şekil 37. Bozkurt algoritması için akış diyagramı .....	78
Şekil 38. Rao 1 algoritması için akış şeması .....	81
Şekil 39. Betonarme konsol dayanma duvarı tasarım değişkenleri .....	83
Şekil 40. Birinci örnek için düşük ağırlıkta GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 için yakınsama grafiği .....	92
Şekil 41. Birinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 algoritmasında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler.....	93
Şekil 42. Birinci örnek için düşük maliyette GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 için yakınsama grafiği .....	95
Şekil 43. Birinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 algoritmasında düşük maliyet için bulunan optimum değerler.....	96
Şekil 44. İkinci örnek için düşük ağırlıkta GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 için yakınsama grafiği.....	101
Şekil 45. İkinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 algoritmasında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler.....	102
Şekil 46. İkinci örnek için düşük maliyette GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 için yakınsama grafiği.....	103
Şekil 47. İkinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao_1 ve Rao_3 algoritmasında düşük maliyet için bulunan optimum değerler.....	104

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Meyerhof taşıma gücü katsayıları .....	50
Tablo 2. Donatı listesi .....	84
Tablo 3. Betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonunda kullanılabilir kısıtlar .....	88
Tablo 4. Birinci örnek için girdi olarak kullanılan parametreler .....	90
Tablo 5. Birinci örnekteki tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar.....	90
Tablo 6. Birinci örneğin düşük ağırlıklı optimum tasarımı için tasarım değişkenleri.....	91
Tablo 7. Birinci örneğin düşük maliyetli optimum tasarımı için tasarım değişkenleri ....	91
Tablo 8. Birinci örneğin optimum tasarım için en iyi ve ortalama değerler .....	91
Tablo 9. İkinci örnek için girdi olarak kullanılan parametreler.....	98
Tablo 10. İkinci örnekteki tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar .....	99
Tablo 11. İkinci örneğin düşük ağırlıklı optimum tasarımı için tasarım değişkenleri ....	99
Tablo 12. İkinci örneğin düşük maliyetli optimum tasarımı için tasarım değişkenleri....	100
Tablo 13. İkinci örneğin optimum tasarım için en iyi ve ortalama değerler .....	100

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	: Eş değer derinlik
$A_s$	: Donatı kesit alanı
$A_{s_{max}}$	: Maksimum donatı kesit alanı
$A_{s_{min}}$	: Minimum donatı kesit alanı
$B$	: Temel taban genişliği
$B'$	: Azaltılmış genişlik
$b$	: Betonarme dikdörtgen kesitin genişliği
$c$	: Kohezyon
$c'$	: Efektif kohezyon
$c_\alpha$	: Adezyon
$c_c$	: Betonun birim maliyeti
$c_s$	: Çeliğin birim maliyeti
$c_{taban}$	: Temel zeminin kohezyonu
$C$	: Beton basınç bileşke kuvveti
$d$	: Faydalı yükseklik
$d_b$	: Donatı çapı
$D$	: Ön ampatman üzerindeki zemin derinliği
$D_{taban}$	: Duvar temel taban kalınlığı
$e$	: Eksantrisite
$F$	: Kayma düzlemine etkiyen normal ve kayma kuvvetlerinin bileşkesi
$f_c$	: Betonun basınç dayanımı
$f_{cd}$	: Beton basınç hesap dayanımı
$f_{ck}$	: Betonun basınç karakteristik dayanımı
$f_{ctd}$	: Beton çekme hesap dayanımı
$f_{ctk}$	: Beton çekme karakteristik dayanımı
$f_y$	: Çeliğin akma dayanımı

$f_{yd}$	: Çelik hesap dayanımı
$f_{yk}$	: Çelik için karakteristik dayanım
$G$	: Sabit Yük
$G_s$	: Güvenlik sayısı
$H$	: Yanal toprak itkisi
$H'$	: Dolgu yüksekliği
$H_{su}$	: Aktif durumun olduğu kısımda yer altı suyu yüksekliği
$H_1$	: Aktif durumun olduğu kısımda yer altı suyu üst yüzünden zemine kadar olan yükseklik
$h_{diş}$	: Konsol dayanma duvarı dış yüksekliği
$K$	: Toprak basıncı katsayısı
$K_0$	: Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı
$K_a$	: Aktif toprak basıncı katsayısı
$K_p$	: Pasif toprak basıncı katsayısı
$k_1$	: Betonun basınç dayanımına göre bir katsayı
$L$	: Temel uzunluğu
$l_b$	: Kenetlenme boyu
$l_{burun}$	: Ön ampatman genişliği
$l_{bk}$	: Kancalı donatı için kenetlenme boyu
$l_{topuk}$	: Arka ampatman genişliği
$M_d$	: Tasarım momenti
$M_r$	: Eğilmedeki taşıma gücü
$N_c$	: Taşıma gücü katsayısı
$N_i$	: Dilim ağırlığının düşey bileşeni
$N_q$	: Taşıma gücü katsayısı
$N_\gamma$	: Taşıma gücü katsayısı
$P_a$	: Aktif zemin itkisi
$P_p$	: Pasif zemin itkisi

- $P'_0$  : Temel taban düzeyindeki efektif gerilme
- $Q$  : Hareketli yük
- $q$  : Sürşarj yükü
- $q_1$  : Gövde ve arka ampatmanın kesişim bölgesindeki temel taban basıncı
- $q_2$  : Gövde ve ön ampatmanın kesişim bölgesindeki temel taban basıncı
- $q_{dt}$  : Gövde burun birleşiminden  $dt$  kadar uzaklıkta temel taban basıncı
- $q_{dh}$  : Gövde burun birleşiminden  $dh$  kadar uzaklıkta temel taban basıncı
- $q_{max}$  : Maksimum taban basıncı
- $q_{min}$  : Minimum taban basıncı
- $q_{sınır}$  : Sınır taşıma gücü
- $r$  : Kayma dairesi yarı çapı
- $T$  : Donatı çekme kuvveti
- $T_i$  : Dilimin ağırlığının düşey bileşeni
- $U$  : Yük bileşimi
- $V_c$  : Duvarın birim uzunluğundaki beton hacmi
- $V_{cr}$  : Eğik çatlama dayanımı
- $V_d$  : Tasarım kesme kuvveti
- $W$  : Üçgen kamanın ağırlığı
- $W_{st}$  : Duvarın birim uzunluğundaki çelik donatı ağırlığı
- $W_{bs}$  : Topuk üzerinde kalan toprak dolgudan kaynaklı oluşabilecek maksimum yük
- $W_{bsdh}$  : Gövde topuk birleşiminden  $dh$  uzaklıkta topuk üstünde dolgunun ağırlığı
- $W_i$  : Dilimin ağırlığı
- $\bar{x}$  : Dayanma duvarına etkiyen kuvvetler bileşkesinin yeri
- $y_{su}$  : Pasif durumun olduğu kısımdaki yer altı suyu yüksekliği
- $y_1$  : Pasif durumun olduğu kısımda yer altı suyu üst yüzünden zemine kadar olan yükseklik
- $z_1$  : Duvar önünde dolgu yüksekliği
- $\alpha$  : Dayanma duvarının dolgu tarafındaki yüzeyinin yatayla yaptığı açı
- $\beta$  : Arka dolgunun yatayla yaptığı açı

$\Delta L_i$	: Dilim yay uzunluğu
$\delta$	: Zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısı
$\varepsilon_{cu}$	: En dış beton lifindeki birim kısalma
$\Phi$	: İçsel sürtünme açısı
$\Phi'$	: Efektif kayma mukavemeti açısı
$\Phi_{taban}$	: Temel zeminin kayma mukavemeti açısı
$\gamma$	: Zeminin birim hacim ağırlığı
$\gamma_c$	: Betonun birim hacim ağırlığı
$\gamma_s$	: Çeliğin birim hacim ağırlığı
$\gamma_k$	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_{k_{min}}$	: Zeminin minimum kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_{taban}$	: Temel zemininin birim hacim ağırlığı
$\gamma_{mc}$	: Beton için malzeme katsayısı.
$\gamma_{ms}$	: Çelik için malzeme katsayısı.
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$\rho_b$	: Dengeli donatı oranı
$\rho_{max}$	: Maksimum donatı oranı
$\rho_{min}$	: Minimum donatı oranı
$\rho_{st}$	: Büzülme ve sıcaklık donatı yüzdesi
$\sigma$	: Normal gerilme
$\sigma'_a$	: Aktif yanal zemin basıncı
$\sigma'_p$	: Pasif yanal zemin basıncı
$\sigma'_h$	: Yatay efektif gerilme
$\sigma'_0$	: Düşey efektif gerilme
$\sigma_1$	: Maksimum asal gerilme
$\sigma'_1$	: Efektif maksimum asal gerilme
$\sigma_3$	: Minimum asal gerilme
$\sigma'_3$	: Efektif minimum asal gerilme



- $\tau_f$  : Kayma dayanımı  
 $\Omega$  : Dayanma duvarının taban sürtünme açısı  
 $\Sigma M_D$  : Duvarın burun noktasına göre momentler toplamı  
 $\Sigma N$  : Düşey yöndeki kuvvetlerin toplamı  
 $\Sigma F$  : Düşey etkiyen kuvvetler toplamı



## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

İbn-i Heysem bilimsel metotları uygulayarak araştırmalar yapan ilk gerçek bilim insanı olarak kabul edilir. Optik alanında ortaya attığı hipotezi deneylerle destekleyerek çeşitli çıkarımlarda bulunmuş ve bu çıkarımları kurallaştırarak “Kitab-el Menazır” adlı kitabında sunmuştur. Tarih boyunca insanlar problemleri çözmek, şartları iyileştirmek üzere bilim ve teknolojiye yararlanmışlardır. Hızın, verimin ve sürdürülebilirliğin bu denli önem kazandığı son dönemde problemleri çözüme ulaştırmak kadar çözümün eldeki imkanlar dahilinde en iyi çözüm olması gerekliliği de yadsınamaz. Bu durum problem çözme tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle yapay zekâ (YZ) hayatın her alanında kendini göstermeye başlamıştır. Son yıllarda tasarım problemleri için oldukça etkili çözümler üreten optimizasyon teknikleri geliştirilmiştir. Günümüzde sağlıktan, ekonomiye, mühendisliğe hatta sosyal bilimlere varıncaya dek neredeyse bütün alanlarda insana dayalı sistem yavaş yavaş yerini yapay zekaya devretmeye başlamıştır. Son zamanlarda yaygınlaşan optimizasyon, inşaat mühendisliği alanında da özellikle tasarım sürecini büyük ölçüde bilgisayara bırakarak yapay zekâdan istifade edilmesini, mühendisin yükünün hafifletilmesini sağlamıştır.

İnşaat mühendisliği açısından tasarımı oldukça önem arz eden dayanma yapıları, tabii ya da insani etkilerle stabilitesi bozulan zemin kütlelerini tutmayı sağlayan yapılardır. Gün geçtikçe kullanımları genişleyen ve çeşitlenen dayanma yapıları; yamaçlı bölgelerdeki yol inşaatlarında, metro istasyonlarında, kıyı yapılarında, derin kazılarda kazı çukurunu tutmada, barajlarda, köprü kenar ayaklarında ve daha birçok alanda inşaat mühendisliğine hizmet etmektedir.

Zemin stabilizasyonunun bozulmasında yanal toprak basınçları etkilidir. Dayanma yapılarının tasarımı ve stabilite analizi için yanal toprak basınçlarının bilinmesi gerekmektedir. Yanal toprak basıncı genel itibariyle; zeminin kütlesi, çeşitli statik ve dinamik yüklemeler vb. sebeplerle zeminde oluşan gerilmeleri ifade etmektedir. Bu konuda birçok çalışma yapılmıştır.

Coulomb (1776) ve Rankine (1857) geliştirdikleri amprik formüllerle yanal toprak basıncı hesabı açısından öne çıkan isimlerdir.

Dayanma yapıları arasında en bilineni ve yaygın kullanılanı dayanma duvarıdır. Günümüzde dayanma duvarları, diğer yapılar yanında geri planda kalıyor gibi gözükse de inşaat mühendisliği için bilhassa güvenlik açısından oldukça büyük öneme sahiptir. Dayanma duvarı çökmesi ülkemizde çok sayıda örneğine rastladığımız bir afettir. Bu olayı önlemek için başarılı bir tasarım aşaması gerekmektedir. Tasarım aşamasında özellikle zamandan ve maliyetten tasarruf ederek daha kesin, hızlı ve kolay şekilde sonuca erişmek mümkündür. Bu durum imalat aşamasını da pozitif yönde etkiler. Dayanma duvarları için de maliyet, kapladığı hacim vb. Çeşitli sorunlar optimizasyon yöntemleri ile tasarım aşamasında özölmeye başlanmıştır.

Bu çalışmada, yaygın kullanılan bir dayanma yapısı olan betonarme konsol dayanma duvarının bir optimizasyon problemi olarak modellenmesi ve bilgisayar üzerinde çeşitli algoritmalarla faydalanılarak çözümü hedeflenmiştir. Optimizasyon aşamasında kullanılan algoritmalar; bozkurt algoritması (GWO), etkili bir diferansiyel gelişim algoritması (AEDE), Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmalarıdır. Bozkurt ve etkili bir diferansiyel gelişim algoritması doğadan esinlenerek hazırlanmış optimizasyon algoritmalarıdır. Ekosistemdeki canlı türlerinin yaşamsal faaliyetlerinde bilhassa yiyecek arama davranışlarında ürettiği optimum özömler bilim adamlarının araştırmalarına konu olmakta ve doğadan esinlenen algoritmaların artışı ile sonuçlanmaktadır. Bunun yanında Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmaları ise bu tür metaforlardan uzak daha sade bir forma sahiptir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışmanın temel amacı bilgisayar ortamında çeşitli algoritmalar yardımıyla betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonunu gerçekleştirmektir. Bunun için; farklı optimizasyon algoritmaları kullanılmış, birbirleriyle karşılaştırılmış ve en başarılı sonuçları elde etmek amaçlanmıştır. Türk standart ve yönetmeliklerine uygun olarak hazırlanmış gerçekleştirilebilir bir çalışma hazırlamak hedeflenmiştir.

Çalışma 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; ilk aşamada dayanma yapıları genel itibariyle sınıflandırılmış ve kısaca özelliklerinden bahsedilmiş, ikinci aşamada dayanma

duvarı tasarımında göz önüne alınan kriterler üzerinde durulmuş ve üçüncü aşamada optimizasyon ve kullanılan algoritmalar hakkında genel bilgiler paylaşılmıştır.

İkinci bölümde, önce optimum betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı için hazırlanan modelleme açıklanmış ardından belirtilen algoritmalar yardımıyla tabanında dış kesit bulunan ve bulunmayan iki betonarme konsol dayanma duvarı için tasarım örnekleri ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, elde edilen sonuçların, literatüre uygunluğu, kıyaslaması ve eleştirisi yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar belirtilmiştir.

Beşinci bölümde, araştırmacının konu ile ilgili çalışma yapmak isteyen araştırmacı ve uygulayıcılara iletmek istediği öneriler ifade edilmiştir.

### **1.3. Literatür Özeti**

Betonarme konsol dayanma duvarları, uzun süredir özellikle şehirlerde fazla yer işgal etmemesi, özel bir dolgu malzemesine ihtiyaç duymaması, inşaat aşamasının sadeliği gibi sebeplerle çok yüksek olmayan duvarlar olarak oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Günümüzde de çalışmaları devam eden betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu çalışmaları 80'li yıllara dayanmaktadır. Optimizasyon çalışmalarında başlıca hedef problemi bir minimizasyon ya da maksimizasyon problemi olarak modelleyerek en iyi çözüme ulaşmaktır. Bu konuda geçmişten günümüze araştırmacılar kendilerine minimize ya da maksimize edecek çeşitli hedefler belirlemişlerdir.

Fang vd., (1980) eğimli bir yamacı destekleyen bir dayanma duvarının stabilitesini göz önünde bulundurmıştır. Optimum lokasyonun, gömme derinliğinin ve duvarın dayanımının belirlenmesi adına probleme özel olarak bir optimizasyon programı geliştirilmiş ve tasarım abakları oluşturmuştur. Rhomberg ve Street (1981) bir konsol dayanma duvarının yeterli dayanım şartlarında minimum maliyetinin hedeflendiği bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Minimum maliyet daha sonra başka araştırmacılar için de çalışma konusu olmuştur (Pochtman vd.1988, Keskar ve Adidam 1989). Buna ek olarak Dembicki ve Chi (1989), minimum ağırlık ve maksimum stabiliteye sahip konsol dayanma duvarı tasarımı yapmıştır.

Sarıbaşı ve Erbatur (1996), betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu için; ağırlık ve maliyet olarak iki amaç fonksiyonu belirlemiştir. Tasarım problemi için kesit alanları ve donatıyı ifade eden 7 tasarım değişkeni seçilmiştir. Problem; duvarın devrilmesi, kayması, taşıma gücü, zeminde çekme gerilmesi oluşmaması, duvar elemanlarında eğilme ve kesme mukavemetlerini içeren 10 adet ve tasarım değişkeninin alt ve üst sınırlarını içeren 14 adet kısıtla birlikte toplamda 24 kısıt ile sınırlandırılmıştır. Araştırmacı ele aldığı ve bir problemin amaç fonksiyonu ya da kısıtlarının doğrusal olmaması durumu olarak özetlenen doğrusal olmayan programlama probleminin çözümü için RETOPT isimli özel bir bilgisayar programı kullanmıştır. Program, ceza fonksiyonu kullanarak kısıtlı bir minimizasyon problemini kısıtsız hale getirmiştir. Sayısal örneklerle desteklenen çalışmada çeşitli parametrelerin tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Ceranic vd. (2001) modifiye edilmiş benzetimli tavlama algoritması (SA) kullanarak yine minimum maliyetin hedeflendiği bir betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu çalışması yapmıştır. Sezgisel bir algoritma olan benzetimli tavlama algoritması betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu için Yepes vd. (2008) tarafından da kullanılmıştır. Duvar geometrisi, malzeme çeşitleri ve donatı özelliklerini kapsayan 20 tasarım değişkeni ile birlikte gövde boyu, zemin gerilmesi, temel ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı, kayma mukavemeti açısı ve yoğunluğuna göre dolgu tipi, duvar dolgu arası kayma mukavemeti açısı, izin verilen gövde sehim, duvar önündeki zeminin pasif yanal basıncı çalışmada optimum maliyeti etkileyen faktörler olarak göz önünde bulundurulmuş ve etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda; kritik olarak belirlenen üç faktör olan temel ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı, gövde sehim, duvar dolgu arası kayma mukavemeti açısı için duvarlarda sırasıyla  $\tan 30$ ,  $1/150$  ve  $0$  değerleri önerilmiştir.

Maliyeti amaç fonksiyonu olarak kabul eden bir diğer çalışma Basudhar vd. (2006) tarafından yapılmış olup, devrilme, kayma ve taşıma gücünün yanında geoteknik açıdan incelenmesi gereken oturma problemi de göz önünde bulundurulmuştur. Ardışık sınırsız minimizasyon tekniği (SUMT) kullanarak hazırladığı optimal tasarıma duyarlılık analizi uygulamıştır. Duyarlılık analizi, bir parametredeki değişiminin sistem üzerindeki etkisini incelemek üzere çeşitli girdilerin değiştirildiği bir işlemdir. Çalışma sonucunda gövde üst kalınlığı 20 cm'den 30 cm'e çıkarılmasıyla maliyette %9 ile %15 civarında artış olacağı gözlemlenmiştir.

Bhatti (2006), konsol dayanma duvarı optimizasyonu için ulaşılabilirlik ve kullanılabilirlik açısından avantaj sahibi olan MS Excel elektronik çizelgelerini kullanmayı önermiştir. Değişken, amaç fonksiyonu ve kısıtlarla ilgili gereken veriler girildikten sonra optimum çözümü bulmak üzere MS Excel'in çözücü aracı kullanılmıştır. Bu işlem tekrar tekrar yapılabilmektedir. Çalışma rneklerle desteklenmiş ve önceki çalışmalarla kıyaslanmış, tasarıma duyarlılık analizleri uygulanmıştır.

Babu ve Basha (2008), dayanma duvarı tasarım sürecinde önem arz eden iki bileşen olan yapıya etkiyen sürşarj yükü ve duvar elemanlarının dayanımlarının içerdiği belirsizlikler sebebiyle tasarım için güvenilirliğe dayalı bir yaklaşım sunmuştur. Deterministik yöntemlerin belirsizlikler sebebiyle güvenilirlik konusunda yetersiz kalacağını öne sürerek optimizasyon formülasyonlarının olasılıksal güvenilirlik katsayılarını içerdiği güvenilirliğe dayalı optimizasyonu önermiştir. Devrilme, taban üzerinde kayma, eksantrisite, temel taşıma gücü, duvar elemanlarının eğilme ve kayma taşıma gücü sorunları göz önünde bulundurularak ve dolgu ve temel zemini özellikleri, duvar boyutları, donatı ve beton özellikleri rassal değişkenler kabul edilerek tasarım yapılmıştır.

Popülasyon tabanlı meta-sezgisel optimizasyon çalışmalarının ilgi çekici alanlarından biri olan sürü zekâsı optimizasyon algoritmaları da birçok tasarım optimizasyonunda olduğu gibi dayanma duvarlarında da kullanılmıştır. Sürü zekâsı algoritmalarının esin kaynağı, tek başlarına yetersiz kalırken sürü olarak zekice çözümlerle başarıya ulaşan hayvanlardır. Hayvanlar deneyimlerine bağlı olarak sonucun iyileşmesine katkıda bulunmaktadırlar. Varae vd. (2009) betonarme bir yapı elemanı olan konsol isitnat duvarına meta-sezgisel bir algoritma olan parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) uygulamıştır. Minimum ağırlık ve maliyet hedeflenmiş, yapısal tasarım ve kısıtlar Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 318-08) yönetmeliğine göre düzenlenmiştir. Kumar ve Suribabu (2017) aynı tasarım için diferansiyel gelişim algoritmasını (DEA) kullanmış ve Varae vd. (2009)'nin sonuçları ile karşılaştırmak üzere aynı parametreleri kullanarak bir örnek tasarım sunmuştur. Varae vd. (2009)'nin sonuçları, C++ üzerinde kodlanmış DEA ve elde yaptığı çözüm karşılaştırdığında minimum ağırlık konusunda en başarılı ve en hızlı sonuçlara DEA ile ulaşıldığı sonucu ortaya konmuştur. Parçacık sürü optimizasyonu daha sonra da betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu için kullanılmıştır (Khajehzadeh vd. 2010).

Sable ve Archana (2012), MATLAB üzerinde MATLAB'ın Optintool aracını kullanarak konsol dayanma duvarı tasarımı yapmış, tabanında dış kesit bulunan ve bulunmayan iki tasarım örneğiyle ve duyarlılık analiziyle çalışmasını desteklemiştir.

Betonarme konsol dayanma duvarları için çeşitli meta-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Evrenin oluşumu ve sona ermesi senaryolarından esinlenen büyük patlama-büyük çöküş algoritması (BBC) (Camp ve Akın 2012), karıncaların sürü davranışı sayesinde besin ve yuva arasındaki en kısa yolu bulmaları olayını modelleyen karınca kolonisi optimizasyon algoritması (ACO) (Ghazavi ve Bonab, 2011) örnek olarak verilebilir. Dağdeviren ve Kaymak (2015) yapay arı kolonisi algoritması kullanarak optimum betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı üzerinde çalışmıştır. Arı sürüsünün yiyecek arama davranışının baz alındığı yapay arı kolonisi algoritması, Derviş Karaboğa'nın (2005) geliştirdiği metasezgisel bir sürü zekâsı algoritması olup literatürde çok kez tasarım optimizasyonu için kullanımına rastlanılmıştır. Optimizasyon probleminin boyutları ve kritik kesitlerindeki donatıların durumları değişken olarak varsayılmış, 12 adet sınır belirlenmiş ve duvarın maliyeti amaç fonksiyonu kabul edilmiştir. Çalışmanın sonucunda %0,5'in altındaki varyasyon katsayısıyla algoritmanın güvenilir olduğu belirlenmiştir.

Zaman zaman betonarme konsol dayanma duvarı için iki algoritma kullanılarak oluşturulan hibrit optimizasyon algoritmalarından yararlanılmıştır. Sheikholeslami vd. (2014) tarafından harmoni arama algoritması ve ateş böceği algoritması kullanılarak geliştirilmiş hibrit IFA-HS algoritması ile optimum konsol dayanma duvarı tasarımı buna örnektir.

Literatürde konsol dayanma duvarı optimizasyonu için var olan algoritmaların geliştirilmiş halleri ya da araştırmacılarca değiştirilmiş hallerinin de kullanımına rastlanmaktadır. Buna örnek olarak M.J. Box (1965) tarafından geliştirilmiş Box'ın Complex Yöntemi'ni modifiye ederek konsol dayanma duvarı optimizasyonuna uygulayan Mahmood ve Alam (2015) ve Levy yürüyüşü dağılımı ile biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (LFBBO) algoritmasını geliştirerek konsol dayanma duvarı tasarımına uygulayan Aydoğdu (2017a) gösterilebilir.

Bazı durumlarda da betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu için amaç fonksiyonu olarak maliyet ve ağırlığın yanı sıra CO<sub>2</sub> emisyonu da göz önüne alınmıştır (Villalba vd. 2010, Aydoğdu ve Akın 2015).

Literatür incelendiğinde bazı araştırmacılar tarafından birden fazla algoritmanın örnek bir problem üzerinde birlikte sınındığı görülmektedir. Pei ve Xia (2012) parçacık sürü optimizasyonu, benzetimli tavlama algoritması ve genetik algoritmayı konsol dayanma duvarı tasarımına uygulamış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuç olarak; GA ve PSO probleme birçok tasarım değişkeni ve karmaşık kısıtlar kullanılarak başarıyla uygulanabilirken SA'da kısıtlar için uygulanan ceza fonksiyonu yöntemi başarılı sonuçlar vermemiştir. Gandomi vd. (2015) hızlandırılmış parçacık sürü optimizasyonu (APSO), ateş böceği algoritması (FA), guguk kuşu algoritmasını birbirleriyle ve iyi bilinen bir algoritma olan klasik parçacık sürü algoritması (PSO) ile karşılaştırmak üzere betonarme konsol dayanma duvarına uygulamıştır. Bir örnek üzerinde algoritmaların verdiği sonuçlara göre CS algoritması aralarında en başarılı sonuçlara ulaşan algoritma olarak sunulmuştur. Gandomi vd. (2017) bu kez aynı problem üzerinde diferansiyel gelişim (DE), evrimsel strateji (ES) ve biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) algoritmasını kullanmış, tabanında dış olan ve olmayan iki tasarım örneği için de BBO'nun diğerlerine göre oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bekdaş ve Temür (2015) öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritmasını kullanarak hazırladığı konsol dayanma duvarı tasarımına PSO, BBBC, IHS algoritmalarını da uygulayarak sonuçları karşılaştırmıştır. Minimum ağırlık amaç fonksiyonu değerlerinin yakın değerlerde sonuç verdiğini buna göre TLBO algoritmasının da bu problemin çözümü için uygun olduğunu belirtilmişlerdir. Lopez (2012), arama grubu algoritması (SGA) ve geriye dönük arama algoritmasını (BSA) tabanında dış kesit bulunan ve bulunmayan iki konsol itinat duvarı tasarımı örneğine uygulamış, optimizasyon sonucu elde ettiği değerleri aynı parametreleri kullanan Camp ve Akın (2012)'in BBBC algoritmasıyla elde ettiği değerlerle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak Lopez (2012), çalışmada ulaşılan sonuçların daha başarılı olduğunu göstermiş ve SGA ve BSA karşılaştırıldığında sağlamlık açısından ileride olanın BSA olduğunu ifade etmiştir.

Betonarme konsol dayanma duvarına, birden fazla amaç fonksiyonunun aynı anda sağlanmasının hedeflendiği bir optimizasyon tekniği olan çok amaçlı optimizasyon da uygulanmıştır (Khajehzadeh vd. 2014, Das vd. 2016a, Aydoğdu 2017b).

Literatürde konsol dayanma duvarının yapısal tasarımı ve iç stabilite analizleri için baskın olarak Amerikan beton enstitüsü (ACI) yönetmeliğinin baz alındığı görülse de Türk betonarme ve deprem yönetmeliklerinden faydalanan çalışmalar mevcuttur. Buna örnek olarak konsol dayanma duvarı tasarımı için; Yılmaz vd. (2015) tarafından çiçeklerin tozlaşma algoritması ile,

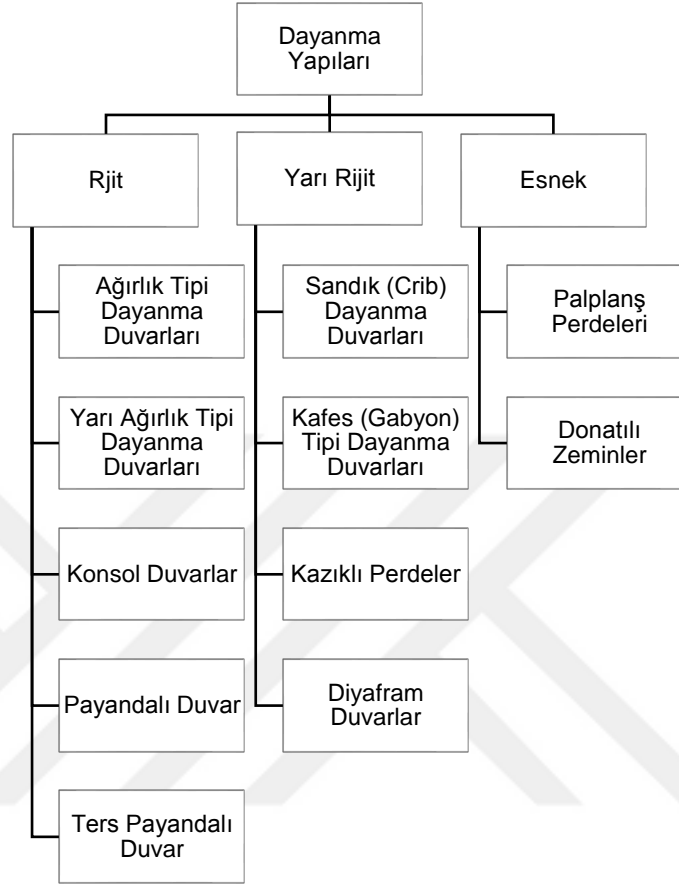


Kayhan ve Demir (2016) tarafından parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması ile, Bekdaş ve Temür (2017) tarafından öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritması ile, Dağdeviren ve Kaymak (2018) tarafından yapay arı kolonisi (ABC) algoritması ile, Kayhan ve Demir (2018) tarafından diferansiyel gelişim (DE) algoritması ile optimizasyon çalışmaları gösterilebilir.

Bu çalışmada, tabanında dış kesit bulunan ve bulunmayan olmak üzere iki ayrı betonarme konsol dayanma duvarı, MATLAB programı üzerinden bozkurt algoritması (GWO), etkili bir diferansiyel gelişim algoritması (AEDE), Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması kullanılarak optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. Tasarım, TS 7994 (1990) (Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları) esas alınarak geoteknik güvenlik sayıları ile ve Türk betonarme yönetmeliği TS 500 (2000) (Betonarme Yapıların tasarım ve Yapım Kuralları) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile betonarme tasarım kuralları dahilinde sınırlandırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda özellikle Amerikan standartlarının baskın olduğu görülmektedir. Türk standartlarının esas alındığı çalışma sayısı oldukça azdır. Bu amaçla çalışmada Türkiye’de yapılacak bir betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonu çalışılmıştır. Yine etkili bir diferansiyel gelişim algoritması (AEDE), Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması kullanılarak ilk kez betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonu bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

#### **1.4. Dayanma Duvarları**

TS 7994 (1990)’e göre iki farklı düzeydeki zeminde oluşan yanal toprak etkisini güvenli bir şekilde karşılayan, zemini destekleyerek doğal şev açısını almasını önleyen yapı elemanlarına dayanma yapıları denmektedir. Yine TS 7994 (1990)’e göre bu dayanma yapıları Şekil 1’de gösterildiği üzere rijit, yarı rijit ve esnek olarak üç ana grupta incelenmektedir. Yeni araştırmalar ve gelişen teknolojiyle çeşitlenen dayanma yapıları yapım yöntemine, sistem rijitliğine, zemine davranış şekillerine göre vs. kategorize edilmektedir.



Şekil 1. Dayanma yapılarının sınıflandırılması

Projelendirilecek dayanma yapısı seçilirken depremlidepremsiz durum, yeraltı suyu, zemin özellikleri, kullanılabilir malzeme, teknik imkanlar, çevreyle olan görsel uyumu, etrafındaki yapılar gibi etkenler göz önüne alınmaktadır.

Rjıt dayanma yapıları; ağırlık tipi dayanma duvarları, yarı ağırlık tipi dayanma duvarları, konsol duvarlar, eşikli konsol duvarlar, payandalı duvar, ters payandalı duvar gibi dayanma duvarlarını ifade etmektedir. Rjıt dayanma yapıları yatay kuvvetler etkisinde neredeyse yanal deformasyona maruz kalmadan zemin stabilitesini koruyan yapılardır. Yarı rijit dayanma yapıları da benzer şekilde stabilitesini korusa da belirli bir kuvvet sınırında hareket eder ya da üstlerine etkiyen gerilmeleri temel zeminine iletirler. Sandık (crib) dayanma duvarları, kafes (gabyon) tipi dayanma duvarları, kazıklı perdeler, diyafram duvarlar yarı rijit dayanma yapılarına örnek olarak verilebilir. Esnek dayanma yapıları zemin itkilerini eğilme ile

karşılıyarak gerilmeleri zemine iletirler. Palplanş perdeleri ve donatılı zeminler de esnek dayama yapılarına birer örnektirler.

İki farklı yükseklikteki zemin yüzlerinin dengesini korumakla görevli olan dayanma duvarlarında genelde yüksek seviyedeki zemin için dolgu ifadesi kullanılmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği üzere duvarın dolguya bitişik yüzüne duvarın arkası (sırtı) adı verilmektedir. Duvarın alt yüzü duvarın tabanı olarak isimlendirilirken genelde duvarın genelinden ayrı şekilde inşa edilir ve bu kısma temel de denebilir. Duvarın arka yüzü ve tabanın birleşim hattı topuk, ön yüzü ve tabanın birleşim hattı da burun olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda tabanda ön yüzdeki çıkımlar burun ya da burun çıkması (ön ampatman) ve arka yüzdekiler topuk ya da topuk çıkması (arka ampatman) olarak da ifade edilebilmektedir.

#### **1.4.1. Dayanma Duvarının Tarihçesi**

Duvarlar tarihte; siyasi sınırları çizmek, barınma alanı oluşturmak, yük taşımak gibi birçok sebeple kullanılmıştır. Yaklaşık 12 000 yıl öncesinden kalma, Dünyanın keşfedilmiş en eski tapınağı, Göbekli Tepe'de dikili taşları birleştirmiş ya da 10 000 yıl öncesinden kalma, Eriha'yı düşmana karşı korumak üzere inşa edilmiş taş duvarlar tarihe tanıklık etmiştir. 5000 yıl öncesinde Mısır'da Nil Nehri'nin taşmasını engellemek adına Gabyon (kafes) dayanma duvarlarının inşa edilmiş olduğu da bilinmektedir.

Yine yaklaşık 5000 yıl öncesi Mısır'da (Sakkara ve Helvan), piramitlerden önceki dönemde, kralların defnedildiği anıt mezar yapılarında temel için kazılan toprağı desteklemek üzere kullanılan dayanma duvarlarına rastlanılmıştır (La Loggia, 2009). Tarihi 2500 yıl öncesine dayanan Çin Seddi ise esasında iki paralel dayanma duvarının arasına yerleştirilen sıkıştırılmış kilden oluşan bir yapıdır.

Antik medeniyetler olan Mısır, Babil, Çin ve Hint medeniyetleri nehir taşkınlarını önlemek üzere topraktan sedde ve bentler inşa etmişlerdir. Sepetle toprak taşıyan insanların imal ettiği bu yapılarda toprak malzeme, işçilerin üzerinde yürümesi sırasında sıkışarak dayanım kazanmıştır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Romalılardan kalma Latince 'eğimli yerleşim yeri' anlamına geldiği düşünülen Vercovicium'daki aynı isimli kale de hem koruma amacı hem de bulunduğu bölgenin eğimli

yapısıyla bir dayanma yapısı olma niteliği taşımaktadır. Orta çağ ve sonrasında devam eden dayanma yapılarından da bir kısmı günümüze dek ulaşmıştır. Tecrübenin, ilerleyen teknolojinin ve artan mühendislik becerilerinin dayanma yapılarını da daha başarılı sonuçlara ulaştıracağı düşünülse de durum her zaman böyle olmamaktadır. Günümüzde bu yapıların binlerce yıl ayakta kalması için gayret gösterilmese de yapıların birkaç ay içerisinde işlevini yitirmesi istenmeyen bir durumdur.

### **1.4.2. Dayanma Duvarı Çeşitleri**

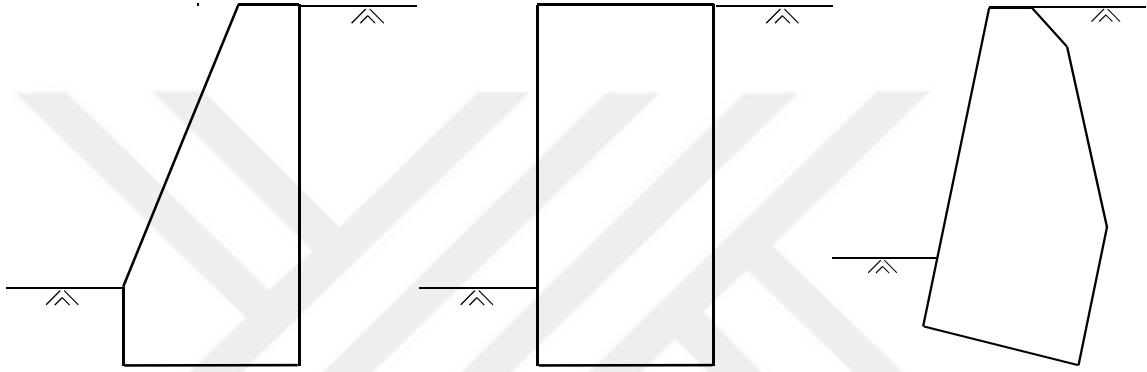
Tarihsel süreçte dayanma yapısı maliyetleri eskiye göre çok daha ucuzlamış ve yapımı için istenen iş gücü ve harcanan zaman oldukça azalmıştır. Mevcut durumlara göre inşa edilecek dayanma yapısı da çeşitlenmektedir. Bu kısımda dayanma duvarı çeşitleri genel özellikleriyle özetlenmektedir.

