

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEPREM BÖLGELERİNDE YAPILACAK BETONARME SİĞ TÜNELLERİN
YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI VE GENETİK ALGORİTMAYLA
OPTİMUM TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

**NİSAN 2013
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEPREM BÖLGELERİNDE YAPILACAK BETONARME SİĞ TÜNELLERİN
YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI VE GENETİK ALGORİTMAYLA
OPTİMUM TASARIMI**

İnş. Yük. Müh. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.03.2013
Tezin Savunma Tarihi : 26.04.2013**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında

Hasan Tahsin Öztürk Tarafından Hazırlanan

**DEPREM BÖLGELERİNDE YAPILACAK BETONARME SİĞ TÜNELLERİN
YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI VE GENETİK ALGORİTMAYLA
OPTİMUM TASARIMI**

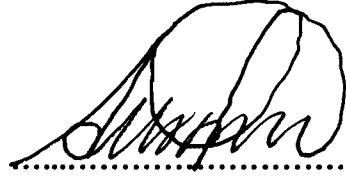
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 02.04.2013 gün ve 1500 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

DOKTORA TEZİ

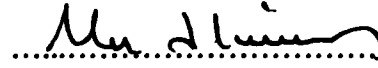
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

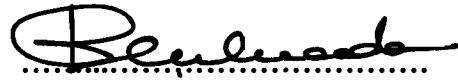
Başkan : Prof.Dr.Ing. Ahmet DURMUŞ



Üye : Prof Dr. Metin HÜSEM



Üye : Prof.Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU



Üye : Prof.Dr. Ayşe DALOĞLU



Üye : Prof.Dr. Mehmet ÜLKER



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Tünellerin optimum tasarımı konusundaki bu çalışmayı bana önererek yoğun çalışma programına rağmen çalışmamı başlangıcından yazımına kadar sürekli takip edip, bu süre içinde bana bilimsel düşünce disiplini kazandıran, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ing. Sayın Ahmet DURMUŞ'a minnet ve şükranlarımı sunmayı önemli bir görev sayarım.

Çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaştan tez izleme komitesindeki değerli hocalarım Prof. Dr. Sayın Metin HÜSEM'e ve Prof. Dr. Sayın Burhan ÇUHADAROĞLU'na ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Jüri üyeliği gibi önemli bir görevi üstlenen ve tezimi titizlikle inceleyen değerli hocalarım Prof. Dr. Sayın Ayşe DALOĞLU'na ve Prof. Dr. Sayın Mehmet ÜLKER'e minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Çalışmalarım sırasında özel ilgilerini gördüğüm Bahreyn Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sayın Mehmet Polat SAKA'ya, çalışmalarım için kaynak temin eden İnş. Yük. Müh. Sayın Çetin ÖZDEMİR'e teşekkür etmek isterim.

Ödül olarak Yurtiçi Doktora Bursu vermek suretiyle çalışmamı desteklemiş olan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı 2008.112.001.1 nolu proje çerçevesinde destekleyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Biriminin yöneticilerine de teşekkür ederim.

Burada, öğrenim boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anarken, çalışmam süresince bana her türlü imkan ve desteği sağlayan eşim Arş. Gör.Nurcan ÖZTÜRK'e teşekkür eder, ömrünü benim yetişmeme adayan, fedakârlıklarını asla unutamayacağım annem Ayşe ÖZTÜRK'e ve babam Ömer ÖZTÜRK'e müteşekkirdiğimi belirtir çalışmamın tüneller konusunda bilimsel gelişmeler için yararlı olmasını gönülden dilerim.

Hasan Tahsin ÖZTÜRK
Trabzon, 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Betonarme Sığ Tünellerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarıda yaptığımı, 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. 22.03.2013

Hasan Tahsin ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XVII
SİMGELER DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Tüneller Hakkında Bazı Bilgiler	1
1.1.1. Sınıflandırma.....	2
1.1.2. Geçki Zeminine Göre Tünel İnşası	4
1.1.2.1. Kayaç Zeminlerde Tünel İnşası	5
1.1.2.2. Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası	7
1.1.2.2.1. Yumuşak Zeminlerde Kalkanla Tünel İnşası.....	9
1.1.2.2.2. Yumuşak Zeminlerde Boru Sürmeyle Tünel İnşası.....	10
1.1.2.2.3. Yumuşak Zeminlerde Aç-Kapa Yöntemiyle Tünel İnşası.....	10
1.1.2.2.4. Yumuşak Zeminlerde Şemsiyelemeyle (Boru Kemer Yöntemiyle) Tünel İnşası.....	11
1.1.2.3. Sualtında Tünel İnşası.....	11
1.1.3. Tünel Kaplamaları	12
1.1.3.1. Dökme Beton Kaplamalar.....	12
1.1.3.2. Püskürtme Beton Kaplamalar	13
1.1.3.3. Öndöküm Kaplamalar	16
1.2. Sığ Tüneller.....	17
1.2.1. Sığ Tünel Çeşitleri	19
1.2.1.1. Metro Tünelleri	19
1.2.1.2. İstasyon Tünelleri.....	19

1.2.1.3.	Karayolu Tünelleri	21
1.2.1.4.	Su İletim Tünelleri	21
1.2.2.	Sığ Tünellerin Yapısal Çözümlerinde Dikkate Alınan Yük ve Yük Etkileri.....	22
1.2.2.1.	Sabit Yükler	23
1.2.2.2.	Hareketli Yükler.....	24
1.2.2.3.	Yatay Zemin Basıncı.....	26
1.2.2.4.	Kaldırma Kuvveti.....	29
1.2.2.5.	Taşkın Etkileri.....	30
1.2.2.6.	Rötre ve Sıcaklık Etkisi	30
1.2.2.7.	Deprem Yükleri	30
1.2.3.	Yük Birleşimleri.....	36
1.3.	Yapısal Optimizasyon	38
1.3.1.	Yapısal Optimizasyon Elemanları	40
1.3.1.1.	Tasarım Değişkenleri	41
1.3.1.2.	Amaç Fonksiyonu	42
1.3.1.3.	Sınırlayıcılar.....	42
1.3.2.	Optimizasyon Yöntemleri	43
1.3.2.1.	Matematik Programlama.....	45
1.3.2.2.	Tabu Arama Algoritması	45
1.3.2.3.	Isıl İşlem Algoritması	46
1.3.2.4.	Yapay Sinir Ağları Algoritması.....	47
1.3.2.5.	Karınca Kolonileri Algoritması	48
1.3.2.6.	Yapay Bağışıklık Sistemi Algoritması.....	49
1.3.2.7.	Armoni Arama Algoritması	50
1.3.2.8.	Parçacık Sürü Algoritması	50
1.3.3.	Sınırlayıcı İşleme Yöntemleri	51
1.3.3.1.	Statik Ceza Fonksiyonları	52
1.3.3.2.	Dinamik Ceza Fonksiyonları	53
1.3.3.3.	Isıl İşlem Ceza Fonksiyonları	55
1.3.3.4.	Uyarlanabilen Ceza Fonksiyonları.....	56
1.3.3.5.	Yarı Evrimsel Cezalar	59

1.3.3.6.	Ayrık Genetik Algoritma	60
1.3.3.7.	Yok Etme Ceza Fonksiyonları	61
1.3.4.	Algoritma Durdurma Ölçütleri	61
1.4.	Optimizasyon Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar	62
1.4.1.	Betonarme Yapı Elemanlarıyla İlgili Bazı Çalışmalar	62
1.4.2.	Sığ Tünellerle İlgili Bazı Çalışmalar	65
1.4.3.	Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla İlgili Bazı Çalışmalar	68
1.5.	Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	72
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER	73
2.1.	Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritma	73
2.1.1.	Yapay Arı Koloni Algoritması	73
2.1.1.1.	Başlangıç Nektar Kaynaklarının Üretim Aşaması	76
2.1.1.2.	Görevli Arı Aşaması	77
2.1.1.3.	Gözcü Arı Aşaması	80
2.1.1.4.	Kaşif Arı Aşaması	81
2.1.2.	Genetik Algoritma	82
2.1.3.	Karşılaştırmalarda Kullanılabilecek Optimizasyona İlişkin Örnek Tasarımlar	86
2.1.3.1.	Himmelblau Fonksiyonu	86
2.1.3.2.	Kaynaklı Kiriş Tasarımı	89
2.1.3.3.	Tek Donatılı Betonarme Kiriş Tasarımı	92
2.1.3.4.	Bir Doğrultuda Birleşik Eğilme Etkisinde Betonarme Kolon Tasarımı	95
2.2.	Dikdörtgen Kesitli Betonarme Sığ Tünellerin Optimum Tasarımı	100
2.2.1.	Amaç Fonksiyonu	101
2.2.2.	Tasarım Değişkenleri	107
2.2.3.	Yapısal Sınırlayıcılar	112
2.3.	Trabzon Kalekapısı Kavşağı Alt Geçidi ile İlgili Bilgiler	115
2.3.1.	Tünelin Sonlu Elmanlar Modeli	117
2.3.2.	Yükler	119
2.3.2.1.	Sabit Yükler	119
2.3.2.2.	Hareketli Yükler	120
2.3.2.3.	Yatay Zemin Basınçları	121

2.3.2.3.	Deprem Yükleri	122
2.3.3.	Yük Birleşimleri	123
2.3.4.	Tasarım Parametreleri	124
2.4.	rnek Uygulamalar	127
2.4.1.	Denetim Parametrelerinin Belirlenmesi	127
2.4.2.	Bir Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Optimum Tasarımı	131
2.4.3.	Bir Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı.....	141
2.4.4.	İki Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Optimum Tasarımı	150
2.4.5.	İki Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı.....	159
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	171
4.	KAYNAKLAR.....	175
5.	EKLER	193
ZGEÇMİř		

Doktora Tezi

ÖZET

DEPREM BÖLGELERİNDE YAPILACAK BETONARME SIĞ TÜNELLERİN YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI VE GENETİK ALGORİTMAYLA OPTİMUM TASARIMI

Hasan Tahsin ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr.Ing.Ahmet DURMUŞ
2013, 192 Sayfa, 8 Ek Sayfa

Gittikçe artan malzeme ve işçilik maliyetleri buna karşın kaynakların sınırlı olması nedeniyle, inşaat mühendislerinin yapı başarımlarının yeterli olmasını sağlarken maliyeti ve/veya ağırlıklarını optimum düzeyde olmasını sağlamaları da gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı da, aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen enkesitli betonarme sığ tünellerin başarımlarının minimum maliyetle sağlanmasını Yapay Arı Koloni ve Genetik Algoritmalarla gerçekleştirmekten ibarettir. Gerçekleştirilen çalışma dört asıl ve iki ek bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde Yapay Arı Koloni Algoritması bazı örnek tasarımlar üzerinde denenmekte, sığ tünellerin tasarımı için amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar için matematiksel ifadeler belirlenmekte, bunlarla Trabzon Kalekapısı Kavşağı Altgeçit tünelinin minimum maliyetle tasarımı gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar geleneksel tasarımlarla karşılaştırılmaktadır. Üçüncü bölüm çalışmanın bütününden çıkarılabilen sonuç ve önerilere ayrılmıştır. Bu son bölümü kaynaklar listesi, iki ek bölüm ve yazarın özgeçmişi izlemektedir.