#### **1.4.2.1. Ağırlık Dayanma Duvarları**

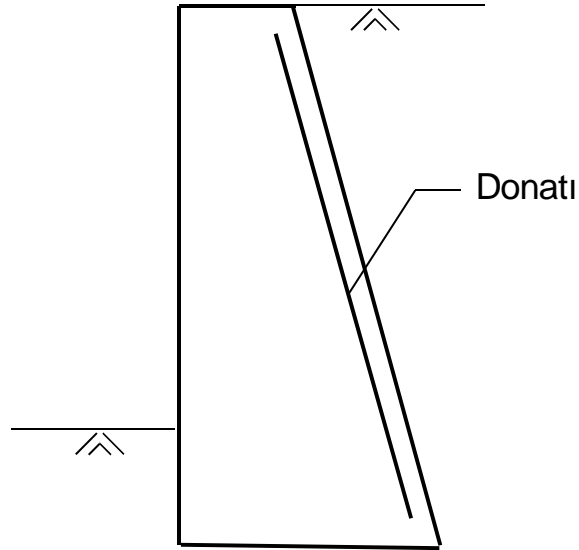
En eski dayanma duvarı tiplerinden biri olan ağırlık dayanma duvarları, taş örgü, tuğla, beton ya da briket kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2’de çeşitli modelleri görülen ağırlık dayanma duvarları yanal toprak basıncını kendi ağırlıkları ile karşılarlar. Kalın ve sert gövdelerinde eğilme meydana gelmesi beklenmemektedir. Çekme gerilmesini karşılamadıkları için yüksekliklerini artırmak, gövdeyi daha da kalınlaştırıp maliyeti artıracığından genelde yükseklikleri sınırlıdır (4-5 m). Harç (kum çimento karışımı) kullanılarak ve harç kullanmadan taş bloklar halinde kargir (taş) dayanma duvarları yapılmaktadır. Genelde malzeme temininin kolaylığına göre taş ya da beton ağırlık dayanma duvarına karar verilmektedir. Taş duvarlar genelde, estetik açıdan beton (masif) ağırlık duvarına göre öndedirler. Duvarın tabanında beton, üst kısmında da yığma taş kullanılan karma ağırlık duvarlar da bulunmaktadır.

Gövdede malzeme olarak taş kullanılırken temelde beton kullanılan ağırlık duvarlarında gövde-temel birleşim yeri kesme için kritik kesittir (Uzuner, 2014). Özellikle yarma şevleri stabilitesi için uygundur.

Bir diğerk ağırlık duvarı çeşidi, duvar arkasında çekme gerilmesi taşıyan donatılar kullanılarak gövde kalınlığının azaltıldığı yarı ağırlık dayanma duvarlarıdır (Şekil 3). Bu duvarlarda gövde daha ince tutulabilir. Ancak yeterli taban genişliğini sağlamak için tabana ön ampatman yapılabilir. Ancak bu çıkmanın genişliğini azaltmak adına burun kısmına bir miktar donatı eklenmelidir (Huntington, 2013).



Şekil 2. Ağırlık dayanma duvarı çeşitleri

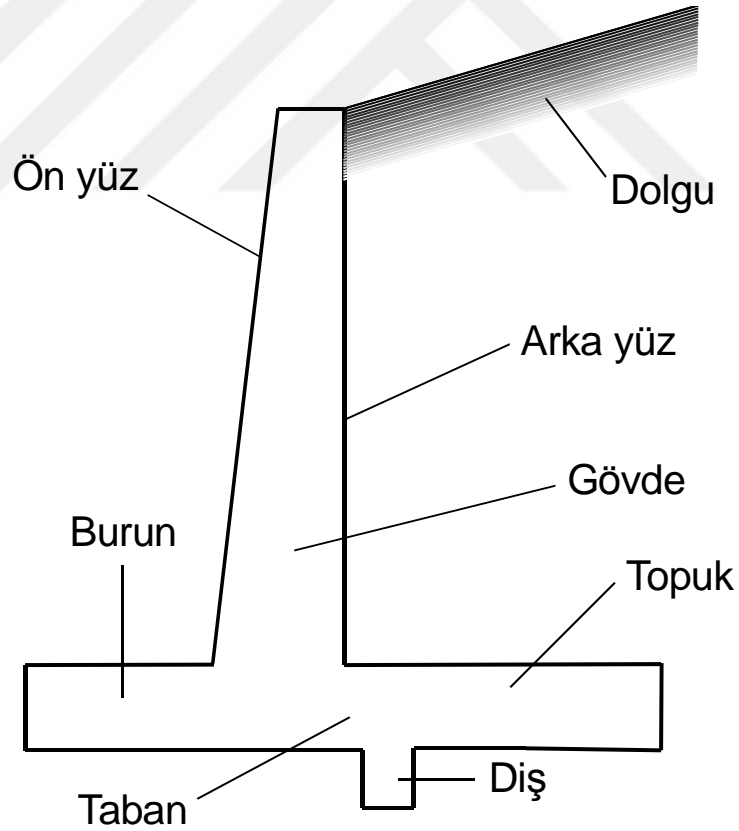


Şekil 3. Yarı ağırlık dayanma duvarı

### 1.4.2.2. Konsol Dayanma Duvarları

Duvarın ön ya da arkasında ya da her iki tarafında taban plağının (temel), konsol olarak uzatıldığı betonarme dayanma duvarı tipidir. Konsol üzerindeki zemin ağırlığından stabilite için faydalanılır. Böylece ters 'L', veya 'T' kesitine sahip olabilirler. Şekil 4'te gösterildiği üzere gövde ve taban plağından oluşan duvarın gövde kısmı incedir. Beton malzemeyle basınç ve çelik malzemeyle çekme karşılanır. Hem gövde hem temelde donatı kullanılır.

Duvar yükseklikleri 20 m'ye kadar varabilir ancak ekonomik maksimum yükseklik 7,5 m civarındır. Duvarın taban üzerinde kayma tehlikesinin önüne geçmek üzere taban plağına dış yerleştirilebilmektedir (TS 7994, 1990).



Şekil 4. Konsol dayanma duvarı

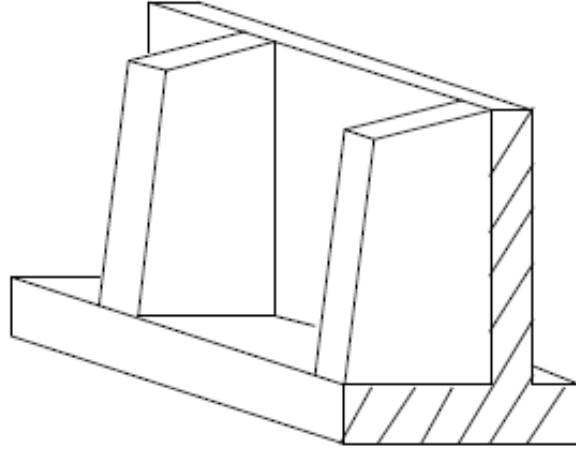
Günümüzde en çok kullanılan dayanma duvarları; geosentetik donatılı zemin (MSE) ve konsol dayanma duvarlarıdır. Bilhassa derin yarmaların olduğu ulaşım yapıları ve yamaçlı bölgelerdeki yol inşaatlarında yaygın kullanılırlar. Konsol dayanma yapıları, şehirlerde oldukça yaygındır, çünkü, vandalizme karşı daha dayanıklıdırlar ve inşasında özel bir dolgu malzemesine gerek duyulmaz. Kısa mesafeli (20-50 m mesafe) ve çok yüksek olmayan (4 m'nin altında) duvarlar arasında en çok tercih edilen dayanma duvarlarından (Bowles, 2001).

Dayanma duvarları arasında konsol dayanma duvarlarının yaygın kullanıma sahip olmasının bir sebebi de yapının şeklinin verdiği avantajla diğerlerine nazaran daha az malzeme ile benzer yanal desteği sağlayabilmesidir.

Duvar sırtında bir veya birkaç adet olarak tabana paralel eşik eklenerek hafifletme konsollu betonarme konsol dayanma duvarı da denilen eşikli konsol duvarlar yapılmaktadır. Bu duvarlarda toprak yükünün ters yöndeki momenti ile konsol-temel birleşimindeki maksimum momenti azaltmak amaçlanmaktadır (TS 7994, 1990).

#### **1.4.2.3. Payandalı Dayanma Duvarları**

Konsol dayanma duvarlarıyla benzer olmakla birlikte Şekil 5'te görüldüğü üzere duvarın gövde ve taban plağını birleştiren ve eğilme momenti etkisini düşürmeyi amaçlayan, ince payandaların kullanıldığı dayanma duvarı çeşidine payandalı duvarlar denilmektedir (Das, 2009). Yüksekliğin 8 m'yi geçtiği durumlarda kullanılmaktadır (TS 7994, 1990).



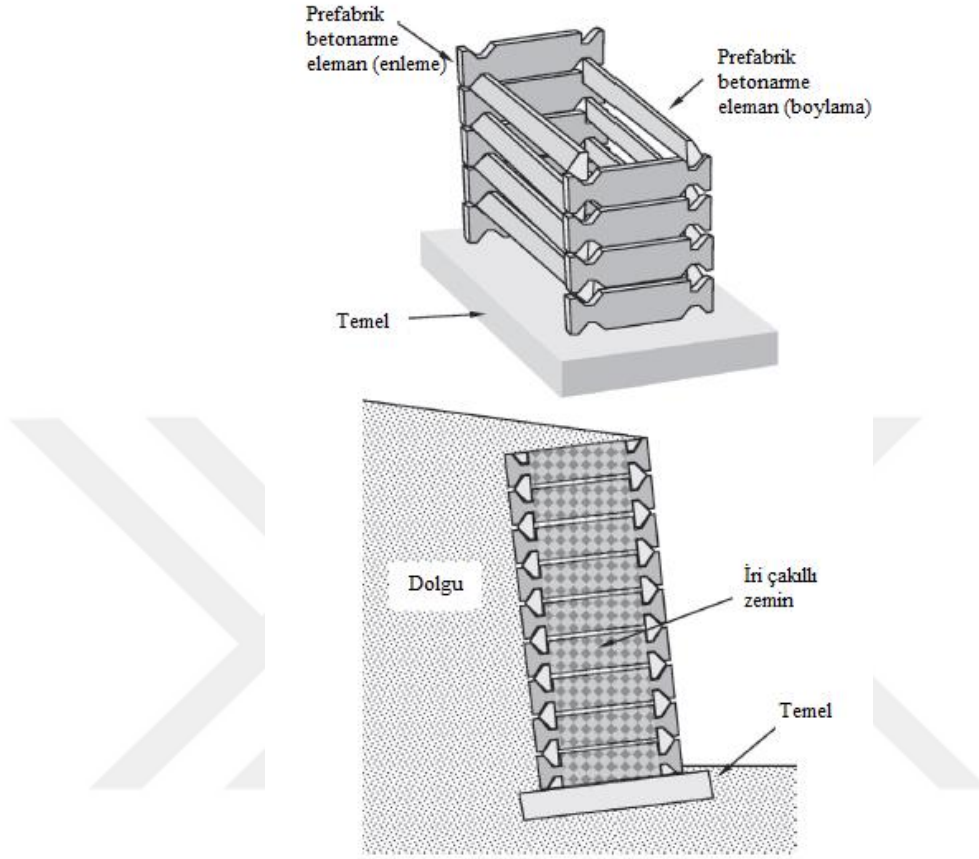
Şekil 5. Payandalı Dayanma Duvarları (Birand, 2006).

Yine 8 m'den yüksek duvarlarda ters payandalı duvarlar kullanılabilir. Ters payandalı duvarda destek duvarın ön kısmındadır ve çekmeye değil basınca çalışır. Duvarın ön kısmına payanda eklemenin sorun teşkil etmeyeceği durumlarda kullanılırlar (Clayton vd., 2014).

#### **1.4.2.4. Sandık (Crib) Dayanma Duvarı**

Bir ağırlık duvarı tipi olan sandık dayanma duvarı, ahşap, metal veya prefabrike beton malzemeden elemanların istiflenerek oluşturulduğu, içleri iri taneli zeminle doldurulmuş hücrelerden meydana gelmektedir. Şekil 6'da bir sandık dayanma duvarı örneği gösterilmiştir.





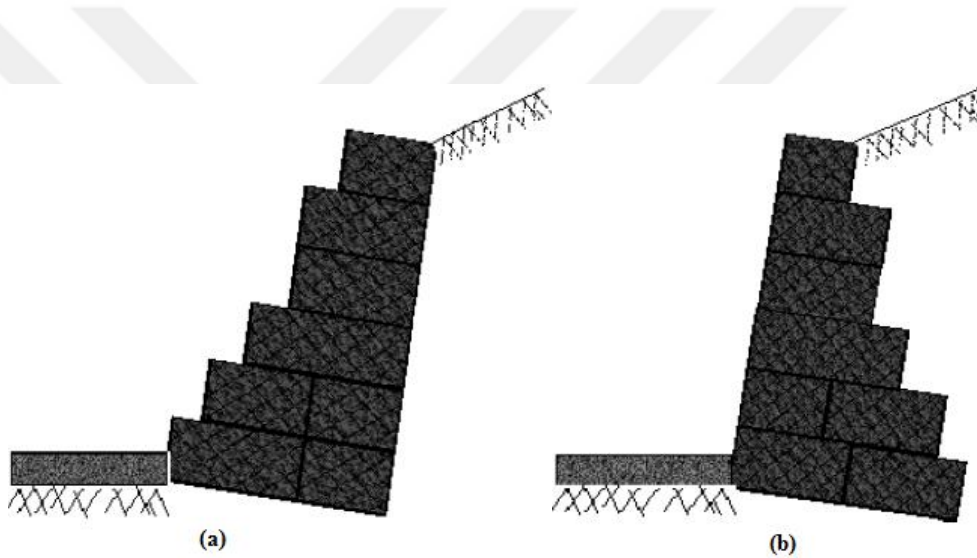
Şekil 6. Sandık (Crib) Dayanma Duvarları (Clayton vd., 2014).

Sandık dayanma duvarları genelde 6-9 metre olarak inşa edilmeye uygundur. Ahşap malzeme genelde geçici işler ya da peyzaj amaçlı kullanılırken inşaat mühendisliği için genelde betonarme kullanılır. Esnek bir malzeme olduğundan harekete karşı zarar açısından toleransı yüksek bir sisteme sahiptir (Clayton vd., 2014)

#### 1.4.2.5. Gabyon (Kafes) Tipi Dayanma Duvarı

Her ne kadar ilk örneklerine M.Ö. 5000'li yıllarda Mısır Nil Nehri'nde ya da M.Ö. 1000 civarında Çin Yellow Nehri'nde rastlansa da mühendislik uygulaması olarak değerlendirilebilecek ilk gabyon duvar tasarım ve uygulaması İtalya'da inşaat mühendisi Egidio Palvis (1880-1929) tarafından yapılmıştır. 1893'te İtalya Reno Nehri için yapılan duvar

hala sağlamlığını korumaktadır. İtalyanca ‘büyük kafes’ anlamına gelen Gabyon genel itibariyle, altıgen göz açıklığında yumuşak çelikten çift burgulu tel örgüyle imal edilmektedir (Uray ve Tan, 2015). Gabyon; dikdörtgen, kare ve silindir gibi geometrik şekillerde ya da çuval ve tel örgü şeklinde yapılarak içleri kaya ve taş ile doldurulmasıyla elde edilir. Bu duvarlarda duvar malzemesi olarak kullanılan büyük çaplı taş ve kayalar sayesinde genelde dayanma duvarlarında görülen drenaj problemiyle karşılaşılmaz. Esnek olduklarından farklı oturma görülebilecek zeminler için idealdir. Estetik açıdan peyzaj için uygundur. Şekil 7’de önden ve arkadan merdivenli iki tür gabyon gösterilmiştir.



Şekil 7. Gabyonlar a) önden merdivenli gabyon b) arkadan merdivenli gabyon (Birand, 2006).

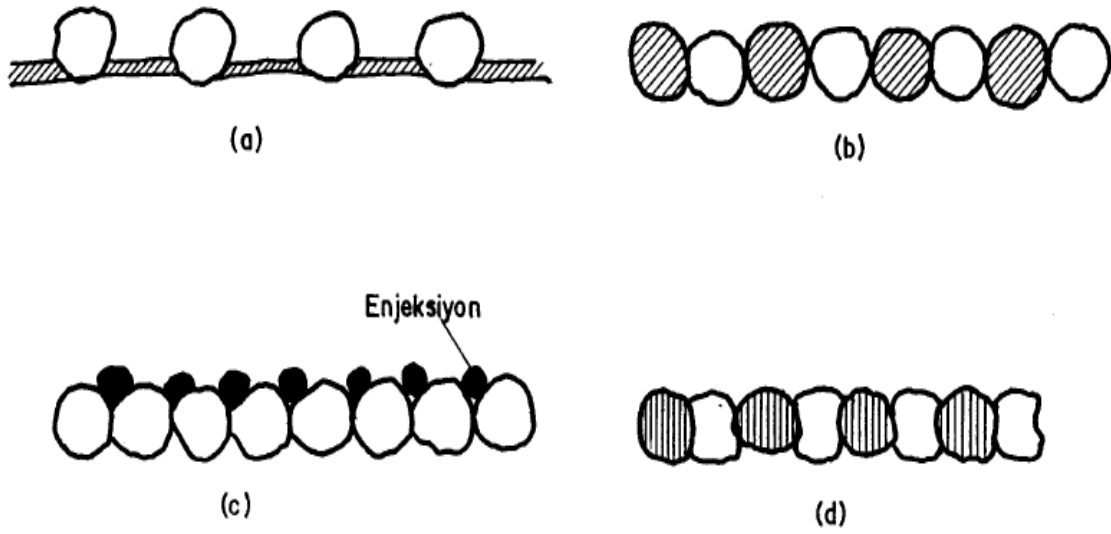
#### 1.4.2.6. Kazıklı Perdeler

Genelde fore kazık grupları sıra sıra dizilerek oluşturulan duvarlardır. Hemen her türlü zeminde kullanılabileceklerinden özellikle elverişsiz zeminler için tercih sebebidirler. Kazıklı perdeler bir binanın yapısal tasarımına dahil olabilir ve yatay toprak basınçlarının yanında düşey yüklemeleri de karşılayabilirler. Şekil 8’de gösterildiği gibi çeşitli şekillerde imal edilebilirler. İmal şekilleri şu şekilde özetlenebilir:

- Aralıklı kazıkla oluşturulan perdeler
- Teğet kazıklı perdeler

- Enjeksiyonlu teğet kazıklı perdeler
- Bindirmeli kazıklı perdeler

Aralıklı kazıklı oluşturulan perdelerde kazıklar arası aralıklar kazık çaplarından büyüktür. Suyu geçireceğinden yer altı su seviyesinin kazı derinliğinden aşağıda olduğu zaman ve toprağın boşluklardan taşmasını engellemek üzere aşırı konsolide ya da doğal çimentolaşmış zeminlerde uygulanabilirler (Clayton vd., 2014).



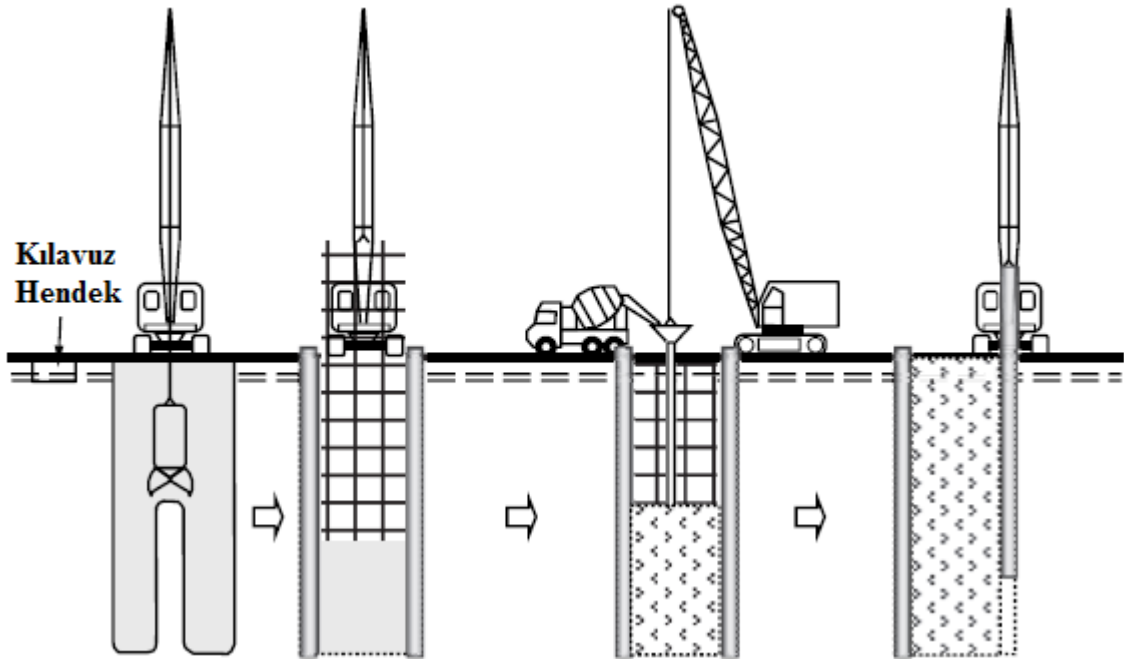
Şekil 8. Kazıklı perdeler a) aralıklı kazıklı oluşturulan perdeler b) teğet kazıklı perdeler c) enjeksiyonlu teğet kazıklı perdeler d) bindirmeli kazıklı perdeler (TS 7994, 1990).

Uygulamada en çok yer bulan yöntem olan teğet kazıklı perdelerde kazıklar yan yana dizilirler. Enjeksiyonlu teğet kazıklı perdelerde kazık birleşme noktaları enjeksiyonla tıkanarak yer altı suyu geçirimsizliği sağlanır. Bindirmeli kazıklı perdeler ise yüksek toprak basınçlı doygun zeminlerde kullanılırlar (TS 7994, 1990).

Yükün orantılı dağılımı için kazıklar, kazık başlık kirişi ile birbirlerine bağlanırlar. Zemin durumuna göre çeşitli (45-80 cm) kazık çapları kullanılabileceği gibi kazıklar istenen geometrik düzende yerleştirilebilirler.

### 1.4.2.7. Diyafram Duvarlar

Diyafram duvar zemin içerisinde paneller halindeki betonarme yapılardır. Yapımları için Şekil 9’da da gösterildiği gibi sıg derinlikte bir çift karşılıklı betonarme kılavuz duvar yapılır. Bu duvarlar kazıya kılavuzluk edecek, düzgün şekilde ilerlemesini sağlayacak ve hendeğin yüzeye yakın kısmının çökmesine engel olacak şekilde imal edilirler. Duvar olacak yerden bir makine ile dörtgenel bir zemin boşaltılır. Bentonitle doldurulan kazı çukuru desteklenerek zeminin çökmesi engellenir. Kafes halinde hazırlanmış demir donatı vinç yardımıyla indirildikten sonra beton dökülür. Nadiren de olsa prefabrik betonarme duvarlar da kullanılmaktadırlar. Diyafram duvarlar dayanma yapısı ya da yük taşıyıcı (baret kazık) olarak inşa edilebilir ve yeraltı yaya alt geçitleri, metro istasyonları, aç kapa tüneller, otoparklar, doklar (iki rıhtım arasında kalan gemilerin alındığı alan) ve su yapıları gibi yapılarda kullanılırlar (Clayton vd., 2014).



Şekil 9. Diyafram duvarların inşası (Clayton vd., 2014).

### 1.4.2.8. Palplanş Perdeleri

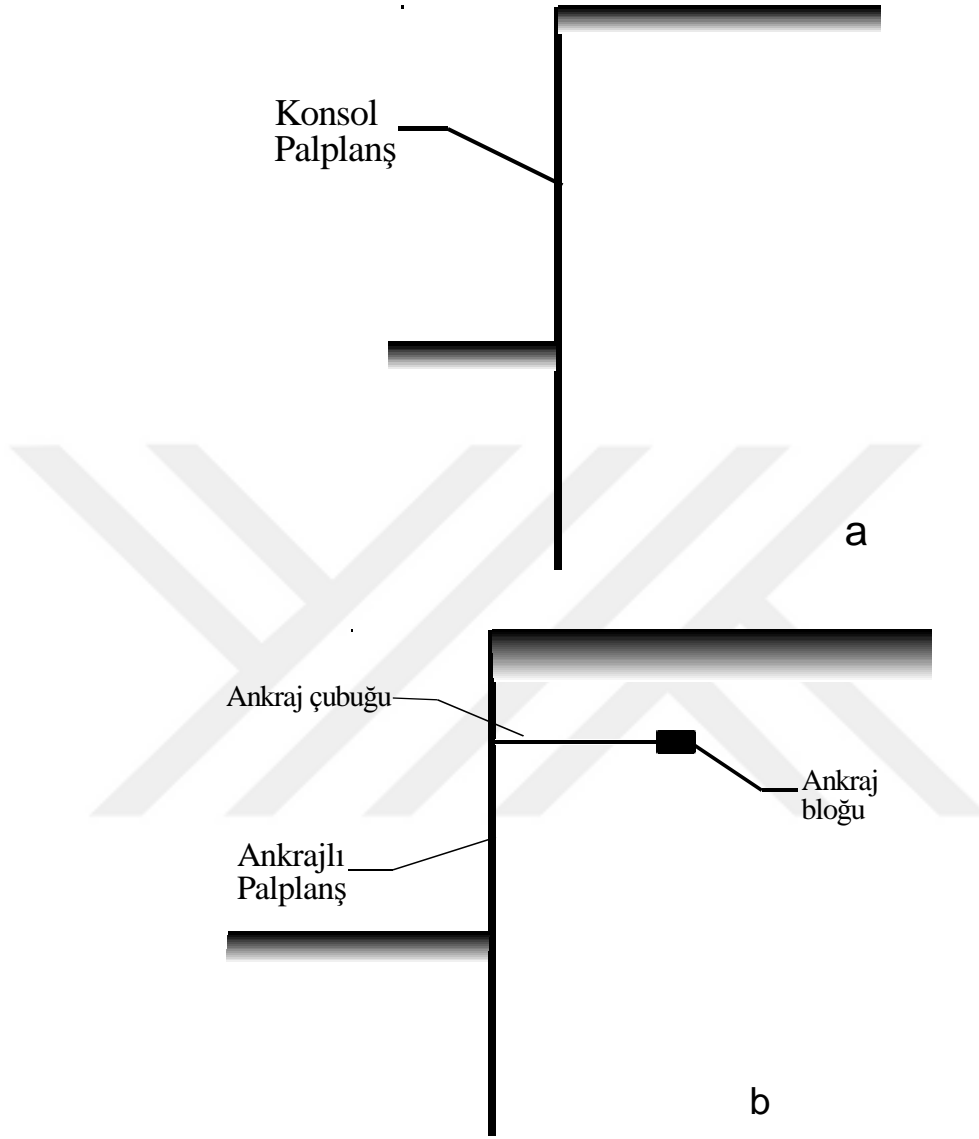
Ahşap, çelik ya da betonarme kazık türü elemanların zemine yan yana çakılarak oluşturduğu esnek dayanma duvarları palplanş perdeleri olarak ifade edilir. Bu perdeler sızdırmazlık özelliği taşıdığından genelde, kıyı yapılarında (rıhtım, iskele, dalgakıran vs.) ya da geçici işlerde (derin kazılarda kazı çukurunu tutma vs.) kullanılırlar. Geçici çalışmalardan sonra tekrar tekrar değerlendirilebilirler. Zeminin elverişsiz olduğu durumlarda da kullanıma uygundur.

Palplanş perdelerinin tamamen zemin içerisinde kalan kısmı inşa edildikten sonra sırtları doldurulabilir. Şekil 10'da gösterildiği gibi konsol ya da ankrajlı palplanş duvar olarak başlıca iki şekilde inşa edilebilirler. Konsol duvarlar denge için gereken kuvveti zemine gömülü kısımdan elde ederler. Ankrajlı duvarlar ise denge için gereken kuvveti hem gömülü kısım hem de duvarı toprağa bağlayan ankrajlardan elde ederler (Birand, 2006).

Konsol duvar alçak ve orta yükseklikteki (2-7 m) duvarlar için elverişlidir. 5 m'yi geçen yükseklikler için kullanılan ankrajlı duvarları sınıflandıracak olursak;

- Zemine yarı ankastre bağlı perde,
- Zemine tam ankastre perde olarak iki başlıkta toplayabiliriz (TS 7994, 1990).

Zemine yarı ankastre bağlı perde, çakma derinliği perdenin alt bölümünde hareketini tamamen önleyecek kadar yüksek olmayan palplanş duvarları ifade ederken, zemine tam ankastre perde ise çakma derinliğinin çevredeki zeminin perdeyi sabit tutacak kadar basınç uygulayabildiği şekilde olduğu palplanş duvarları ifade etmektedir.



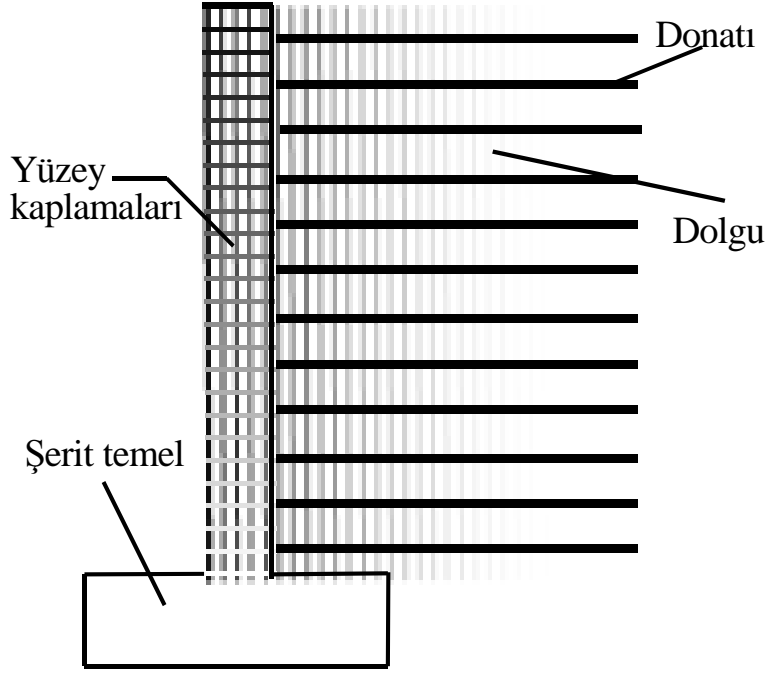
Şekil 10. Palplanş perdeler a) konsol palplanş b) ankrajlı palplanş

#### 1.4.2.9. Donatılı Zemin (Toprakarme) Dayanma Duvarları

Tarihte toprakarme dayanma duvarlarının ilk örneklerine; Mezopotamya’da Sümer, Babil ve Asur uygarlıklarının inşa ettiği, piramit şeklindeki tapınaklar olan ve en eskisi M.Ö. 4000 civarından kalma zigguratlarda rastlanmaktadır.

Modern anlamdaki donatılı zemin uygulamasının tarihi ise 1920’lerin sonlarında Coyne ve Munster’ın patentli sistemlerine uzanmaktadır. 1960’larda Vidal, beton yüzey ve çelik

şeritler içeren 'La Terre Armée' ya da 'Donatılı Zemin' olarak isimlendirdiği ve modern inşaat mühendisliği için bir başarı hikayesine dönüşen sistemi geliştirmiştir (Clayton vd., 2014).



Şekil 11. Donatılı zemin dayanma duvarları

Esnek dayanma yapılarından olan donatılı zemin dayanma duvarları, toprak içinde yatay sıra halinde çelik ya da geosentetik malzemeden donatının yüzeyde toprağı tutacak ve estetik görüntü kazandıracak plakalara monte edilmesiyle oluşurlar. Bu duvarlar üç temel bileşenden oluşur. Bunlar; iri taneli malzeme içeren dolgu, donatı elemanları ve yüzey kaplama elemanlarıdır.

Bu bileşenlerden kısaca bahsedecek olursak; öncelikle donatılacak zemin seçilirken zeminin iri taneli dolgunun ağırlıkça %10'unu geçmeyecek miktarda ince malzeme içermesine, bu malzemedeki kil yüzdesinin %10'u, likit limitin %45'i ve plastisite indisinin %20'yi geçmemesine dikkat edilmelidir. Kayma direnci açısı, toplam kesme kutusunda gerilme analizine göre 25°'den ve efektif gerilme analizine göre 20°'den büyük olmalıdır (TS 7994, 1990). Donatı olarak galvanize çelik, paslanmaz çelik, alüminyum gibi düz yüzeyli ya da

nervürlü şeritler ya da cam takviyeli plastik şeritler, plastik ızgaralar, plastik kaplı polyester lifler (geotekstil, geogrid vs.) kullanılmaktadır (TS 7994, 1990). Yüzey kaplamaları olarak genelde birbirine tam kenetlenerek zeminin taşmasına izin vermeyen prefabrik beton plaklar kullanılırken, galvanize çelik de kullanılabilir (Das, 2009).

Donatılı zeminler, yarma- dolgu desteklenmesinde, barajlarda, köprü kenar ayaklarında ve daha birçok alanda kullanılırlar.

### **1.4.3. Dayanma Duvarı Tasarımı**

Dayanma duvarı tasarımı için mühendisin tecrübelerine ve ön sezilerine ihtiyaç bulunmaktadır. Tasarım aşaması özetle beş kısımdan oluşmaktadır. İlk aşama uygun duvar tipinin seçilmesidir. İkinci aşama ise ön boyutlandırma. Üçüncü aşamada zeminin parametreleri belirlenmekte, dördüncü aşamada dış stabilite analizleri yapılmakta ve beşinci aşamada ise iç stabilite analizleriyle birlikte duvar özellikleri detaylandırılmaktadır (Clayton vd., 2014).

Seçilen duvar tipine göre ön tasarım için stabilite analizleri yapılarak tasarımın yeterliliği kontrol edilmektedir. Dayanma duvarlarının genel boyutları deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Eğer duvar güvenli görülmezse yeniden boyutlandırma yoluna gidilmektedir. Gereken tahkikler sonucu boyutlar yeterli ise konsol ya da payandalı duvarın tabanının kalınlığı gibi duvarın çeşitli parçaları için detaylı boyutlar hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalara kritik kesme kuvveti ve eğilme momenti hesapları da dahil edilmektedir. Boyutlar detaylı şekilde belirlendikten sonra donatı hesabına geçilmektedir.

Stabilite analizlerini yapabilmek için duvara etkiyen kuvvetlerin ve zemin parametrelerinin bilinmesi şarttır. Bu sebeple; temel zemini ve seçilecek ön ve arka dolgu özellikleri, yer altı suyu durumu, deprem durumu ve yapıya etkiyebilecek dış yüklerin önemi çok fazladır.



### 1.4.3.1. Dayanma Duvarı Ön Tasarımı

Ön tasarım başlıca iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi duvara gelecek yükü azaltmak üzere drenaj önlemleri almak ve ikincisi ön boyutlandırma yapmaktır (Clayton vd., 2014). Yapının diğer boyutlarına büyük oranda seçilen yüksekliğe göre karar verilmektedir.

Hidrostatik basınç dayanma duvarı açısından tehlike arz edeceğinden çeşitli yöntemlerle drene edilmesi gerekmektedir (Altay Birand, 2006).

Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

- Kil dolgunun altına geçirimli malzeme yerleştirilerek drenaj sağlanması
- Dayanma duvarı dolguları çakıl, kum gibi iri taneli malzemelerden seçilerek drenaj sağlanması
- Gövde üzerinde yatayda ve düşeyde 1-2 m aralıklarla 0,1 – 0,2 metre çaplarında drenaj delikleri (güvercin delikleri, barbakan) yapılması
- Duvar ve dolgunun üst yüzeyine gelecek yağmur sularının duvar arkasına sızmasını engellemek üzere dolgu yüzeyine geçirimsiz bir tabaka yerleştirilmesi
- Duvar arkasına suyu toplayıp uzaklaştıracak dren boruları inşa edilmesi
- Drenaj deliklerinde, suyun giriş yerlerinde iri taneli zeminle ya da geosentetik malzemelerle dolgudan ayrılarak filtreler oluşturulması

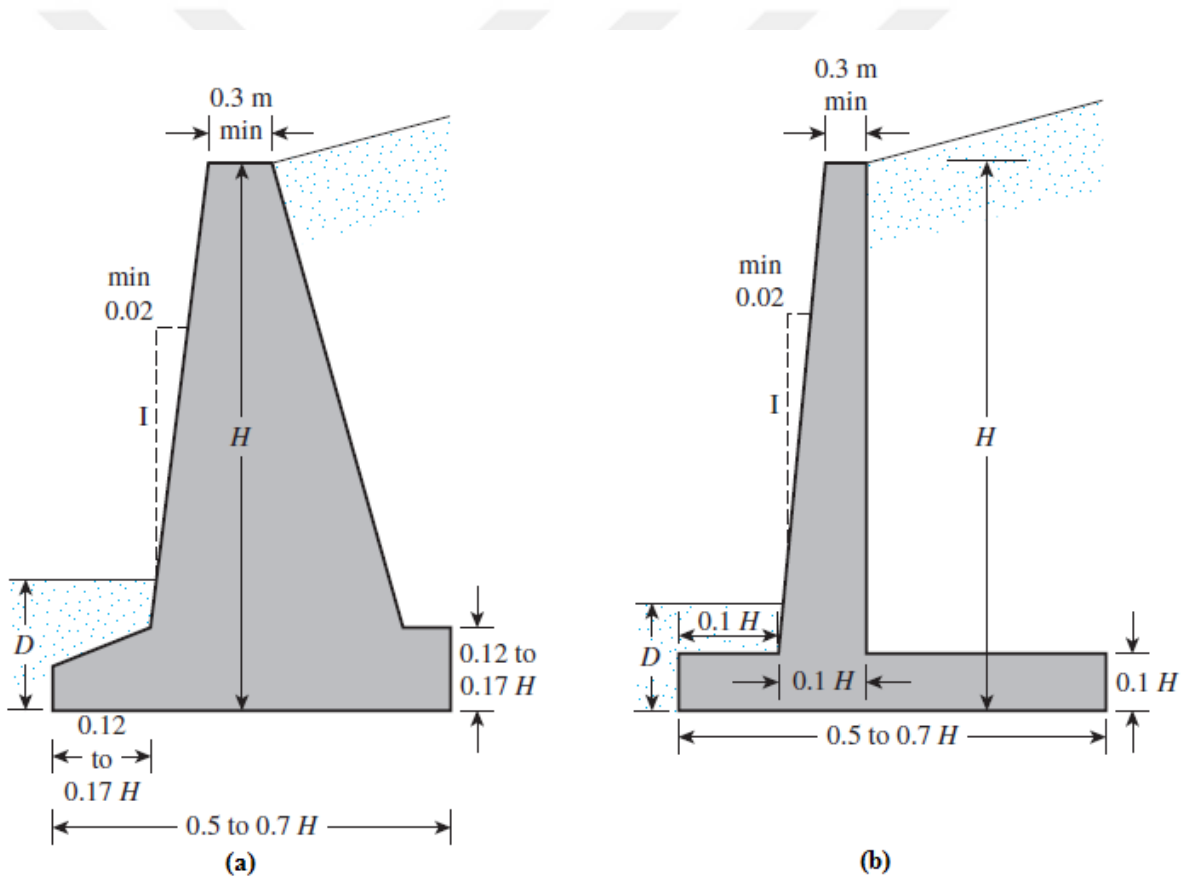
Bahsedildiği gibi, üzerine etkiyen kuvvetleri ağırlıkları ile karşılayan ağırlık dayanma duvarları için malzeme seçimi yapmak gerekmektedir. Duvar tipi ve geometrisine karar verildikten sonra boyutlandırmaya başlanabilir. Şekil 12’de ağırlık dayanma duvarı boyutları ve konsol dayanma duvarı için yaklaşık boyutlara birer örnek gösterilmiştir.

Konsol dayanma duvarlarında, ağırlık dayanma duvarları için yapılan tahkiklerin (kayma, devrilme, taban basıncı, toptan göçme, oturma) yanında ince gövdesindeki eğilme ve kesme dayanımlarını belirlemek üzere betonarme hesabı da yapılması gerekmektedir.

Konsol dayanma duvarlarının kalınlığı, TS 7994 (1990)’e göre minimum 30 cm olmalıdır. Taban genişliği ( $B$ ), duvar yüksekliğine göre  $0,5 H$  civarı seçilebilmekte buna göre ön ampatman genişliği ise  $B/3$  civarı yapılabilmektedir. Gövde ve tabanın birleşim yerlerinde geniş giriş – kolon birleşiminden dolayı dayanımın düşmesini engellemek üzere gövde ve taban kalınlıkları yeterli olacak şekilde seçilmelidir. Betonarme konsol dayanma duvarları, yanal

basınçlardan dolayı gövdelerinde oluşan kesme kuvvetleri ve eğilme momentlerine karşı dayanıklı olmalıdır (Bowles, 2001). Duvarın arka yüzünde, gövdede eğilmeye karşı çalışan donatılar için TS 500 (2000) yönetmeliğine göre minimum 50 mm beton örtüsü bırakılmalıdır.

Konsol dayanma duvarlarında kaymaya karşı güvenliği artırmak üzere yapılan dişin yeri için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Diş önündeki pasif basınçtan maksimum verim alınması hedeflenmektedir. Bu sebeple diş genelde, duvarın ön yüzündeki zeminin zamanla yer değiştireceği ihtimali düşünülerek duvarın ön yüzüne yakın yerleştirilmemektedir.



Şekil 12. Dayanma duvarı ön tasarımı a) ağırlık dayanma duvarı boyutları için yaklaşık boyutlar b) konsol dayanma duvarı için yaklaşık boyutlar (Das, 2009).

### 1.4.3.2. Dayanma Duvarına Etkiyen Kuvvetler

Bir yapının tasarımı, inşası ve bakımı için aşağıda verilen şartların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

- Yapı, gerekli hizmet koşullarını temin ederken sağlam ve uygun maliyetli olmalıdır.
- Yapı, inşası ya da kullanımı sırasında gerçekleşen çeşitli olaylar (kazaen darbe alma vs.) sonrasında da ayakta kalabilmelidir.
- Belirli bir süre yapının yapısal performansı yeterli kalabilmelidir.
- Bir yapının dış etkiler (patlamalar, insan...) karşısında hassaslık göstermemesi gerekmektedir (Clayton vd., 2014).

Bir dayanma duvarı tasarımı için duvara etkiyen yatay ve düşey yöndeki kuvvetlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu kuvvetler, duvarın kendi ağırlığı, aktif toprak basıncı, pasif toprak basıncı, duvar önündeki toprak basıncı, suların yapacağı basınçlar, deprem tesiri, don tesiri, üst yük (sürşarj) etkisi olarak özetlenebilir. Duvarın kendi ağırlığı, daha önceden de bahsedildiği gibi özellikle ağırlık dayanma duvarları için yanal itkileri karşılamak için en önemli kuvvettir. Dayanma duvarının tabanı ve zemin arasındaki sürtünme kuvveti yanal itkiye ters yönde etkiyerek yanal basıncı dengelemektedir. Zemin ortamının yanal olarak genişlemesine izin verilmesi ile zeminde aktif durum oluşur ve duvara aktif duvar basıncı etkir. Pasif toprak basıncı ise zeminin sıkışmaya tabi tutulması ile oluşan pasif durumda duvara etkiyen yanal toprak basıncıdır. Duvarın önündeki toprak basıncı, duvarın önünü dolduran toprağın, duvar öne doğru gittiğinde taban üzerinde oluşturacağı pasif basınçtır. Suların yapacağı basınçlar, dayanma duvarının arkasında bulunan suyun (yüzey suları, yer altı suyu) duvara uyguladığı hidrostatik basınç ve zemin tanelerini yüzdürme kuvvetidir. Pek çok duvar göçmesi olayı bu hidrostatik basıncın kuvvetler dengesi hesabı yapılırken dikkate alınamaması sebebiyle gerçekleşmektedir. Deprem tesiri, sismik etkilerden dolayı oluşan yatay ivmenin dayanma duvarında meydana getirdiği ani yanal basınçlardır. Don tesiri, soğuk mevsimlerde zeminde oluşan buz mercleklerinin sıcak mevsimlerde eriyerek oluşturduğu basınçtır. Bir diğer kuvvet üst yük (sürşarj) etkisi ise, duvar arkasındaki dış yüklerden kaynaklı oluşmaktadır (Alkaya, 2008).

### 1.4.3.3. Yanal Toprak Basıncı Teorileri

Dayanma duvarı tasarımı yapabilmek için duvara etkiyen yanal itkilerin hesaplanması gerekmektedir. Bu konuda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları Coulomb (Kama) Teorisi ve Rankine Teorisi'dir.

Zemin mekaniği adına modern anlamda ilk bilimsel çalışmanın sahibi, Fransız fizikçi Charles-Augustin de Coulomb olarak kabul edilmektedir. Fizikte Coulomb Kanunu olarak kabul edilen matematiksel formülasyon da kendisine aittir. Elektrik alanındaki çalışmalarından dolayı, elektrik yük miktarı birimi 'coulomb' olarak adlandırılmıştır (URL-1, 2020).

Coulomb, yatay toprak basıncı adına 1776'da yaptığı çalışmalara göre temelle duvar arkasındaki zemin kütlesini bir kama olarak ele almıştır. Coulomb'a göre zemini destekleyen duvar bir miktar ileri doğru hareket ederse duvar ve şev yüzeyi arasında bir kayma düzlemi oluşacaktır. Duvar arkasında kayan kütle üçgen biçimindedir. Coulomb kırılma düzleminin eğrisel olduğunu fark etse de matematiksel hesaplarda kolaylık adına düz olduğunu kabul etmiştir. Bu kabul aktif basınç için doğru sonuçlar verse de pasif yanal basınç adına önemli hatalara sebep olmaktadır. Yine de bu teori yanal toprak basıncı için birkaç istisna hariç temel noktaları ile geçerli olmakla birlikte dayanma duvarı tasarımı için hala önemini korumaktadır. Poncelet (1840) "Memoiré sur la stabilité des revétements et de leurs fondations" adlı kitabıyla, Culmann (1866) "Die graphische Statik" adlı kitabıyla, Rebhann (1871) "Theorie des erddruckes und der futtermauern" adlı kitabıyla ve Engesser (1880) "Geometrische Erddrucktheorie" adlı makalesiyle bu teorinin ilerlemesine katkıda bulunan başlıca bilim insanlarıdır (Venkatramaiah, 1995).

Termodinamiğin kurucularından sayılan İskoç fizikçi ve mühendis William John Macquorn Rankine, buharlı makineler için geliştirdiği teorilerle bilinmektedir. Zemin mekaniği adına önemli çalışmaları olan Rankine, Coulomb'dan neredeyse bir yüzyıl sonra (1857) yanal toprak basıncı hesabı konusunda biraz daha farklı ve pratik bir bakış açısı ortaya koymuştur. Rankine, zeminin plastik denge durumunda olduğunu göz önüne alarak Coulomb ile benzer varsayımlarda bulunmuştur. Ancak Rankine, Coulomb'dan farklı olarak teorisini kohezyonsuz zemin üzerine geliştirmiş ve zeminle duvar arasındaki sürtünme açısını sıfır kabul etmiştir.

### 1.4.3.3.1. Elastik ve Plastik Denge Durumu

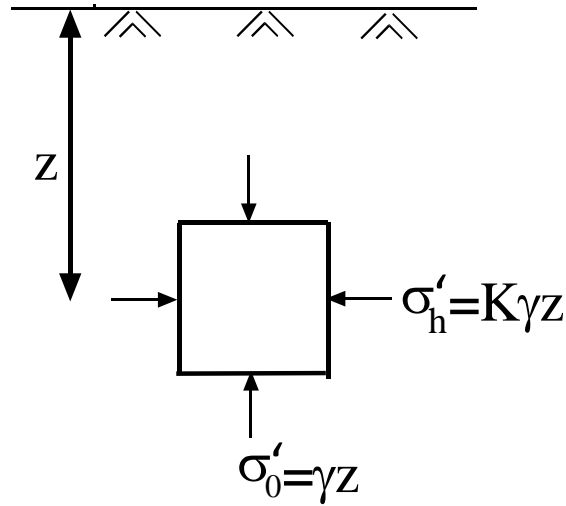
Zeminin yanal basıncının bağlı olduğu bir diğer etmen de zeminin denge durumudur. Zemin Şekil 13'te gösterildiği gibi yarım sonsuz bir ortamda teorik olarak iki denge durumunda olabilir, plastik denge ve elastik denge.

Plastik denge, zeminin her noktasında kırılma olması durumudur. Zeminin deformasyona uğramamış olması durumuna ise elastik denge denilir (Uzuner, 2014).

Şekil 13'te gösterildiği üzere iki boyutlu koşullarda, yarım sonsuz ortamda,  $z$  derinliğindeki bir elemana asal gerilmeler etki etmektedir. Bu durumda zeminin yatay efektif gerilme ( $\sigma'_h$ ) ve düşey efektif gerilmesi ( $\sigma'_0$ ) arasındaki oran Terzaghi tarafından;

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_0} \quad (1)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada,  $K$  toprak basıncı katsayısıdır (Clayton vd., 2014).



Şekil 13. Yarım sonsuz ortamda  $z$  derinliğindeki bir eleman

Zeminde dayanma duvarı ile alakalı üç muhtemel durum meydana gelebilmektedir. Bu durumlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Birinci duruma göre; eğer duvar başlangıç pozisyonunu koruyor, şekil 14'teki AB doğrusu sabit kalıyor, sağa sola hiç hareket etmiyor, zemin kütlelerinde hiçbir deformasyon meydana gelmiyorsa zemin elastik denge durumundadır.

Zeminin toprak basıncı ise sükûnet durumundaki toprak basıncı olarak adlandırılmaktadır. Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı ( $K_0$ ) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$K_0 = \left[ \frac{\sigma'_h}{\sigma'_{v0}} \right]_{sükunet} \quad (2)$$

İri taneli zeminler için sükûnet durumundaki toprak basıncı katsayısı ise şu şekilde ifade edilebilir (Jaky, 1944):

$$K_0 = 1 - \sin \Phi' \quad (3)$$

Burada,  $\Phi'$  efektif kayma mukavemeti açısıdır.

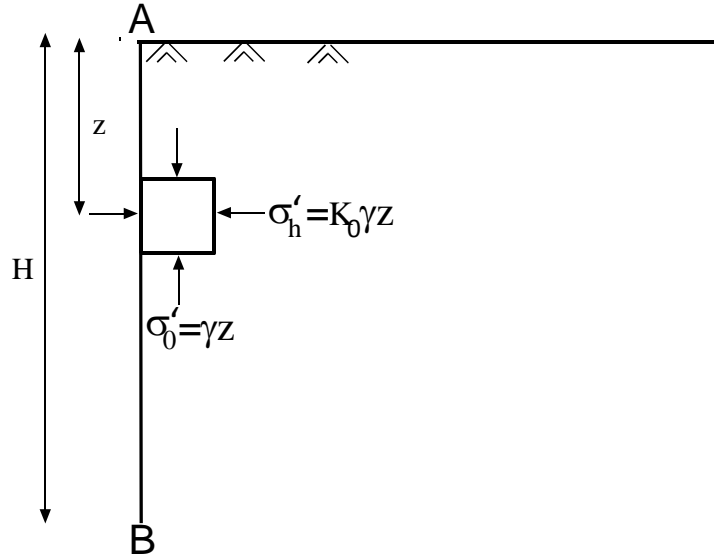
Ancak bu bağıntı gevşek kumlar için başarılı olsa da Sherif, vd. (1984) sıkı kumlar için, bağıntıyı,

$$K_0 = 1 - \sin \Phi' + \left[ \frac{\gamma_k}{\gamma_{kmin}} - 1 \right] 5,5 \quad (4)$$

şeklinde değiştirmişlerdir. Burada;

$\gamma_k$  : Dolgunun kuru birim hacim ağırlığı

$\gamma_{kmin}$  : Dolgunun minimum kuru birim hacim ağırlığıdır.



Şekil 14. Zeminde sükûnet durumu

Sükûnet durumundaki toprak basıncı katsayısındaki bu artışın sebebi aşırı konsolidasyondur. Bu sebeple Mayne and Kulhawy (1982), 171 farklı zemini değerlendirerek aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$K_0 = 1 - \sin \Phi' (OCR)^{\sin \Phi'} \quad (5)$$

Burada OCR aşırı konsolidasyon oranını ifade etmektedir. Zemin geçmişte üzerindeki mevcut gerilmeden daha yüksek gerilmelere, bir ön konsolidasyon basıncına, maruz kaldıysa o zemine aşırı konsolide zemin denilmektedir.

Sükûnet durumunda zemine etkileyen yanal toprak basıncı ise eşitlik 6'da verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$P_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H'^2 \quad (6)$$

Burada;

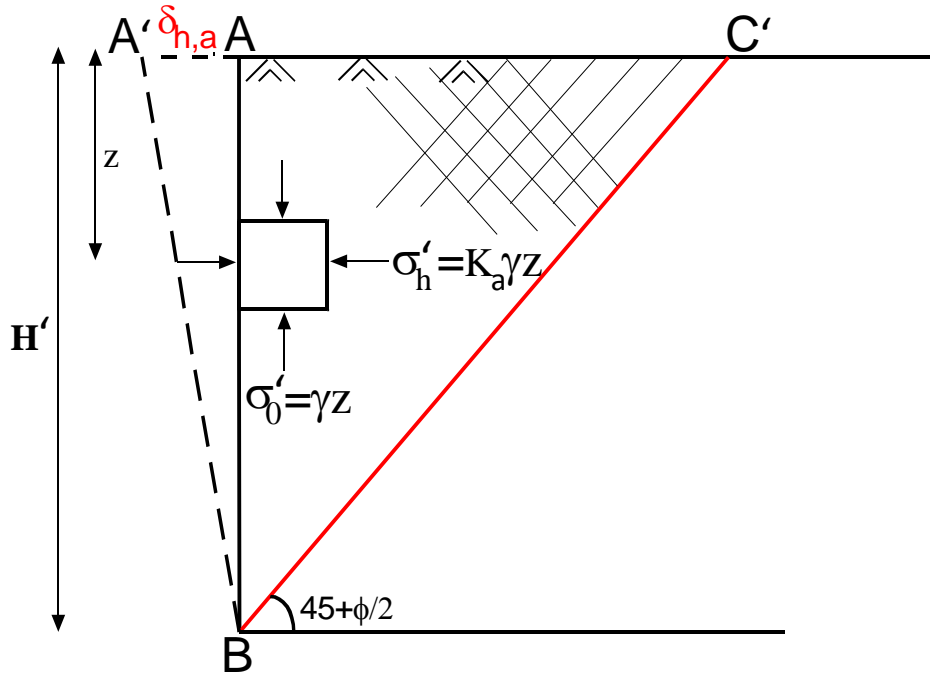
$\gamma$  : Dolgunun (zeminin) birim hacim ağırlığı

$H'$  : Dolgu yüksekliğidir.

İkinci durumda, sürtünmesiz duvar şekil 15'teki B ucu etrafında bir miktar dönerek A'B haline geliyorsa duvar arkasındaki zeminde oluşan ABC' üçgensel zemin kitlesi plastik denge durumuna gelerek aşağı doğru kayar. Bu durumda yatay efektif gerilme ( $\sigma'_h = \sigma'_a$ ) aktif basınç olarak adlandırılır. Aktif toprak basıncı katsayısı ( $K_a$ ),

$$K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_0} \quad (7)$$

olarak ifade edilmektedir.



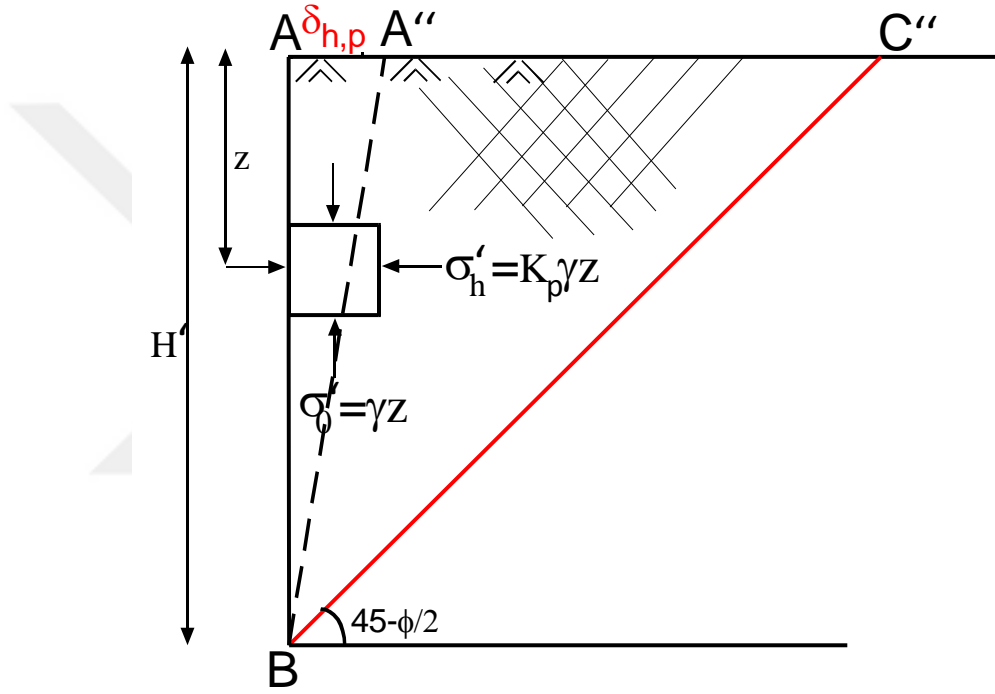
Şekil 15. Aktif durumdaki zemin

Üçüncü durumda ise, sürtünmesiz duvar şekildeki B ucu etrafında bir miktar dönerek A''B haline geliyorsa duvar arkası zeminde oluşan ABC'' üçgensel zemin kitlesi plastik denge durumuna gelerek yukarı doğru kayar. Bu durumda yatay efektif gerilme ( $\sigma'_h = \sigma'_p$ ) pasif basınç olarak adlandırılır. Pasif toprak basıncı katsayısı ( $K_p$ ),



$$K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \quad (8)$$

olarak ifade edilmektedir.



Şekil 16. Pasif durumdaki zemin

#### 1.4.3.3.2. Rankine Toprak Basıncı Teorisi

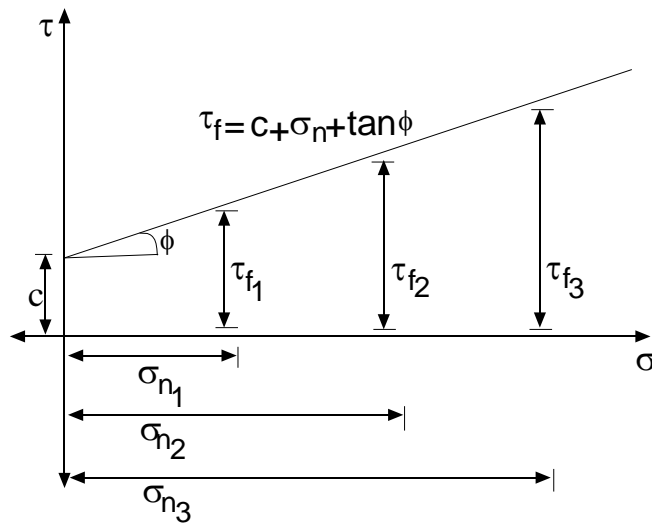
1857'de yayınladığı makalesiyle William John Macquorn Rankine, zemini plastik durumda ele alarak temelde Coulomb ile benzer kabulleri yapmış yalnızca duvar sürtünmesini ve zemindeki kohezyonu yok saymıştır. Kohezyonsuz olarak açıkladığı teorisini daha sonra her iki zemin türü için genelleştirmiştir.

Zeminin kendi kütlesi ve bazen de ilave yüklerle yüklenmesi, zeminde kayma gerilmelerine sebep olmakta ve bu gerilmeler zeminin kayma dayanımını aşacak büyüklüğe eriştiğinde zemin kitlesinde kırılma meydana gelmektedir.

Coulomb, yanal basınçlar üzerine yaptığı çalışmalarla kayma dayanımını ( $\tau_f$ ), normal gerilme ( $\sigma$ ), kayma mukavemeti açısı ( $\Phi$ ) ve kohezyonla ( $c$ ) ilişkilendirmiştir ve bu ilişkiyi eşitlik 9'daki gibi açıklamıştır.

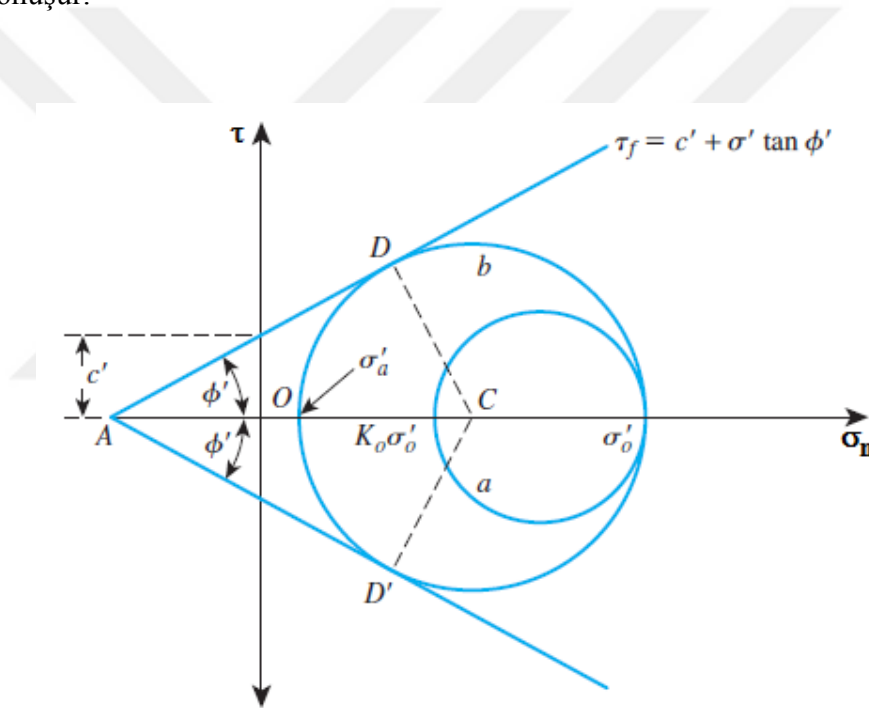
$$\tau_f = \sigma \tan \Phi + c \quad (9)$$

'Kayma gerilmesi, kayma düzlemi üzerinde normal gerilmenin belli bir değerine ulaşırsa kırılma meydana gelir' şeklindeki kriteri ortaya koyan Otto Mohr ise kırılma anındaki asal gerilmelerin bilinmesiyle zemin üzerinde tekrarlı deneylerle Mohr dairelerini çizilmiştir. Mohr daireleri kırılma anında çizilmiş olduklarından bunlara teğet çizilen doğru kırılma doğrusudur. Coulomb (1776)'un ve Mohr (1900)'un geliştirdiği iki teorinin birleştirilmesiyle ortaya Mohr-Coulomb kırılma hipotezi çıkmıştır. Böylece Mohr'un kırılma doğrusu üzerinde Coulomb'un kayma dayanımı denklemi yazılmıştır. Şekil 17'de Mohr-Coulomb kırılma hipotezi  $\sigma$ - $\tau$  eksen takımında gösterilmiştir (Holtz ve Kovacs, 1981).



Şekil 17. Mohr-Coloumb kırılma hipotezi

Şekil 18’de, zeminin z derinliğinde yatay ve düşey kayma gerilmeleri sıfır olan şekil 13’teki elemanın elastik ve plastik dengedeki durumları Mohr daireleri üzerinde gösterilmiştir. Şekil 18’deki kırılma doğrusuna değmeyen a dairesi sükûnet halindeki zeminin, kırılma doğrusuna değen b dairesi de aktif durumdaki zeminin gerilme koşullarını göstermektedir. Zemin elemanına etkiyen düşey gerilme sabit kalırken, yatay gerilmenin değeri sabit değere varıncaya dek azalır ve zemin yatayla  $45 + (\Phi/2)^\circ$ ’lik açılarla kırılır. Böylece gerilme dairesi a, b’ye dönüşür.



Şekil 18. Bir noktadaki bir düzlemden sükûnet durumunda ve aktif durumda gerilme daireleri (Das, 2009).

Kırılma anındaki zemini ifade etmek üzere Mohr dairesi üzerinde asal gerilmelerin  $(\sigma_3, \sigma_1)$ , sırasıyla yatay  $(\sigma'_a)$  ve düşey  $(\sigma'_o)$  basınçları ifade ettiği aşağıdaki bağıntı ortaya çıkmıştır.

$$\sigma_3' = \sigma_1' \tan^2 \left( 45 - \frac{\Phi'}{2} \right) - 2c \tan \left( 45 - \frac{\Phi'}{2} \right) \quad (10)$$

Bu ifade kohezyonsuz zeminler için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

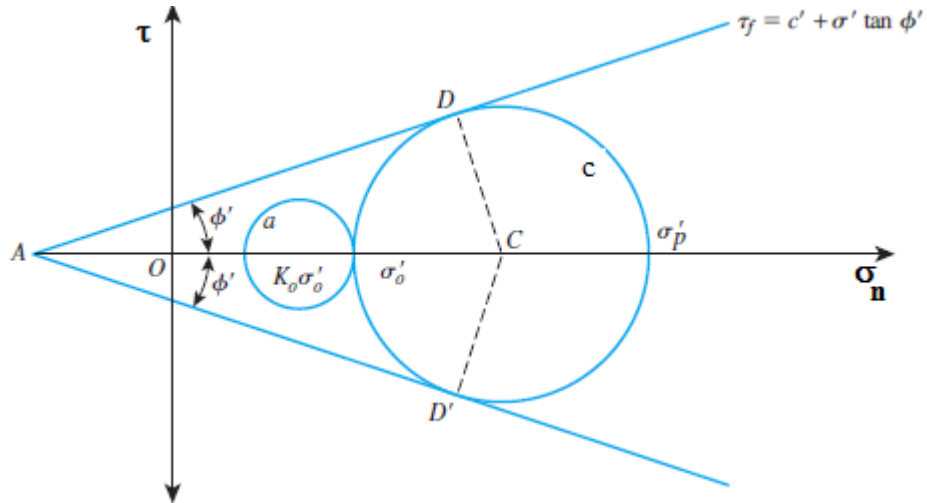
$$\sigma_3' = \sigma_1' \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (11)$$

Bu durumda aktif toprak basıncı katsayısı;

$$K_a = \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (12)$$

olarak hesaplanmaktadır (Das, 2009).

Yine benzer şekilde Şekil 19'da zeminin elastik ve plastik dengede gösterildiği Mohr gerilme dairelerinde a dairesi sükûnet durumundaki, kırılma doğrusuna değen c dairesi zeminin pasif durumdaki gerilme koşullarını göstermektedir. Bu sefer zemin elemanına etkiyen düşey gerilme sabit kalırken, yatay gerilmenin değeri sabit değere varıncaya dek artar ve zemin yatayla  $45 - (\phi'/2)^\circ$ 'lik açılarla kırılır. Böylece gerilme dairesi a, c'ye dönüşür.



Şekil 19. Bir noktadaki bir düzlemde sükûnet durumunda ve pasif durumda gerilme daireleri (Das, 2009).

Yine benzer şekilde asal gerilmeleri Mohr dairesindeki durumlarına göre eşitlik 13'te verilmiş olan bağıntıyla ifade etmek mümkündür.

$$\sigma_3' = \sigma_1' \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (13)$$

İfade kohezyonsuz zeminler için,

$$\sigma_3' = \sigma_1' \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (14)$$

halini almaktadır. Bu durumda pasif toprak basıncı katsayısı:

$$K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (15)$$

olmaktadır. Bu durumda  $H'$  dolgu yüksekliğindeki duvara birim uzunlukta etkiyen toplam aktif itki (bileşke kuvvet)  $P_a$ :

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H'^2 K_a \quad (16)$$

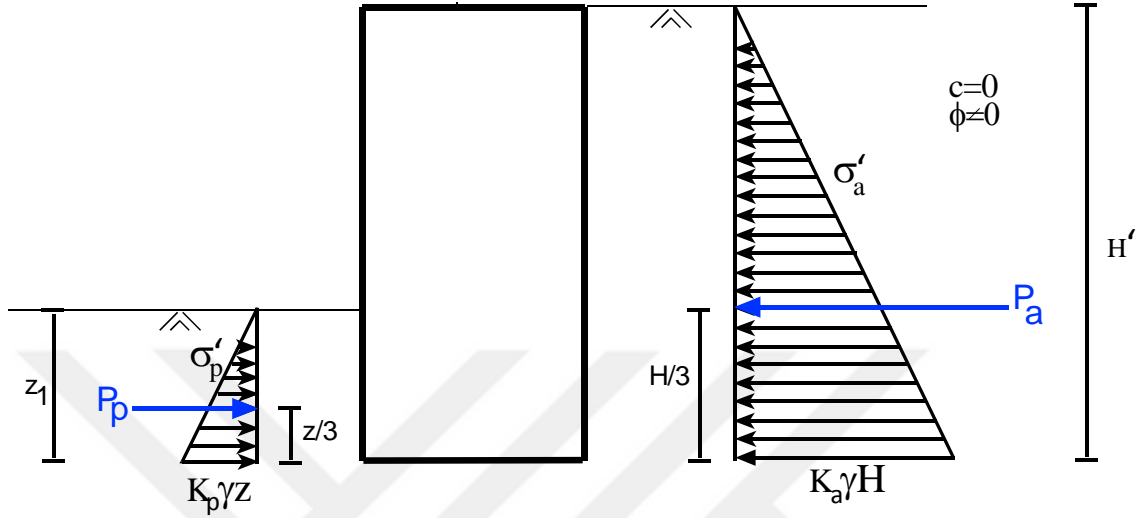
olarak elde edilmektedir. Yine  $H'$  dolgu yüksekliğindeki duvara birim uzunlukta etkiyen toplam pasif itki (bileşke kuvvet)  $P_p$ :

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H'^2 K_p \quad (17)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Rankine teorisine göre aktif ve pasif yanal basınç dağılımları zemin, duvar ve sürşarj yükü durumuna göre şekillenmektedir.

- Duvar arkasında kohezyonsuz tek zemin olma durumunda aktif ve yanal basınç dağılımları üçgen şeklinde olup Şekil 20'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 20. Tek zemin durumunda aktif ve pasif yanal basınçlar

Aktif toprak basıncı katsayısı bağıntısı eşitlik 18'de ifade edildiği gibidir.

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (18)$$

Derinlikle doğru orantılı olarak artan aktif yanal basıncın  $H'$  derinliğindeki değeri ise,

$$\sigma'_a = K_a \gamma H' \quad (19)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Pasif toprak basıncı katsayısı,

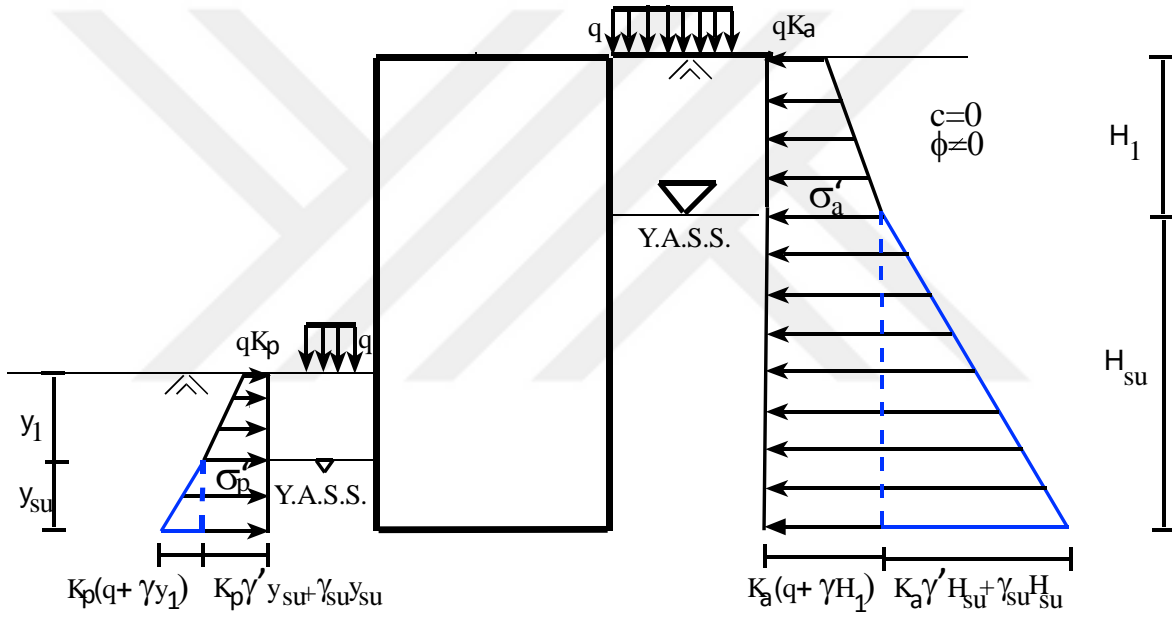
$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (20)$$

ve pasif yanal basınç,

$$\sigma'_p = K_p \gamma z_1 \quad (21)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada  $z_1$ , duvarın önündeki dolgu yüksekliğidir.

- Duvar arkasında kohezyonsuz zemin üzerinde sürşarj yükü ( $q$ ) ve zemin yüzeyinden altta  $H_{su}$  yüksekliğinde yer altı suyu olma durumunda aktif ve pasif yanal basınç dağılımları Şekil 21'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 21. Kohezyonsuz zeminde yer altı suyu ve üzerinde sürşarj yükü olma durumu

Aktif toprak basıncı katsayısı eşitlik 18'de verildiği gibidir.

Derinlikle doğru orantılı olarak artan aktif yanal basıncın zeminin en üst yüzündeki değeri bu kez görüldüğü üzere sıfırdan farklıdır. Burada,

$$\sigma'_0 = q \quad (22)$$

olduğundan aktif yanal basınç,

$$\sigma'_a = K_a q \quad (23)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Şekil 21'de görüldüğü üzere aktif durumun oluştuğu kısımda yer altı suyu üst yüzünden zemine kadar olan yükseklik  $H_1$  olarak, yer altı suyu yüksekliği ise  $H_{su}$  olarak ifade edilmiştir. Aktif yanal basıncın ( $H_1 + H_{su}$ ) derinliğindeki değerini bulmak üzere basınca bir de yer altı suyunun sebep olduğu hidrostatik basınç da eklenirse bağıntı,

$$\sigma'_a = K_a (q + \gamma' H_{su} + \gamma_n H_1) \quad (24)$$

şeklini almaktadır.