Elde edilen bulguların irdelenmesi, aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünellerin minimum maliyetle optimum tasarımlarının Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla gerçekleştirilebileceğini ve bu algoritmalarla geleneksel yöntemle göre daha ekonomik tasarımların yapılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tüneller, Aç-kapa yöntemi, Optimizasyon, Yapay arı koloni algoritması, Genetik algoritma

PhD. Thesis

SUMMARY

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SHALLOW TUNNELS IN
EARTHQUAKE ZONES USING ARTIFICIAL BEE COLONY AND GENETIC
ALGORITHMS

Hasan Tahsin ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Ahmet DURMUŞ
2013, 192 Pages, 8 Appendix

Whereas the increasing material and labour costs due to limited resources, engineers must ensure enough performance of structures with optimum cost and/or weight.

The main purpose of this study is to perform optimum cost design of cut and cover RC shallow tunnels using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithms. This study consists of four chapters and two appendixes. General information is presented in first chapter. In second chapter; Artificial Bee Colony Algorithm tested on some sample designs, mathematical expressions of objective function, design variables and constraints for the design of shallow tunnels limiters are determined, with this expressions, optimum cost design of the Trabzon Kalekapısı junction underpass tunnel is carried out, and the results obtained are compared with the results obtained from traditional design. Third chapter is reserved the results and recommendations concluded from the whole study. This chapter is followed by the list of references, two appendixes and the author's biography.

Evaluated findings show that optimum cost design of cut and cover shallow rectangular RC tunnels can be made with Artificial Bee Colony Algorithm and Genetic Algorithm and the design with these algorithms can be more economic than the traditional ones.

Key Words: Tunnels, Cut and cover method, Optimization, Artificial bee colony algorithm, Genetic algorithm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri	3
Şekil 1.2.	Büyük açıklıklı tünellerin tepe-çekirdek yöntemiyle açılmasına ilişkin şematik gösterilimler (Taşlıca, 1983).	4
Şekil 1.3.	Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılış anında bir görünüm	5
Şekil 1.4.	Tam kesitte tünel açma aygıtından bir görünüm	6
Şekil 1.5.	Kazı yapan kollu tünel açma aygıtından bir görünüm.....	7
Şekil 1.6.	Yumuşak zeminlerde tünel inşasında kullanılan kalkandan bir görünüm (URL-1, 2012).	9
Şekil 1.7.	Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen bir metro tüneli görünümü	10
Şekil 1.8.	Şemsiyeleme yönteminde zemin çivilerinin görünümü	11
Şekil 1.9.	Kuru karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005).	13
Şekil 1.10.	Islak karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005).	13
Şekil 1.11.	Öndöküm betonarme elemanların donatılarının görünümü.....	17
Şekil 1.12.	Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin yapım aşamaları.....	17
Şekil 1.13.	Düz arazide zemine ankrajlar tespit edilmiş panplanş perdeleri yardımıyla aç-kapa yöntemiyle inşa edilen şematik bir tünel örneği	18
Şekil 1.14.	Eğimli arazide ankrajlar tespit edilmiş panplanş perdeleri yardımıyla aç-kapa yöntemiyle inşa edilen şematik bir tünel örneği	18
Şekil 1.15.	İki gözlü kutu kesitli tipik bir metro tüneli enkesiti	19
Şekil 1.16.	Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir istasyon tünelinin enkesiti	20
Şekil 1.17.	Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir karayolu tünelinin enkesiti	21
Şekil 1.18.	Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir su iletim tünelinin enkesiti	22
Şekil 1.19.	ABD’de metro tünellerinin tasarımında kullanılan taşıt yükleri	24
Şekil 1.20.	AASHTO HB-17 (2002) yönetmeliğinde verilen HS 20-44 taşıt yükü.	25
Şekil 1.21.	WMATA tarafından metro tünellerine uygulanan kısa (a) ve uzun (b) süreli yüklemekten doğan yatay zemin basınçları	29
Şekil 1.22.	Kesme etkisindeki zemin modelinin (a) ve tünel kesitinin kaykılması (b)	33
Şekil 1.23.	Geleneksel tasarım süreci (Coello vd.,1997).	40
Şekil 1.24.	Optimum tasarım süreci.....	40
Şekil 1.25.	Yapay sinir ağları algoritmasında nöronlar	48

Şekil 2.1.	Biyolojideki gen ve kromozomun genetik algoritmadaki karşılıkları	83
Şekil 2.2.	Tasarımı yapılan kaynaklı kiriş	89
Şekil 2.3.	Tek donatılı kirişin şematik enkesiti ve tasarım değişkenleri.....	92
Şekil 2.4.	Tek donatılı betonarme kirişte maliyetteki yakınsamanın dört koloni boyutu için karşılaştırılması.....	94
Şekil 2.5.	Kolon enkesiti (a), şekildeğiştirme diyagramı (b), gerilmeler ve bileşkeleri (c)	96
Şekil 2.6.	Kolon enkesiti ve tasarım değişkenleri.....	96
Şekil 2.7.	Kolon çözümlerinin yakınsama durumları	99
Şekil 2.8.	Bu çalışmada belirlenen optimum üç örnek kolon enkesitlerinin optimum değerleri için moment-normal kuvvet etkileşim diyagramları	100
Şekil 2.9.	Bir gözlü tünelin tavan döşemesine ilişkin asal donatı şeması.....	103
Şekil 2.10.	Bir gözlü tünelin taban döşemesine ilişkin asal donatı şeması.....	104
Şekil 2.11.	Bir ve iki gözlü tünelin yan duvarlarına ilişkin asal donatı şeması	104
Şekil 2.12.	İki gözlü tünelin tavan döşemesine ilişkin asal donatı şeması	104
Şekil 2.13.	İki gözlü tünelin taban döşemesine ilişkin asal donatı şeması	105
Şekil 2.14.	İki gözlü tünelin orta duvarına ilişkin asal donatı şeması.....	105
Şekil 2.15.	Bir gözlü tünelde boyut ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenleri	107
Şekil 2.16.	İki gözlü tünelde boyut ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenleri	108
Şekil 2.17.	Bir gözlü tünellerde asal ve ek donatı değişkenleri	109
Şekil 2.18.	Bir gözlü tünellerde kesme donatısı değişkenleri	110
Şekil 2.19.	İki gözlü tünellerde asal ve ek donatı değişkenleri.....	110
Şekil 2.20.	İki gözlü tünellerde kesme donatısı değişkenleri.....	111
Şekil 2.21.	Optimum tasarımı yapılan Trabzon Kalekapısı kavşağı altgeçit tünelinin konumu	115
Şekil 2.22.	Tünel enkesitinin boyutları	116
Şekil 2.23.	Bir gözlü tünelin için sonlu elemanlar modeli.....	117
Şekil 2.24.	Bir gözlü tünelin için sonlu elemanlar modeli.....	117
Şekil 2.25.	İki boyutlu çerçeve eleman	118
Şekil 2.26.	H30-S24 taşıt yüklemesine ilişkin yük dağılımı.....	120
Şekil 2.27.	En büyük açıklık (a) ve cebrik olarak en küçük mesnet momentleri (b) için yükleme durumları.....	121
Şekil 2.28.	Tünele etkileyen yatay zemin basınçları	122
Şekil 2.29.	Deprem etkisinde tünele gelen yatay basınçlar	123
Şekil 2.30.	Denetim parametresi MR için ANOM grafiği.....	129
Şekil 2.31.	Denetim parametresi SPP için ANOM grafiği	130

Şekil 2.32. Denetim parametresi LIMIT için ANOM grafiği	131
Şekil 2.33. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir koloni için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi.....	132
Şekil 2.34. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin tasarımı için 60 aralıklı koloniyle yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi. 133	
Şekil 2.35. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	134
Şekil 2.36. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	134
Şekil 2.37. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	134
Şekil 2.38. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	135
Şekil 2.39. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	135
Şekil 2.40. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	135
Şekil 2.41. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	136
Şekil 2.42. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları	136
Şekil 2.43. Bir gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı	138
Şekil 2.44. Bir gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı	138
Şekil 2.45. Bu çalışmanın uygulamasına konu olan tünelin yapım şirketi tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarımın enkesit detayı.....	140
Şekil 2.46. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir nesil için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi	142
Şekil 2.47. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin tasarımı için 100 bireyden oluşan nesille yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi	143

Şekil 2.48. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	143
Şekil 2.49. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	144
Şekil 2.50. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	144
Şekil 2.51. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	144
Şekil 2.52. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	145
Şekil 2.53. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	145
Şekil 2.54. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	145
Şekil 2.55. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları	146
Şekil 2.56. Bir gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı.....	148
Şekil 2.57. Bir gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı.....	148
Şekil 2.58. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir koloni için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi	151
Şekil 2.59. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin tasarımı için 60 aralıklı koloniyle yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi	152
Şekil 2.60. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	153
Şekil 2.61. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	153
Şekil 2.62. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	153

Şekil 2.63. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	154
Şekil 2.64. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	154
Şekil 2.65. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	154
Şekil 2.66. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	155
Şekil 2.67. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları	155
Şekil 2.68. İki gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı	157
Şekil 2.69. İki gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı	157
Şekil 2.70. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir nesil için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi	160
Şekil 2.71. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin tasarımı için 80 bireyden oluşan nesille yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi.....	161
Şekil 2.72. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	162
Şekil 2.73. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	162
Şekil 2.74. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	162
Şekil 2.75. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	163
Şekil 2.76. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	163
Şekil 2.77. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	163

Şekil 2.78. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları	164
Şekil 2.79. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları	164
Şekil 2.80. İki gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı.....	166
Şekil 2.81. İki gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı.....	166
Şekil 2.82. Bir ve iki gözlü tüneller için Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla belirlenen optimum maliyetler ile şirket tarafından geleneksel yöntemle belirlenen maliyet grafikleri.....	169
Şekil 2.83. Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla optimum maliyetlerin belirlenmesinde yakınsamaya kadar değerlendirilen amaç fonksiyonu sayısı grafikleri	169

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1.	Kuru ve ıslak yolla üretilen püskürtme betonların karşılaştırılması (Vanderwalle, 2005).....	14
Çizelge 1.2.	Tünel üzerine etkiyen darbe yükleri	26
Çizelge 1.3	Zemindeki maksimum enine dalga hızının maksimum yer ivmesine oranı (Power vd.,1996).....	32
Çizelge 1.4.	Yeraltındaki ivmenin yeryüzündekine oranının tünel derinliğine bağlı olarak değişimi (Power vd.,1996).....	32
Çizelge 1.5.	Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması	44
Çizelge 2.1.	Himmelblau fonksiyonu için bulunan optimum değerler	88
Çizelge 2.2.	Kaynak giriş problemine ilişkin bu çalışma ve diğer çalışmalardan elde edilen optimum değerler	91
Çizelge 2.3	Geometrik programlama, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Koloni Algoritmasından elde edilen bulgular	95
Çizelge 2.4.	Kolon örneğine ilişkin tasarım değişkenlerinin sınır ve değişim aralıkları .	97
Çizelge 2.5.	Kolon örneğinde kullanılan bazı veriler	98
Çizelge 2.6.	Kolon örneğinde elde edilen bulguların diğer araştırmacılarınkilerle karşılaştırılması	99
Çizelge 2.7.	Boyutlara ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenlerinin sınırları, değişim aralıkları ve alabilecekleri değer sayıları	108
Çizelge 2.8.	Optimizasyon algoritmasında kullanılan beton sınıflarına ilişkin bazı mekanik özellikler.....	109
Çizelge 2.9.	Tünel inşasında kullanılan beton ve donatıya ilişkin bazı özellikler	116
Çizelge 2.10.	Zemine ilişkin bazı özellikler.....	116
Çizelge 2.11.	Aç-kapa tünele ilişkin tasarım parametreleri	125
Çizelge 2.12.	2010 yılı beton birim fiyatları	126
Çizelge 2.13.	2010 yılı donatı birim fiyatları	126
Çizelge 2.14.	Kalıp, iskele, kazı ve dolguya ilişkin birim fiyatlar.....	126
Çizelge 2.15.	Denetim parametresi MR için ANOVA testinin bulguları	128
Çizelge 2.16.	Denetim parametresi SPP için ANOVA testinin bulguları.....	129
Çizelge 2.17.	Denetim parametresi LIMIT için ANOVA testinin bulguları	130
Çizelge 2.18.	Bir gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen, optimum değerleri	137

Çizelge 2.19. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunları maliyetleri	139
Çizelge 2.20. Bir gözlü tünelin geleneksel ve optimum tasarımına ilişkin maliyetler	140
Çizelge 2.21. Bir gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Genetik algoritmayla elde edilen, optimum değerleri	147
Çizelge 2.22. Genetik Algoritmayla yapılan çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri	149
Çizelge 2.23. Bir gözlü tünelin geleneksel ve optimum tasarımına ilişkin maliyetler	150
Çizelge 2.24. İki gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen, optimum değerleri	156
Çizelge 2.25. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri	158
Çizelge 2.26. Bir gözlü tünelin geleneksel ve iki gözlü tünelin optimum tasarımına ilişkin maliyetler	159
Çizelge 2.27. İki gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Genetik Algoritmayla elde edilen, optimum değerleri	165
Çizelge 2.28. Genetik Algoritmayla yapılan çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri	167
Çizelge 2.29. Bir gözlü tünelin geleneksel ve iki gözlü tünelin optimum tasarımına ilişkin maliyetler	168

SİMGELER DİZİNİ

A_0	Etkin yer ivme katsayısı
a	Eşdeğer basınç diyagramı derinliği
A_{cc}	Derinliği a ile sınırlanan beton basınç alanı
A_i	i elemanının enkesit alanı
A_k	Kalıp alanı
a'_{max}	Yeraltında ölçülen maksimum yer ivmesi
A_s	Asal donatı alanı
A_{sd}	Dağıtma donatısı alanı
A_{sw}	Kesme donatısı alanı
b	Tünel genişliği, kiriş genişliği, kolon kısa kenarı
B	Taban basıncı
b_{min}	Kolon kısa kenarının minimum boyutu
c	Tarafsız eksen derinliği
c_c	Beton birim maliyeti
C_c	Beton toplam maliyeti
C_{dl}	Dolgu toplam maliyeti
C_e	Ceza eşik değeri
C_h	Yatay eşdeğer deprem katsayısı
c_i	i elemanında kullanılan malzemenin birim maliyeti
C_{is}	İskele toplam maliyeti
CK	Ceza katsayısı
c_k	Kalıp Birim maliyeti
C_k	Kalıp toplam maliyeti
C_{kz}	Kazı toplam maliyeti
C_s	Enine dalgaının maksimum zahiri hızı
c_s	Çelik birim maliyeti
C_s	Çelik toplam maliyeti
C_v	Düşey eşdeğer deprem katsayısı

C_y	Yapı maliyeti
D	Tasarım değişkeni sayısı
d	Faydalı yükseklik
$d_i(S)$	S çözümünün i . sınırlayıcıyı ihlal miktarı
DY	Darbe yükü
E	Deprem yükü
E_s	Donatı çeliğinin elastisite modülü
f	Tünelin esneklik oranı
F	Anova testinde gruplar arası ortalama karelerin grup içi ortalama karelere oranı
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$f'(x)$	Bireyin uygunluk değeri
F_c	Beton basınç gerilmeleri bileşkesi
$F_ç$	Anova testinde F dağılım çizelgesinden alınan değer
f_{cd}	Betonun tasarım basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun tasarım çekme dayanımı
ff	En iyi bireyin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri
ff_t	Herhangi bir t nesline kadar bulunan uygun bölgedeki en iyi bireyin amaç fonksiyonu değeri
$f_{maliyet}$	Maliyeti dikkate alan amaç fonksiyonu
F_o	Önem faktörü
F_{si}	Donatı gerilmelerinin bileşkesi
FY	Frenleme yükü
f_{yd}	Donatının tasarım akma dayanımı
f_{ywd}	Kesme donatısının tasarım dayanımı
G	Sabit yükler
g	Sınırlayıcı ihlali miktarı
$g(x)$	Eşitsizlik tipi sınırlayıcılar
G_t	Tünelin kayma modülü
G_z	Zeminin kayma modülü
H	Zemin derinliği
h	Tünel yüksekliği, kolon uzun kenarı, eleman kalınlığı
$h(x)$	Eşitlik tipi sınırlayıcılar

h_{min}	Kolon uzun kenarının minimum boyutu
h_n	Tünel net yüksekliği
h_{or}	Tünel üzerindeki örtü zemini kalınlığı
I	Yapı önem katsayısı
ICE	Buzlanma basıncı
i_d	Kullanıcı tarafından tanımlanan ihlal düzeyi sayısı
i_s	Sıfırdan başlayan ve ihlal edilen her bir sınırlayıcı için, ihlal miktarına bakılmaksızın, birer artırılan bir sayı
K	Tünelin kaykılma oranı
k	Ceza derecesini ayarlayan bir katsayı
K_0	Sükunet durumundaki basınç katsayısı
K_{ad}	Dinamik aktif basınç katsayısı
K_{as}	Aktif basınç katsayısı
K_{at}	Toplam aktif basınç katsayısı
K_{pd}	Dinamik pasif basınç katsayısı
K_{ps}	pasif basınç katsayısı
K_{pt}	Toplam pasif basınç katsayısı
k_t	Tünel enkesitinin yatay rijitliği
l	Eleman boyu
l_b	Donatı kenetlenme boyu
L_i	i elemanının uzunluğu
$LIMIT$	Yapay arı koloni algoritmasında bir denetim parametresi
l_n	Tünelin yada bir gözün net genişliği
l_s	Asal donatı uzunluğu
l_{sw}	Kesme donatısı uzunluğu
m	Eşitsizlik tipi sınırlayıcı sayısı
M_d	Tasarım momenti
MR	Yapay arı koloni algoritmasında bir denetim parametresi
M_r	Direnme momenti
M_w	Moment manyitüdü
MY	Merkezkaç yükü
n	Eşitlik tipi sınırlayıcı sayısı, asal donatı adedi