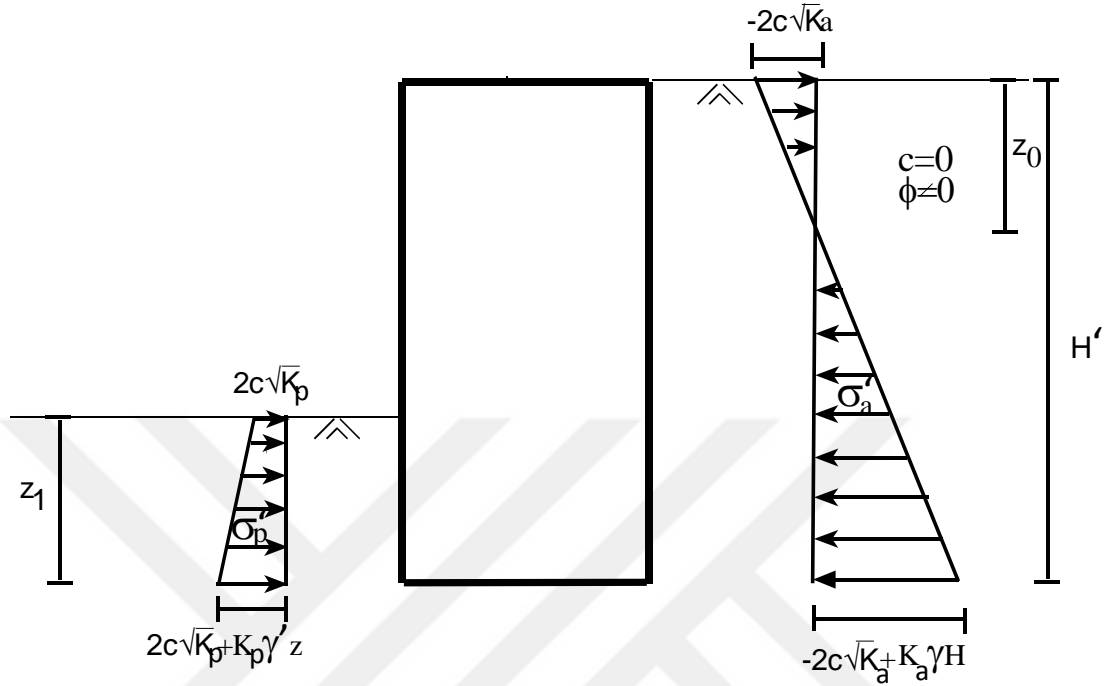
Pasif toprak basıncı katsayısı da eşitlik 20'de verildiği gibidir ve pasif yanal basınç benzer şekilde,

$$\sigma'_p = K_p (q + \gamma' y_{su} + \gamma_n y_1) \quad (25)$$

olarak ifade edilmektedir. Yine  $y_{su}$  pasif durumun oluştuğu kısımdaki yer altı suyu yüksekliği iken,  $y_1$  pasif durumun oluştuğu kısımda yer altı suyu üst yüzünden zemine kadar olan yüksekliktir.

- Duvar arkasında kohezyonlu zemin olması durumunda aktif ve yanal basınç dağılımları Şekil 22'deki gibi gösterilmektedir. Görüldüğü üzere kohezyon sebebiyle zeminin üst kısmında teorik olarak bir çekme gerilmesi oluşmaktadır.





Şekil 22. Kohezyonlu zemin durumu

$K_a$  yine eşitlik 18’de verildiği gibi hesaplanırken, aktif yanal basınç hesabı için daha önce ihmal ettiğimiz kohezyon eşitlik 26’da olduğu olduğu gibi denklemde yerini almaktadır.

$$\sigma'_a = K_a \gamma H' - 2c\sqrt{K_a} \quad (26)$$

$K_p$  yine eşitlik 20’de verildiği gibi hesaplanırken, eşitlik 27’de gösterildiği üzere pasif yanal basınç hesabında bu sefer kohezyon pozitif bir etki oluşturmaktadır.

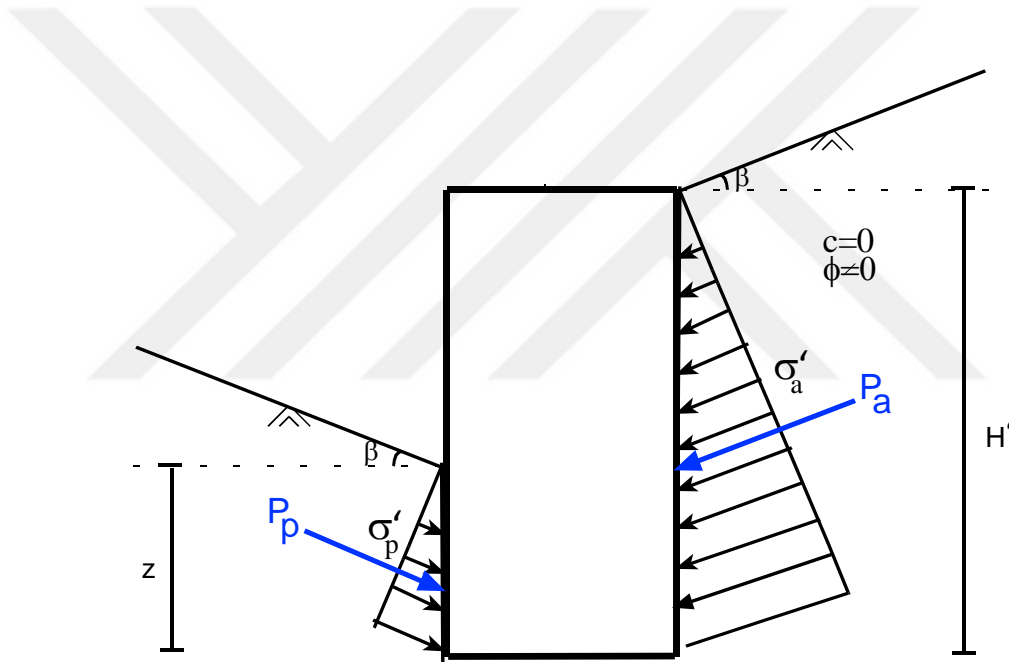
$$\sigma'_p = K_p \gamma z_1 + 2c\sqrt{K_p} \quad (27)$$

- Şekil 23’te gösterilen, zemin yüzünün eğik olduğu durumda duvar arkasına gelen yanal basınç zemin yüzüne paralel olmaktadır. Bu durumdaki aktif ve pasif yanal basınç katsayıları  $K_a$  ve  $K_p$  sırasıyla eşitlik 28 ve 29’da belirtildiği gibidir.

$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\phi)}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\phi)}} \quad (28)$$

$$K_p = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\phi)}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\phi)}} \quad (29)$$

Bu durumda aktif ve yanal basınçlar ise yine eşitlik 19 ve 21'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada  $\beta$ , arka dolgunun yatayla yaptığı açıdır.



Şekil 23. Zemin yüzünün eğik olduğu durum

#### 1.4.3.3 Coulomb Toprak Basıncı Teorisi (1776)

Coloumb'un 1776'da yayınlanan "Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture" adlı eseri yanal basınç teorileri ile ilgili başarılı bir çalışmadır.

Coulomb teorisinin geçerliliği adına Rankine'in de birçoğunu temel aldığı bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller kısaca şöyle özetlenebilir:

- Tutulmak üzere tasarlanan zemin izotrop ve homojendir. Kohezyon, kayma mukavemeti açısı ve birim hacim ağırlık zeminin her yerinde aynıdır.
- Duvar arkasında yatay halde tabakalar halinde birden fazla zemin olabilir.
- Kırılma yüzeyi ve duvar arkası zemin yüzeyi düzlemseldir.
- Sürtünme kuvvetleri kayma düzlemi boyunca uniform bir şekilde dağılmıştır.
- Üçgen kaması rijit bir kitledir.
- Duvar arkasında sürtünme vardır.
- Kırılma bir düzlem şekil değiştirme problem olduğundan sonsuz uzunlukta kabul edilen duvarın bir kısmı (bir birim) göz önüne alınabilir (Bowles, 2001).

Duvar arkasında oluşan üçgen kamaya etkiyen kuvvetler şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Üçgen kamanın kendi ağırlığı ( $W$ )
- Kayma düzlemine etkiyen normal ve kayma kuvvetlerinin bileşkesi ( $F$ ).
- Zemin kitlesinin birim uzunlukta oluşturduğu aktif yanal zemin itkisi ( $P_a$ ).

Şekil 24'te gösterildiği gibi; bileşke kuvvet ( $F$ ), kayma düzleminin normaliyle  $\Phi'$  kadarlık bir açıyla, aktif yanal zemin itkisi ( $P_a$ ) ise duvarın zemini desteklediği yüzünün normaliyle  $\delta$  kadarlık bir açıyla etkimektedir.

Burada;  $\delta$  zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısıdır.

$P_a$ , aktif yanal basınç bu kuvvetler neticesinde:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H'^2 K_a \quad (30)$$

şeklinde ifade edilir. Aktif yanal basınç katsayısının formülü ise eşitlik 31'de verildiği gibidir.

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \Phi')}{\sin^2(\alpha) \sin^2(\alpha - \delta) + \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\Phi' + \delta) \sin(\Phi' - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (31)$$

Burada;  $\alpha$  dayanma duvarının dolgu tarafındaki yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır.



#### 1.4.3.4. Dayanma Duvarlarında Stabilite Analizleri

Bir dayanma duvarı tasarımında, dayanma duvarına etkiyen kuvvetler belirlendikten sonra duvar için bir ön boyutlandırma yapılır. Ön boyutlandırması yapılan duvarın stabilitesini belirlemek üzere çeşitli tahkikler yapılmalıdır. Bu tahkikler iç ve dış stabilite analizleri olarak iki kısımda incelenebilir. Dış stabilite analizlerinde, dayanma duvarının devrilmeye, kaymaya, temel zeminin ise taşıma gücü ve eksantrisiteye karşı güvenliği kontrol edilmektedir. İç stabilite analizlerinde ise duvar gövdesindeki ve temelindeki farklı kesitlerde oluşacak kesme kuvvetlerinin ve normal kuvvetler ile eğilme momentlerinden kaynaklanan basınç ve çekme gerilmelerinin kullanılan duvar malzemesi tarafından emniyetli olarak karşılanıp karşılanmadığı araştırılmaktadır.

##### 1.4.3.4.1. Dayanma Duvarlarında Dış Stabilite Analizleri

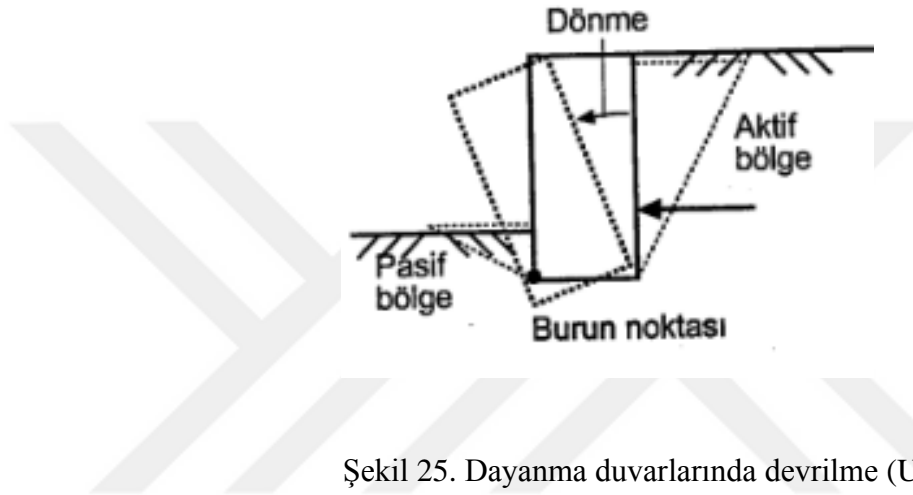
###### 1.4.3.4.1.1. Devrilme Tahkiki

Kaya ya da sert bir zemine oturan donatılı bir duvarın desteklediği zeminde oluşan yanal basınç, Şekil 25’de de gösterildiği üzere duvarın burun noktası etrafında dönmesine (devrilmesine) sebebiyet verebilir. Duvarın devrilmeye karşı stabilitesini sağlamak adına, bu noktaya göre duvara etkiyen kuvvetlerin momentleri hesaplanmalıdır. Devrilmeye karşı koyan kuvvetlerin duvarı devirmeye çalışan kuvvetlere oranı yeterli bir güvenlik sayısına ulaşmalıdır. Duvar arkasında oluşan aktif yanal basıncın yatay bileşeni duvarı devirmeye çalışırken; duvar ağırlığı, topuk üzerinde kalan zeminin ağırlığı, duvar arkasında oluşan aktif yanal basıncın düşey bileşeni ve duvar önündeki dolgudan kaynaklı pasif yanal toprak basıncı devrilmeye karşı koyarlar. Eşitlik 34’te ifade edilen güvenlik sayısı ( $G_{S(devrilme)}$ ) TS 7994 (1990)’e göre konsol dayanma duvarları için 1,5 olarak alınabilmektedir.

$$G_{S(devrilme)} = \frac{\sum M_D(karşı\ koyan)}{\sum M_D(deviren)} \quad (34)$$

Öndeki pasif itki, pasif durumun oluşması için gereken hareketin aktif duruma göre çok daha fazla olduğu durumlarda, derinliği de az ise (0,5-1 m gibi) ihmal edilebilir (Uzuner, 2014).

Genelde bu tarz dayanma duvarlarında ekonomik açıdan topuk kısmının uzunluğu burnun iki katı kadar tercih edilir (Clayton vd., 2014).



Şekil 25. Dayanma duvarlarında devrilme (Uzuner, 2014).

#### 1.4.3.4.1.2. Kayma Tahkiki

Dayanma duvarına etkiyen yanal basınçlar duvarın temel tabanı üzerinde Şekil 26'da gösterildiği gibi kaymasına sebep olabilmektedir. Duvarın kayma durumunu analiz etmek üzere belirlenen güvenlik sayısına göre duvarın kaymasına karşı koyan kuvvetlerin, duvarı kaydırmaya çalışan kuvvetlere oranı tahkik edilmelidir. Duvar arkasında oluşan aktif yanal basıncın yatay bileşeni duvarı kaydırmaya çalışırken duvar tabanındaki sürtünme kuvveti ve duvar önünde oluşan pasif yanal basınç kaymayı önlemeye çalışmaktadır. Kaymaya karşı koyan, taban üzerindeki düşey yöndeki kuvvetlerin ( $\sum N$ ) taban sürtünme açısına ( $\Omega$ ) bağlı bir değer olan sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ile çarpılmasıyla sürtünme kuvveti hesaplanabilmektedir. Sürtünme katsayısı:

$$\mu = \tan \Omega \quad (35)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre kaymaya karşı güvenlik sayısı aşağıdaki bağıntıda verildiği gibidir.

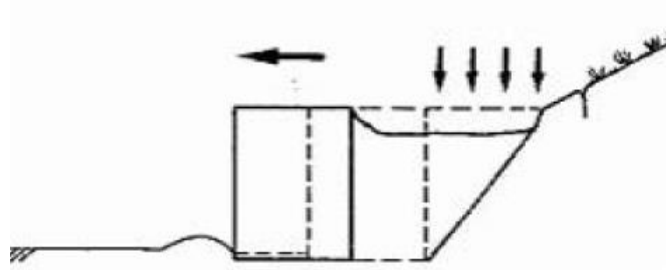
$$G_{S(kayma)} = \frac{\sum F(kaymaya\ karşı\ koyan)}{\sum F(kaydıran)} \quad (36)$$

Taban sürtünme açısı ( $\Omega$ ) TS 7994 (1990)'e göre ( $2\Phi_{taban}/3$ ) olarak alınabilmektedir. Burada  $\Phi_{taban}$ , temel zeminin kayma mukavemeti açısıdır. Temel zemini kohezyonlu ise duvar tabanı ve zemin arasında oluşan adezyondan doğan bir kayma direnci de kaymaya karşı koyan kuvvetlerdendir. Adezyon ( $c_\alpha$ ) değeri, TS 7994 (1990)'e göre temelin malzemesine ya da zemin cinsine göre kohezyonun 2/3 katı kadar alınabilmekte ve duvarı kaydırmaya çalışan kuvvetlere temel genişliği ile çarpılarak eklenebilmektedir. Böylece kaymaya karşı koyan kuvvetler:

$$\sum F(kaymaya\ karşı\ koyan) = (\sum N) * \tan\left(\frac{2}{3} * \Phi_{taban}\right) + \frac{2}{3} * B * c_{taban} + \sum P_P \quad (37)$$

olarak ifade edilebilir. Konsol dayanma duvarları için güvenlik sayısı TS 7994 (1990)'e göre kil zemin için 2, kum zemin için 1,5 olarak değer alabilmektedir.

Eğer kaymaya karşı güvenlik sayısı çok düşük gelirse; temel tabanı genişliği artırılabilir, boşluk suyu basıncı da düşürülebilir.



Şekil 26. Dayanma duvarlarında kayma (Birand, 2006).

### 1.4.3.4.1.3. Temel Zeminin Taşıma Gücü ve Eksantrisite Tahkiki

Dayanma duvarının temeline etkiyen taban basıncı, zemin emniyet gerilmesini aşmamalı böylece taşıma gücü koşulları sağlanmalıdır. Taşıma gücünün aşılması durumu Şekil 27’de gösterildiği gibi taşıma gücü yenilmesine yol açmaktadır. Taşıma gücü bakımından temeller sığ ve derin temeller olmak üzere iki başlıkta incelenir. Sığ temel, kabaca yapı yüklerini zemin yüzüne yakın tabakalara aktaran temel çeşitlerine verilen addır ve eğer bu temel ile temel üzerine gelen yükler güvenli bir şekilde zemine taşıtırılmazsa derin temel tercih edilir.



Şekil 27. Dayanma duvarlarında taşıma gücü yenilmesi (Uzuner, 2014).

Dayanma duvarı temeli, bir sığ temel çeşidi olan şerit (sürekli) temeldir. Şerit temel olan dayanma duvarı temeli, temel tabanında oluşan momentlerden dolayı eksantrik olarak yüklenir. Temel tabanında birim uzunluk için oluşacak enine eksantrisite değeri, duvara etkiyen kuvvetlerin temel taban ortasına göre momentleri toplamının, duvara etkiyen düşey yükler toplamına oranlanmasıyla elde edilmektedir.

Eksantrisite değerine ulaşmak üzere öncelikle duvara etkiyen kuvvetler bileşkesinin yeri ( $\bar{x}$ ) bulunmalıdır. Kuvvetler bileşkesini yeri eşitlik 38’de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{x} = \frac{\sum M_D(\text{karşı koyan}) - \sum M_D(\text{deviren})}{\sum N} \quad (38)$$

Burada;



- $\Sigma N$  : Düşey yöndeki kuvvetlerin toplamı
- $\Sigma M_D$  (*deviren*) : Duvarın burun noktasına göre duvarı devirmeye çalışan momentler toplamı
- $\Sigma M_D$  (*karşı koyan*) : Duvarın burun noktasına göre duvarın devrilmesine karşı koymaya çalışan momentler toplamıdır.

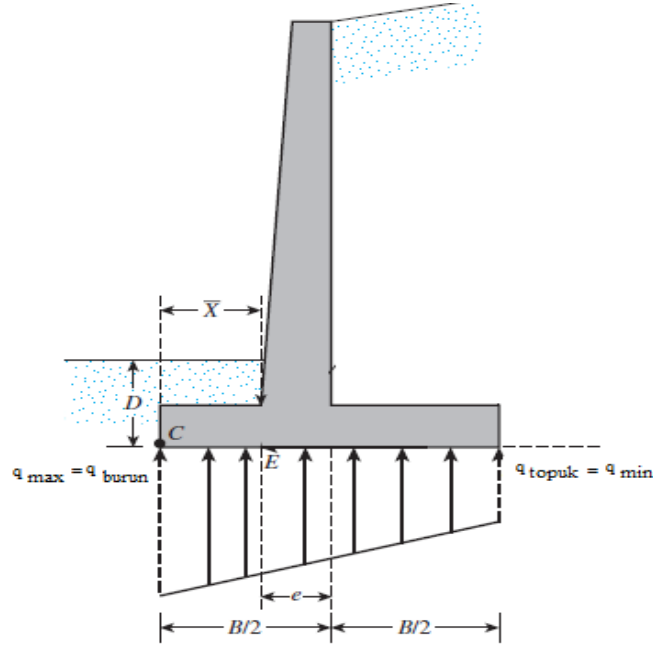
Bileşkenin yeri eşitlik 39'da verilen koşulu sağlamalıdır.

$$\frac{B}{3} < \bar{x} < \frac{2B}{3} \quad (39)$$

Eksantrisite ise eşitlik 40'ta verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$e = \frac{B}{2} - \bar{x} \quad (40)$$

Taban basınçlarının minimum ve maksimum değerleri Şekil 28'de gösterildiği üzere aynı zamanda sırasıyla topuk ve burundaki taban basıncını ifade etmektedirler.



Şekil 28. Konsol dayanma duvarında taban basınçları (Das, 2016b).

Minimum ve maksimum taban basınçları eşitlik 41’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$q_{min,max} = \frac{\Sigma N}{B} \left( 1 \mp \frac{6e}{B} \right) \quad (41)$$

Bu bağıntı,  $e \leq \frac{L}{6}$  şartının sağlandığı durumlarda geçerlidir. Burada L, eksantrisitenin olduğu doğrultudaki temel taban uzunluğudur.  $e \geq \frac{L}{6}$  durumunda taban basınçları,

$$q_{min,max} = \frac{2 \Sigma N}{3 \left( \frac{B}{2} - e \right)} \quad (42)$$

olarak ifade edilmektedir. Ancak büyük dış merkezlik dayanma duvarları için temelleri kaya gibi sert zeminlerde olmadığı sürece kabul edilemez (Aka vd., 1977). Ayrıca zeminin çekme gerilmesi almayacağı ve minimum taban basıncının sıfırdan büyük olacağı kabul edilmektedir.

Eksantrik yüklü şerit temelin sınır taşıma gücü hesabı için Meyerhof (1953), azaltılmış genişlik yöntemini diğer adıyla Meyerhof yöntemini önermiştir.

Bu yöntemle göre; temelin taşıma gücünün, eksantrisitenin yer aldığı boyutunun (B) eksantrisine değerinin 2 katı (2e) kadar azaltılarak elde edilen azaltılmış genişliğe (B') göre hesaplandığı ve böylece temelin merkezi yüklü olarak taşıyabileceği yükü taşıdığı varsayılır. Azaltılmış genişlik ifade edildiği üzere eşitlik 43’te verilmiştir.

$$B' = B - 2e \quad (43)$$

Şerit temel için Meyerhof’a göre temelin sınır taşıma gücü formülü eşitlik 44’te verilmiştir.

$$q_{sınır} = c_{taban} N_c + P'_0 N_q + \frac{1}{2} \gamma_{taban} N_\gamma B' \quad (44)$$

Burada;

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

$c_{taban}$ : Temel zemininin kohezyonu  $kN/m^2$

$P'_0$ : Temel taban düzeyindeki efektif gerilme  $kN/m^2$

$\gamma_{taban}$ : Temel zemininin birim hacim ağırlığı  $kN/m^3$

$B'$ : Azaltılmış temel genişliği (m)

$N_c, N_q, N_\gamma$ : Temel zemininin,  $\Phi$  kayma mukavemeti açısına bağlı taşıma gücü

katsayılarıdır.

Meyerhof taşıma gücü katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Meyerhof taşıma gücü katsayıları (Das, 1999)

$\Phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\Phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5,14	0	0	26	22,25	11,85	8
1	5,38	0,09	0,002	27	23,94	13,2	9,46
2	5,63	0,2	0,01	28	25,80	14,72	11,19
3	5,9	0,31	0,02	29	27,86	16,44	13,24
4	6,19	0,43	0,04	30	30,14	18,4	15,67
5	6,49	0,57	0,07	31	32,67	20,63	18,56
6	6,81	0,72	0,11	32	35,49	23,18	22,02
7	7,16	0,88	0,15	33	38,64	26,09	26,17
8	7,53	2,06	0,21	34	42,16	29,44	31,15
9	7,92	2,25	0,28	35	46,12	33,3	37,15
10	8,35	2,47	0,37	36	50,59	37,75	44,43
11	8,8	2,71	0,47	37	55,63	42,92	53,27
12	9,28	2,97	0,6	38	61,35	48,93	64,07
13	9,81	3,26	0,74	39	67,87	55,96	77,33
14	10,37	3,59	0,92	40	75,31	64,2	93,69
15	10,98	3,94	1,13	41	83,86	73,9	113,99
16	11,63	4,34	1,38	42	93,71	88,38	139,32
17	12,34	4,77	1,66	43	105,11	99,02	171,14
18	13,1	5,26	2	44	118,37	115,31	211,41
19	13,93	5,8	2,4	45	133,88	134,88	262,74
20	14,83	6,4	2,87	46	152,1	158,51	328,73
21	15,82	7,07	3,42	47	173,64	187,21	414,32
22	16,88	7,82	4,07	48	199,26	222,31	526,44
23	18,05	8,66	4,82	49	229,93	265,51	674,91
24	19,32	9,6	5,72	50	266,89	319,07	873,84
25	20,72	10,66	6,77				

Sınır taşıma gücünün temel tabanına gelen maksimum basınca oranı eşitlik 45'te verildiği üzere taşıma gücü için güvenlik sayısını vermektedir (Das, 2016b).

$$G_{S(\text{taşıma gücü})} = \frac{q_{\text{sınır}}}{q_{\text{max}}} \quad (45)$$

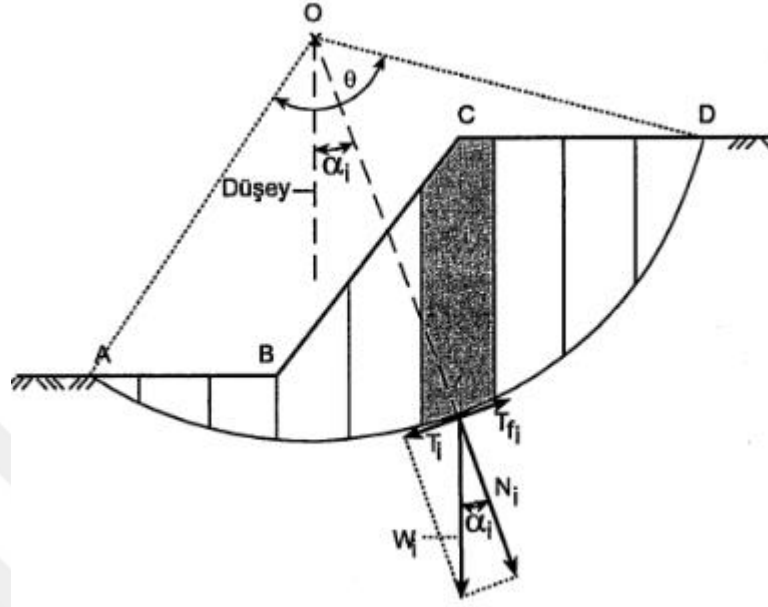
Duvarın topuk kısmında oluşan gerilme değerinin sıfır ya da sıfıra yakın olması taşıma gücü açısından idealdir. Taşıma gücü için güvenlik sayısı konsol dayanma duvarlarında kil zemin için 2, kum zemin için 3 olarak alınabilmektedir (TS 7994, 1990).

#### 1.4.3.4.1.4. Toptan Göçme Tahkiki

Bahsedilen tahkiklerle güvenli koşulların sağlanması güvenli bir dayanma duvarı tasarımı yapıldığını gösterebilir. Ancak bu durum yalnızca duvarın yakın çevresi ile sınırlı kalabilmekte ve duvarı saran geniş toprak kütlelerinin güvenliği ile ilgili garanti vermemektedir. Bu nedenle bölgede şev duraylılık analizi yapılmalıdır (Clayton vd., 2014).

Dayanma duvarlarında özellikle konsol ve payandalı dayanma duvarlarında toptan göçme durumu tahkik edilmelidir. Toptan göçme için konsol dayanma duvarlarına göre güvenlik sayısı 1,5 olarak alınabilir (TS 7994, 1990).

Şev duraylılık analizi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan en sık kullanılanı İsveç dilim yöntemidir. İskandinavya'daki düşük kayma dayanımlı hassas deniz kili sebebiyle şevlerin yenilmeye dayanıksız olması, özellikle 19. yy'da sanayi devrimiyle ivmelenen liman ve demiryolu çalışmalarının önünde büyük bir engeldi. Bu durumu açığa kavuşturup sorunların önüne geçmek üzere kurulan bir komite İsveç Kayma Dairesi ile birlikte bir çok geoteknik analiz yöntemi geliştirmiştir. Daha sonra formül genelleştirilerek günümüzde İsveç Dilim Yöntemi olarak bilinen adı almıştır (Coduto, 2001). Bu yöntemde güvenlik sayısı; dilimin kaymasına karşı koyan kuvvetlerin, dilimi kaydıran kuvvetlere oranı ile kıyaslanmaktadır. Bu hesap için, şekil 29'da gösterildiği üzere dairesel kayma yüzeyinin üst kısmında kalan zemin  $i$  sayıda dilime ayrılmaktadır.



Şekil 29. İsveç dilim yöntemi (Uzuner, 2014).

Bu dilimlerin birim uzunluktaki ağırlıklarının ( $W_i$ ) düşey bileşeni ( $N_i$ ) kullanılarak eşitlik 9'da ifade edilmiş olan kayma direnci hesabındaki normal gerilme ( $\sigma_n$ ) eşitlik 46'da gösterildiği üzere elde edilir.

$$\sigma_n = \frac{N_i}{\Delta L_i x_1} \quad (46)$$

Burada;  $\Delta L_i$   $i$ 'nci dilimin yay uzunluğudur ve bir dilim için düzlemsel kabul edilebilmektedir. Böylece  $i$ 'nci dilimin kayma direnci eşitlik 47'de verildiği üzere hesaplanmaktadır.

$$\tau_{fi} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (47)$$

Buradan hareketle  $i$ 'nci dilimin kayma dayanımı ise eşitlik 48'de verildiği gibidir.

$$T_{fi} = \Delta L_i \tau_{fi} \quad (48)$$

Yine birim uzunluktaki ağırlıklarının ( $W_i$ ) yatay bileşeni olan kuvvetler ( $T_i$ ) cebirsel olarak toplanır ve güvenlik sayısı hesabında kullanılır. Toptan göçme için güvenlik sayısı eşitlik 49'da verildiği gibi belirlenmektedir.

$$G_{S(\text{toptan göçme})} = \frac{\sum(c\Delta L_i + N_i \tan\phi)r}{\sum T_i} \quad (49)$$

Burada  $r$ , kayma dairesinin yarı çapını ifade etmektedir.

Anlaşıldığı üzere dayanma yapıları yüzeysel kayma tehlikesinin önüne geçebilecek durumda olsalar da derin kaymalar için bir önlem değildir (Uzuner, 2014).

#### **1.4.3.4.1.5. Oturma Tahkiki**

Kohezyonsuz, iri taneli zeminlerde oturma genelde duvar inşaatı bitene kadar tamamlanır. Eğer duvar temeli doymuş, kohezyonlu bir zemin üzerindeyse (ya da inceleme derinliğinde böyle bir zemin varsa) zamanla oturma devam edecektir. Eğer, burun ve topuk altında birbirinden çok farklı gerilmeler oluşuyorsa farklı oturmalar meydana gelebilmektedir (Bowles, 2001). Oturmalar gerilmelerin yüksek olduğu ön ampatmanda (burun) gerçekleşebilir ve bu durum duvarın öne eğilmesine sebep olabilmektedir (TS 7994, 1990). Ancak eğer topuk üzerindeki yükte kayda değer bir artış varsa bu kez topukta burna göre daha yüksek miktarda oturma meydana gelebilmektedir (Bowles, 2001).

Dayanma duvarlarındaki oturmalar hesaplanmalı ve tasarım bu oturmaların belli değerleri aşmayacağı şekilde yapılmalıdır. Anlaşıldığı üzere bu değerler aşıldığında yapıda belli başlı hasarlar meydana gelebilmektedir.

#### **1.4.3.4.2. İç Stabilite Analizleri**

Birçok yapı için tasarım yöntemi kesin değildir ancak tecrübeye ve yargı kabiliyetine bağlıdır. Yıllar boyunca mühendislerce kabul gören birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu

yöntemlerden genelde geleneksel yöntemler olarak bahsedilmektedir. Bunlardan bir kısmı çeşitli mühendislik komitelerince geliştirilmiş formüllerdir.

Dayanma duvarlarında tasarım ile ilgili detaylar, kullanımda olan duvarların davranışıyla gelen tecrübeye, yapının yapım yöntemine ya da deneysel verilere göre belirlenmektedir. Bu detaylar, beton kalitesi, donatı yerleşimi, sıcaklık değişimi ve büzülme sebebiyle oluşan çatlakların kontrolü, drenaj ve dolgunun yerleştirilmesidir.

Dayanma duvarında yapının gerilmelere karşı davranışını incelemek üzere iç stabilite analizleri yapılmalıdır. Taban plağında ön ve arka ampatmanın betonarme hesabı için eşitlik 41'deki bağıntıyla erişilebilecek olan zemin gerilmelerinin bilinmesi gerekmektedir.

Beton dayanma duvarlarında gerilmeler duvar boyunca kritik yatay kesitlerde ve eğer ön ampatman varsa burun ve gövdenin kesişimlerinde dikey kesitte hesaplanmaktadır.

Betonarme dayanma duvarı tasarlarken en basit yöntem deneme yanılma ile boyut ve donatı belirlemektir. Betonarme elemanlar yalnız eğilmeye ya da birleşik eğilmeye maruz kalabilirler.

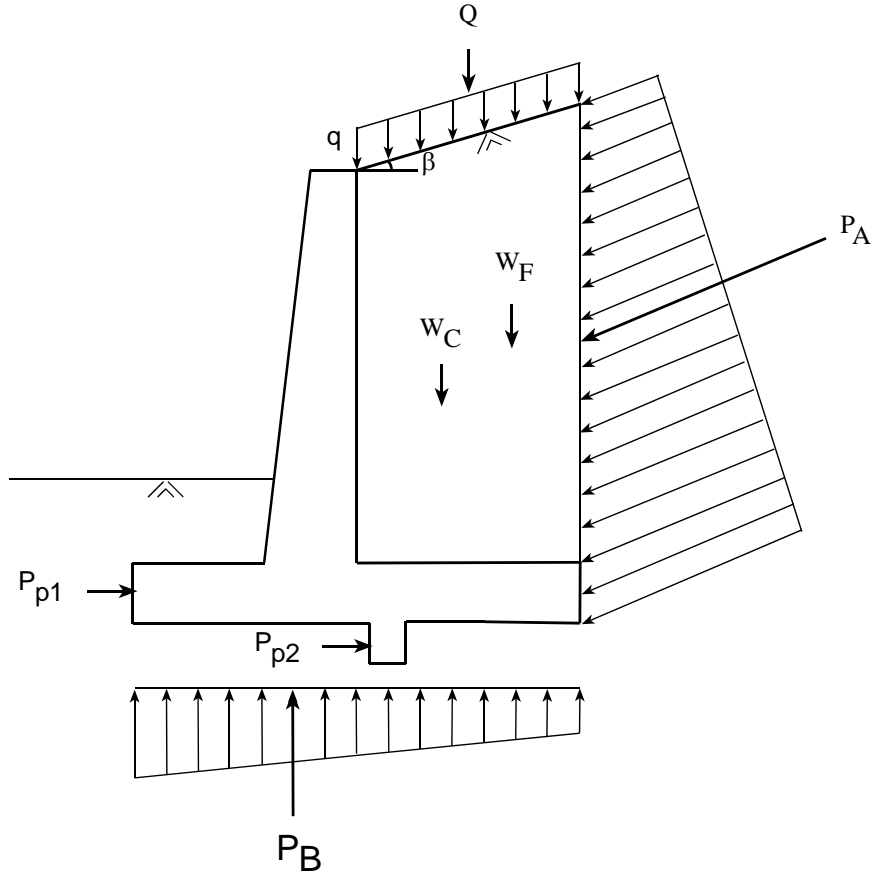
Betonarme dayanma duvarlarında iç stabilite analizleri betonarme kiriş için yapılan hesaplamalara dayandırılmaktadır. Bu konuda çeşitli yapı yönetmeliklerinden faydalanılmaktadır. Bu çalışmada Türk betonarme yönetmeliği TS 500 Betonarme Yapıların tasarım ve Yapım Kuralları (2000) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinden (TBDY 2018) yararlanılmıştır.

TS 500 (2000)'e göre kesit hesabı için sınır durumlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde taşıma gücü ve kullanılabilirlik olarak iki sınır durumu ele alınabilmektedir. Ancak esas olarak hesaplar kesitin taşıma gücü sınırına göre yapılmaktadır. Betonarme konsol dayanma duvarlarının kritik kesitlerinde betonarme hesabı yapılması gerekmektedir. Konsol dayanma duvarları için kritik kesitler gövde ve taban birleşim yerleri, ön ampatman ve gövde birleşim yerleri, arka ampatman ve gövde birleşim yerleri ve eğer dış varsa dış ve taban birleşim yerleridir. Bu kesitler için eğilme ve kesme tahkikleri yapılmalıdır.

#### 1.4.3.4.2.1. Eğilme tahkiki

Şekil 30'da üzerine etkiyen kuvvetlerin gösterildiği konsol dayanma duvarı kesitleri üzerinde eğilme tahkiki yapılabilmesi için kesitler basit eğilme etkisi altındaki birer tek tesirli kiriş olarak değerlendirilmektedir.

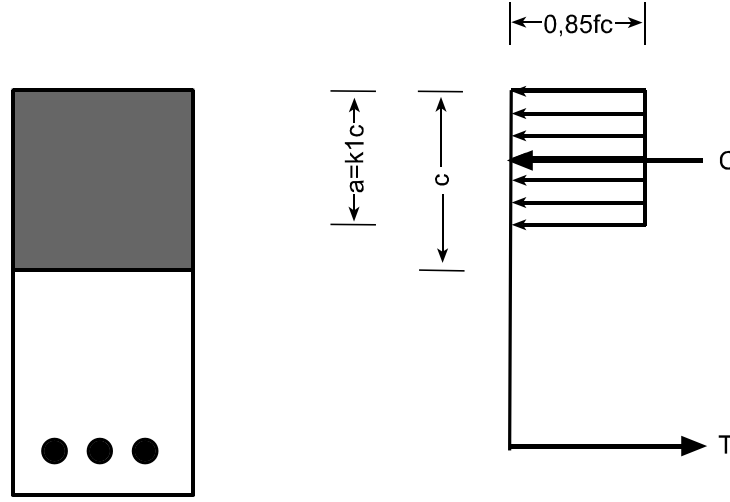
Duvar elemanlarında üzerine etkiyen yüklerin oluşturduğu eğilme momenti ve kesitin eğilmedeki taşıma gücü karşılaştırılarak tahkik yapılabilmektedir.