N_d	Tasarım eksenel yükü
NFT	Çözümün uygun bölgeye yakınlığına karar vermede kullanılan bir eşik değer
NFT_0	NFT için bir üst sınır
n_x	Kolonda köşe donatıları hariç x eksenleri doğrultusundaki diğer donatıların adedi
n_y	Kolonda köşe donatıları hariç y eksenleri doğrultusundaki diğer donatıların adedi
$\emptyset$	Donatı çapı
P	Yatay zemin basınçları
p	Toplam sınırlayıcı sayısı, kesme donatısı adedi
p_0	Sükunet durumunda yatay zemin basıncı
p_{ad}	Depremden oluşan dinamik aktif yatay basınç
p_{as}	Aktif yatay zemin basıncı
p_c	Çaprazlama olasılık değeri
p_d	Kiriş üzerine etkiyen eşit yayılı tasarım yükü
p_i	Nektar kaynağının seçilme olasılığı
p_m	Mutasyon olasılık değeri
p_{pd}	Depremden oluşan dinamik pasif yatay basınç
p_{ps}	Pasif yatay zemin basıncı
Q	Hareketli yükler
q	Yüzeyden etkiyen ek yük
q_{ad}	Ek yükler nedeniyle oluşan dinamik aktif yatay basınç
q_{as}	Aktif durumda ek yükten oluşan yatay zemin basıncı
q_{pd}	Ek yükler nedeniyle oluşan dinamik pasif yatay basınç
q_{ps}	Pasif durumda ek yükten oluşan yatay zemin basıncı
R	Elemanlarda oluşan kısalma etkisi
r	paspayı oranı, dağıtma donatısı adedi
R_j	0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı rastgele bir sayı
S	Rötre etkisi
S_a	Aktif sınırlayıcılardan oluşturulan bir küme
s_a	Asal donatı aralığı
S_b	Bir sabit
SF	Taşkın etkisi

s_l	Kesme donatısının tünel boyuna doğrultusundaki aralığı
s_{max}	Donatılar arası maksimum net mesafe
s_{min}	Donatılar arası minimum net mesafe
SN	Nektar kaynağı sayısı
SPP	Yapay arı koloni algoritmasında bir denetim parametresi
ss	Sağlanan sınırlayıcı sayısı
s_t	Kesme donatısının tünel enkesitindeki aralığı
s_x	Kolonda x doğrultusundaki donatı aralıkları
s_y	Kolonda y doğrultusundaki donatı aralıkları
T	Sıcaklık etkisi
t	Mevcut iterasyon (nesil) numarası
T_{i-1}	Önceki iterasyonda kullanılan sıcaklık değeri
T_s	Evrin süreci boyunca sifıra yaklaşan algoritma koşum süresinin bir fonksiyonu
tt	Toplam iterasyon sayısı
$V(t)$	Mevcut iterasyon numarasının bir fonksiyonu
V_c	Beton hacmi, betonun karşıladığı kesme kuvveti
V_d	Tasarım kesme kuvveti
V_{dl}	Dolgu hacmi
V_{kz}	Kazı hacmi
V_r	Kesitin kesme dayanımı
V_s	Enine dalgaının maksimum hızı
V_w	Kesme donatısının karşılayacağı kesme kuvveti
W	Rüzgar yükü
wf_i	i sınırlayıcısının ağırlık katsayısı
WL	Hareketli yük üzerine etkiyen rüzgar yükü
W_s	Donatı ağırlığı
W_y	Yapının toplam ağırlığı
x_{max}^j	j. tasarım değişkeninin üst sınırı
x_{min}^j	j. tasarım değişkeninin alt sınırı
YY	Yuvarlanma yükü
α	Duvar yüzünün düşeyle yaptığı açı
β	Şev açısı

β_B	Taban basıncı yük katsayısı
β_E	Deprem yükü katsayısı
β_F	Frenleme yükü katsayısı
β_G	Sabit yük katsayısı
β_{ICE}	Buzlanma basıncı katsayısı
β_M	Merkezkaç yükü katsayısı
β_P	Yatay zemin basınçları yük katsayısı
β_Q	Hareketli yük katsayısı
β_R	Elemanda oluşan kısalma, rötre ve sıcaklık etkisi yük katsayısı
β_S	Taşkın etkisi yük katsayısı
β_W	Rüzgar yükü katsayısı
γ	Yük çarpanı
γ_i	i elemanında kullanılan malzemenin birim ağırlığı
γ_s	Çelik birim ağırlığı
γ_t	Tünel enkesitinin açısız şekildeğiştirmesi
γ_z	Zeminin birim ağırlığı, zeminin serbest alan açısız şekildeğiştirmesi
γ_{zb}	Zeminin su altındaki birim ağırlığı
γ_{zs}	Zeminin suya doymuş birim ağırlığı
δ	Duvarla zemin arasındaki sürtünme açısı
δ_d	Tünel tavan döşemesinin orta noktasında hesaplanan sehim
δ_{max}	İzin verilen maksimum sehim
$\Delta b_i(x)$	i sınırlayıcının ihlali
Δ_t	Tünel tavanının tabanına göre bağıl yerdeğiştirmesi
Δ_z	Zemin elemanın tepesinin tabanına göre bağıl yerdeğiştirmesi
ε_{si}	Çeşitli düzeylerdeki donatının birim şekildeğiştirmeleri
η_i	Bir katsayı
η_s	S çözümünün uygun olup olmamasına göre değer alan bir katsayı
λ	Deprem yönetmeliğine göre hesaplanan açısı değeri
ρ	Donatı oranı
ρ_b	Dengeli donatı oranı
ρ_{max}	Maksimum donatı oranı
ρ_{min}	Minimum donatı oranı

ρ_z	Zeminin yoğunluğu
σ_{si}	Çeşitli düzeylerdeki donatıdaki gerilmeler
τ	Kayma gerilmesi, ısıtıl işlem algoritmasının soğuma sürecinde kullanılan bir sıcaklık değeri
φ	Zeminin içsel sürtünme açısı, dinamik yük çarpanı
Φ	Direnme momenti azaltma katsayısı
$\Phi(x)$	Cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri
$\Phi_i(.)$	İhlalin bir fonksiyonu
Φ_{ij}	-1 ile 1 arasında değer alan bir parametre

Not: Simgeler dizininde verilmeyen simgeler metnin içinde geçtikleri yerde tanımlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Tüneller Hakkında Bazı Bilgiler

Demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal gibi bir ulaşım yada taşın yolunun bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan mümkün olmadığı yada ekonomik açıdan uygun bulunmadığı durumlarda bu yolların bir kısmının yeraltından geçirilmesine imkan tanıyan yeraltı yapılarının tümüne tünel adı verilmektedir (Bozkurt, 1970).

Tüneller, bilimin gelişmemiş olduğu çağlardan beri, insanoğlunun çok ilgi duyduğu bir yapı türüdür. Bu nedenle bu yapılar uzun zaman mühendislerin önsezileri ve usta marifetiyle inşa edilmişlerdir. Ancak bu yapıların o tarihlerde emniyetlerinin uygun bir masrafla sağlanıp sağlanmadığı belli olmadığından bu tür çözümler hiçbir zaman memnuniyet verici olamamıştır. Mühendislik biliminin özellikle kaya mekaniğinin 1950'lerden sonra hızla gelişmesi ve buna bağlı olarak geliştirilen analitik yöntemler tünel tasarımına bilimsellik getirmiş ve hatta ikinci dünya savaşından sonra meydana gelen gelişmeler diğer inşaat mühendisliği alanlarındakini oldukça geride bırakmıştır. Bununla beraber bugün de bir tünel ya da yeraltı yapısının yerüstü yapıları kadar sağlıklı bir şekilde tasarlanması daha zor olmaktadır (Önalp,1982; Öztürk,2007).

Tünel inşasını gerektiren başlıca nedenler:

- 1) Eğimi sınırlandırılmış olan geçkilerde (güzergâhlarda) öngörülen eğimle arazide aşılamayan sırt ve tepelerin bulunması,
- 2) Ekonomik yönden uygun olması durumunda geçkinin kısaltılması,
- 3) Geçkinin önemli bir kısmını toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları yada çığlardan korunmak,
- 4) Demiryollarında olduğu gibi, büyük yarıçaplı dönemeçlerin (virajların) uygulandığı geçkilerde dar bir vadinin yada sırtın dönülmesi sırasında büyük dolgu, yarma, köprü yada viyadüklerin yapımının uygun görülmemesi,
- 5) Demiryollarında dağlık arazide helisel bir tünelle yükseklik kazanmak,
- 6) Üzerindeki ulaşımı aksatmamak için akarsuların yada boğaz teşkil eden derin suların altından geçilmek istenmesi,
- 7) İnşası ve bakımı masraflı olan kendini tutamayan zeminlerdeki büyük yarmalardan kurtulmaya çalışmak,

8) Atık ve temiz suların iletimi, elektrik ve telefon kabloları ile gaz boruları gibi çeşitli tesisatlar için galeri ihtiyaçlarının giderilmesi,

9) Kamulaştırılması pahalı olan arazilerde bulunan yolların genişletilmesi yada yeni yolların açılmasının mümkün olmaması,

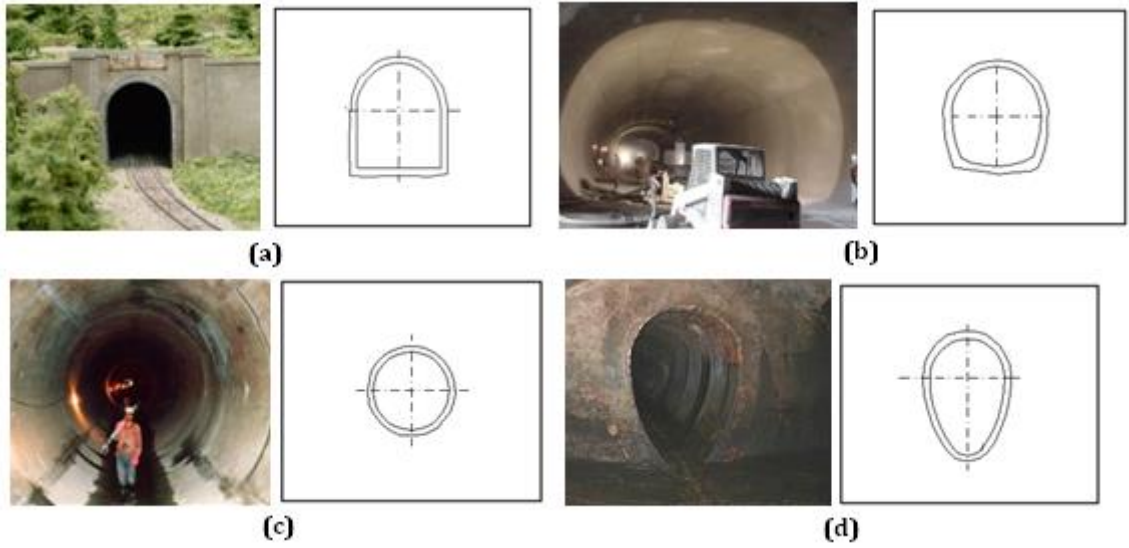
10) Toplu taşımacılığın metro ile yapılma ihtiyaçlarının bulunması vb., şeklinde sıralanabilmektedir.

Bayındırlık yapılarının bir sınıfını teşkil eden tünellerin; ulaşım, savunma, sığınma, su iletimi ve depolama gibi birçok amaçla inşa edildiği bilinmektedir. Günümüzde şehirlerin büyümesi yol standartlarının iyileştirilmesi, savunma ve sığınak ihtiyaçlarının giderek artması, arazinin engebeli ve/veya değerli oluşu gibi nedenlerle bu yapıların inşasına çok daha fazla gereksinim duyulmaktadır. Özellikle dağlık bölgelerde planlanan çeşitli karayolu projelerinde, yüksek standartlı yolların yapılması için, tünellerin sıkça başvurulmuş bayındırlık yapıları olduğu da bir gerçektir. Günümüz koşulları bundan böyle özellikle Türkiye’de yaygın olarak inşa edilen ulaşım tünelleri yanında savunma amaçlı tünellerin yapımına da daha çok önem verilmesi gerektiğini düşündürmektedir (Öztürk,2007; Öztürk ve Durmuş,2008).

Bu yapıların tasarımları, yapısı çok karmaşık olan zeminle özel etkileşimlerinden dolayı diğer yapılara göre daha fazla disiplin mensubu mühendislerin teknik literatürde mevcut tasarım yöntemlerinden, ülke ekonomisiyle bağdaşan bir emniyeti sağlama yönünden, en uygun olanını seçerek birlikte çalışmalarını gerektirmektedir. Zira tünel inşasında karşılaşılabilecek birtakım sorunlara ancak bu yolla uygun çözümler bulunabileceği açıktır.

1.1.1. Sınıflandırma

Tünellere ilişkin enkesit tiplerinin seçimi bunların üzerinde bulundukları ulaşım yolunun cinsine ve bu yol zemininden gelecek etkilere göre değişmektedir. Kayaç türü zeminlerde tünel enkesitleri genellikle dairesel kemer ve düşey yan duvarlardan oluşacak şekilde inşa edilmektedir (Şekil 1.1a). Yumuşak zeminlerde açılan tünellerin ise yatay basınçları karşılayacak farklı enkesitlere sahip olması gerekmektedir (Şekil 1.1b ve 1.1c). Bu tür zeminlerde açılan tünel enkesitlerinin genellikle tam daire yada nal şeklinde olması tercih edilmektedir (Beykont,1951; Öztürk ve Durmuş,2008).



Şekil 1.1. Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri

Dairesel enkesitli tünellerin teorik olarak iç ve dış kuvvetleri en iyi karşılayan tüneller olduğu kabul edilmektedir. Diğer taraftan bu enkesite sahip olan tüneller en küçük çevreyle en büyük enkesite de sahip olmaktadır. Ancak bu üstünlükleri yanında bazı sakıncaları da mevcuttur. Bunlardan biri tabanlarının daire yayı olması nedeniyle ulaşım yolu için fazlaca dolgu gerektirmeleri, diğeri ise bu tünellerde beton kaplamanın yapım zorluğudur.

Bugün nal şeklindeki enkesitin (bkz. Şekil 1.1b), kemerli ve dairesele enkesit şekilleri (bkz. Şekil 1.1a ve 1.1c) arasında olup hem tasarım mühendisi, hem de yüklenici tarafından diğerlerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Böyle bir tünelin döşemesi ulaşım yolu için yeteri kadar düz olduğu gibi eğrisel kenarları ve tabanı da kemer gibi çalıştığından dış kuvvetleri daha iyi karşılamaktadır.

Yumurta şeklindeki enkesitler (Şekil 1.1d) şehir atık suları ile taşkın debilerini geçiren birleşik kanalizasyon tünellerinde kullanılan enkesitlerdir. Ancak tabanları dar olduğundan bu enkesitler karayolu, demiryolu tünelleri için uygun değildirler (Beykont, 1951).

Burada dikdörtgen enkesitli tünellerin, aç- kapa yöntemiyle yapılanlar ve su altı tünelleri hariç, kaplamalarının zor olmasından dolayı pek tercih edilmediklerini belirtmek uygun olmaktadır.

İşlevlerine göre tüneller; (a) barınak ve tapınak tünelleri, (b) karayolu, demiryolu, metro ve su yolu gibi ulaşım tünelleri, (c) maden galerileri, (d) su iletim tünelleri, (e)

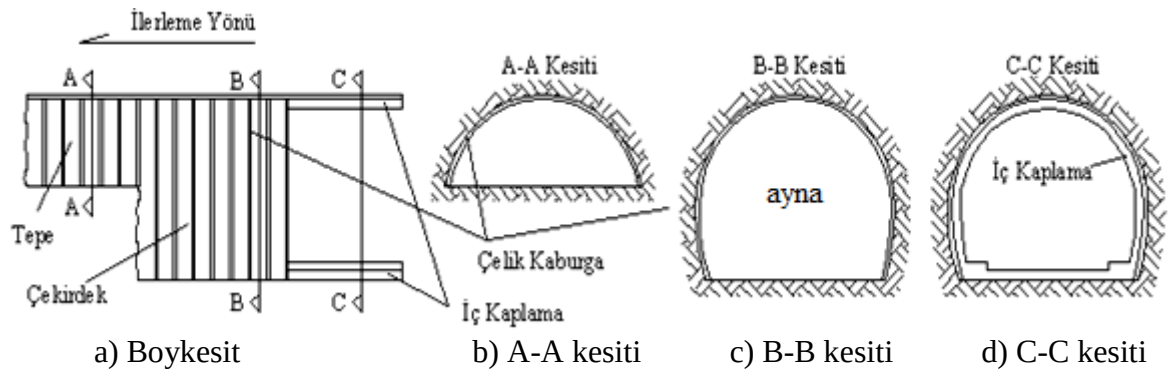
kanalizasyon ve kamu hizmet tünelleri, (f) depolama tünelleri ve (g) korunma amaçlı tüneller olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte sözkonusu amaçlar dışında yeraltı fabrikaları, istasyonları, santralleri gibi yapılar olarak inşa edilen tüneller de mevcuttur.

Yapım şekline göre ise tüneller; (a) kaya zemin tünelleri, (b) yumuşak zemin tünelleri ve (c) su altı tünelleri şeklinde sınıflandırılabilir.

1.1.2. Geçki Zeminine Göre Tünel İnşası

Tünel inşasının; kazı, iksa, kazılan malzemenin taşınması, kaplama, drenaj, yalıtım ve havalandırma işlemlerinin birlikte ve uyum içinde yürütüldüğü çok yönlü bir çalışma olduğu bilinmektedir.

Kazı yapıldıktan sonra zeminin kendini tutma süresi, iksanın yapımına kadar havalandırmaya ve kazı malzemesinin taşınmasına imkan veriyorsa tünelin, ekonomik olduğu bilinen, tam kesit olarak açılması tercih edilmektedir. Bu koşulların sağlanmaması durumunda yada sağlansa bile tam kesitte kazı için gerekli araç-gereçlere sahip olunmaması yada bunların temin edilmesinin ekonomik olmadığı büyük açıklıklı tünellerin kazı işlemlerinde tepe-çekirdek yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. Büyük açıklıklı tünellerin tepe-çekirdek yöntemiyle açılmasına ilişkin şematik gösterimler (Taşlıca, 1983).

Yumuşak zeminlerde açılan büyük açıklıklı tünellerde uygulanan yandan galeri açma yönteminde, tünel açıklığının iki yanında açılan galeriler yardımıyla yan duvarlar desteklendikten sonra orta kısmı kazılmak suretiyle iksa tamamlanmaktadır. Bu tez konusu tünelde kullanılan aç-kapa yöntemi, tüm sığ tünellerde de kullanılabilir.

1.1.2.1. Kayaç Zeminlerde Tünel İnşası

Kayaç zeminlerde tünel inşası kazının şekline göre delme-patlatma yada özel delgi aygıtlarıyla inşa olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Klasik yöntem adıyla anılmakta olan delme-patlatma yoluyla tünel inşası uzun süredir önemli bir değişiklik yapılmadan hemen her türlü kayaç koşullarında kullanılmaktadır.

Bu yöntemle tünel inşasında aşağıdaki sıra izlenmektedir:

1) Kararlaştırılmış bir plana göre önceden aynada (bkz. Şekil 1.2c) patlayıcıların yerleştirileceği lağım delikleri açılmaktadır. Eğer jumbo adlı delgi aygıtı lağım deliklerinin açımında kullanılacaksa aynaya yaklaştırılmakta ve kazı için hazırlanmaktadır (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılış anında bir görünüm

2) Açılan deliklere daha önceden hesaplanmış miktarda patlayıcı yerleştirilmektedir.

3) Deliklerde bulunan patlayıcılar ateşlenmekte ve patlatmadan meydana gelen gazların giderilmesi için havalandırma yapılmaktadır.

4) Düşme ihtimali olan kayaç parçaları düşürülmekte, gerekli durumlarda yeni açılan kısma iksa yapıldıktan sonra çıkan kazı malzemesi taşınmaktadır.

Burada emniyetli ve verimli ilerlemenin sağlanması için patlayıcı maddenin cinsinin ve miktarının, lağım deliklerinin düzen ve derinliklerinin önemli olduğu belirtilmelidir. Diğer taraftan ilk malzeme ve teçhizatın ucuzluğu, her türlü kayaç koşullarında kullanılabilirliği gibi üstünlükleri yanında ilerlemenin yavaş olması, aşırı sökülmenin

önüne geçilememesi dolayısıyla da tünel enkesitinin aynen açılmasının mümkün olmaması, çevredeki kayalar yumuşatması gibi sakıncaların bulunduğu bilinmektedir (Kaya, 1983).

Bundan yaklaşık 60 yıl önce diğer bir deyişle 1950'li yıllardan sonra tünel açma aygıtlarının geliştirilmesiyle tünel açımında yeni bir devir başlamış, öyle ki bu aygıtlar sayesinde kazı hızı geleneksel yöntemlere göre önemli derecede artmıştır.

Bu aygıtlardan en önemlisi tam kesitte tünel açma aygıtıdır. Bu aygıt (Şekil 1.4.), ön yüzüne çeşitli cins ve sayıda kesiciler yerleştirilmiş dönen bir kafa ile içinde gerekli parçaların ve kumanda bölümünün bulunduğu silindirik bir gövdeden ibarettir (Taşlıca, 1983).