Şekil 30. Betonarme konsol dayanma duvarına etkiyen kuvvetler

Şekil 31'de gösterildiği üzere kesitte basınç bölgesindeki beton basınç bileşkesi  $C$  ve donatı çekme kuvveti  $T$  birbirini dengeleyen bir kuvvet çiftidir.





Şekil 31. Tek tesirli betonarme kirişte eş değer gerilme dağılımı

TS 500 (2000) yönetmeliğine göre, beton kesitte taşıma gücü sınırına ulaşıldığında en dış beton lifindeki birim kısalma ( $\epsilon_{cu}$ ) 0.003 olarak kabul edilerek uygun denklemler yazılmaktadır. Bu değer yönetmeliklere göre değişebilmektedir.

TS 500 (2000) yönetmeliğine göre beton basınç bölgesinde geçerliliği kabul görmüş herhangi bir beton gerilme dağılımının kullanılmasına izin verilse de belirli özellikleri taşıyan Şekil 31'de verilmiş eş değer dikdörtgen dağılımı sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durumda eş değer dikdörtgen gerilme dağılımına göre  $0,85f_{cd}$  gerilme değerinin  $a$  derinliği boyunca uniform olarak dağıldığı kabul edilebilmektedir. Burada,  $f_{cd}$  beton basınç hesap dayanımını ifade etmektedir.

Eş değer derinlik  $a$ ;

$$a = k_1 c \quad (50)$$

iken  $k_1$  katsayısı, betonun basınç dayanımının 25 Mpa'dan küçük ve 25 Mpa'a eşit olduğu durumlar için 0,85 olarak alınmaktadır. Ancak 25 Mpa'dan büyük olduğu durumlar için:

$$k_1 = 0,85 - 0,006(f_c - 25) \geq 0,7 \quad (51)$$

eşitliği kullanılarak belirlenmektedir. Burada  $f_c$  betonun basınç dayanımını ifade etmektedir. Bu durumda dikdörtgen dağılımda beton basınç bileşke kuvveti  $C$ ,

$$C = 0,85f_c b a \quad (52)$$

olarak hesaplanmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2012). Burada  $b$  dikdörtgen kesitin genişliğidir. Donatı çekme kuvveti ( $T$ ) ise,

$$T = A_s f_{yd} \quad (53)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $A_s$  ifadesi donatı kesit alanını belirtirken  $f_{yd}$  ise çeliğin akma hesap dayanımını ifade etmektedir. Birbirini dengeleyen bu kuvvet çifti için,

$$C = T \quad (54)$$

denklemini

$$A_s f_{yd} = 0,85 \cdot f_{cd} b a \quad (55)$$

olarak yazılabilmektedir. Kesitte kuvvet çiftinden kaynaklı moment hesabı yapılarak kesitin eğilmedeki taşıma gücü eşitlik 56'da verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$M_r = A_s f_{yd} \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (56)$$

Burada,  $d$  faydalı yüksekliktir.

TS 500 (2000)'e göre betonun 28 günlük silindirik basınç dayanımından elde edilen değer betonun karakteristik dayanımı adı verilen değerden küçük olma olasılığı belli bir oran teşkil etmektedir (genelde %10). Burada basınç karakteristik dayanım ( $f_{ck}$ ) ve çekme karakteristik

dayanım göz ( $f_{ctk}$ ) göz önüne alınmaktadır. Çelik için karakteristik dayanım ( $f_{yk}$ ) ise yönetmelikte saptanan en küçük akma dayanımıdır. Genelde betonarme hesaplarının güvenli olarak yapılabilmesi için beton ( $f_{cd}$ ) ve çelik ( $f_{yd}$ ) hesap dayanımları, karakteristik dayanımların malzeme katsayılarına bölünmesiyle elde edilen değerler olarak ele alınmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2012).

Beton için basınç dayanımı;

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{mc}} \quad (57)$$

olarak ve çekme dayanımı;

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{mc}} \quad (58)$$

olarak ifade edilirken, donatı için hesap dayanımı,

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{ms}} \quad (59)$$

olarak ifade edilmektedir. Buradaki  $\gamma_{mc}$  ve  $\gamma_{ms}$  ifadeleri sırasıyla beton ve çelik için malzeme katsayıları. TS 500 (2000) yönetmeliğine göre donatı için malzeme katsayısı 1,15 olarak alınmalıdır. Beton için yerinde dökülen betonda 1,5 ve öndöküm prefabrikte 1,4 ayrımı yapılmaktadır.

Betonarme elemanlarda kesit taşıma gücü hesabı için eleman üzerine etkiyen yükler bilinmelidir. Duvar üzerine etkiyen yük birleşimleri TS 500 (2000) yönetmeliğine göre belirli yük katsayıları ile kullanılmaktadır. Yanal toprak itkisinin bulunduğu durumlarda yük birleşimi;

$$U = 1,4G + 1,6Q + 1,6H \quad (60)$$

olarak hesaplanmaktadır. Kesit hesabı yapılırken yük birleşimlerinden elde edilen en elverişsiz zorlamalar dikkate alınmaktadır. Burada;

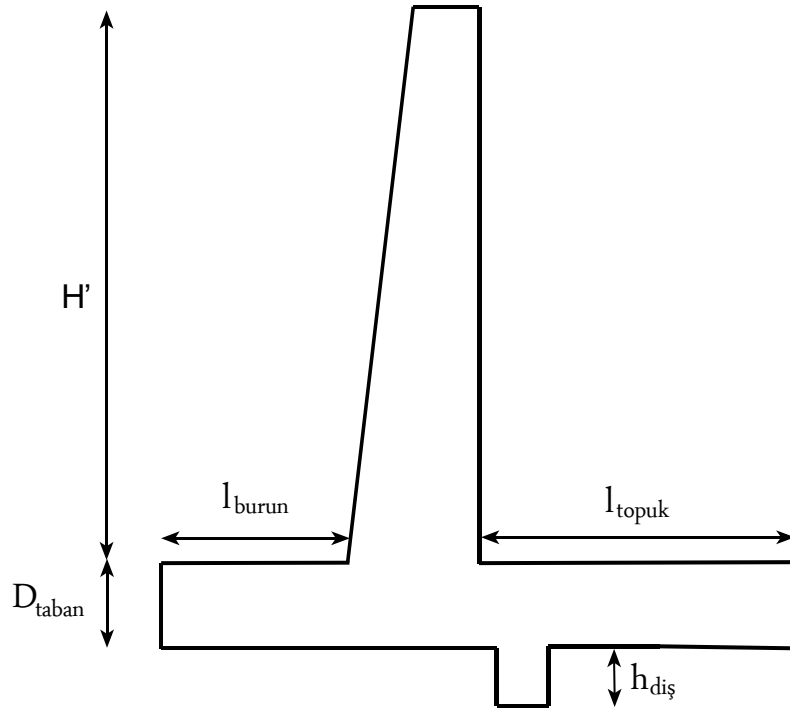
$G$  : Sabit yük

$Q$  : Hareketli yük

$H$  : Yanal toprak itkisini ifade etmektedir. Sabit ve hareketli yükün söz konusu zorlamayı azalttığı durumlarda eşitlik 54;

$$U = 0,9G + 1,6H \quad (61)$$

şeklini almaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2012). Daha önce bahsedildiği üzere yapıda eğilme tahkiki yapılırken kesitin eğilmedeki taşıma gücü yapı üzerine etkiyen kuvvetlerden kaynaklı oluşan eğilme momenti ile karşılaştırılmalıdır. Bu yük bileşimlerine göre duvar elemanları üzerinde oluşan eğilme momentleri ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Şekil 32’de konsol dayanma duvarı elemanları görülmektedir.

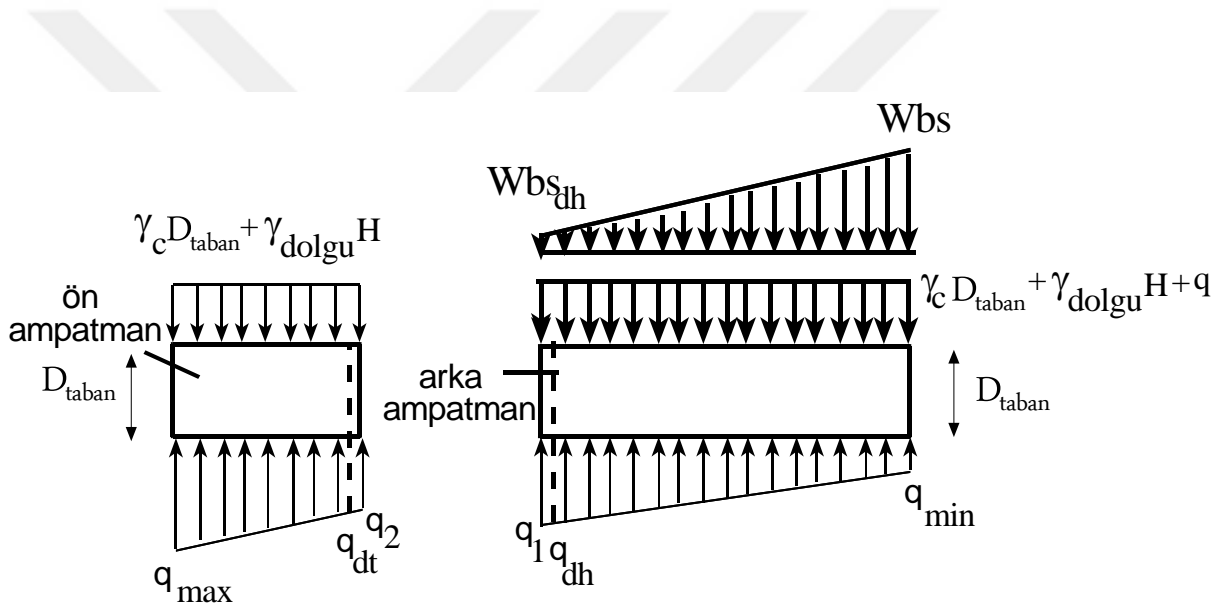


Şekil 32. Konsol dayanma duvarı elemanları

Gövde için tasarım eğilme momenti;

$$M_{d_{gövde}} = 1,6 \left[ qK_a \cos \beta \frac{(l_{topuk} \tan \beta + H')^2}{2} + K_a \gamma_{dolgu} \cos \beta \frac{(l_{topuk} \tan \beta + H')^3}{6} \right] \quad (62)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $H'$ , dolgu yüksekliği ve  $l_{topuk}$ , arka ampatman genişliğidir. Şekil 33'te taban üzerine etkileyen kuvvetler görülmektedir.



Şekil 33. Taban üzerine etkileyen kuvvetler

Ön ampatman için tasarım eğilme momenti;

$$M_{d_{burun}} = \left[ 1,6 \left( \frac{q_2}{6} + \frac{q_{max}}{3} \right) - 1,4 \left( \frac{\gamma_c D_{taban} + \gamma_{dolgu} D}{2} \right) \right] l_{burun}^2 \quad (63)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $l_{burun}$  ön ampatman genişliğini,  $D$ , ön ampatman üzerindeki zemin derinliğini ifade etmektedir.  $q_2$ , gövde ve ön ampatmanın kesişim bölgesindeki temel taban basıncıdır.  $q_{max}$  maksimum temel taban basıncı ve  $\gamma_c$  betonun birim hacim ağırlığını ifade etmektedir.  $D_{taban}$ , konsol dayanma duvarının taban kalınlığıdır.

Arka ampatman için tasarım eğilme momenti;

$$M_{d_{topuk}} = \left[ \left( \frac{1,6q + 1,4\gamma_c D_{taban} + 1,4\gamma_{dolgu} H'}{2} \right) + 1,4 \left( \frac{W_{bs}}{3} \right) - 1,6 \left( \frac{q_1 + 2q_{min}}{6} \right) \right] l_{topuk}^2 \quad (64)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $W_{bs}$ , gövde hizasından yukarıda topuk üzerinde kalan toprak dolgunun ağırlığından kaynaklı oluşabilecek maksimum yüküdür.  $q_1$  gövde ve arka ampatmanın kesişim bölgesindeki temel taban basıncıdır.

Eğer varsa dış için tasarım eğilme momenti;

$$M_{d_{diş}} = 1,6 \left[ \left( \frac{K_{p2} \gamma_{taban} (h_{diş})^3}{3} \right) \right] \quad (65)$$

olarak hesaplanmaktadır.  $h_{diş}$ , konsol dayanma duvarının dış yüksekliğidir.

#### 1.4.3.4.2.2. Kesme Tahkiki

Betonarme elemanları eğilme gibi kesme kuvvetini de taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır. Betonun kesmeye karşı dayanımı yüksek olsa da sebep olduğu asal çekme gerilmelerine karşı dikkatli olmak gerekmektedir. Betonun kesme ve basınç dayanımı yüksek olduğundan basit kesme durumunda kırılma yine çekme gerilmeleri sebebiyle oluşmaktadır. Bu durumda asal çekme gerilmelerinin sebep olduğu çatlaklara eğik çatlak denmektedir. Eğik çatlaklar gevrek kırılmaya sebep olabilmektedirler. Buna göre yapı için kesme tahkiki de muhakkak yapılmalıdır (Ersoy ve Özcebe, 2012).

TS 500 (2000) yönetmeliğine göre yalnızca kesme ve eğilme etkisindeki elemanlar için eğik çatlama dayanımı hesabı,

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctd} b d \quad (66)$$

bağıntısına göre yapılmaktadır. Burada;  $f_{ctd}$  betonun çekme hesap dayanımı,  $b$  kesitin gövde genişliği,  $d$  faydalı yüksekliktir. Bahsedilen yük bileşimlerine göre duvar elemanları üzerinde oluşan tasarım kesme kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Betonarme elemanlarda mesnet dolaylarında yerel basınç gerilmeleri kaynaklı, kırılmaya sebep olabilen eğik çatlaklar oluşabilmektedir. Eğik çatlakların, olduğu yer genelde mesnete en az " $d$ " (faydalı yükseklik) uzaklığıdır. Mesnet yüzüne " $d$ " uzaklığından itibaren kesme kuvveti hesabı yapılmalıdır (Ersoy ve Özcebe, 2012).

Dayanma duvarı için belirtilen " $d$ " uzaklığı, duvarın her bir elemanı için ayrı kesme kuvveti hesabı yapılacağından her elemana göre farklı şekilde ifade edilmiştir. Buna göre " $d$ " uzaklığı gövde için gövde ve taban birleşiminde  $ds$  kadar yukarıda, ön ampatman için  $dt$  kadar gövde burun birleşiminden öne doğru, arka ampatman için  $dh$  kadar gövde topuk birleşiminden arkaya doğru ve eğer dış varsa  $dsh$  kadar dış taban birleşiminden aşağıya doğru olarak alınır.

Sonuç olarak gövde için tasarım kesme kuvveti;

$$V_{d_{gövde}} = 1,6 \left[ qK_a \cos \beta (l_{topuk} \tan \beta + H' - ds) + K_a \gamma_{dolgu} \cos \beta \frac{(l_{topuk} \tan \beta + H' - ds)^2}{2} \right] \quad (67)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Ön ampatman için tasarım kesme kuvveti;

$$V_{d_{burun}} = \left[ 1,6 \left( \frac{q_{dt} + q_{max}}{2} \right) - 1,4 (\gamma_c D_{taban} + \gamma_{dolgu} D) \right] (l_{burun} - dt) \quad (68)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada;  $q_{dt}$  gövde burun birleşiminden  $dt$  kadar uzaklıkta temel taban basıncıdır.

Arka ampatman için tasarım kesme kuvveti;

$$V_{d_{topuk}} = \left[ (1,6q + 1,4\gamma_c D_{taban} + 1,4\gamma_{dolgu} H') + 1,4 \left( \frac{W_{bs} + W_{bsd}}{2} \right) - 1,6 \left( \frac{q_{dh} + q_{min}}{2} \right) \right] (l_{topuk} - dh) \quad (69)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada;  $W_{bsd}$  gövde hizasından yukarıda, gövde topuk birleşiminden  $dh$  uzaklıkta topuk üzerinde kalan toprak dolgunun ağırlığından kaynaklı yüküdür.  $q_{dh}$  gövde topuk birleşiminden  $dh$  uzaklıkta taban basıncıdır.  $q_{min}$  ise minimum zemin gerilmesidir.

Eğer varsa dış için tasarım kesme kuvveti;

$$V_{d_{diş}} = 1,6 \left[ \left( \frac{K_{p2} \gamma dsh + K_{p2} \gamma h_{diş}}{2} \right) (h_{diş} - dsh) \right] \quad (70)$$

olarak hesaplanmaktadır.

#### 1.4.3.5. Donatı Hesabı

Betonarme bir kiriş olarak göz önüne alınan dayanma duvarı elemanları için ön boyutlandırma aşamasında taşıyıcı sistemin boyutları belirlenmektedir. Kesin tasarım aşamasına gelindiğinde kesite etkiyen zorlamalar ayrıntılı biçimde hesaplanarak boyutların uygunluğu kontrol edilmekte ve uygun donatı seçimi yapılmaktadır. Eğer bu donatılar maksimum donatı oranını aşıyorsa yeniden kesit boyutlarının artırılması düşünülmektedir.

TS 500 (2000) yönetmeliğine göre kesitte hesaplanan donatı oranı sünegliği sağlamak adına muhakkak  $0,85\rho_b$ 'den küçük olmalıdır.  $\rho_b$  dengeli donatı oranını ifade etmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2012). Dolayısıyla maksimum donatı oranı,

$$\rho_{max} = 0,85 \left( \frac{0,85k_1 f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left( \frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (71)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu oran 0.02'den büyük olamaz. Bu durumda maksimum donatı alanı,

$$A_{s_{max}} = \rho_{max} bd \quad (72)$$



olarak ifade edilebilmektedir. Üst sınırı belirlenen donatı için donatısız betonda gözlemlenebilecek gevrek kırılmadan kaçınmak üzere bir de alt sınır belirlenmelidir. TS 500 (2000) yönetmeliğine göre minimum donatı oranı olan

$$\rho_{min} = 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (73)$$

ifadesine göre, minimum donatı alanı

$$A_{s_{min}} = \rho_{min} bd \quad (74)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Betonarmede çelik ve beton arasındaki kesme gerilmeleri olan aderans, eğilme ve kenetlenme aderansı olarak iki çeşittir. Eğilme aderansı, eğilme etkisindeki bir elemanda donatı çevresinde oluşan aderans gerilmeleri olarak ifade edilmektedir. Kenetlenme aderansı donatının beton içinden sıyrılıp çıkmayacak şekilde gömülmesi için gereken aderanstır. Bu kenetlenme için gereken donatı boyu ise kenetlenme boyu ( $l_b$ ) olarak ifade edilmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2012).

Kenetlenme çeşitli şekillerde olabilmektedir. Sadece nervürlü donatıda izin verilen düz kenetlenmede, çubuk donatının gerek duyulmadığı noktadan itibaren beton kütesine  $l_b$  kadar uzatılarak kenetlenme sağlanmaktadır.

Donatının düz olarak istenen derinliğe uzatılması mümkün olmayan durumlarda donatı ucuna kanca veya fiyonk şekli verilip gerekli kenetlenme sağlanabilmektedir.

TS 500 (2000) yönetmeliğine göre kenetlenme boyu  $20d_b$ 'den kısa olmamalıdır. Düz kenetlenme boyu nervürlü düz çubuklar için;

$$l_b = \left( \frac{0,12 f_{yd}}{f_{ctd}} \right) d_b \quad (75)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanırken, donatı çapı ( $d_b$ ), 32 mm ile 40 mm arasındaysa kenetlenme boyu;

$$l_d = \frac{100}{132-d_b} \left( \frac{0,12 f_{yd}}{f_{ctd}} \right) d_b \quad (76)$$

şeklinde büyütülmelidir. Donatı çapı ( $d_b$ ) milimetre cinsindedir.

Yönetmeliğe göre kancalı donatı için kenetlenme boyu ( $l_{bk}$ ),  $15d_b$  'den küçük olmamak kaydıyla eşitlik 70'teki ifadenin 3/4'ü kadar alınabilmektedir. Ancak Türkiye Bina Deprem yönetmeliği (TBDY, 2018), 90 dereceli kancaların boyları için alt sınırı yatayda  $0.4 l_b$  ve düşeyde  $12d_b$  olarak belirlemiştir. Çalışmada bu ifade sınır kabul edilmiştir.

### 1.5. Optimizasyon

Optimizasyon işlemi de belirli bir problem için uygun şartlar altında en iyi çözüme ulaşma işlemidir. Optimizasyon, Aristo'nun uslamlama yaklaşımına benzer şekilde bilinenden bilinmeyeni çıkarmayı amaçlamaktadır. Diğer bir tanımıyla optimizasyon, belirli sınırlamaları sağlayacak şekilde, bilinmeyen parametre değerlerinin bulunmasını içeren herhangi bir problem, optimizasyon problemi olarak adlandırılabilir (Karaboğa, 2004).

Daha önce de belirtildiği üzere optimizasyon çalışmalarında başlıca hedef problemi bir minimizasyon ya da maksimizasyon problemi olarak modelleyerek en iyi çözüme ulaşmaktır. Örneğin minimize edilecek bir  $f(x)$  fonksiyonu için,  $n$  değişkenli  $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  vektörü tanımlanır. Burada  $x_i$ ,  $i$ 'nci parametrenin değerini göstermektedir. Fonksiyon;

$$f(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (77)$$

aşağıdaki gibi eşitlik veya eşitsizlik sınırlamalarına

$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0 \quad , 1 \leq j \leq p \quad (78)$$

sahip olabilmektedir. Problem için sınırlamaları sağlayan mümkün tüm çözümlerin oluşturduğu bölge, araştırma yapılabilir en uygun çözüm bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgedeki sonuçlar uygun çözümlerdir. Eşitlik 79'da verilmiş olan,

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (79)$$

denkleminle minimize edilen  $f(x)$  fonksiyonu,  $x^* = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  çözümü için minimize edilen alan içindeki tüm çözümleri sağlıyorsa fonksiyon için  $x^*$ 'da küresel (global) optimuma sahiptir denilebilir. Ancak bu alandaki dar bir bölgede tüm çözümleri sağlıyorsa  $x^*$ 'da bölgesel (yerel, lokal) optimuma sahiptir denilebilir (Karaboğa, 2004). Benzer şekilde bu durum bir maksimizasyon problemine de uyarlanabilir.

Bir problemin, optimizasyon problemi olarak modellenmesi için; amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve/veya kısıtların belirlenmesi gerekmektedir. Maksimize ya da minimize edilmek istenen optimizasyon probleminin elde edilmesi gereken fonksiyona amaç fonksiyonu ismi verilmiştir. Bir optimizasyon probleminin çözümünde aynı anda ulaşmak istediği birden fazla amaç fonksiyonu olabilir ki bu durumda problem çok amaçlı optimizasyon olarak ele alınabilmektedir. Bir optimizasyon problemi fonksiyonu karar değişkenleri ile ifade edilmektedir. Tasarım optimizasyonları tasarım değişkenleri kullanılarak modellenmektedir. Genel olarak optimizasyon için ilk aşama tasarım için parametreleri (tasarım değişkenleri) belirlemektir. Optimum çözüm kümesinin sınırlarını belirleyen fonksiyonlara kısaca optimizasyon kısıtları denmektedir. Algoritmalar çalışırken kısıtlar dışında kalan çözümler için ceza fonksiyonları kullanılmaktadır. Amaç fonksiyonuna sınırları ihlal eden çözümleri ifade edecek bir ceza fonksiyonu eklenmektedir. Ceza fonksiyonun aldığı değere göre amaç optimizasyonu değerlendirilmekte olup, çözümün kabul edilebilir olması için ceza fonksiyonu değerinin sıfır olması gerekmektedir.

## 1.6. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması

Optimizasyon problemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Örneğin;  $f(x)$  amaç fonksiyonunun  $x$  ile ilgili herhangi bir sınırlaması olmaması durumu problemin sınırlayıcı

optimizasyon ve bazı sınırlamalar olması problemin sınırlayıcı optimizasyon olarak adlandırılmasını sağlar. Problemin amaç fonksiyonu ya da sınırlama ile ilgili fonksiyonlarının tamamının doğrusal (lineer, birinci derece) olması problemi doğrusal optimizasyon problemi yaparken herhangi birinin doğrusal olmayan (nonlinear) olması problemi doğrusal olmayan optimizasyon problemi yapmaktadır. Tasarım değişkenlerinin veya parametrelerinin alacağı değerler sürekli ise probleme, sürekli optimizasyon problemi, değilse ayrık optimizasyon problemi denmektedir (Karaboğa, 2004).

### 1.7. Optimizasyon Teknikleri

Feoktistov (2006), basitçe optimizasyon tekniklerini iki şekilde sınıflandırmıştır.

- Sürekli Optimizasyon Teknikleri
- Kesikli (Kombinatoryal, Ayrık) Optimizasyon Teknikleri

Sürekli optimizasyonda arama alanının ve çözümlerin kesin ve sürekli uzayda bulunduğu varsayılmaktadır. Kesikli optimizasyonda ise arama alanının uygun çözümlerin sonlu bir sayısı ile sınırlanması söz konusudur. Bu optimizasyon teknikleri içinde alt başlıklar halinde kabaca; doğrusal, doğrusal olmayan, karesel (kuadratik) kesin ve yaklaşık yöntemler yer almaktadır.

Optimizasyon teknikleri aynı zamanda deterministik (belirlemci) ve stokastik (rassal) olarak da sınıflandırılabilir. Belirli şartlar altında belirli sonuçlara ulaşılabilecek deterministik yöntemler karmaşık hesapları gerektirirken, istatikselsel olarak en iyi çözüme yaklaşmayı hedefleyen stokastik yöntemler daha hızlı ve uygulanabilir. Stokastik yöntemlerden olan metasezgisel yöntemlerin global optimum çözüme ulaşması kesin olmasa da yöntemler epey başarılı sonuçlar vermektedir. Metasezgisel algoritmaların gelişimi, özellikle 1975'te psikolog ve bilgisayar bilimleri uzmanı John Holland'ın öncülüğünde Charles Darwin'in evrim teorisinden esinlenilerek geliştirilmiş genetik algoritma ile 1980 ve 1990'lı yıllarda Scott Kirkpatrick, C. Daniel Gellat ve Mario P. Vecchi'nin benzetimli tavlama algoritmasıyla hızlanmıştır (Yang, 2008). Genetik algoritma ata bireylerin çaprazlanması ve genetik mutasyon sayesinde meydana gelen çeşitliliğin ve yeni jenerasyon bireylerden yalnız güçlü olanın hayatta kaldığı doğal seçim evrelerinin modellendiği, stokastik bir meta-sezgisel algoritmadır. Benzetimli tavlama ise metallerin ısıtma ve soğutma aşamaları ile

tavlanmasından esinlenilmiştir. 1992 yılında Marco Dorigo'nun karınca kolonisi ve 1995'te sosyo-psikolojist James Kennedy ve mühendis Russel C. Eberhart'ın parçacık sürü optimizasyonu çalışmalarıyla bu alanda yapılan çalışmalar bambaşka bir boyut kazanmıştır. 21.yüzyılda da bu çalışmalar devam etmiştir. Örneğin; 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen yapay arı kolonisi algoritması optimizasyon alanında yaygın kullanıma sahiptir (Karaboğa, 2005).

“Metasezgisel arama alanını araştırma ve ondan faydalanma adına farklı kavramları zekice birleştirerek ikincil sezgisellere rehberlik yapan, tekrarlayan bir üretim süreci olarak tanımlanabilir.” Osman (1995).

Metasezgisel yöntemler farklı bakış açılarına göre farklı şekilde sınıflandırılabilir. Blum ve Roli (2003)'ye göre sınıflandırmalar şu şekilde olabilmektedir.

- Doğadan esinlenen ve doğadan esinlenmeyen
- Toplum tabanlı ve tek çözüme dayalı
- Dinamik amaç fonksiyonlu ve statik amaç fonksiyonlu
- Bir komşuluk yapısı olan ve değişken komşuluk yapısı olan
- Hafıza kullanımlı ve hafıza kullanımı olmayan

Doğadan esinlenen algoritmalar; doğada gelişen süreçlerin taklit edilmesiyle oluşturulan modellerdir. Buna örnek olarak; genetik algoritma, ateşböceği algoritması, bozkurt algoritması vb. gösterilebilir. Tabu arama algoritması ise doğadan esinlenmeyen bir algoritma çeşididir. Bu sınıflandırma oldukça yüzeysel olduğundan fazla tercih edilmemektedir.

Toplum tabanlı ve tek çözüme dayalı olarak sınıflandırma; aynı anda odaklanılan çözüm sayısına göre yapılır. Bir çözüme odaklanılan ve belirli bir yörünge üzerinde aramasını gerçekleştiren tepe tırmanma, tabu arama ve benzetimli tavlama algoritmaları tek çözüme dayalı olarak sınıflandırılırken; arama alanındaki çözüm kümesi üzerinde değerlendirme yapan evrimsel programlama, genetik algoritma, parçacık sürü algoritması toplum tabanlı algoritma sınıfındadır.

Dinamik amaç fonksiyonlu ve statik amaç fonksiyonlu olarak sınıflandırma; amaç fonksiyonunun süreç boyu olduğu gibi kalan statik ve arama boyu değişen (modifiye olan) dinamik (örneğin; rehberli yerel arama algoritması) olduğu şeklinde iki başlık altında toplanabilir.

Meta-sezgisel algoritmalar, bir komşuluk yapısında olan ve değişken komşu arama algoritması gibi farklı komşuluklar kullanarak çeşitliliği artıran değişken komşuluk yapısı olan olarak da sınıflandırılabilir.

Son olarak arama hafızası kullanıp kullanmamasına göre; hafıza kullanımlı ve hafıza kullanımı olmayan algoritmalar olarak sınıflandırmadan bahsedilebilir. Hafıza kullanımı olmayan algoritmalar bir sonraki adımın şu ankiye göre belirlendiği Markov sürecinde seyrederek. Hafıza kullanımı olanlar ise daha önceden alınmış kararları (sonuçları, hareketleri) hafızada tutarak sonraki adımlarda uygulamaya koyarlar. Tabu arama algoritması hafıza kullanımı olan bir algoritmadır.

Bu çalışmada; popülasyon tabanlı algoritmanın tek çözüme dayalı algoritmalara üstünlükleri göz önüne alınarak üç farklı popülasyon tabanlı metasezgisel algoritma kullanılmıştır. Çeşitli algoritmaların aynı probleme uygulanmasının sebebi araştırmacıları yeni metasezgisel algoritmalar üretmeye iten sebeple aynıdır. Mirrjalili vd. (2014) meta sezgisel yöntemlerde No Free Launch (NFL), Türkçe'ye bedava yemek olmaz şeklinde çevrilebilir, teorisinin geçerli olduğunu savunmaktadır. Kısaca bir şeyler elde etmek için mutlaka bir şeylerden feragat edilmesi gerektiğini ifade eden teoremi, Wolpert ve Macready (1996) bu bağlamda bir optimizasyon yöntemi ile her optimizasyon problemi için en iyi sonucu almanın mümkün olmadığını açıklamak için kullanmıştır. Bu durum araştırmacıları yeni meta sezgisel yöntemler geliştirmeye itmiştir.

Beheshti ve Shamsuddin (2013) metasezgisel algoritmaların üstünlüklerini şu şekilde özetlemiştir:

- Sağlam algoritmalar ve birçok optimizasyon problemine uyarlanabilirler.
- Birden fazla optimum çözüme erişilmek istenen problemlere uygulanabilirler.
- Yerel optimuma takılmadan küresel optimuma ulaşabilecek mekanizmalar içerebilirler.
- Probleme özel algoritmalar değildirler.
- Arama ve işleme faaliyetleri ile kısa sürede uygun arama bölgeleri oluşturabilirler.
- Kolayca paralel işlemeye uygulanabilirler.

### 1.8. Etkili Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel gelişim algoritması, genetik algoritmalar (evrimsel algoritmalar) sınıfından bir algoritmadır. Genetik algortmada görülen birtakım eksiklikler için algortmada iyileştirmelere gidilerek yeni algoritmalar geliştirilmiştir. Price ve Storn tarafından 1995 yılında geliştirilen Diferansiyel gelişim algoritması, genelde ikili kodlama vb. kodlamaların kullanıldığı genetik algortmaya karşın gerçek değerli parametreleri kullanarak gerçek parametrelili problemleri de çözülebilen bir genetik algortmadır (Hrstka ve Kucerova, 2004).

Diferansiyel gelişim algortmasında da ilk aşama bir başlangıç popülasyonu üretmektir. Başlangıç popülasyonu;

$$x_{i,j,G=0} = x_j^{(1)} + rand_j[0,1](x_j^{(u)} - x_j^{(1)}) \quad (80)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;  $x_j^{(1)}$  ve  $x_j^{(u)}$  değişkenlere ait alt ve üst değerler,  $x_{i,j,G}$   $G$  jenerasyonunda  $i$  kromozomunun  $j$  parametresi,  $rand_j[0,1]$  rassal olarak 0 ve 1 arasından seçilen bir değerdir (Keskintürk, 2006).

Diferansiyel gelişim algortması, genetik algortmadan farklı olarak çaprazlamadan çok mutasyonun baskın olarak işlev gördüğü bir algortmadır. Uygunluk fonksiyonuna karar verildikten sonra popülasyon bütünüyle değil kromozomları ile ele tek tek ele alınmaktadır. Mutasyon işleminde; seçilen kromozomdan (temel kromozom) başka üç kromozom daha rastgele seçilir ( $r_1, r_2, r_3$ ). İkisinin farkının ölçekleme kromozomu ( $F$ ) parametresi ile çarpılmış değeri diğer kromozom ile toplanarak çaprazlamada kullanılacak yeni kromozom elde edilmektedir. Bu durum eşitlik 81'de verilen bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$n_{i,j,G+1} = x_{j,r_3,G} + F(x_{j,r_1,G} - x_{j,r_2,G}) \quad (81)$$

Daha sonra mutasyon süreci tamamlanan,  $n_{i,j,G+1}$  kromozomu,  $x_{i,G}$  temel kromozomuyla çaprazlanarak  $u_{i,G+1}$  yeni kromozomu üretilir (Keskintürk, 2006). Çaprazlama da yapıldıktan sonra uygunluk fonksiyonuna göre kromozomlar değerlendirilmekte ve mevcut jenerasyon ve

yeni jenerasyon arasında genetik algoritmaya göre daha kolay bir seçme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu durum durdurma kriteri şartları sağlanıncaya dek devam eder.

Diferansiyel gelişim algoritması her ne kadar hızlı ve sağlam olsa da yakınsama hızı konusunda beklentileri karşılamamaktadır. Bu sorunun altından kalkabilmek için Wang vd. (2013) etkili bir diferansiyel gelişim (AEDE) algoritmasını geliştirmişlerdir.

Bu tür algoritmalar genellikle keşif ve sömürü olarak iki aşamadan meydana gelmektedir. Diğer optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi diferansiyel gelişim algoritmasında da keşif ve sömürü aşamaları vardır. Keşif aşamasında arama uzayı olabildiğince geniş alanı kapsayarak aranmaktadır. Bu aşamada bir algoritmanın arama uzayını küresel biçimde arayacak stokastik operatörlere ihtiyacı vardır. Sömürü aşamasında ise keşif aşamasında kaydedilen ümit veren bölgede yerel arama yapma konusundaki yetenekler söz konusudur (Mirjalili vd., 2014).

AEDE algoritması ile amaç, çok-stratejili bir mutasyon mekanizması kullanarak daha dengeli bir keşif-sömürü sürecine ulaşmaktır.

Şekil 34'te akış diyagramı verilen optimizasyon süreci kısaca şöyle özetlenir:

1. Kromozom sayılarını belirleyerek, tıpkı klasik diferansiyel gelişim algoritmasında olduğu gibi rassal bir başlangıç popülasyonu oluşturulur.
2. Durdurma kriteri belirlenir.
3. Oluşturulan popülasyon üç gruba ayrılır.
4. Oluşturulan gruplar için mutasyon operatörleri seçilir.