Şekil 1.4. Tam kesitte tünel açma aygıtından bir görünüm

Bu tam kesitte tünel açma aygıtı 2-12 m arasındaki çaplarda kazı yapabilmekte ve uzunlukları 12- 25 m arasında değişmektedir. Bu araç yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi kuyruk, gövde ve yüz kısmı olmak üzere başlıca üç esas bölümden oluşmaktadır. Kuyruk bölümü, kaplama, otomatik taşıyıcı band için gerekli kaldırma kollarını içermektedir. Gövde bölümü; operatör kabini, hidrolik ve elektrikli sistemleri, motorları, jeneratörleri, çalışma platformu gibi üniteleri içermektedir. Yüz kısmında ise aygıtın dönen ve kesici elemanları, gerekli durumlarda ise kalkan bulunmaktadır. Dönen kafanın yüzünde bulunan kesiciler zemin türüne göre seçilmekte, yumuşak zeminlerde kesici uçlar ve dişler, kayaç zeminlerde ise disk şeklinde kesiciler kullanılmaktadır (Çakan,2000). Aygıt dönen kafadaki kesiciler sayesinde kayacı öğütmekte ve kazdığı malzemeyi içine alarak bunu sahip olduğu dönen bantlar sayesinde arkaya doğru iletmektedir. Gerekli durumlarda

aygıtın dışında bulunan kalkan sistemi kaya düşmesine karşı aygıtı korumakta ve iksa esnasında gerekli güvenliği sağlamaktadır. Çatlak ve kırıklı kayalarda kazı yapıldığı durumlarda iksa bu kalkanın hemen arkasına kadar yaklaştırılmaktadır.

Diğer bir tünel açma aygıtı kollu tünel açma aygıtıdır (Şekil 1.5). Bu aygıt kayacı, bir kol üzerinde dönen küçük bir kafaya yerleştirilmiş kesiciler yardımıyla yontmaktadır. Bu aygıt tam kesitte tünel açma aygıtına göre daha az enerjiye ihtiyaç duymakta ve maliyetleri de daha düşük olmaktadır. Tam kesitte tünel açma aygıtından farklı olarak bu aygıt dairesel olmayan kesitlerde de kullanılmaktadır (Kırbaş,1995).



Şekil 1.5. Kazı yapan kollu tünel açma aygıtından bir görünüm

Burada bu aygıtlara benzer daha başka tünel açma aygıtlarının mevcut olduğu da belirtilmelidir.

1.1.2.2. Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası

Alt geçitler, gömme depolar, yeraltı otoparkları, içme suyu ve kanalizasyon tünelleri gibi yeraltı yapıları genellikle sığ derinliklerde ve yumuşak zeminlerde açılmaktadırlar. Bu zeminler düşük taşıma güçlü ve genellikle suya doymun zeminlerdir. Bu nedenle bu tür zeminlerde tünel açımı, özel tekniklerin geliştirilmesini ve genellikle zeminlerin iyileştirilmesini de gerektirmektedir. Zemin özellikleri ve yeraltı suyunun konumu tünel aynasında ve çevresinde stabilizeyi etkilediği durumlarda, zemin iyileştirme yöntemleriyle

tünel çevresi stabilitesinin sağlanmasına ve yeraltı su seviyesinin düşürülmesine çalışılmaktadır. Stabilitiyi sağlamak ve suyu önlemek için enjeksiyon, zemini dondurma, denetimli drenajla zemin suyu seviyesinin düşürülmesi ve basınçlı hava yardımıyla suyun denetim altına alınması gibi işlemler yapılmaktadır (West ve O'Reilly,1978). Bu işlemler aşağıda kısaca açıklanmaktadır:

✓ Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi: Bu işlemin amacı tünel inşasını kolaylaştırmak için yeraltı su seviyesini tünel taban düzeyinin altına düşürmektir. Bu amaçla tünel geçkisinde yeteri kadar kuyu kazılmakta ve bu suretle yeraltı su seviyesinin istenen düzeye inmesi sağlanmaktadır. Bu işlem esnasında dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, ince taneleri tutarak topraktan çekilmesini önleyecek filtre malzemesinin kuyulara uygun şekilde yerleştirilmesidir. Filtrenin uygun olmaması durumunda suyla birlikte çekilen malzemeden dolayı zeminde önemli oturmalar meydana gelmektedir. Yumuşak killi ve siltli zeminlerde uygun olmayan bu yöntem yerine elektro-osmoz adı verilen başka bir yöntem kullanılmaktadır (Bahar,1994).

✓ Enjeksiyon Yöntemi: Enjeksiyon yöntemiyle zemindeki boşluklara bir çözelti verilmek suretiyle zeminin mevcut geçirimsizliği, dayanımı ve stabilitesi iyileştirilmektedir. Enjeksiyon işleminde kullanılan en eski malzeme portland çimentosu olmakla birlikte bugün bu işlem için ekonomi ve sağlık yönünden uygun çeşitli kimyasal maddeler de kullanılmaktadır.

Burada teknik literatürde konsolidasyon, kompaksiyon ve jet-grouting adlı üç çeşit enjeksiyon yönteminin mevcut olduğunu belirtmek uygun olmaktadır (Bahar, 1994).

✓ Basınçlı Hava Kullanımı: Basınçlı hava 19. yüzyıl sonlarından beri kullanılan bir yöntemdir. Suya doygun zeminlerde kullanılabilen bu yöntemin temel amacı tünel içindeki hava basıncını hidrostatik basınca eşitleyerek suyun tünel içine girmesini engellemektir. Sistemin kurulması oldukça zaman alıcı ve pahalı olduğu gibi, basınç altında çalışan işçilerde sağlık sorunlarına yol açabilen bu yöntemin kullanımı giderek azalmaktadır (Öztürk,2007).

✓ Zeminin Dondurulması: Zemin dondurma yöntemi enjeksiyonla ve basınçlı havayla çalışmanın mümkün olmadığı suya doygun zeminlerde kullanılan özel ve pahalı bir yöntemdir. Dondurma işleminde stabilitesinin sağlanması gereken alan etrafındaki zemine soğutma borularının yerleştirilmesi suretiyle bunların çevresinde donmuş bir bölge oluşturulmaktadır. Bu işlem yüzeyden düşey sürülmüş borularla ve/veya aynadan yatay borularla gerçekleştirilmektedir (Öztürk ve Durmuş,2008).

1.1.2.2.1. Yumuşak Zeminlerde Kalkanla Tünel İnşası

Kalkan (bukliye) esas olarak çelik bir silindir şeklindedir (Şekil 1.6). Bu aygıt tünel boşluğunu çevreleyerek, zemine destek sağlamak suretiyle kaplamanın yapımına iksa gerektirmeden izin vermektedir. Kalkan kesici uç, gövde ve kuyruk kısımlarından oluşmaktadır. Kalkan kesici ucu sayesinde zeminde ilerlemekte, gövde kısmında gerekli itici kriko ve pompalar, kuyruk kısmında ise kaplama yapımını kolaylaştıracak elemanlar bulunmaktadır (Taşlıca,1983).



Şekil 1.6. Yumuşak zeminlerde tünel inşasında kullanılan kalkandan bir görünüm (URL-1, 2012).

Tünel kazısında tam kesit halinde ilerlemeyi sağlayan bu aygıt, yapılmış olan son kaplama kenarından destek alarak ileri doğru solucan hareketine benzer bir hareketle itilmekte ve keskin ucu sayesinde zemine gömülerek ayna kazısının yapılmasına imkân tanımaktadır.

Tasarlanmış çeşitli otomatik kalkanlar mevcut olmakla birlikte bunlardan dönen tamburlu otomatik kalkanlar yumuşak zeminlerde en yaygın kullanılanıdır. Bentonitli otomatik kalkan ise daha çok suya doymun ayrık taneli zeminlerde kullanılmaktadır. Bu aygıtın özeliği önyüzünden basınçlı bentonit eriyiğini püskürterek bu eriyiği aynadaki zemine uygulayıp bu suretle stabiliteyi sağlamasıdır. Basınçlı hava kullanan kalkanlarda ise stabilite basınçlı hava ile sağlanmaktadır.

1.1.2.2.2. Yumuşak Zeminlerde Boru Sürmeyle Tünel İnşası

Bu yöntemde dışarıda imal edilmiş borular, krikolar yardımıyla arka arkaya zemine sürülmektedir. Bu yöntem kanalizasyon ve su şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemde öncelikle boru dönecek yerde giriş ve çıkışa iki adet kuyu açılmakta, giriş kuyusuna yan duvarlardan destek alacak şekilde yerleştirilen krikolar yardımıyla, kuyuya indirilen borular zemine itilmektedir. Kazı işi itme işleminden önce yada sonra çeşitli araçlarla yapılabilmektedir.

Yeni gelişen teknolojilerle ölçme sistemleri elektronik lazer sistemine bağlı olarak yapıldığından yönlendirme işlemleri daha hassas ve hızlı yapılmaktadır. Lazer sistemleri sayesinde tünel içinde yapılan ölçme işlemlerine gerek kalmadığından hatalara neden olan olumsuzluklar da çoğunlukla ortadan kalkmaktadır.

1.1.2.2.3. Yumuşak Zeminlerde Aç-Kapa Yöntemiyle Tünel İnşası

Açıp-kapama yöntemi genellikle örtü kalınlığı 10 m'den az olan kanalizasyon, içme suyu, karayolu ve metro tünellerinin inşasında kullanılmaktadır. Bu yöntemde zemin, büyük bir hendek şeklinde kazılmakta, tünelin kaplaması yapıldıktan sonra üzeri tekrar örtülmektedir (Şekil 1.7.).

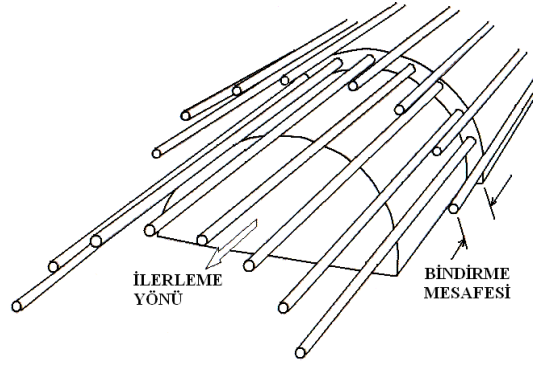


Şekil 1.7. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen bir metro tüneli görünümü

Bu yöntem, ekonomik ve kolay uygulanabilir olmasına karşılık, yüzeydeki trafiği etkileyebilmektedir. Bu nedenle yapım aşamasında trafiği en az etkileyecek önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.