Diferansiyel gelişim algoritmasına alternatif olacak şekilde iyileştirmeler için yapılan çalışmalarda ortaya çeşitli mutasyon operatörleri çıkmıştır. Araştırmacılar bu operatörleri üç sınıfa ayırmışlardır. Bunlardan ilki başarılı keşif süreci gerçekleştiren ancak yakınsama hızı oldukça düşük olanlar, bir ikincisi yüksek yakınsama hızını yakalayan ancak keşif sürecinde zayıf olanlar ve üçüncüsü keşif ve sömürü sürecinde dengeli olanlar. Bahsedilen operatörler Wang vd., (2011) çalışmasında ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

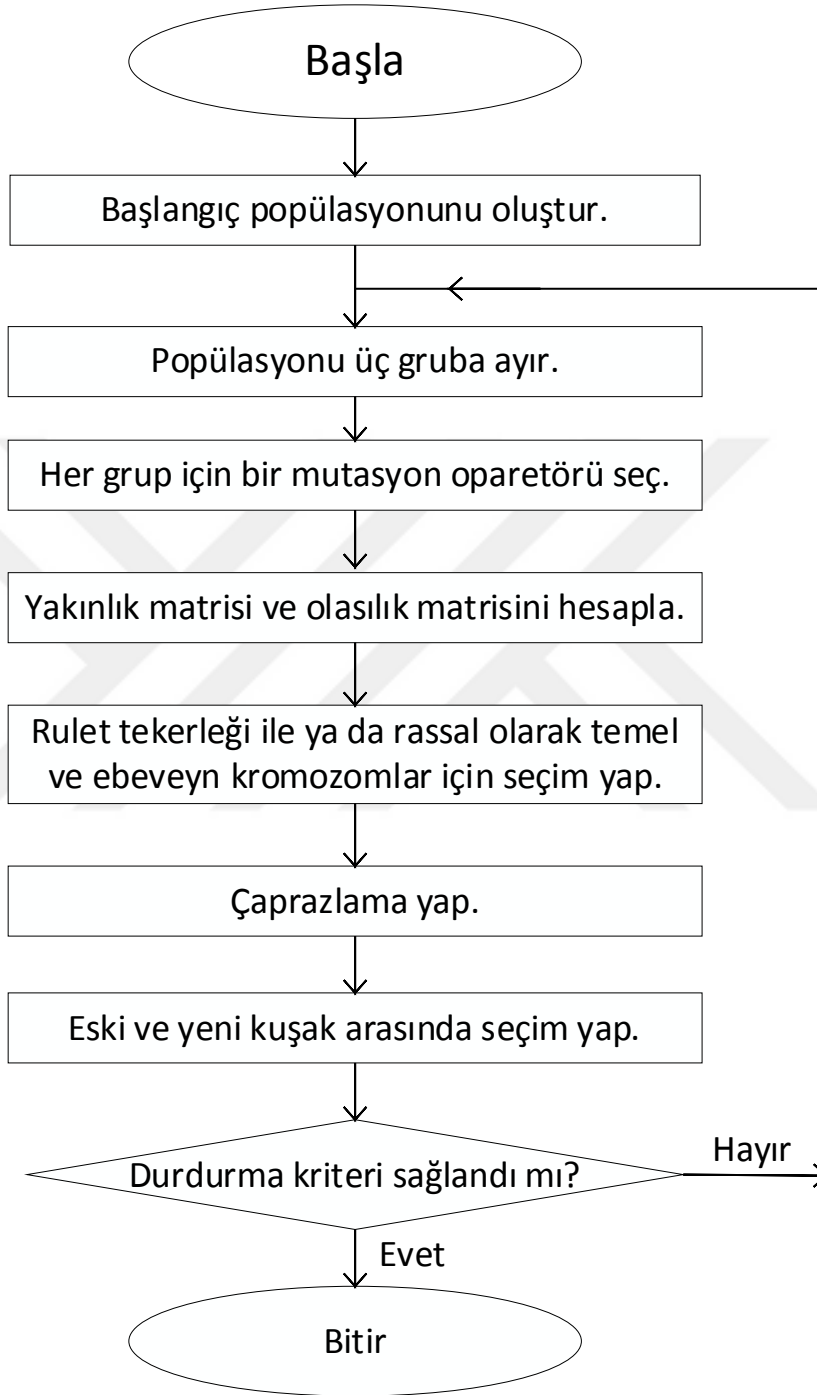
5. Temel kromozom ve ebeveyn kromozomların seçimi için rulet tekerleği seçim yöntemine dayalı istatistiksel bir seçim yöntemi ile ya da rassal olarak seçim yapılır.

Keşif ve sömürü sürecini dengelemek açısından mutasyon aşamasında rol oynayacak 3 birey seçilirken tamamen rassal hareket etmek yerine seçilme olasılıkları temel birey ile



aralarındaki uzaklıkla ters orantılı olacak şekilde olması sağlanabilir. Ancak sürekli bireye en yakın bireyleri seçmek algoritma açısından yine dengesizlik oluşturacağından bu aşamada stokastik bir seçim yöntemine gidilmektedir. Oluşturulan popülasyona, arama alanındaki bireyler arası uzaklığın temel alındığı yakınlık matrisi uygulanmaktadır. Ardından bu matris baz alınarak bireyler arası uzaklığın en düşük olduğu yerde olasılığın en yüksek olduğu olasılık matrisi uygulanmaktadır. Genel kaniya göre yakınlık matrisinin her kuşakta yenilenmesi gerekmez ancak olasılık matrisi birkaç kuşakta bir yenilenmelidir. Bahsedilen çalışma yakınlık matrisinin bireylerin her değişiminde yenilenmesini savunmaktadır. Böylece değiştirmesiz olarak rulet tekerleği seçimi formunda bir istatistiksel bir seçim metodu uygulanmış olur. Sonuç olarak, mutasyona katılacak diğer iki birey rassal olarak değil istatistiksel bir metotla seçilmiş olur (Epitropakis, 2011).

6. Klasik diferansiyel gelişim algoritmasıyla aynı şekilde çaprazlama yapılır.
7. Uygunluk değerine göre eski ya da yeni üretilen kuşak popülasyona dahil edilir. Seçim işlemi klasik diferansiyel gelişim algoritmasındaki gibidir.
8. Durdurma kriteri sağlanıncaya dek üçüncü adıma dönlür.



Şekil 34. AEDE algoritmasının akış diyagramı

### 1.9. Bozkurt Algoritması

Bozkurt Algoritması, popülasyon tabanlı sürü zekâsına dayanan meta sezgisel bir algoritmadır. Diğer popülasyon tabanlı algoritmalar gibi rassal bir başlangıç popülasyonu (çözüm kümesi) ile başlayıp iterasyonlar doğrultusunda çözüm kümesini genişleterek arama yapmaktadır.

Bozkurt algoritması; bozkurtların (*Canis Lupus*) doğada sürü hareketleri ve avlanma taktiklerinden esinlenilerek Mirjalili vd. (2014) tarafından geliştirilmiş meta sezgisel bir algoritmadır. Besin piramidinde üst seviyede bulunan bozkurtlar, bir lider kurt (alfa) tarafından yönetilen 5-12 bireyden oluşan sürüler olarak yaşar ve avlanırlar. Hiyerarşide en üst sevide bulunan lider alfa kurdu takip eden sırasıyla beta kurt, omega kurt ve delta kurtlar her biri takımda ayrı bir görev alarak hiyerarşik bir düzene göre hareket etmektedirler. Alfa kurt avı bulan ve sürüdekilerin yaşamları ile ilgili hayati kararları alan üyedir. Beta, kara alma sürecinde alfaya yardım etmekte ve sürünün geri kalan kendinden düşük rütbedeki kurtları ile aradaki iletişimi sağlamaktadır. Ayrıca alfa öldüğünde yerini alma ihtimali yüksektir. Gruptaki en düşük rütbeli kurtlar olan omega kurtlar, genelde yavru kurtların bakımını üstlenmekte, gerekirse onlarla geride beklemekte ve av sırasında diğer kurtlardan sonra beslenmektedir. Bunun dışında kalan kitle delta kurtlardır. Bunlar topraklarının sınırlarını gözlemekte ve avcılıkta sürüye yardım etmektedirler (Mirjalili vd., 2014).

Bozkurt algoritmasına göre bir optimizasyon probleminin en iyi aday çözümü alfa ( $\alpha$ )'dır. Bu sebepten ötürü sırasıyla beta ( $\beta$ ) ve delta ( $\delta$ ) hiyerarşik düzende en iyi aday çözümler olarak sıralanabilir. Kalan aday çözümler ise omega ( $\omega$ ) sınıfında kabul edilebilir. Bozkurt algoritmasında omega diğer üç grubu takip etmektedir (Mirjalili vd., 2014).

Muro vd. (2011) bozkurtların hiyerarşik bir düzene ya da sosyal ve bilişsel yeteneklere sahip olmadan avlanabildiklerini öne sürmüş ve bu avlanma davranışını matematiksel olarak modellemiştir. Muro vd. (2011) şekil 35'te görülebilen av sürecini kısaca şöyle özetlemiştir:

- Av etrafında daireler çizme
- Avı kovalama ve etrafını sarma
- Avı kovalamayı bırakıp av koşmayı bırakana dek pusuya yatma
- Avı takip edip kaçan avı yakalama



Şekil 35. Bozkurtların avlanma süreci a) takip etme, iz sürme, b-d) avı kovalama, taciz etme, etrafında daireler çizme, e) vaziyet alma ve saldırı (Muro vd. 2011).

Bu süreçler ve bozkurtlar arasında olduğu varsayılan sosyal hiyerarşi ilkeleri birleştirilerek Mirjalili vd. (2014) tarafından matematiksel olarak eşitlik 82’de verildiği gibi modellenmiştir. Av etrafında daireler çizen bozkurtlar:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}|\vec{C}\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (82)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada  $t$ , halihazırdaki iterasyonu ifade etmektedir.  $\vec{x}(t+1)$  kurdun bir sonraki konumu,  $\vec{x}_p(t)$  ise avın konumudur.  $\vec{A}$  katsayısı ise eşitlik 83’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{A} = 2\vec{a}r_1 - \vec{a} \quad (83)$$

Burada  $\vec{a}$  değeri 0'dan 2'ye kadar iterasyon sürecinde doğrusal olarak değer alan bir vektördür.  $\vec{X}(t)$  kurdun hali hazırdaki konumunu ifade ederken  $\vec{C}$  bir başka katsayıdır.

$$\vec{C} = 2r_2 \quad (84)$$

$r_1$  ve  $r_2$  0 ve 1 arasında rassal değerler alan sayılardır. Eşitlik 84'te gösterildiği üzere doğada avın kendini çeşitli şekillerde konumlandırmasına göre kurdun da bu doğrultuda yerini değiştirmesi avın konumuna göre sürekli lineer artan rassal değerler yardımıyla güncellenmektedir.

Normal şartlarda alfa sürüyü beta ve delta kurtlar eşliğinde ava doğru götürür. Ancak optimizasyon problemlerinde genellikle aranan optimum çözüm belli olmadığı için bu tarz bir modelleme yapılamamaktadır. Bu sebeple, alfa en iyi, beta en iyi ikinci ve delta da en iyi üçüncü aday çözüm olarak isimlendirilmektedir. Diğer arama ajanları da bu üçüne göre sürekli konumlarını güncellemektedir (Şekil 36). Güncellenen konumlar,

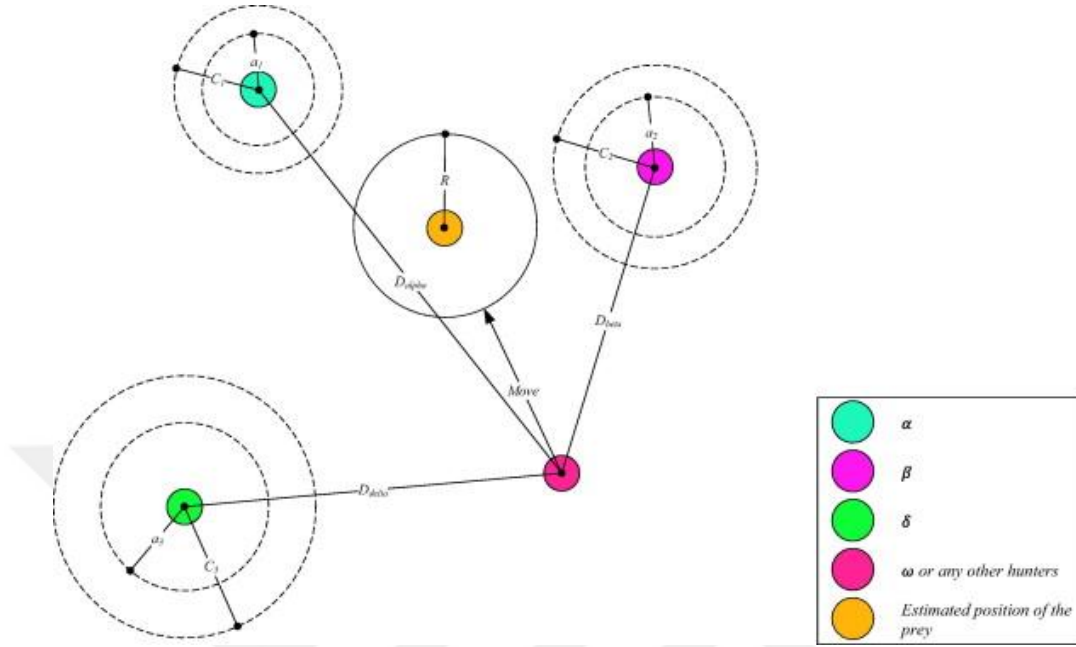
$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (85)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (86)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (87)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (88)$$

olarak ifade edilmiştir.

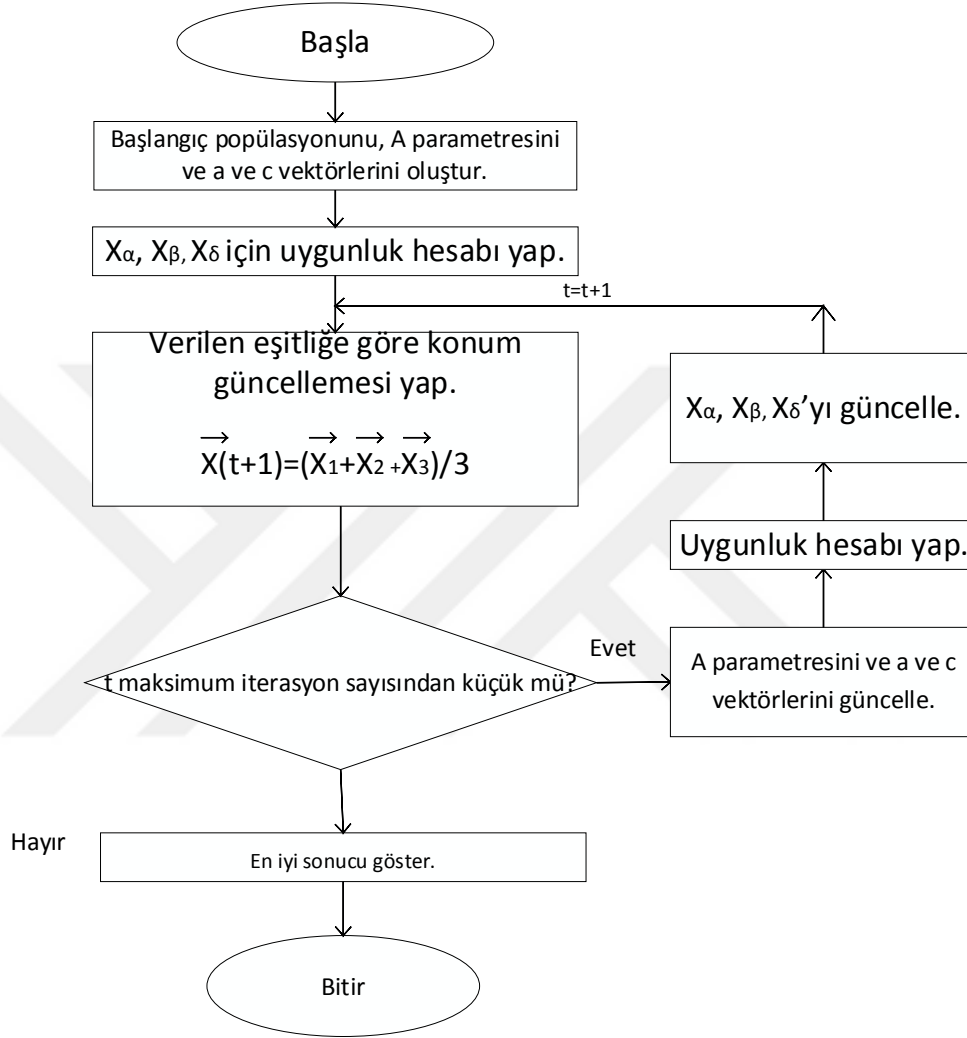


Şekil 36. Bozkurtların konumlarını güncellemeleri (Mirjalili vd. 2014).

Doğal şartlarda sürü av hareket etmeyi bırakana dek saldırmaz. Saldırı aşaması optimizasyonun sömürü aşamasıdır. Bu durumu modellemek üzere 2'den 0'a doğrusal olarak azalan  $\vec{a}$  değeri kullanılmaktadır. Bu durumda  $\vec{A}$  katsayısı  $[-a, a]$  aralığında değer almaktadır. Böylece;  $|\vec{A}| < 1$  durumunda sürü ava saldırmaktadır.  $|\vec{A}| > 1$  durumunda ise sürü daha iyi bir av aramaya başlar.

Normalde alfa, beta ve delta kurtları daha etkili bir arama yapmak üzere ayrılırlar. Bu durumu algorithmada temsil etmek üzere araştırmacılar,  $\vec{A}$  değerinin 1'den büyük ve -1'den küçük değerler almasını sağlamışlardır. Böylece keşif süreci etkili bir şekilde işler.

Doğayı düzgün şekilde taklit etmek üzere ava rassal değerler vererek arama sürecini canlandıran, iterasyon sırasında rassal değerler alan bir başka katsayı olan  $\vec{C}$  katsayısı kullanılmıştır. Bu katsayı,  $\vec{A}$  katsayısının aksine lineer değil 0 ve 1 arasında tamamen rasgele değerler alır. Böylece av sürecini zorlaştıran diğer etmenler de göz önüne alınmış olur. Böylece yerel optimumlara takılmaktan da kaçınılmış olunur ( $\vec{C} > 1$  veya  $\vec{C} < 1$ ). Şekil 37'de algoritmanın akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 37. Bozkurt algoritması için akış diyagramı

### 1.10. Rao Algoritmaları

Kenneth Sörensen (2013) sürekli bir yenisiyle karşılaştığımız metaforlara dayalı optimizasyon algoritmalarının durumunu bambaşka bir metaforla özetlemiştir. Ona göre bu durum bir gün *Nature* dergisinin haftalık sayısını incelerken ‘Parçacık fiziğiyle ilgili yemek tabanlı özgün bir teori’ şeklinde bir makaleyle karşılaşmaya benzer. Makaledeki araştırmacı, standart parçacık teorisinin evrenin işleyişini bütünüyle açıklayamadığını öne sürerek atom altı

parçacıkların davranışlarını kendi teorisiyle açıklamaya çalışmıştır. Bunun için yemek ile alakalı terimler kullanmıştır. Örneğin proton ve nötronları oluşturan kuarklara et, nötronları oluşturan leptonlara sebze ismi vererek bunların birleşimine yemek (atom) demiştir. Elektromanyetik kuvvetleri taşıyan fotonlara yemeğin oluşturduğu tat demiştir. Saf enerjiden oluşan, parçacıklara kütlelerini verdiği söylenen Higgs Bozonu ise elbette yemeğe tat katan tuzdur. Böylesi bir makalenin bilim dünyasınca dikkate alınmayacağı açıktır. Optimizasyon sahasındaki yeni meta-sezgisel algoritma çalışmaları da bu örnekle fazlasıyla benzeşmektedir. Sörensen'e göre; çeşitli hayvanların, gezegenlerin, müzik aletlerin taklit edilmesiyle oluşturulan metafor tabanlı metasezgisel algoritmalar gereksiz olmalarının yanında bilimsel kalite ve araştırma alanına da zararlıdır.

Bu çerçevede Rao (2020), araştırmacıların metafor tabanlı teknikler geliştirmek için uğraşmak yerine karmaşık problemleri çözebilecek basit optimizasyon yöntemleri geliştirmek üzerine odaklanması fikrini desteklemiştir.

Bunun üzerine üç adet metaforsuz ve algoritmaya özel parametresiz optimizasyon algoritması geliştirmiştir.

Bu çalışmada Rao-1 ve Rao-3 algoritmaları çalışılmıştır. Rao algoritmalarında da diğer stokastik meta-sezgisel algoritmalarinkine benzer belli başlı adımlar vardır:

- Rastgele çözümlerin yer aldığı bir çözüm kümesi olan başlangıç popülasyonu oluşturulur.

Öncelikle minimize veya maksimize edilecek bir amaç fonksiyonu ( $f(x)$ ) belirlenir.  $m$  adet değişken,  $n$  adet çözüm adayı (popülasyon büyüklüğü  $k = 1, 2, \dots, n$ ) olan herhangi bir iterasyon,  $i$ 'nci iterasyon olsun.  $X_{j,k,i}$ ;  $i$ 'nci iterasyonun,  $k$ 'nci aday çözümünün,  $j$ 'nci değişkeni adını alır.

- Durdurma kriteri belirlenir .

Optimum sonucu bulmak üzere bulunan sonuçların sürekli bir döngü içerisinde olmaması için süreci sonlandıracak kriteri durdurma kriteri adı verilir. Bu kriter; sınırlı bir hesaplama süresi, iyileştirmeler sonucu oluşan çözümler arası farkın belirli bir değere tekabül etmesi, önceden kararlaştırılmış bir amaç fonksiyonuna ulaşmak, döngü sayısının (popülasyon ve iterasyon) muayyen olması vs. şeklinde oluşturulabilir.

- En iyi ve en kötü çözümler belirlenir.



En iyi değer  $f(x)_{best}$  ve en kötü değer  $f(x)_{worst}$  adını alır.

- Çözüm kümelerine en iyi ve en kötü çözümlere dayalı rassal oranda iyileştirmeler yapılır.

Rao-1 için;

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - X_{j,worst,i}), \quad (89)$$

eşitliği kullanılırken, Rao-2 için;

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - X_{j,worst,i}) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} \text{ or } X_{j,l,i}| - |X_{j,l,i} \text{ or } X_{j,k,i}|), \quad (90)$$

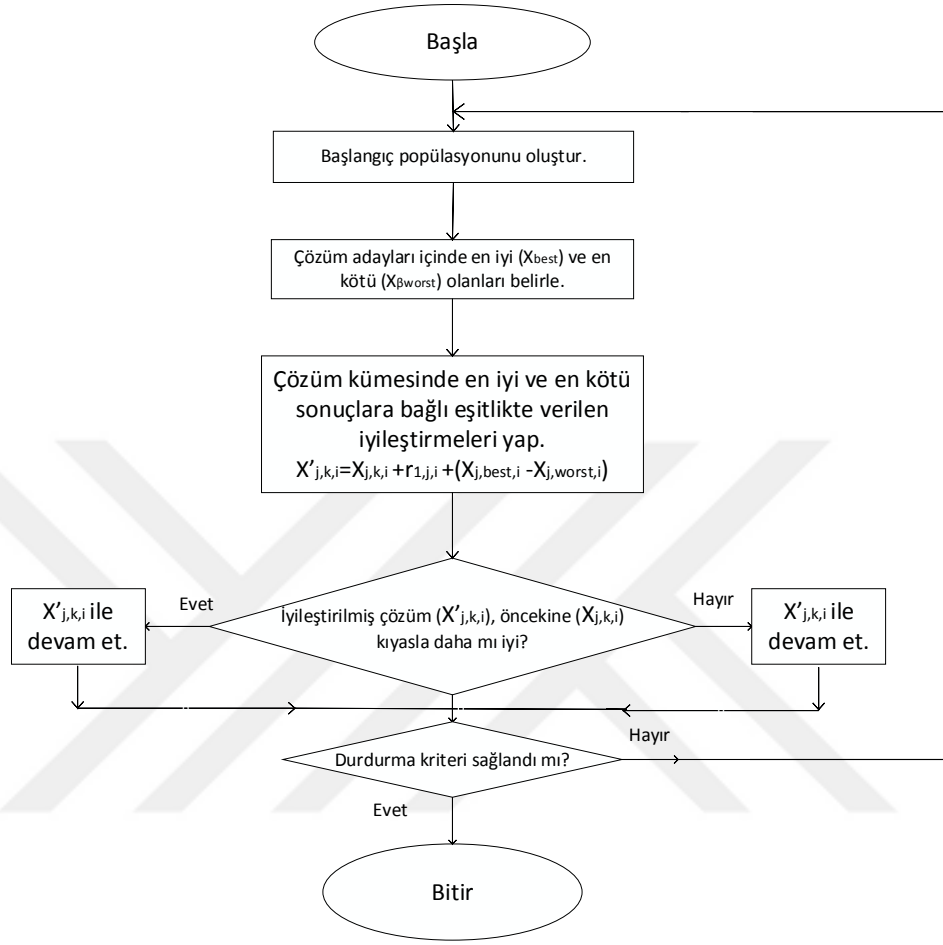
Rao-3 için;

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,worst,i}|) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} \text{ or } X_{j,l,i}| - |X_{j,l,i} \text{ or } X_{j,k,i}|), \quad (91)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada;  $X_{j,best,i}$ ,  $X_{j,worst,i}$  ve  $X'_{j,k,i}$ , sırasıyla  $i$ 'nci iterasyonun,  $j$ 'nci değişkeninin en iyi, en kötü ve iyileştirilmiş aday çözümleri,  $r_{1,j,i}$  ve  $r_{2,j,i}$  ise bunların 0 ve 1 arasında rassal değerler alan katsayılarıdır. Eşitlik 90 ve eşitlik 91'de seçilen  $k$ 'nci aday bir başka ( $l$ 'nci) aday ile karşılaştırılarak uygunluk değeri hangisinin iyi ise o çözümün kullanılması uygun görülmüştür.

- Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar 2. aşamaya dönülür.
- Optimum sonuç kaydedilir.

Şekil 38'de algoritmanın akış diyagramı göstermiştir.



Şekil 38. Rao 1 algoritması için akış şeması

Rao algoritmaları algoritmaya özel parametre kullanmadığından araştırmacının üzerine ek bir yük bindirmeyecek ve kolaylık sağlayacaktır. Şekil 38’de Rao-1 algoritması için verilen akış şeması Rao-2 ve Rao-3 için aynıdır. Yalnızca şemada gösterilen eşitlik 89 sırasıyla 90 ve 91 ile yer değiştirecektir.

Çalışmada Rao-1 ve Rao-3 algoritmaları kullanılmış dolayısıyla eşitlik 89 ve eşitlik 90 göz önüne alınmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Çalışmada; betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyon problemi olarak modellenmiş, amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlar belirlenmiş, optimizasyon problemi bu modellemeye uygun olarak taban plağında bir dış bulunan ve bulunmayan iki betonarme konsol dayanma duvarı için sayısal örneklerle desteklenerek çözülmüştür.

### 2.1. Betonarme Konsol Dayanma Duvarı Tasarımı Optimizasyonu

Tasarım optimizasyonu uzun süredir optimizasyon çalışmalarının bir konusudur. İnşaat mühendisliğinde; çelik kafes sistemlerinin, temel yapılarının, ulaşım ağlarında trafik sinyalizasyonunun ve daha birçok problemin optimum çözüme kavuşturulmasında etkin rol oynamaktadır. Bir yapının optimumluk durumu, aynı anda hem yapının stabil halde kalması için sağlaması gereken şartları sağladığı hem de en ekonomik tasarıma sahip olduğu durumudur.

Çalışmada iki amaç fonksiyonu kullanılmıştır. İlki yapının toplam ağırlığı ( $f_{obj1}$ ) ve ikincisi yapının toplam maliyetidir ( $f_{obj2}$ ). Amaç fonksiyonları şöyle ifade edilmektedir:

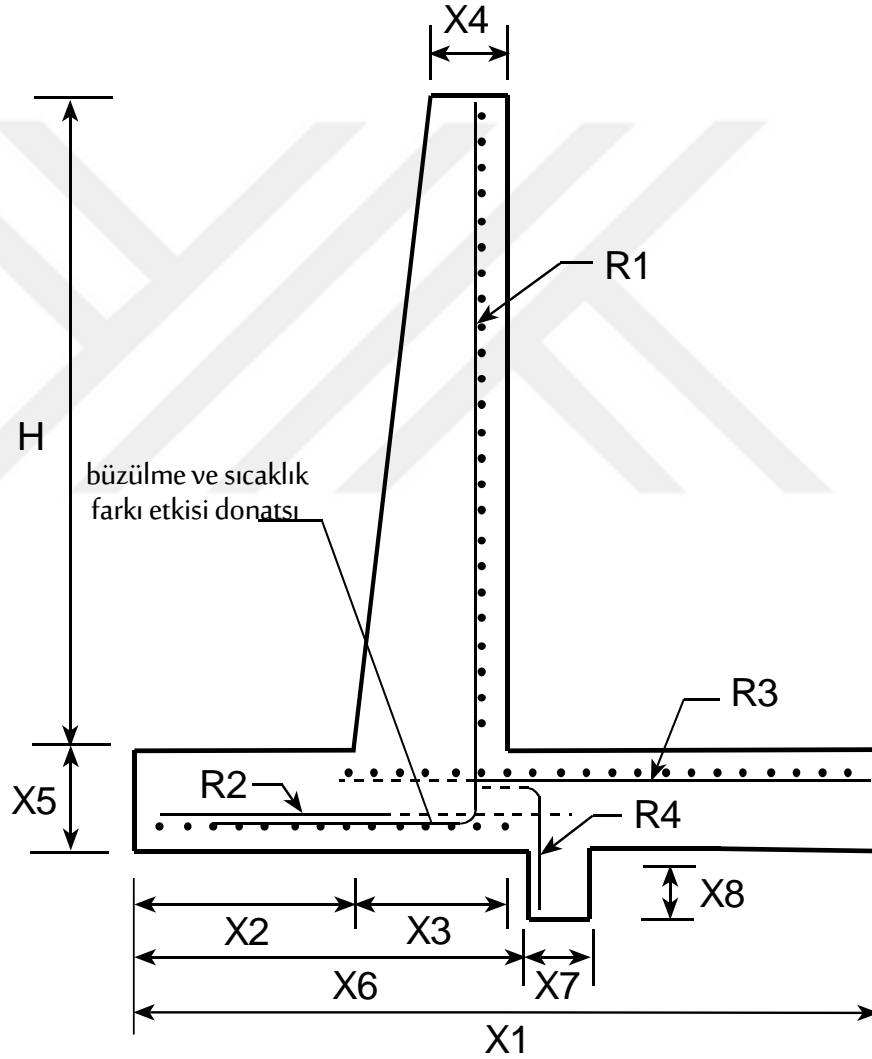
$$f_{obj1} = W_{st} + 100V_c\gamma_c \quad (92)$$

$$f_{obj2} = c_s W_{st} + c_c V_c \quad (93)$$

Burada;  $W_{st}$  duvarın birim uzunluğundaki çelik donatı ağırlığı,  $V_c$  duvarın birim uzunluğundaki beton hacmi,  $\gamma_c$  betonun birim hacim ağırlığı,  $c_s$  ve  $c_c$  ise sırasıyla çelik ve betonun birim maliyetleridir.

Bir tasarım optimizasyonu için sistemin modellemesini tanımlayacak tasarım değişkenlerine ihtiyaç vardır. Optimizasyon sürecinde tasarıma göre şekil alacak olan bu değişkenlerin optimum çözümü aranmaktadır. Tasarım değişkenleri kesikli ya da sürekli olmasına göre optimizasyon problemi kesikli ya da sürekli olarak adlandırılmaktadır. İkisi arasındaki farktan 'optimizasyon' kısmında bahsedilmiştir. Dayanma duvarı için tasarım

değişkeni olarak duvarın geometrik boyutları, kullanılan malzeme tipi, donatı miktarı vb. seçilebilmektedir. Bu çalışmada duvarın geometrik değişkenleri olarak boyutları ve yapısal değişkenleri olarak kritik kesitlerindeki donatı durumu seçilmiştir. Çalışmadaki modelleme Sarıbaş ve Erbatur (1996) 'ın hazırladığı modellemeden uyarlanmıştır (şekil 39).



Şekil 39. Betonarme konsol dayanma duvarı tasarım değişkenleri

Şekil 39'da ifade edilen değişkenlerden geometrik değişkenler,

X1: Temel tabanının genişliği

X2: Temel tabanında ön ampatman genişliği

X3: Duvarın en alt kısmında gövde genişliği

X4: Duvarın en üst kısmında gövde genişliği

X5: Temel tabanının kalınlığı

X6: Temel tabanında ön ampatmanın ön yüzünden dış kısmının ön yüzüne uzaklık

X7: Taban dış kısmının genişliği

X8: Taban dış kısmının yüksekliği

ve yapısal değişkenler;

R1: Gövdede donatı donatı kesit alanı

R2: Temel tabanında ön ampatmanda yatay donatı kesit alanı

R3: Temel tabanında topuk kısmında yatay donatı kesit alanı

R4: Temel tabanında dış kısmının dikey donatı alanı olarak ifade edilmektedir.

Tablo 2’de R1, R2, R3 ve R4’ün ifade ettiği değerler gösterilmiştir. Belirli kesitlerdeki donatı çap (10-30) ve sayısını (3-28) kesikli değerlerle ifade etmek üzere 1’den 264’e dek bir donatı listesi hazırlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Donatı listesi

Donatı			
No.(n)	Çubuk	Boyut	As ( $cm^2$ )
1	3	10	2,356
2	4	10	3,141
3	3	12	3,393
4	5	10	3,927
5	4	12	4,524
6	3	14	4,618
7	6	10	4,712
.	.	.	.
.	.	.	.
262	28	24	126,669
263	18	30	127,234
264	24	26	127,423

Tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar belirlenebilmekte, böylece değişkenler bu sınırlar içerisinde değer almaktadır. Tasarım optimizasyonunda tasarım için gerekli olan kısıtlar teknik şartnameler ve standartlar üzerinden seçilebilmektedir. Böylece; bu kısıtları sağlayan modellemeler optimum olarak düşünülebilir. Yapı tasarımı optimizasyonunda genelde yapının boyutları ya da yapı elemanlarının davranışları kısıtlanmaktadır. Dayanma duvarı

optimizasyonunda da dayanma duvarının geoteknik ve yapısal davranışları ve duvarın bazı elemanlarının boyları belli başlı kısıtlar ile çerçevesiştir. Duvarın geoteknik stabilitesini korumak adına duvara uygulanan kuvvetleri hesaplayarak duvarın gereken bölgelerinde kayma, devrilme, taşıma gücü yenilmesi ihtimallerine karşı güvenlik katsayıları sınır olarak kullanılmıştır. Duvarın kritik kesitlerindeki eğilme ve kesme kırılması gibi tehlikelerden korunması adına standart eğilme ve kesme mukavemeti değerleri sınır kabul edilmiştir. Yine teknik şartnamelere göre duvar eleman boyları ve donatı durumu ile ilgili çeşitli kısıtlar belirlenmiştir. Daha önce hesap yöntemlerinden bahsedilen devrilme, kayma, taşıma gücü tahkikleri için hesaplanan tasarım güvenlik sayıları ile güvenlik sayıları karşılaştırılmaktadır.

Bu durumda optimizasyon sürecinde devrilmeye karşı geoteknik kısıt;

$$g(1) = \frac{G_{S(\text{devrilme})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{devrilme})}} - 1 \leq 0 \quad (94)$$

olarak ifade edilmektedir. Benzer şekilde kaymaya karşı geoteknik kısıt;

$$g(2) = \frac{G_{S(\text{kayma})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{kayma})}} - 1 \leq 0 \quad (95)$$

olarak ifade edilirken, taşıma gücü yenilmesine karşı geoteknik kısıt,

$$g(3) = \frac{G_{S(\text{taşıma gücü})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{taşıma gücü})}} - 1 \leq 0 \quad (96)$$

olarak ifade edilmektedir. Taşıma gücü ile alakalı bir diğer sınır, zeminde çekme gerilmesi oluşmaması gerekliliğidir ve bu durumla alakalı kısıt eşitlik 97'de verilmiştir.

$$g(4) = q_{min} \geq 0 \quad (97)$$

Daha önce bahsedildiği üzere konsol dayanma duvarı için belirli kritik kesitlerde iç stabilite analizleri yapılmaktadır. Dayanma duvarı elemanları için eğilme ve kesme dayanımları

yapısal kısıtları oluşturmaktadır. Kısıtlar kesitin eğilmedeki taşıma gücü ( $M_r$ ) ve tasarım eğilme momenti ( $M_d$ ) kıyaslanarak eğilmeye göre ve kesitte eğik çatlama dayanımı ( $V_{cr}$ ) ve tasarım kesme kuvveti ( $V_d$ ) kıyaslanarak kesmeye göre olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Bu kısıtlar elemanlara uygulanarak 8 yapısal belirlenmiştir.

Bu kısıtları ifade eden bağıntılar eşitlik 98 ve 99'da verilmiştir.

$$g(5 - 8) = \frac{M_d}{M_r} - 1 \leq 0 \quad (98)$$

$$g(9 - 12) = \frac{V_d}{V_{cr}} - 1 \leq 0 \quad (99)$$

Minimum ve maksimum donatı alanı kısıtları ise eşitlik 100 ve 101'de verilen bağıntılarla ifade edilmektedir.

$$g(13 - 16) = \frac{A_{smin}}{A_s} - 1 \leq 0 \quad (100)$$

$$g(17 - 20) = \frac{A_s}{A_{smax}} - 1 \leq 0 \quad (101)$$

Betonarme duvar elemanları için donatı kenetlenme boyları ile alakalı kısıtlar düz kenetlenme ve kancalı için gövde, burun, topuk ve dış için sırasıyla,

$$g(23) = \frac{l_{bgövde}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \text{ veya } g(23) = \frac{l_{bkgövde}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \quad (102)$$

$$g(24) = \frac{l_{bburun}}{X1-X2-cc} - 1 \leq 0 \text{ veya } g(24) = \frac{l_{bkburun}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \quad (103)$$

$$g(25) = \frac{l_{btopuk}}{X2+X3-cc} - 1 \leq 0 \text{ veya } g(25) = \frac{l_{bktopuk}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \quad (104)$$

$$g(26) = \frac{l_{bdış}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \text{ veya } g(26) = \frac{l_{bkdış}}{X5-cc} - 1 \leq 0 \quad (105)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Duvar geometrisinin makul şekilde olması adına hazırlanmış kısıtlar eşitlik 106 ve 107 ile ifade edilebilmektedir.

$$g(21) = \frac{x_2+x_3}{x_1} - 1 \leq 0 \quad (106)$$

$$g(22) = \frac{x_6+x_7}{x_1} - 1 \leq 0 \quad (107)$$

Optimizasyon sürecinde kullanılacak kısıtlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Kısıtlar optimizasyon problemlerinin çözümünü zorlaştırmaktadır. Ceza fonksiyonları sayesinde bu durum daha içinden çıkılabilir hale gelmiştir.



Tablo 3. Betonarme konsol dayanma duvarı optimizasyonunda kullanılabilir kısıtlar

Kısıt	Açıklama
$g(1) = \frac{G_{S(\text{devrilme})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{devrilme})}} - 1 \leq 0$	Devrilmeye karşı güvenlik
$g(2) = \frac{G_{S(\text{kayma})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{kayma})}} - 1 \leq 0$	Kaymaya karşı güvenlik
$g(3) = \frac{G_{S(\text{taşıma gücü})}(\text{tasarım})}{G_{S(\text{taşıma gücü})}} - 1 \leq 0$	Taşıma gücü yenilmesine karşı güvenlik
$g(4) = q_{\min} \geq 0$	Minimum yatak gerilmesi
$g(5 - 8) = \frac{M_d}{M_r} - 1 \leq 0$	Kritik kesitte eğilme dayanımı
$g(9 - 12) = \frac{V_d}{V_{cr}} - 1 \leq 0$	Kritik kesitte kesme dayanımı
$g(13 - 16) = \frac{A_{s\min}}{A_s} - 1 \leq 0$	Kritik kesitte minimum donatı alanı
$g(17 - 20) = \frac{A_s}{A_{s\max}} - 1 \leq 0$	Kritik kesitte maksimum donatı alanı
$g(21) = \frac{X_2 + X_3}{X_1} - 1 \leq 0$	Duvar boyutları için geometrik sınır
$g(22) = \frac{X_6 + X_7}{X_1} - 1 \leq 0$	Duvar boyutları için geometrik sınır
$g(23) = \frac{l_{b\text{gövde}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$ veya $g(23) = \frac{l_{bk\text{gövde}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$	Düz ve kancalı donatı için gövdede kenetlenme boyu
$g(24) = \frac{l_{b\text{burun}}}{X_1 - X_2 - cc} - 1 \leq 0$ veya $g(24) = \frac{l_{bk\text{burun}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$	Düz ve kancalı donatı için ön ampatmanda kenetlenme boyu
$g(25) = \frac{l_{b\text{topuk}}}{X_2 + X_3 - cc} - 1 \leq 0$ veya $g(25) = \frac{l_{bk\text{topuk}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$	Düz ve kancalı donatı için arka ampatmanda kenetlenme boyu
$g(26) = \frac{l_{b\text{dis}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$ veya $g(26) = \frac{l_{bk\text{dis}}}{X_5 - cc} - 1 \leq 0$	Düz ve kancalı donatı için dite kenetlenme boyu

## 2.2. Tasarım Örnekleri

Bu çalışmada belli başlı sabit parametrelerin girdi olarak kullanıldığı iki farklı tasarım farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak boyutlandırılmıştır. Tasarımı yapılacak betonarme konsol dayanma duvarı tasarım değişkenleri Şekil 39'da verildiği gibidir. Aynı değişkenler üzerinden eşitlik 92 ve 93'teki amaç fonksiyonlarına ulaşılarak sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Tabanında dış kesit bulunan ve bulunmayan iki betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonu yapılmıştır. Tablo 3'te verilen kısıtların kullanılması için gereken formüllerden birinci bölümde bahsedilmiştir.

Bozkurt Algoritması (GWO), Etkili Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması (AEDE) , Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmaları çalıştırılarak optimizasyon yapılmıştır. Algoritmalar MATLAB programı üzerinde çalıştırılmış, en iyi ve ortalama değerler kaydedilmiştir.

Matrix Laboratory (matris laboratuvarı), kısaca MATLAB, özellikle mühendisler ve bilim insanları için tasarlanmış bir programlama platformudur. MATLAB matris tabanlı bir dile sahiptir. MATLAB kullanılarak veriler analiz edilebilir, model ve uygulamalar üretilebilir, algoritmalar geliştirilebilir (URL-2, 2020).

Her bir algoritma için başlangıç popülasyonu 50, iterasyon sayısı 1000 olarak seçilmiştir. Programın çalıştırıldığı bilgisayar Intel (R) Core (TM) i3-3227U CPU 1,90 GHz işlemciye sahiptir. Her bir örnek için her bir algoritma 30'ar kez koşturulmuştur.

### 2.2.1. Birinci Örnek

İlk örnek taban plağında kaymaya karşı bir dış kesit yerleştirilmeksizin tasarlanan bir konsol dayanma duvarı içindir. Bu örnek için girdi olarak kullanılan parametreler Tablo 4'te listelenmiştir. Burada maliyet hesabı için kullanılan parametreler olan beton ve çelik birim maliyetleri Çevre Şehircilik Bakanlığı'nın 2020 yılında yayımlanmış olduğu İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları kitabından alınmış güncel verilerdir. Tasarım için 8 farklı tasarım değişkeni kullanılmıştır. Bu tasarım değişkenlerinden 5 tanesi duvarın geometrik boyutlarını ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ ), 3 tanesi de duvarın donatı durumlarını ( $R_1, R_2, R_3$ ) ifade etmektedir. Bu ifadeler Şekil

39’da gösterilmiştir. Bu değişkenler için alt ve üst sınırlar Tablo 5’te gösterildiği gibidir (Saribaş ve Erbatur 1996). Tasarım örneği için 21 adet kısıt kullanılmıştır (Tablo 3).

Tablo 4. Birinci örnek için girdi olarak kullanılan parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Duvar yüksekliği	H	3	m
Çelik donatı akma dayanımı	$f_y$	420	MPa
Beton basınç dayanımı	$f_c$	25	MPa
Beton örtü kalınlığı	cc	7	cm
Büzülme ve sıcaklık donatı yüzdesi	$\rho_{st}$	0,002	-
Sürşarj yükü	Q	20	kPa
Arka dolgu eğimi	B	10	°
Taban zemindeki kayma mukavemeti açısı	$\varphi_{taban}$	0	°
Dolgunun kayma mukavemeti açısı	$\varphi$	36	°
Dolgunun birim hacim ağırlığı	$\gamma_{dolgu}$	17,5	kN/m <sup>3</sup>
Taban zemindeki birim hacim ağırlığı	$\gamma_{taban}$	18,5	kN/m <sup>3</sup>
Çeliğin birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	78,5	kN/m <sup>3</sup>
Betonun birim hacim ağırlığı	$\gamma_c$	23,5	kN/m <sup>3</sup>
Duvarın önündeki Zemin derinliği	D	0,5	m
Dönmeye karşı güvenlik katsayısı	$F_{SO_{design}}$	1,5	-
Kaymaya karşı güvenlik katsayısı	$F_{SS_{design}}$	1,5	-
Taşıma gücü yenilmesine karşı güvenlik katsayısı	$F_{SB_{design}}$	1,5	-
Temel zemindeki kohezyon	$c_{base}$	125	kPa
Dolgu zemininin kohezyonu	c	0	kPa
Beton birim maliyeti	$C_c$	178	TL/m <sup>3</sup>
Çelik birim maliyeti	$C_s$	2,68	TL/kg

Tablo 5. Birinci örnekteki tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar (Saribaş ve Erbatur 1996)

Tasarım değişkeni	Birim	Alt sınır	Üst sınır
X1	m	1,3090	2,3333
X2	m	0,4363	0,7777
X3	m	0,2000	0,3333
X4	m	0,2000	0,3333
X5	m	0,2722	0,3333
R1	-	1	264
R2	-	1	264
R3	-	1	264

Optimizasyon için amaç fonksiyonu eşitlik 92 ve 93'te verildiği gibi, ayrı ayrı ağırlık ve maliyet için hesaplanmıştır. Optimizasyon sonucunda hesaplanan en düşük ağırlıklı dayanma duvarı ve en düşük maliyetli dayanma duvarı tasarımı için elde edilen tasarım değişkenleri sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7'de sunulmuştur. Amaç fonksiyonuna göre her algoritmanın sonuç olarak sunduğu en düşük ağırlıklı dayanma duvarı ve en düşük maliyetli dayanma duvarı tasarımı için en iyi ve ortalama değerler Tablo 8'de gösterilmiştir. Tablo 8'de ayrıca maliyet ve ağırlık amaç fonksiyonu baz alınarak dayanma duvarı için kullanılan toplam beton ve çelik miktarı da belirtilmiştir.

Tablo 6. Birinci örneğin düşük ağırlıklı optimum tasarımı için tasarım değişkenleri

	X1	X2	X3	X4	X5	R1	R2	R3
<b>GWO</b>	1,794	0,637	0,205	0,200	0,270	82 (28Φ10)	8 (7Φ10)	14 (9Φ10)
<b>Rao-1</b>	1,794	0,644	0,204	0,200	0,270	85 (20Φ12)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)
<b>Rao-3</b>	1,804	0,722	0,203	0,200	0,270	85 (20Φ12)	11 (4Φ14)	9 (5Φ12)
<b>AEDE</b>	1,826	0,725	0,224	0,201	0,270	61 (23Φ10)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)

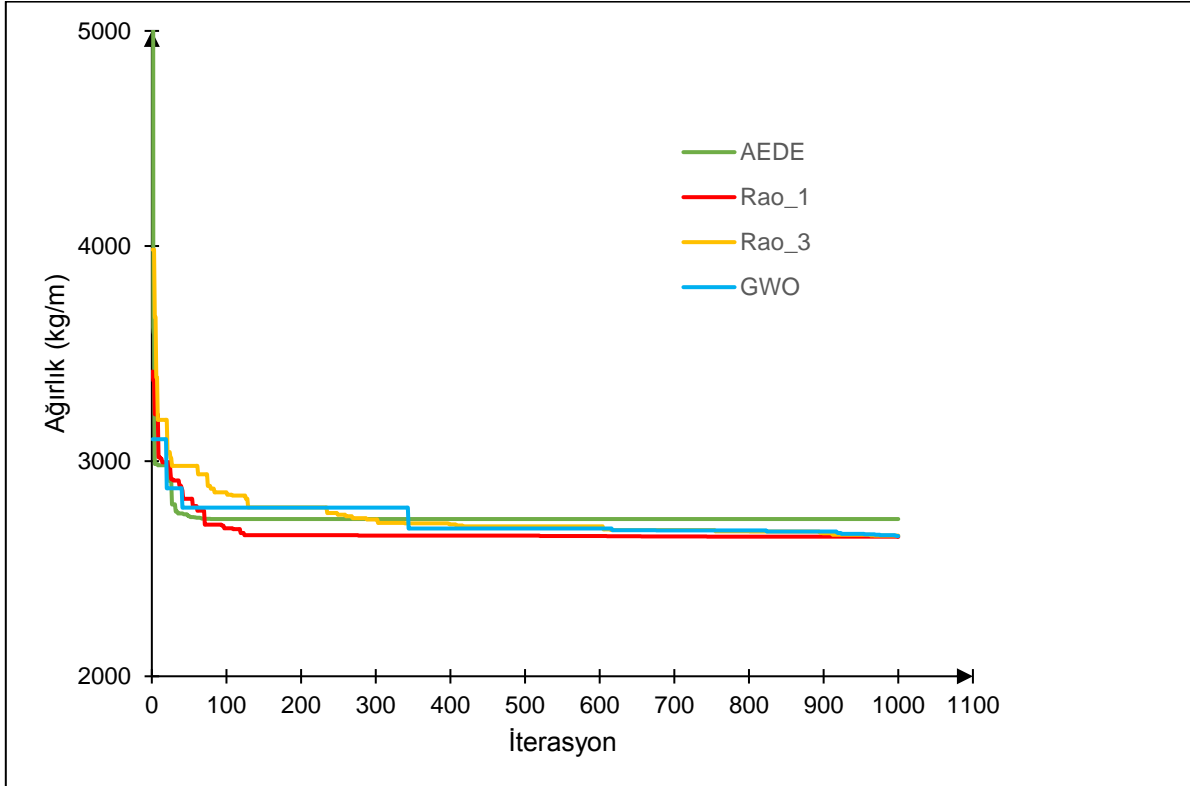
Tablo 7. Birinci örneğin düşük maliyetli optimum tasarımı için tasarım değişkenleri

	X1	X2	X3	X4	X5	R1	R2	R3
<b>GWO</b>	1,791	0,629	0,322	0,200	0,270	28 (13Φ10)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)
<b>Rao-1</b>	1,793	0,648	0,321	0,200	0,270	28 (13Φ10)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)
<b>Rao-3</b>	1,787	0,593	0,323	0,200	0,270	23 (12Φ10)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)
<b>AEDE</b>	1,249	0,747	0,303	0,218	0,273	28 (13Φ10)	8 (7Φ10)	8 (7Φ10)

Tablo 8. Birinci örneğin optimum tasarımı için en iyi ve ortalama değerleri

Yöntem	Çelik (kg/m)		Beton (m <sup>3</sup> /m)		Amaç Fonksiyonu (kg/m)			
	Düşük Ağırlık	Düşük Maliyet	Düşük Ağırlık	Düşük Maliyet	Düşük ağırlık (kg/m)		Düşük maliyet (TL)	
					En İyi	Ortalama	En İyi	Ort.
<b>GWO</b>	86,059	55,0274	1,092	1,2664	2652,871	2663,70	372,896	373,73
<b>Rao-1</b>	87,037	55,0236	1,090	1,2658	2648,941	2648,94	372,777	376,47
<b>Rao-3</b>	88,898	55,0200	1,092	1,2670	2654,880	2666,90	372,981	374,87
<b>AEDE</b>	75,155	57,4459	1,130	1,2814	2731,159	2897,53	382,036	395,23

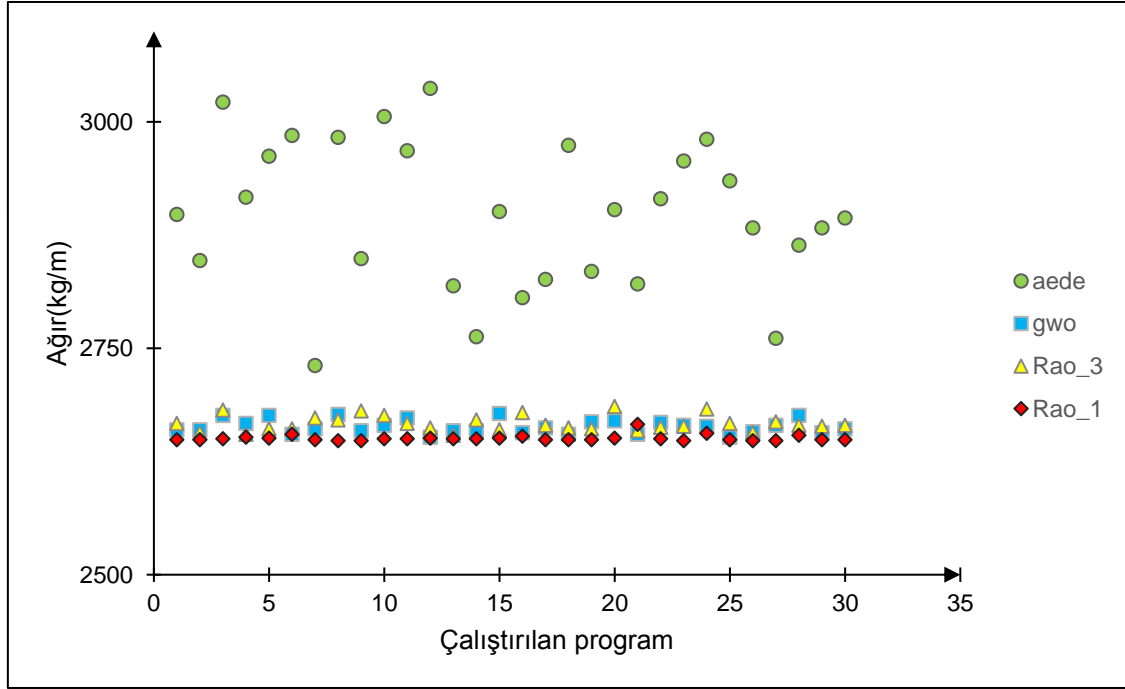
Birinci örnek için 1000 iterasyon boyunca düşük ağırlıkta dayanma duvarı için hesaplanan amaç fonksiyonunun değişimini veren yakınsama grafiği her bir algoritma için şekil 40'ta gösterilmiştir.



Şekil 40. Birinci örnek için düşük ağırlıkta GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 için yakınsama grafiği

Şekil 40'ta görüldüğü üzere algoritmaların yakınsama hızları birbiriyle farklılık göstermektedir. Yakınsama hızı algoritmaların performanslarını değerlendiren bir ölçüttür. Yakınsama grafikleri incelendiğinde, düşük ağırlıkta optimizasyon için en iyi performansı AEDE algoritması vermiş bu algoritmayı sırasıyla Rao\_1, Rao\_3 ve GWO algoritmaları takip etmiştir.

Yine birinci örnek için program her çalıştırıldığında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler bozkurt algoritması, etkili bir diferansiyel gelişim algoritması için, Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması için şekil 41’de gösterilmiştir.



Şekil 41. Birinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmasında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler

Hesaplama sürelerine bakıldığında ise en hızlı hesabı 298,851733 saniye ile Rao\_3 algoritması yapmış ve onu sırasıyla 314,115191 saniye ile GWO, 334,227468 saniye ile AEDE ve 372,402867 saniye ile Rao\_1 algoritmaları izlemiştir.

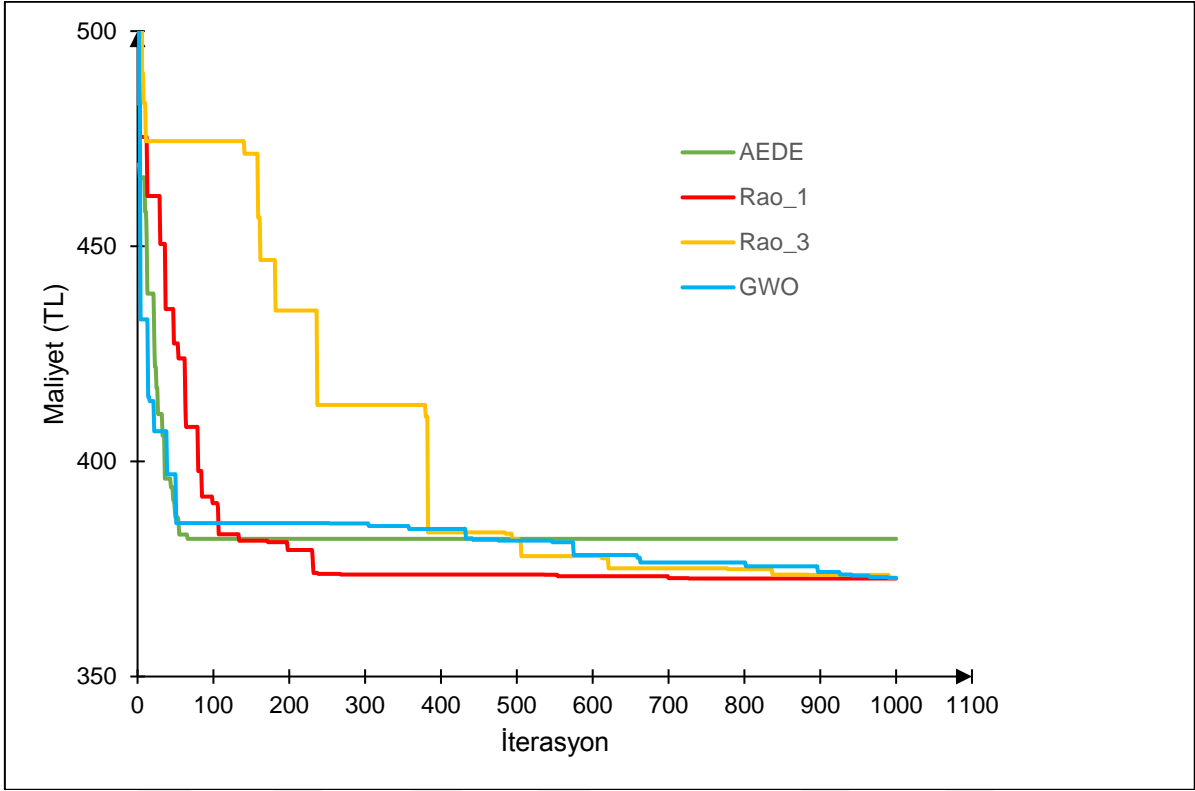
Betonarme bir konsol dayanma duvarı için yapılan düşük ağırlığa göre optimizasyon işlemi sonucunda kullanılan algoritmalar birbirine yakın değerler vermiştir. Bununla birlikte bazılarının diğerlerine göre daha başarılı sonuçlara ulaştığı da ortadadır. Aralarında en düşük ağırlıkta dayanma duvarı tasarımına, birim uzunlukta 87,037 kg/m donatı ağırlığı ve 1,090 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 2648,941 kg/m olarak Rao\_1 algoritmasıyla ulaşılmıştır. Daha sonra; 56,09 kg/m donatı ağırlığı ve 1,092 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 2652,871 kg/m olarak GWO, 88,898 kg/m donatı ağırlığı ve 1,092 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 2654,880 kg/m olarak Rao\_3, ve 75,155 kg/m

donatı ağırlığı ve  $1,130 \text{ m}^3/\text{m}$  beton hacmi  $2731,159 \text{ kg/m}$  ile AEDE algoritmaları sırasıyla en iyi sonuçları vermiştir.

Programların 30 denemede ulaştıkları amaç fonksiyonlarının aldığı değer aralıklarına bakıldığında çok yakın olmakla birlikte değer aralığı  $2666 \text{ kg/m}$  ile  $2648 \text{ kg/m}$  arasında oynayıp en az olan ve en kararlı görünen algoritma Rao\_1 olmaktadır onu sırasıyla  $2678 \text{ kg/m}$  ile  $2652,871 \text{ kg/m}$  değer aralığı arasında oynayan GWO,  $2686 \text{ kg/m}$  ile  $2654 \text{ kg/m}$  değer aralığı arasında oynayan Rao\_3 ve son olarak  $3037 \text{ kg/m}$  ile  $2731 \text{ kg/m}$  değer aralığı olarak en büyük oynamaların görüldüğü AEDE algoritmaları izlemiştir.

Görüldüğü üzere her bir algoritma birbirine yakın değerler vermiştir ve her birinin birbirlerine üstünlükleri vardır. Bu optimizasyon çalışmasında; yakınsama hızı olarak en önde olan AEDE algoritması en iyi amaç fonksiyonunu yakalamada ve hesaplama sırası ve kararlılık açısından geriye düşmüştür. Bunun yanında düşük ağırlık için amaç fonksiyonunu yakalama konusunda en başarılı performans gösteren Rao\_1 ise yakınsama hızı açısından ikinci sırada iken hesap süresi açısından sonuncu sırada ancak kararlılık açısından yine en öndedir. Hesap süresi açısından en önde olan Rao\_3 algoritması ise yine amaç fonksiyonunu yakalamada, yakınsama hızı olarak ve kararlılık açında üçüncü sıradadır. GWO ise ortalama bir performans sergilemiştir.

Düşük maliyetteki dayanma duvarının yakınsama grafiği her bir algoritma için şekil 42'de gösterilmiştir.

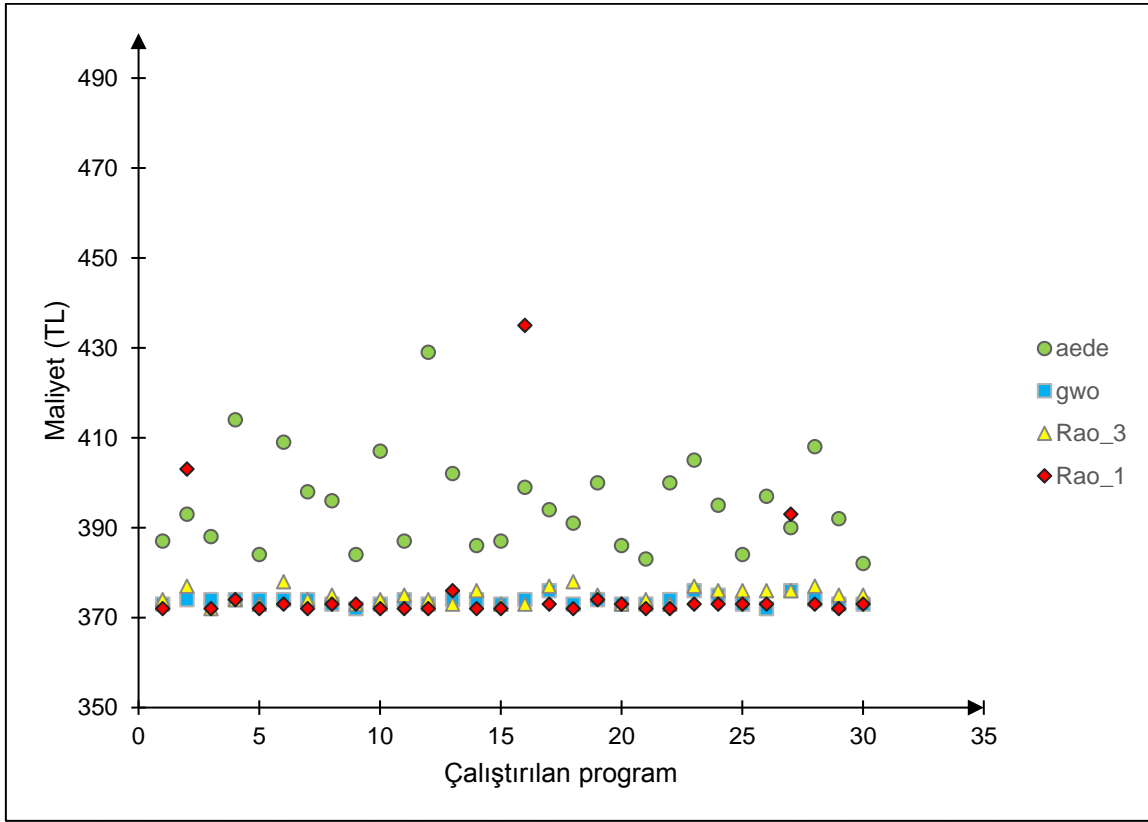


Şekil 42. Birinci örnek için düşük maliyette GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 için yakınsama grafiği

Birinci örnek için maliyete göre yakınsama grafikleri incelendiğinde, en iyi performansı AEDE algoritması vermiş bu algoritmayı sırasıyla Rao\_1, Rao\_3 ve GWO algoritmaları takip etmiştir.

Düşük maliyet için program her çalıştırıldığında bulunan optimum değerler şekil 43'te gösterilmiştir.





Şekil 43. Birinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmasında düşük maliyet için bulunan optimum değerler

Hesaplama sürelerine bakıldığında en hızlı hesabı 299,477760 saniye ile Rao\_3 algoritması yapmış ve onu sırasıyla 302,372199 saniye ile AEDE, 304,975783 saniye ile Rao\_1 ve 332,494434 saniye ile GWO algoritması izlemiştir.

Betonarme bir konsol dayanma duvarı için yapılan düşük maliyete göre optimizasyon işlemi sonucunda en düşük maliyetle inşa edilebileceği hesaplanan dayanma duvarı tasarımına birim uzunlukta birim uzunlukta 55,0236 kg/m donatı ağırlığı ve 1,2658 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 372,777 TL olarak Rao\_1 algoritmasıyla ulaşılmıştır. Daha sonra; 55,0274 kg/m donatı ağırlığı ve 1,2664 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 372,896 TL olarak GWO, 55,0200 kg/m donatı ağırlığı ve 1,2670 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 372,981 TL olarak Rao\_3, ve 57,4459 kg/m donatı ağırlığı ve 1,2814 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 382,036 TL ile AEDE algoritmaları sırasıyla en iyi sonuçları vermiştir.

Programların 30 denemede ulaştıkları amaç fonksiyonlarının aldığı değer aralıklarına bakıldığında çok yakın olmakla birlikte değer aralığı 376 TL ile 372,777 TL arasında oynayıp en az olan ve en kararlı görünen algoritma GWO olmaktadır onu sırasıyla 378 TL ile 372,981 TL değer aralığı arasında oynayan Rao\_3, 435 TL ve 372,777 değer aralığı arasında oynayan Rao\_1 ve son olarak 429 TL ve 382,036 TL değer aralığı olarak en büyük oynamaların görüldüğü AEDE algoritmaları izlemiştir.

Bu optimizasyon çalışmasında; yakınsama hızı olarak en önde olan AEDE algoritması hesaplama süresi açısından ikinci sırada iken en iyi amaç fonksiyonunu yakalamada ve kararlılık açısından en geride kalmıştır. Hesaplama süresi açısından en önde olan Rao\_3 algoritması yakınsama açısından ve en iyi amaç fonksiyonunu yakalama açısından üçüncü ve kararlılık açısından ikinci sıradadır. Düşük ağırlık için amaç fonksiyonunu yakalama konusunda en başarılı performans gösteren Rao\_1 ise yakınsama hızı açısından ikinci sırada iken hesap süresi açısından sonuncu, kararlılık açısından üçüncü olup geride kalmıştır. Kararlılık açısından en iyi performansı gösteren GWO ise yakınsama hızı ve hesaplama süresi açısından son sırada kalırken en iyi amaç fonksiyonunu yakalama konusunda da ikinci sıradadır.

Sonuç olarak birinci örnek için hem ağırlık hem maliyet göz önünde bulundurulduğunda amaç fonksiyonunu yakalamak açısından en başarılı görünen algoritma Rao\_1 algoritmasıdır. Hesap süreleri göz önüne alındığında en hızlı algoritma Rao\_3 algoritmasıdır ve yakınsama hızı gözetildiğinde en iyi performans AEDE algoritmasına aittir. GWO ise kararlılık açısından düşük ağırlıkta ikinci ve düşük maliyette birinci sırada olup etkili performans göstermiştir.

### 2.2.2. İkinci Örnek

İkinci örnekte taban plağında kaymaya karşı bir dış kesit yerleştirilmiş en düşük ağırlıklı dayanma duvarı ve en düşük maliyetli dayanma duvarı tasarımı hedeflenmiştir. Bu örnek için girdi olarak kullanılan parametreler Tablo 9'da listelenmiştir. Uzun vadede daha etkili bir yapı tasarımı için tabanda kohezyonsuz zemin tercih edilmiştir.

Tasarım için dış kesit ile ilgili eklenen 4 yeni değişkenle birlikte 12 farklı tasarım değişkeni kullanılmıştır. Bu tasarım değişkenlerinden 8 tanesi duvarın geometrik boyutlarını ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ ), 4 tanesi duvarın donatı durumlarını ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ) ifade etmektedir. Bu ifadeler şekil 40'ta gösterilmiştir. Bu değişkenler için alt ve üst sınırlar Tablo

10’da gösterildiği gibidir (Saribaş ve Erbatır 1996). Tasarım örneği için dış kesit için olan kısıtlarla birlikte 26 adet kısıt kullanılmıştır.

Tablo 9. İkinci örnek için girdi olarak kullanılan parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Duvar yüksekliği	H	4,5	m
Çelik donatı akma dayanımı	$f_y$	420	MPa
Beton basınç dayanımı	$f_c$	25	MPa
Beton örtü kalınlığı	cc	5	cm
Büzülme ve sıcaklık donatı yüzdesi	$\rho_{st}$	0,002	-
Sürşarj yükü	Q	30	kPa
Arka dolgu eğimi	$\beta$	0	°
Taban zemindeki kayma mukavemeti açısı	$\varphi_{dolgu}$	34	°
Dolgunun kayma mukavemeti açısı	$\varphi$	28	°
Dolgunun birim hacim ağırlığı	$\gamma_{dolgu}$	18,5	kN/m <sup>3</sup>
Taban zemindeki birim hacim ağırlığı	$\gamma_{taban}$	17	kN/m <sup>3</sup>
Çeliğin birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	78,5	kN/m <sup>3</sup>
Betonun birim hacim ağırlığı	$\gamma_c$	23,5	kN/m <sup>3</sup>
Duvarın önündeki Zemin derinliği	D	0,3	m
Dönmeye karşı güvenlik katsayısı	$F_{SO_{design}}$	1,5	-
Kaymaya karşı güvenlik katsayısı	$F_{SS_{design}}$	1,5	-
Taşınma gücü yenilmesine karşı güvenlik katsayısı	$F_{SB_{design}}$	1,5	-
Temel zemindeki kohezyon	$c_{taban}$	0	kPa
Beton birim maliyeti	$C_c$	178	TL/m <sup>3</sup>
Çelik birim maliyeti	$C_s$	2,68	TL/kg

Tablo 10. İkinci örnekteki tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar (Sarıbaş ve Erbatur 1996)

Tasarım değişkeni	Birim	Alt sınır	Üst sınır
X1	<i>m</i>	1,96	5,5
X2	<i>m</i>	0,65	1,16
X3	<i>m</i>	0,25	0,5
X4	<i>m</i>	0,25	0,5
X5	<i>m</i>	0,4	0,5
X6	<i>m</i>	1,96	5,5
X7	<i>m</i>	0,20	0,5
X8	<i>m</i>	0,20	0,5
R1	-	1	264
R2	-	1	264
R3	-	1	264
R4	-	1	264

Amaç fonksiyonu birinci örnek ile aynı seçilmiştir.

Hesaplanan optimum tasarımın tasarım değişkenleri en düşük ağırlıklı dayanma duvarı ve en düşük maliyetli dayanma duvarı tasarımı için elde edilen tasarım değişkenleri sırasıyla Tablo 11 ve Tablo 12’de sunulmuştur. Amaç fonksiyonuna göre her algoritmanın sonuç olarak sunduğu en düşük ağırlıklı dayanma duvarı ve en düşük maliyetli dayanma duvarı tasarımı için en iyi ve ortalama değerler Tablo 13’te gösterilmiştir. Tablo 13’te ayrıca maliyet ve ağırlık amaç fonksiyonu baz alınarak dayanma duvarı için kullanılan toplam beton ve çelik miktarı da belirtilmiştir.

Tablo 11. İkinci örneğin düşük ağırlıklı optimum tasarımı için tasarım değişkenleri

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	R1	R2	R3	R4
<b>GWO</b>	3,149	0,651	0,318	0,250	0,400	3,206	0,319	0,500	160 (23Φ16)	40 (17Φ10)	88 (9Φ18)	44 (7Φ16)
<b>Rao-1</b>	4,162	0,650	0,459	0,250	0,400	3,000	0,200	0,200	94 (22Φ12)	23 (12Φ10)	66 (24Φ10)	4 (5Φ10)
<b>Rao-3</b>	4,163	0,650	0,459	0,250	0,400	1,960	0,200	0,200	94 (22Φ12)	20 (8Φ10)	71 (25Φ10)	1 (3Φ10)
<b>AEDE</b>	3,392	0,715	0,362	0,259	0,407	4,614	0,327	0,472	132 (18Φ16)	23 (12Φ10)	67 (24Φ10)	241 (14Φ30)

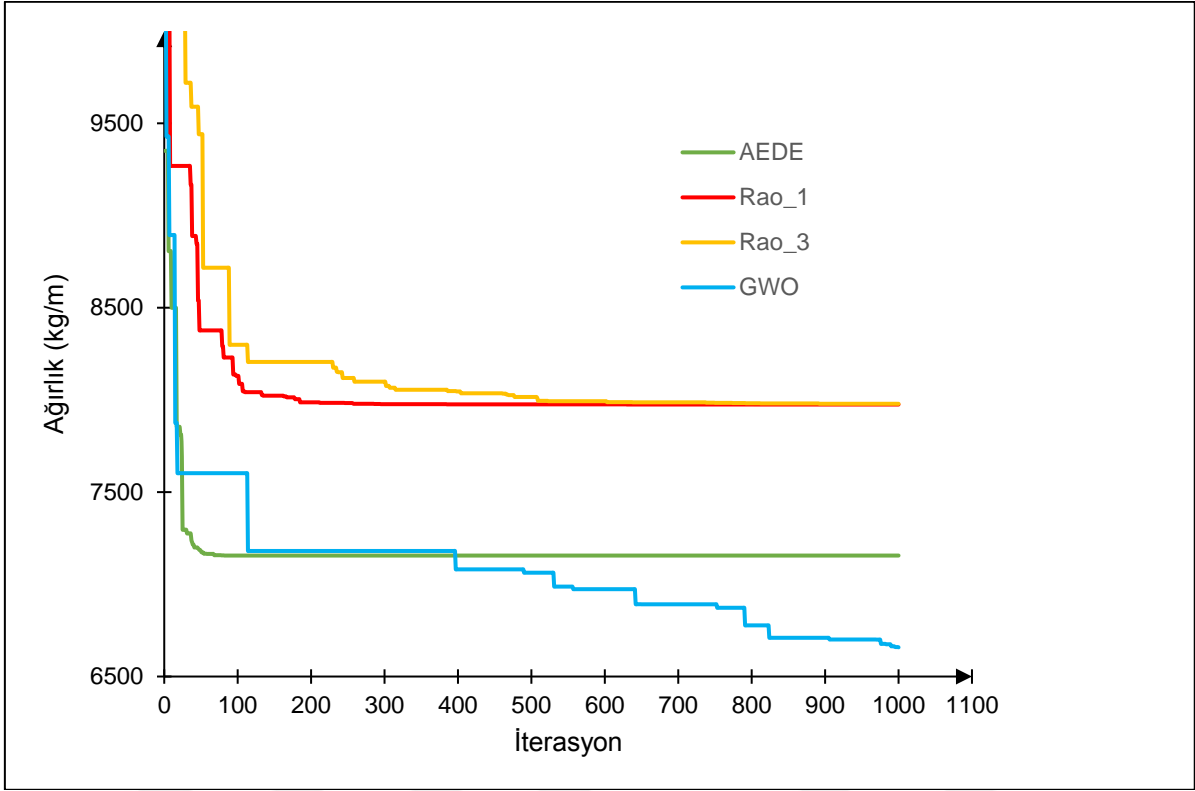
Tablo 12. İkinci örneğin düşük maliyetli optimum tasarımı için tasarım değişkenleri

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	R1	R2	R3	R4
<b>GWO</b>	3,336	0,756	0,494	0,250	0,402	5,187	0,253	0,499	84 (20Φ12)	21 (8Φ12)	59 (22Φ10)	57 (11Φ14)
<b>Rao-1</b>	4,192	0,659	0,499	0,250	0,400	5,500	0,200	0,200	84 (20Φ12)	23 (12Φ10)	60 (23Φ10)	250 (24Φ24)
<b>Rao-3</b>	4,184	0,650	0,496	0,250	0,400	1,960	0,200	0,200	84 (20Φ12)	23 (12Φ10)	66 (24Φ10)	151 (8Φ26)
<b>AEDE</b>	3,288	0,726	0,457	0,258	0,402	5,007	0,324	0,498	97 (23Φ12)	23 (12Φ10)	60 (23Φ10)	170 (20Φ18)

Tablo 13. İkinci örneğin optimum tasarım için en iyi ve ortalama değerleri

Yöntem	Çelik (kg/m)		Beton (m <sup>3</sup> /m)		Amaç Fonksiyonu (kg/m)			
	Düşük Ağırlık	Düşük Maliyet	Düşük Ağırlık	Düşük Maliyet	Düşük ağırlık (kg/m)		Düşük maliyet (TL)	
					En İyi	Ortalama	En İyi	Ortalama
<b>GWO</b>	318,427	193,8943	2,6978	3,1441	6658,25	7165,38	1079,29	2826,80
<b>Rao-1</b>	218,2476	208,2672	3,3012	3,4024	7975,95	8006,07	1163,78	1172,93
<b>Rao-3</b>	220,6505	210,1867	3,3015	3,9210	7979,18	8096,67	1167,08	1215,57
<b>AEDE</b>	261,0584	208,711	2,9340	3,0950	7156,01	7713,67	1110,24	1162,33

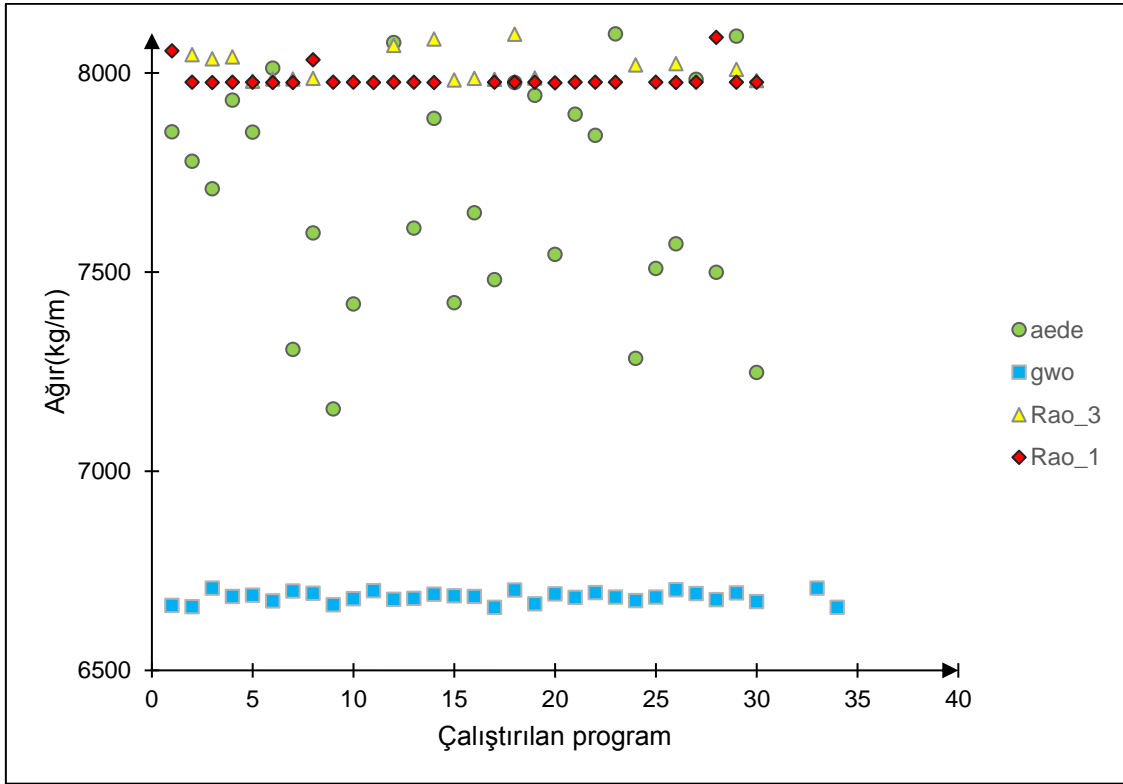
İkinci örnekte ağırlığın amaç fonksiyonu olduğu tasarım için 1000 iterasyon boyunca ağırlığının değişimi, bozkurt Algoritması (GWO), etkili bir diferansiyel gelişim algoritması (AEDE), Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması için Şekil 44'te yakınsama grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 44. İkinci örnek için düşük ağırlıkta GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 için yakınsama Grafiği

Yakınsama grafikleri incelendiğinde ikinci örnek için düşük ağırlıkta, en iyi performansı AEDE algoritması sergilemiş bu algoritmayı sırasıyla Rao\_1, Rao\_3 ve GWO algoritmaları takip etmiştir.