1.1.2.2.4. Yumuşak Zeminlerde Şemsiyelemeyle (Boru Kemer Yöntemiyle) Tünel İnşası

Bu yöntemde tünel aynasının stabilitesini sağlamak amacıyla zemin çivisi adıyla anılan destekleme elemanları, tünel aynasında önceden belirlenen çapta ve uzunlukta delikler delinerek zemine uygulanmaktadır (Şekil 1.8). Delinen deliklere uygun kalınlıkta ve uzunlukta çelik donatı yada yeterli çekme dayanımına sahip cam lifler yerleştirilmekte ve etrafı uygun kıvamda çimento enjeksiyonuyla doldurulmaktadır. Bu sayede oluşturulan ön kemer altından kazı yapılarak tünel inşası gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.8. Şemsiyeleme yönteminde zemin çivilerinin görünümü

1.1.2.3. Sualtında Tünel İnşası

Tüp tünel yada batırılmış tünel adıyla anılan bu tüneller bir su yolu engelini aşmak için köprü ve derinden geçen geleneksel tünellere bir seçenek olmakla birlikte karakteristik olarak kanalların ve kanal tarzındaki doğal engelleri alttan geçmede en kısa yol olarak seçilmektedir. Batırılmış tüneller yeni bir yapım tekniği olmayıp kullanımları uzun yıllardan beri devam etmektedir. Dünya çapında tanınan 150'nin üstünde batırılmış tünel mevcut olup bunların yaklaşık 100 adedi karayolu ve demiryolu geçişi için tasarlanmıştır. Geri kalanlar ise su temini ve elektrik hattı tünelleri olarak kullanılmaktadır (Saveur ve Grantz, 1997).

1.1.3. Tünel Kaplamaları

Sağlam kayaç zeminlerde inşa edilenler dâhil diğer tüm zeminlerde inşa edilen tünellere genellikle başta yeterli stabilite olmak üzere, dayanım, dayanıklılık, süneklik ve rijitlik özelliklerinin kazandırılması açısından kaplama yapılmaktadır.

Tünellerde günümüzde çok farklı kaplama türü kullanılmakla birlikte geçmişte en çok tercih edilen kaplamaların kesme taş olduğu bilinmektedir. Kemer şeklinde örülen bu taş kaplamalar, oldukça zahmetli ve pahalı olduklarından, günümüzde kullanılmamaktadır.

Kaplamalarda kullanılmış bir diğer malzeme de tuğladır. İşçiliği kesme taşla göre daha kolay olmakla birlikte yeteri kadar dayanımlı olmadıkları gibi geçirimsizlikleri de yüksektir. Bu kaplamaların hasar görmelerinin en önemli nedeni kemerin dış yüzü ile zemin arasında sıkı bir dolgu temin etme zorluğu olarak gösterilmektedir. Zira bu boşlukların önlenememesi durumunda farklı yüklemeler altında bu tür kaplamalar genellikle hasar görmektedir.

Günümüzde genellikle 1) Dökme beton kaplamalar, 2) Püskürtme beton kaplamalar ve 3) Prefabrike kaplamalar kullanıldığından kesme taş kaplamalar gibi tuğla kaplamaların kullanımı da son derece azalmıştır (Bozkurt, 1970; Pequignot, 1963).

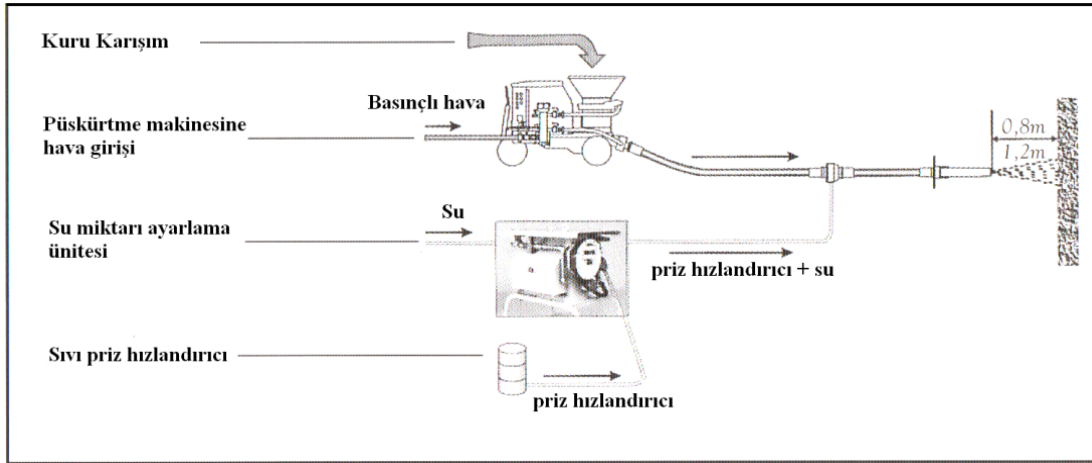
1.1.3.1. Dökme Beton Kaplamalar

Dökme beton kaplamalar, gerek kaya ve gerekse yumuşak zeminlerde inşa edilen tünellerde sıklıkla kullanılan bir kaplama türüdür. Plastikliği sayesinde kalıpla zemin arasına yerleştirmeye imkan vermekte ve bu suretle düz bir yüz oluşturulabilmektedir. Günümüzde, geliştirilmiş araç ve gereçler sayesinde, kullanımları da yaygınlaşmıştır. Özellikle püskürtme betondan yapılan geçici iksa üzerine genellikle son kaplama olarak bu beton kullanılmaktadır. Alt geçitlerde olduğu gibi aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünel kaplamaları ve sualtı tünel kaplamalarında, koşullar rahatlıkla kalıp yapmaya ve betonun kalıba yerleştirilmesine imkân tanıdığından kaplamaların dökme betonla yapılması tercih edilmektedir. Yumuşak zeminlerde kaplamanın dökme betonla yapılması durumunda iş çok yavaş ilerlenmekte, dolayısıyla da işçilik çok artmaktadır. Bu nedenle günümüzde yumuşak zeminlerde inşa edilen tünel kaplamalarında genellikle püskürtme beton kullanılmaktadır (Alun, 2009; BTSICE, 2004).

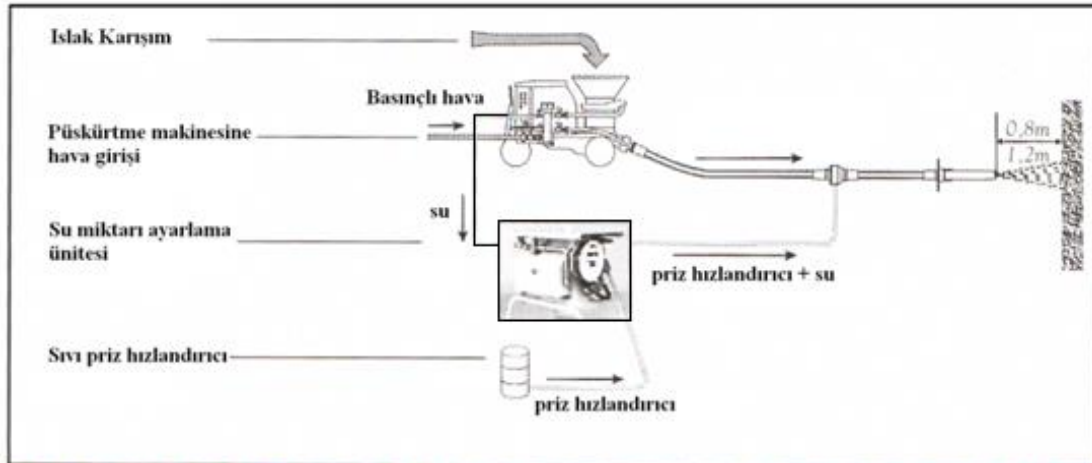
1.1.3.2. Püskürtme Beton Kaplamalar

Püskürtme beton, onarım yada yapım amacıyla önceden kuru yada ıslak yolla hazırlanarak hava basıncı kullanarak yüksek hızla yapının uygulama yüzeyi yada uygulama alanına püskürtülebilen betondur (TS 11747,1995). Bu yöntem ilk defa 1950’lerde iri agrega kuru karışımda kullanılmış ve bu suretle elde edilen beton püskürtme beton anlamına gelen “shotcrete” olarak adlandırılmıştır. Daha sonra bu terim ıslak karışımla üretilen betonlar için de kullanılmıştır.

Kuru karışımda karma suyu betona püskürtme başlığında ilave edilmektedir (Şekil 1.9.). ıslak karışımda ise, katılaşmayı hızlandırıcı katkı maddeler hariç, beton bileşimi püskürtme başlığına gelmeden önce karıştırılmaktadır (Şekil 1.10.).



Şekil 1.9. Kuru karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005).



Şekil 1.10. Islak karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005).

Bu iki yolla üretilen püskürtme betonların birbirine göre üstünlük ve sakıncaları Çizelge 1.1.'de özetlenmektedir.

Çizelge 1.1. Kuru ve ıslak yolla üretilen püskürtme betonların karşılaştırılması (Vanderwalle, 2005).

Karşılaştırma Ölçütü	Kuru karışimli	Islak karışimli
Araç-Gereç	- Toplam yatırım maliyet düşüktür. - Basit olan bakımı uzun ömürlüdür. - Çalışma alanında çok sayıda araç gerektirdiğinden çalışmayı zorlaştırmaktadır. - Kuru karışım nedeniyle pompa, hortum ve başlıklarda daha fazla aşınma meydana gelir.	- Toplam yatırım maliyeti daha yüksektir. - Bakımları zahmetli olması yanında daha kısa ömürlüdür. - Çalışma alanında daha az sayıda araç gerekmektedir. - Pompa, hortum ve püskürtme başlığında daha az aşınma sağlar.
Karışım	- Çalışma alanında mikser gerektirmektedir. - Arzulanan karışım oranını tutturmak oldukça zordur. - Nemden korunmak koşuluyla önceden hazırlanmış kuru karışımlar kullanılabilir. - Islak kum kullanılması durumunda başarımlı düşmektedir.	- Mikser çalışma alanından uzakta olabilmektedir. - Arzulanan karışım oranını tutturmak daha kolaydır. - Islak karışım üretmek yerine hazır beton da kullanılabilir. - Islak kum kullanılabilir.
Ürün	- Saatte 5 m³ civarında beton üretilip yerine konabilmektedir. - Islak karışımdan daha uzak mesafeye taşınabilir. - Su/ çimento oranının düşüklüğüne bağlı olarak yüksek dayanım elde edilebilir, ancak su girişinin operatör tarafından uygulama esnasında ayarlanması kalitenin değişken olmasına neden olmaktadır.	- Üretilerek yerine konan beton saatte 20 m³'e kadar ulaşabilmektedir. - Taşınma süresi ve mesafesi sınırlıdır. - Su/ çimento oranının iyi ayarlanmasıyla yüksek dayanım elde edilebilmekte ve kalite daha homojen olmaktadır.
Geri Sıçrayıp Dökülen Malzeme	- Düşey duvarlarda %15-40 oranında, tavanda ise %20-50 oranında bir geri sıçrama olmaktadır. - Kayıp malzeme yığınları oluşur.	- Uygun bir karışım sayesinde geri sıçrama oranı %10'dan daha az olmaktadır. - Kayıp malzeme yığınları oluşmaz.
Toz oluşumu	- Fazla miktarda toz oluşmaktadır.	- Çok daha az toz olduğundan daha iyi bir çalışma ortamı sağlamaktadır.
Katkılar	- Toz katkıları mikserde, sıvı katkıları ise püskürtme başlığında ilave edilerek kullanılabilir.	- Genellikle sıvı katkıları kullanılmaktadır.