Yine ikinci örnek için program her çalıştırıldığında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler bozkurt algoritması, etkili bir diferansiyel gelişim algoritması, Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması için Şekil 45'te gösterilmiştir.



Şekil 45. İkinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmasında düşük ağırlık için bulunan optimum değerler

Hesaplama sürelerine bakıldığında ise en hızlı hesabı 416.587806 saniye ile AEDE algoritması yapmış ve onu sırasıyla 417.987375 saniye ile Rao\_1, 500.656480 saniye ile Rao\_3 ve 532.043767 saniye ile GWO algoritmaları izlemiştir.

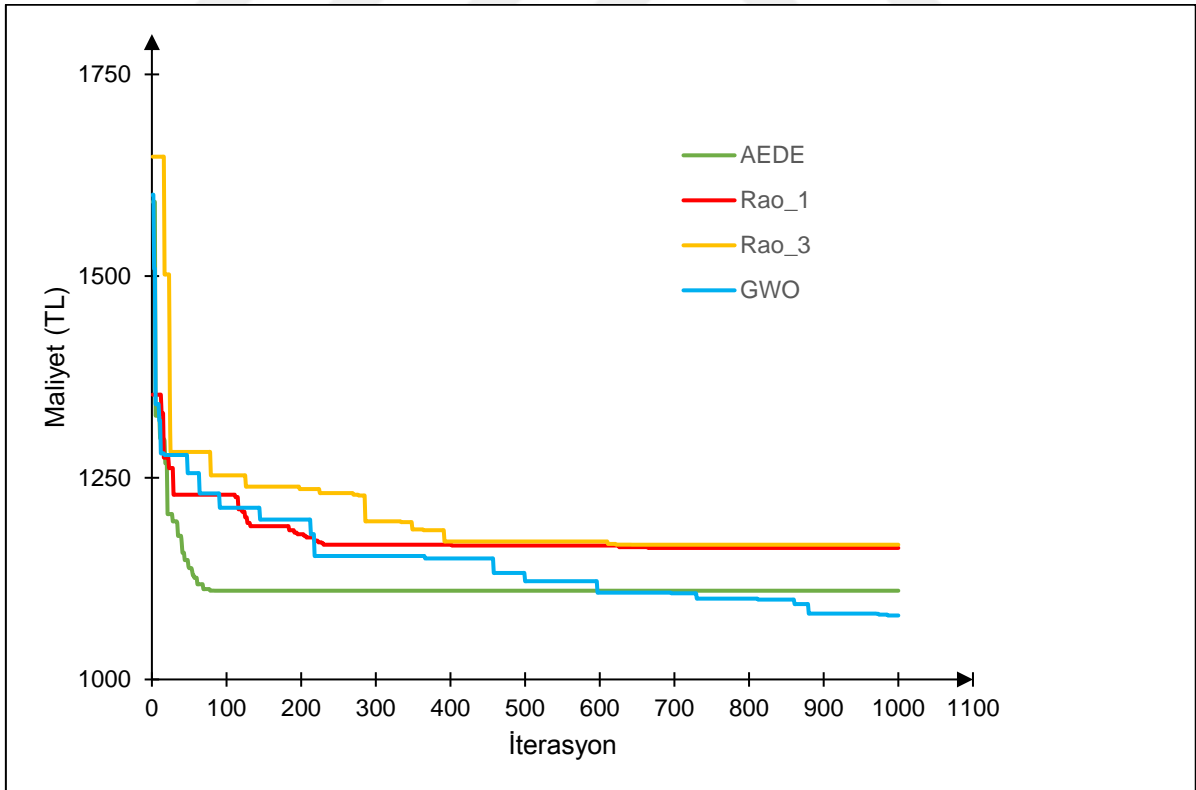
Tabanında dış kesit bulunan betonarme bir konsol dayanma duvarı için yapılan düşük ağırlığa göre optimizasyon işlemi sonucunda en düşük ağırlıkta dayanma duvarı tasarımına birim uzunlukta 318,427 kg/m donatı ağırlığı ve 2,697 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 6658,254 kg/m olarak GWO algoritmasıyla ulaşılmıştır. Daha sonra; 261,058 kg/m donatı ağırlığı ve 2,934 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 7156,015 kg/m olarak AEDE, 218,2476 kg/m donatı ağırlığı ve 3,3012 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 7975,95 kg/m olarak Rao\_1 ve 220,6505 kg/m donatı ağırlığı ve 3,3015 m<sup>3</sup>/m beton hacmi 7979,18 kg/m ile Rao\_3 algoritmaları sırasıyla en iyi sonuçları vermiştir.

Programların 30 denemede ulaştıkları amaç fonksiyonlarının aldığı değer aralıklarına bakıldığında çok yakın olmakla birlikte değer aralığı 6706,19 kg/m ile 6658,25 kg/m arasında oynayıp en az olan ve en kararlı görünen algoritma GWO olmaktadır onu sırasıyla 8255 kg/m

ile 7975,95 kg/m değer aralığı arasında oynayan Rao\_1, 8471 kg/m ile 7979,18 kg/m değer aralığı arasında oynayan Rao\_3 ve son olarak 8184 kg/m ile 7156,01 kg/m değer aralığı olarak en büyük oynamaların görüldüğü AEDE algoritmaları izlemiştir.

Bu optimizasyon çalışmasında; GWO algoritması amaç fonksiyonunu yakalamada ve kararlılık açısından en öndeyken yakınsama hızı ve hesap süresi açısından son sıradadır. Yakınsama hızı konusunda ve hesap süresi açısından birinci sırada olan AEDE, amaç fonksiyonunu yakalama açısından da ikinci sırada, kararlılık açısından ise son sıradadır. Görülüyor ki bu örnekte AEDE ve GWO, Rao algoritmalarına göre daha baskın sonuçlar ortaya koymuştur.

Düşük maliyetteki dayanma duvarının bozkurt algoritması, etkili bir diferansiyel gelişim algoritması, Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması için Şekil 46'da yakınsama grafiği gösterilmiştir.

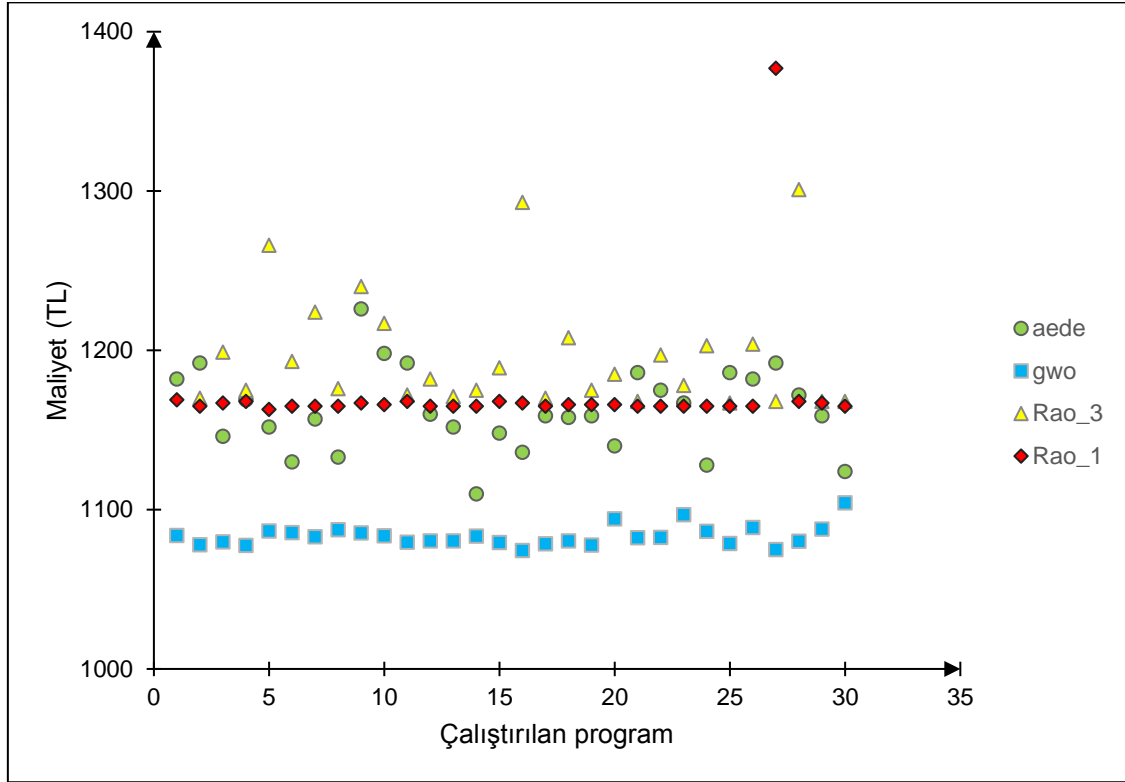


Şekil 46. İkinci örnek için düşük maliyette GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 için yakınsama Grafiği



Düşük maliyette tabanında dış kesit bulunan betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonu için yakınsama grafikleri incelendiğinde, en iyi performansı AEDE algoritması vermiş bu algoritmayı sırasıyla Rao\_1, Rao\_3 ve GWO algoritmaları takip etmiştir.

Düşük maliyet için bulunan optimum değerler bozkurt algoritması, etkili bir diferansiyel gelişim algoritması, Rao\_1 algoritması ve Rao\_3 algoritması için Şekil 47’de gösterilmiştir



Şekil 47. İkinci örnek için program her çalıştırıldığında GWO, AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmasında düşük maliyet için bulunan optimum değerler

Hesaplama sürelerine bakıldığında ise en hızlı hesabı 403,166851 saniye ile Rao\_3 algoritması yapmış ve onu sırasıyla 422,146639 saniye ile GWO, 422,886087 saniye ile AEDE, ve 486,533786 saniye ile Rao\_1 algoritmaları izlemiştir.

Tabanında dış bulunan betonarme bir konsol dayanma duvarı için yapılan düşük maliyete göre optimizasyon işlemi sonucunda kullanılan algoritmalardan en düşük maliyette dayanma duvarı tasarımına birim uzunlukta 193,894 kg/m donatı ağırlığı ve 3,144 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle

1079,295 TL algoritmasıyla ulaşılmıştır. Daha sonra; 281,711 kg/m donatı ağırlığı ve 3,095 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 1110,24 TL olarak AEDE, 208,2672 kg/m donatı ağırlığı ve 3,4024 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 1163,78 TL olarak Rao\_1 ve 210,1867 kg/m donatı ağırlığı ve 3,9210 m<sup>3</sup>/m beton hacmiyle 1167,08 TL ile Rao\_3 algoritmaları sırasıyla en iyi sonuçları vermiştir. Programların 30 denemede ulaştıkları amaç fonksiyonlarının aldığı değer aralıklarına bakıldığında değerler birbirine yakın görünmekte ve değer aralığı 1104 TL ile 1079,29 TL arasında oynayıp en az olan ve en kararlı görünen algoritma GWO olmaktadır onu sırasıyla TL 1226 TL ile 1110,24 TL değer aralığı arasında oynayan AEDE, 1377 TL ve 1163 TL değer aralığı arasında oynayan Rao\_1 ve son olarak 1765 TL ve 1167,08 TL değer aralığı olarak en büyük oynamaların görüldüğü Rao\_3 algoritmaları izlemiştir.

Bu optimizasyon çalışmasında; amaç fonksiyonunu yakalama açısından ve kararlılık açısından en önde olan GWO hesaplama süreci olarak ikinci sırada ve yakınsama hızı açısından son sıradadır. Yakınsama hızı açısından birinci sırada olan AEDE algoritması ise kararlılık açısından ikinci sırada ve amaç fonksiyonunu yakalamada ve hesaplama süresi açısından geridedir. Hesaplama süresi açısından en önde olan Rao\_3 algoritması, yakınsama hızı ve amaç fonksiyonunu yakalamada ve kararlılık konusunda geride kalmıştır.

Sonuç olarak ikinci örnek için hem ağırlık hem maliyet göz önünde bulundurulduğunda amaç fonksiyonunu yakalamak ve kararlılık açısından en başarılı görünen algoritma GWO algoritmasıdır. Hesap süreleri göz önüne alındığında Rao\_3 ve AEDE algoritmaları öne çıkmaktadır. Yakınsama hızı açısından AEDE iki amaç fonksiyonu için de birinci sıradadır.

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, betonarme konsol dayanma duvarı tasarımı optimizasyonu konusuna yer verilmiştir.

Konsol dayanma duvarı tasarımı TS 7994 (1990), TS 500 (2000) ve TBDY (2018) Türk yönetmelikleri baz alınarak hazırlanmış ve MATLAB bilgisayar problemi üzerinde optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. Türkiye’de yapılacak bir betonarme konsol dayanma duvarı tasarımları için hazırlanan bu modelleme dört farklı algoritmaya uyarlanmış ve sayısal örneklerle desteklenerek elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Böylece algoritmaların performansları ölçülmüştür. İki sayısal örnekte 3 ve 4,5 m uzunluğundaki konsol dayanma duvarları, üzerlerindeki sürşarj yükü, dolgu eğimi ve zemin özellikleri açısından da farklılık göstermektedir.

Çözüm kalitesi ve hesaplama zamanı, kod basitliği ve gerçekleştirilebilirlik, esneklik, dinçlik (sağlamlık), basitlik ve analiz edilebilirlik, etkileşimli hesaplama ve teknoloji değişimleri Karaboğa (2004) tarafından sezgisel algoritmaların değerlendirilmesi için kriterler olarak ifade edilmiştir. Algoritmalar, tabanında dış kesiti bulan ve bulunmayan konsol dayanma duvarları olmak üzere hazırlanmış iki sayısal örnekle çözüm olan amaç fonksiyonundaki başarı, yakınsama hızları, hesap süreleri ve kararlılıklarına göre değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmeye göre en önemli kriterlerden olan amaç fonksiyonu açısından birinci örnekteki taban plağında dış bulunmayan konsol dayanma duvarı tasarımında düşük ağırlık göz önünde bulundurulduğuna Rao\_1 algoritması öne çıkmıştır. Rao\_1 algoritması amaç fonksiyonu bakımından; GWO algoritmasına göre %0,148, Rao\_3 algoritmasına göre %0,22 ve AEDE algoritmasına göre %3,14 daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Birinci örnek için düşük maliyet amaç fonksiyonuna bakıldığında yine Rao\_1 algoritması öne çıkmış ve GWO algoritmasına göre %0,03, Rao\_3 algoritmasına göre %0,05 ve AEDE algoritmasına göre % 2,48 daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Dikkat edildiğinde ikisinde de Rao\_1’i GWO, ardından Rao\_3 ve son olarak AEDE takip etmiştir. Ancak algoritma performansı için tek kriter amaç fonksiyonunu yakalamak değildir. Birinci örnek için hem ağırlık hem maliyet göz önünde bulundurulduğunda hesap süresi açısından öne çıkan algoritma Rao\_3 algoritmasıdır.

Yakınsama hızı açısından AEDE algoritması öndeyken, kararlılık açısından düşük ağırlıkta Rao\_1 algoritması ve düşük maliyette GWO ilk sıradadır.

İkinci örnekteki taban plağında dış bulunan konsol dayanma duvarı tasarımında düşük ağırlık göz önünde bulundurulduğuna bu kez GWO algoritmasının öne çıktığı görülmektedir. GWO algoritması, düşük ağırlık için amaç fonksiyonuna bakıldığında AEDE algoritmasına göre %7,47 ve Rao\_1 algoritmasına göre %19,7 yine Rao\_3 algoritmasına göre %19,8 daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Görüldüğü üzere GWO, diğer algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. İkinci örnek için düşük maliyet amaç fonksiyonuna bakıldığında yine GWO algoritması öne çıkmıştır. GWO algoritması, AEDE algoritmasına göre %2,87 ve Rao\_1 algoritmasına göre %7,83 ve yine Rao\_3 algoritmasına göre % 8,13 daha başarılı bir sonuca ulaşmıştır. İki amaç fonksiyonu açısından da GWO birinci sıradayken ardından sırasıyla AEDE, Rao\_1 ve Rao\_3 algoritmaları gelmektedir. İkinci örnek için ağırlık göz önünde bulundurulduğunda hesap süresi açısından öne çıkan algoritma AEDE ve maliyet amaç fonksiyonu göz önüne alındığında Rao\_3 algoritması birinci sıradadır. Yakınsama hızı açısından AEDE algoritması en öndeyken, kararlılık açısından hem düşük ağırlıkta hem düşük maliyette GWO ilk sıradadır.

Algoritma kodları kolayca problemin uyarlanmasına olanak verecek basitliktedir. Algoritmalar iki farklı amaç fonksiyonuyla ve değişken parametrelerle uyumlu şekilde çalışacak esnekliktedir. Daha önce farklı problemlere de uygulanan algoritmalar dayanma duvarı tasarımı için de etkili sonuçlar verecek sağlamlıktadır. Her bir algoritma için MATLAB programında sonuçların grafik üzerinde gösterilebilmesi mümkündür.

Görüldüğü üzere algoritmalar birbirlerine yakın sonuçlara ulaşmışlardır ve her birinin diğerleri üzerine üstünlükleri bulunmaktadır. Dört algoritma da birbirine yakın sonuçlar sunmuştur. Bu durum, algoritmaların problem için uygunluğunun da bir göstergesidir.

İterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü artırılarak ve program daha fazla kez çalıştırılarak daha iyi sonuçların bulunabileceğinin mümkün olduğu görülmektedir. Özellikle bozkurt algoritmasının (GWO) yakınsama grafiğindeki davranışı gözetilirse iterasyon sayısındaki artışın olumlu etkisinin olacağı açıktır.

#### 4. ÖNERİLER

Bilimsel ilerleme konusunda en çok kabul gören iki metot tümevarım ve yanlışlamadır. Tümevarım klasik birikimlerle ilerleyen bilgiyi ifade ederken, yanlışlamacı bakış açısına göre bilimsel bilginin doğrulanması mümkün değildir ancak yanlışlanarak bilimde yeni kapılar açmak mümkündür. Bilim yanlışlamalara daha dirençli teoriler üretilerek ilerleyebilmektedir. Her iki yöntem için de yeni deneysel çalışmalar ile literatürün geliştirilmesinin bir gereklilik olduğu görülmektedir. Bu çalışmada hazırlanan modellemeler ve elde edilen verilerin de literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Çalışmada betonarme bir konsol dayanma duvarı için kullanılan dört algoritma günlük hayatta sürekli karşılaşılan bir probleme, hızlı ve iyi bir tasarım elde etme problemine çözüm getirebilmiştir. Ancak bilimin ilerleyişi adına bu konuda önerilebilecekler şu şekilde ifade edilebilir:

- Baz alınan yönetmeliklerde hesaba katılmayan donatı aralığı, toprak basınçlarının duvar ortasına etkidiği açı gibi sınır durumları modellemeye dahil edilerek tasarım geliştirilebilir.
- Hazırlanan bu model farklı dinamik, statik, hidrostatik dış etkiler altında yeniden değerlendirilebilir.
- Çalışmada dayanma duvarı tasarımı açısından çok önemli olduğu düşünülen maliyet ve ağırlık amaç fonksiyonu olarak kullanılmış olsa da karbondioksit salınımı gibi farklı amaç fonksiyonlarına göre çözüme gidilebilir.
- Kullanılan toprak basıncı teorisi ve analiz yöntemlerinde çeşitlilik sağlanarak model geliştirilebilir.

Optimizasyon yapay zekadan aldığı destekle birlikte hızla gelişmekte ve yaygınlaşmakta olan bir konu haline gelmiştir. Bu konuda yapılacak yeni çalışmalar inşaat mühendisliği alanındaki gelişme ve ilerlemelere de ışık tutacaktır.

## 5. KAYNAKLAR

ACI 318-05, 2005. American Concrete Institute Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI, ACI Committee, Detroit.

Aka, İ., Keskinel, F. ve Arda, T., S., 1977. Birsen Yayınevi, 324 S.

Alkaya, D., 2008. İstinat Duvarlarının Spread Sheet (Excel) Programı ile Çözümü ve Maliyet Analizi ile Uygun Duvar Tipinin Belirlenmesi, TMH Türkiye Mühendislik Haberleri, 5, 56-65.

Aydogdu, I. ve Akin, A., 2015. Biogeography Based CO2 and Cost Optimization of RC Cantilever Retaining Walls, 17th International Conference on Structural Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology, July, Paris, Bildiriler Kitabı: 20-21.

Aydogdu, İ., 2017a. Cost Optimization of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls Under Seismic Loading Using a Biogeography-based Optimization Algorithm with Levy Flights. Eng. Optim., 49, 3, 381-400.

Aydogdu, I., 2017b. Betonarme Konsol İstinat Duvarların Çok Amaçlı (Maliyet ve Karbondioksit) Optimizasyonunda Meta-sezgisel Yöntemlerin Karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 221-231.

Babu, G., L., S. ve Basha, B., M., 2008. Optimum Design of Cantilever Retaining Walls Using Target Reliability Approach, Int. J. Geomech., 8, 4, 240-252.

Basudhar, P., K., Lakshman, B. ve Dey, A., 2006. Optimal Cost Design of Cantilever Retaining Walls, IGC-2006 Indian Geotechnical Conference, December, Bildiriler Kitabı: Chennai, 525-528.

Beheshti, Z. ve Shamsuddin, S., M., 2013. A Review of Population-based Meta-heuristic Algorithm, International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications, 5, 1-35.

- Bekdas, G. ve Temur, R., 2015. Optimum Design of Cantilever Reinforced Concrete Retaining Wall Using Teaching Learning Based Optimization Algorithm, Third International Conference on Optimization Techniques in Engineering, November, Bildiriler Kitabı: Roma, 138-14
- Bekdas, G. ve Temur, R., 2017. Metaheuristic Approaches for Optimum Design of Cantilever Reinforced Concrete Retaining Walls, Challenge Journal of Structural Mechanics, 3, 22-30.
- Bhatti, M., A., 2006. Retaining Wall Design Optimization with MS Excel Solver, Proc., 17th Analysis and Computation Specialty Conf., ASCE, Reston, VA, Bildiriler Kitabı: 1-15.
- Birand, A., 2006. Duvarlar, Teknik Yayınevi, 157 S.
- Bowles, J., E., 2001. Foundation Analysis and Design, 5th Edition, The Mc Graw-Hill Companies, Inc., 1175 S.
- Box, M., J., 1965. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods, The Computer Journal, 8, 1, 42-52.
- Blum, C. ve Roli, A., 2003. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison, ACM Computing Surveys, 35, 3, 268-308.
- Camp, C., V. ve Akin, A., 2012. Design of Retaining Walls Using Big Bang-Big Crunch Optimization, J. Struct. Eng., 138, 3, 438-448.
- Ceranic, B., Fryer, C., Baines, R., W., 2001. An Application of Simulated Annealing to the Optimum Design of Reinforced Concrete Retaining Structures, Computers & Structures, 79, 17, 1569-1581
- Clayton, C., R., I., Woods, R., I., Bond, A., J. ve Milititsky, J., 2014. Earth Pressure and Earth-Retaining Structures, 3<sup>rd</sup> edition, CRC Press.
- Coulomb, C., A., 1776. Essai sur une application des règles de maximise et minimis quelques problèmes de statique, relatifs a l'architecture, Mémoires de Mathématique de l'Académie Royale de Science 7, 343-382.

- Coduto, D., P., 2001. Temel Tasarımı – İlkeler ve Uygulamalar, Çevirenler: Murat Mollamahmutoğlu, Kamil Kayabalı (Foundation Design – Principles and Practices, Prentice Hall, 883 s) Gazi Kitabevi, Ankara.
- Culmann, K. 1864. Die Graphische Statik. Verlag van Meyer & Zeller, Zürich, 840 S.
- Dağdeviren, U. ve Kaymak B. 2018. Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Betonarme İstinat Duvarlarının Optimum Maliyet Tasarımını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33, 1.
- Dağdeviren, U. ve Kaymak B., 2015. Optimum Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Using Artificial Bee Colony Algorithm, Int. Conf. Civ. Environ. Eng., Nevsehir, 1171-1180.
- Das, B. M., 1999. Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, CRC Press, California, 366 s.
- Das, B.M., 2009. Principles of Geotechnical Engineering, 7th Edition, Cengage Learning, 666 S.
- Das B. ve Sivakugan, N., 2014. Introduction to geotechnical engineering 2nd ed., Cengage Learning, 448 S.
- Das, M., R., Purohit, S. ve Das, S., K., 2016a. Multi-objective Optimization of Reinforced Cement Concrete Retaining Wall. Indian Geotech, J 46, 354–368.
- Das, B., M., 2016b. Principles of Foundation Engineering, Eighth Edition, Cengage Learning, 869 S.
- Dembicki, E. ve Chi, T., 1989. System Analysis in Calculation of Cantilever Retaining Walls, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 13, 599-610.
- Dorigo, M., 1992. Optimization, learning and natural algorithms (in italian). Ph.D. thesis, DEI, Politecnico di Milano, Italy.



- Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, October, Nagoya, Bildiriler Kitabı: 39-43.
- Engessor, F., 1880. Geometrische Erddruck-theorie, Zeitschrift für Bauwesen, 30,189-210.
- Epitropakis, M., G., Plagianakos, V., P. ve Vrahatis, M., N., 2008. Balancing the Exploration and Exploitation Capabilities of the Differential Evolution Algorithm, IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, Bildiriler Kitabı: 2686-2693.
- Ersoy, U. ve Özcebe G. 2012, Betonarme, 3.baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 816 S.
- Fang, H., Y., Atsuta, T., ve Chen, W., F., 1980. Optimum design of retaining walls on sloping hillside, Proceedings of the Southeast Asian Conference on Soil Engineering, 6, 1, 391-406.
- Feoktistov, V., 2006. Differential Evolution: In Search of Solutions, Springer Optimization and Its Applications, Springer, New York, 196 S.
- Gandomi, A., H., Kashani, A., R., Roke, D., A. ve Mousavi, M., 2015. Optimization of Retaining Wall Design Using Recent Swarm Intelligence Techniques., Eng. Struct., 103, 72-84.
- Gandomi, A., H., Kashani, A., R., Roke, D., A. ve Mousavi, M., 2017. Optimization of Retaining Wall Design Using Evolutionary Algorithms, Struct. Multidisc. Optim., 55, 3, 809-825.
- Ghazavi, M. ve Bonab, B., S., 2011. Optimization of Reinforced Concrete Retaining Walls Using Ant Colony Method, Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), June, Munich, Bildiriler Kitabı: 297-305.
- Huntington, W., C., 2013. Earth Pressures and Retaining Walls, Literary Licensing, LLC, 550 S.
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, 211 S.

- Holtz, R., D. ve Kovacs, W., D., 1981. Geoteknik Mühendisliğine Giriş, Çeviren: Kamil Kayabalı (Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, 733 s), Gazi Kitabevi, Ankara, 722 S.
- Hrstka, O. ve Kučerová, A., 2004. Improvement of Real Coded Genetic Algorithm Based on Differential Operators Preventing Premature Convergence, Advances in Engineering Software, 35, 237-246.
- Jaky, J., 1944, The Coefficient of Earth Pressure at Rest, Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.
- Karaboğa, D., 2004. Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Yayınevi, İstanbul, 200 S.
- Karaboga, D., 2005. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
- Kayhan, A., H. ve Demir, A., 2016. Betonarme Konsol İstinat Duvarlarının Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Optimum Tasarımı, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg., 22, 3, 129-135.
- Kayhan, A., H. ve Demir, A., 2018. Statik ve Dinamik Yüklere Maruz Betonarme Konsol İstinat Duvarlarının Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Optimum Tasarımı, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg., 24, 3, 403-412.
- Keskar, A., V. ve Adidam, S., R., 1989. Minimum Cost Design of Cantilever Retaining Wall, Indian Concrete Journal, 63, 8, 401-405.
- Keskintürk T., 2006. Diferansiyel Gelişim Algoritması, YA/EM 2006- XXVI. Ulusal Kongresi, Temmuz, Kocaeli, Bildiriler Kitabı: 214-217.
- Khajehzadeh, M., Taha, M., R., El-Shafie, A. ve Eslami, M., 2010. Economic Design of Retaining Wall Using Particle Swarm Optimization with Passive Congregation, Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 4, 11, 5500-5507.

- Khajehzadeh, M., Taha, M., R., El-Shafie, A. ve Eslami, M., 2014. Multi-objective Optimisation of Retaining Walls Using Hybrid Adaptive Gravitational Search Algorithm, Civil Engineering and Environmental Systems, 31, 3, 229-242.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr. C., D. ve Vecchi, M., P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 4598, 671-80.
- Kumar V., N. ve Suribabu C., R., 2017. Optimal Design of Cantilever Retaining Wall Using Differential Evolution Algorithm, Int. J. Optim. Civil Eng, 7, 3, 433–49.
- La Loggia, A., 2009. Egyptian Engineering in the Early Dynastic Period: The sites of Saqqara and Helwan, British Museum Studies in Ancient Egypt and Sudan, 13, 175-176.
- Lopez, R., H., 2017. Optimum Project of Cantilever Retaining Wall Using Search Group Algorithm and Backtracking Search Algorithm, Rev. Int. métodos numér. cálculo diseño,
- Mahmood, U., A. ve Alam, B., 2015. Design Optimization of Cantilever Retaining Wall Using Direct Optimal Design Simulation, Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng., 4, 4, 243-246.
- Mayne, P., W. ve Kulhawy, F., H., 1982, *K<sub>o</sub>—OCR Relationships in Soil*, Journal of the Geotechnical Division, 108, 6, 851–872.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S., M. ve Lewis, A., 2014. Grey Wolf optimizer, Adv. Eng. Softw., 69, 46–61.
- Mohr, O., 1900. Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materiales?, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 44, 1524–1530, 1572–1577.
- Muro, C., Escobedo, R., Spector, L. ve Coppinger, R., 2011. Wolf-pack (*Canis lupus*) Hunting Strategies Emerge from Simple Rules in Computational Simulations, Behavioural processes, 88, 192-197.
- Osman, I., H., 1995. An introduction to metaheuristics, Operational Research Tutorial Papers, Hampshire, UK: Stockton Press. 9-22.

- Pei, Y. ve Xia, Y., 2012. Design of Reinforced Cantilever Retaining Walls Using Heuristic Optimization Algorithms, Procedia Earth Planet. Sci., 5, 32–36.
- Poncelet, J., V., 1840. Memoiré sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations, Memorié de l'officier du Génie, 13, 7-270.
- Pochtman, Y., M., Zhumuro, O., V. ve Landa, M., S., 1988. Design of an Optimal Retaining Wall with Anchorage, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 25, 5, 508-510.
- Rankine., W., J., M., 1857. On the Stability of Loose Earth, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9-27.
- Rao, R., V., 2020. Rao Algorithms: Three metaphor-less Simple Algorithms for Solving Optimization Problems, International Journal of Industrial Engineering Computations, 11, 107–130.
- Rebhann, G., 1871. Theorie des erddruckes und der futtermauern, Carl Gerold's Sohn, Wien, 564 S.
- Rhomberg, E., J., 1981. Optimal Design of Retaining Walls, Journal of the Structural Division, 107, 5, 992-1002.
- Sable, K., S. ve Patil Archana, A., 2012. Optimization of Retaining Wall by Using Optimtool in MATLAB, Int. J. Eng. Res. Technol (IJERT), 1, 6.
- Sarıbaş, A. ve Erbatur, F., 1996. Optimization and sensitivity of retaining structures, Journal of Geotechnical Engineering, 122, 8, 649–656.
- Sheikholeslami R., Gholipour Khalili B., ve Zahrai, S., M., 2014. Optimum Cost Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Using Hybrid Firefly Algorithm, IACSIT Int. J. Eng. Technol., 6, 6, 465–70.
- Sherif, M., A., Fang, Y., S. ve Sherif, R., I. 1984. *KA and KO* Behind Rotating and Non-Yielding Walls, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 10, GT1, 41–56.
- Sörensen, K., 2013. Metaheuristics -- the Metaphor Exposed, International Transactions of Operational Research. 22, 1, 3–18.

- Storn, R. ve Price, K., 1995, Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces, Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Bildiriler Kitabı: Berkeley.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS 500/Şubat 2000, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 7994, 1990. Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uray, E. ve Tan, Ö., 2015. Gabion Tipi Dayanma Yapıları, Türkiye Mühendislik Haberleri, 20152, 485, 19-29.
- Uzuner, B., A., 2014. Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, Trabzon, 677 S.
- Varaee, H. ve Ahmadi-Nedushan, B., 2009. Optimal Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Using a Swarm Intelligence Technique, Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, Sept., Madeira, Portugal, Bildiriler Kitabı: 1–4.
- Venkatramaiah, C., 1995. Geotechnical Engineering, New Age International, 1063 S.
- Villalba, P., Alcalá, J., Yepes, V. ve González-Vidoso, F., 2010. CO2 Optimization of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls, 2nd international conference on engineering optimization, September, Lisbon, Portugal, Bildiriler Kitabı: 6–9.
- Wang, T., Cai, Z. ve Zhang, Q., 2011. Differential Evolution with Composite Trial Vector Generation Strategies and Control Parameters, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 15, 1, 55-66.
- Wang, C., X., Li, C., G., Dong, H. ve Fan Zhang, 2013. An Efficient Differential Evolution Algorithm For Function Optimization, Information Technology Journal, 12, 444-448.
- Whitney, C., H., 2013. Earth Pressures and Retaining Walls, Literary Licensing, LLC, 550 S.

Wolpert, D., H. ve Macready, W., G. 1997. No Free Lunch Theorems for Optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1, 1, 67-82.

Yang, X., S. 2008. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, Luniver Press, 128 S.

Yepes ,V., Alcalá, J., Perea, C. ve Vidoso, F., G., 2008. A Parametric Study of Optimum Earth-Retaining Walls by Simulated Annealing. Engineering Structures, 30, 821-830.

Yılmaz, B., Bekdaş, G. ve Niğdeli, S., 2015. Betonarme İstinat Duvarlarının Çiçeklerin Tozlaşma Algoritması ile Optimizasyonu, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ağustos, Trabzon, Bildiriler Kitabı: 1070- 1075.

URL-1, [www.britannica.com/biography/Charles-Augustin-de-Coulomb](http://www.britannica.com/biography/Charles-Augustin-de-Coulomb) Charles Augustin de Coulomb. 8 Şubat 2020.

URL-2, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), Ocak 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Trabzon Lisesi'nde, lisans öğrenimini Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'dan yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Elif Nur Kalemci İngilizce bilmektedir.