Püskürtme beton bir kayaç üzerine uygulandığında öncelikle çatlak, eklem gibi boşlukları doldurmakta, ayrık parçaları bir araya getirmekte ve kayacın daha fazla bozulmasına engel olmaktadır.

Püskürtme betonun tünel kaplamalarında kullanımının tercih edilme nedenleri ise aşağıda özetlenmektedir:

1) Tünel açılan zeminde oluşacak gevşeme nedeniyle meydana gelen yerdeğiştirmeleri, kayaç kütlelerinin boşluklarını (çatlak, eklem vb.) doldurarak

rijitliklerini ve dayanımlarını arttırmak, kayaç kütlelerinin yüklerini, bitişik stabil kayalara aktarmak ve bir kabuk gibi davranarak, durdurması yada olabildiğince azaltması.

2) Kazı yüzeyinin suya ve havanın bağıl nemine karşı yalıtkan hale getirmek suretiyle bozulmaya karşı korunması.

3) Hızlı ve kolay uygulanabilir oluşudur.

Tünellerin püskürtme betonla kaplanmaları ano halinde yapılan kazılar sırasında başlatılmaktadır. Bu beton kazıdan sonra kaplamasız zemine, çelik kemer, kaya bulonları, kafes donatılar gibi iksa elemanları yerleştirildikten sonra uygulanmaktadır. Bu betonun, iksa elemanları sayesinde, yüksek basınç dayanımına karşı düşük olan kesme ve çekme dayanımı artırılmış olmaktadır.

Günümüz tünelciliğinde mümkün olduğunca yüklerin zeminin kendisine taşıttırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla zeminin belirli bir miktar hareketine izin veren ve bu suretle yeni bir dengenin oluşturulması için zeminde kemerlenmeye imkan veren iksaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iksa yukarıda belirtilen elemanlarla oluşturulabilmekle beraber bu iş için en uygun çözümü hasır yada lif donatılı püskürtme betonla sağlanmaktadır.

Çelik lifli püskürtme betonlarda lifler her doğrultuda dağılmış olduğundan anizotrop olan betonarme elemanlara oranla izotropiye çok yakın bir beton elde edildiği gibi bu püskürtme betonun özellikle çekmede taşıma güçleri artmaktadır. Diğer taraftan bu lifli betonların rötreden ve farklı sıcaklıklarından doğan kaçınılmaz çatlakların açılmasını daha etkin olarak önledikleri de bilinmektedir.

Teknik literatürde çelik lifli püskürtme betondan inşa edilen kaplamalar ile hasır çelik kullanılan kaplamalar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre çelik lifli püskürtme beton kaplamaların kesme dayanımının daha yüksek olduğunu, eğilme dayanımının ise hasır çelik donatı kullanılan püskürtme beton kaplama dayanımına ulaştığı kanısına varılmıştır (URL-2, 2006) .

Burada bu sonuçların betona katılan çelik liflerin yüksek çekme dayanımına sahip olmaları durumunda geçerli olduğunu, püskürtme betonun elastik sonrası davranışının tellerin betondan sıyrılma özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirtilmelidir.

Püskürtme beton kaplamalar bir ve iki tabaka olarak inşa edilmektedir. İki tabakalı kaplamalarda genellikle, kısa ve orta vadedeki yükler altında, tünelin kazı sonrasında stabilitesini korumak için önce püskürtme betondan birinci tabaka adı verilen bir iç kaplama, stabilite sağlandıktan sonra da genellikle yerinde dökme betondan ikinci tabaka

adı verilen bir son kaplama yapılmaktadır. Böylece dış yükler altında tünele yeterli dayanım sağlanabildiği gibi, iki kaplama arasına yerleştirilen yalıtım malzemeleri sayesinde su yalıtımı da sağlanmaktadır.

Beton kalitesinin artmasıyla püskürtme betonda birinci ve dökme betondan ikinci kaplamanın birlikte kullanıldığı iki tabakalı kaplama yerine bazen bir tabaka olarak çalışan kaplamalar da bir seçenek olarak uygulanmaktadır. Yekpare çalışan bu kaplama iki tabakalı birlikte çalışmayan kaplamalardan inşaat süresi ve maliyet bakımından daha uygun olduğu kanısı yaygındır. Bu kaplamalar inşa süresindeki yükleri ve tünelin ekonomik ömürleri boyunca etkisinde kalacakları tüm yükleri karşılayabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Yekpare çalışması istenen kaplamalar, tabakaların birlikte çalışmasını sağlayacak önlemlerin alınması koşuluyla, çok tabakalı olarak da inşa edilebilmektedirler (Alun, 2009; Vanderwalle, 2005).

1.1.3.3. Öndöküm Kaplamalar

Bu kaplamalar için öndöküm elemanlar kazı aygıtının ardından, kapalı formu verecek şekilde, kısa sürede yerleştirilip bağlantıları da yapılmaktadır. Bu tür kaplama, özellikle yerleşim yerlerinde, tünel üzerinde zemin kütlelerinde oluşan oturmaları diğer kaplamalara göre daha çok azaltmaktadır. Bugün çeşitli öndöküm kaplama elemanları mevcut olmakla birlikte bunlardan en çok kullanılanları öndöküm betonarme ve lifli betondan üretilenlerdir. Bu amaçla bazen yumuşak dökme demir ve çelik kaplamaların kullanıldığı da bilinmektedir.

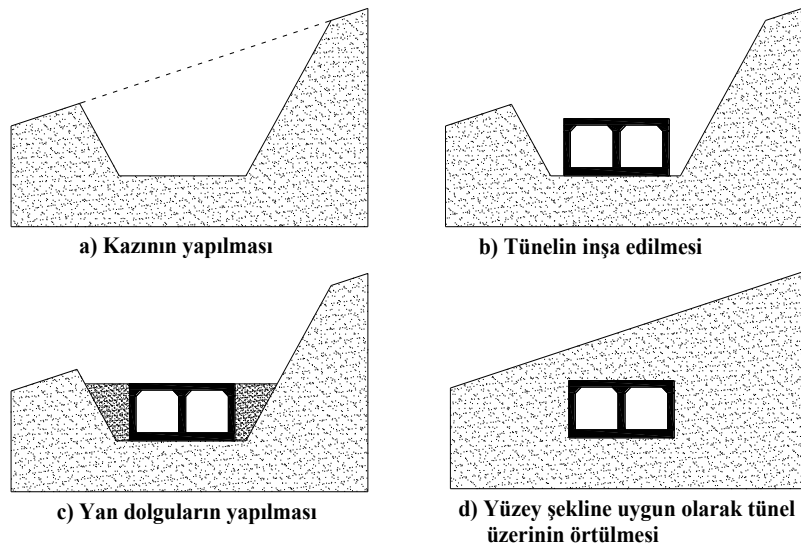
Öndöküm betonarme elemanların donatısı alt ve üst hasırlar ile bunlara kaynaklanan etriyelerden oluşmaktadır. Üretimleri özel aygıt ve vasıflı işçi gerektiren bu elemanların beton örtüsünün montaj ve taşıma sırasında hasar görebileceği, oysa çelik lifli öndöküm beton elemanlarda böyle bir sorunun olmayacağı bilinmektedir. Diğer taraftan betonda çelik liflerin homojen dağılımı sayesinde öndöküm elemanların birleşim yerleri de güçlendirilmiş olmaktadır (URL-3,2006).



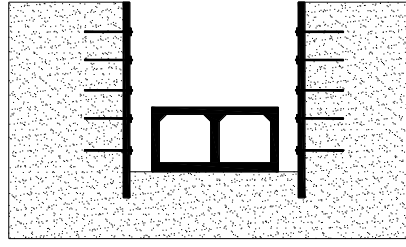
Şekil 1.11. Öndöküm betonarme elemanların donatılarının görünümü

1.2. Sığ Tüneller

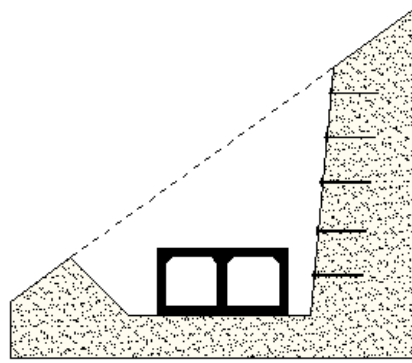
Kanalizasyon ve ulaşım tünelleri gibi sığ tüneller genellikle aç-kapa yöntemiyle inşa edilmektedir. Aç-kapa yöntemiyle tünel inşası; hendek kazılması, bu hendek içerisinde tünelin inşası ve yüzey şekillerine uyum sağlayacak şekilde üzerinin kapatılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.12.). Aşağıdaki Şekil 1.13.'de düz arazide zemine ankrajlarla tespit edilen panplanş perdeleri yardımıyla inşa edilen, Şekil 1.14.'de ise eğimli arazide aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünel örnekleri görülmektedir (Kovari ve Tisa,1998).



Şekil 1.12. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin yapım aşamaları



Şekil 1.13. Düz arazide zemine ankrajlar tespit edilmiş panplanş perdeleri yardımıyla aç-kapa yöntemiyle inşa edilen şematik bir tünel örneği



Şekil 1.14. Eğimli arazide ankrajlar tespit edilmiş panplanş perdeleri yardımıyla aç-kapa yöntemiyle inşa edilen şematik bir tünel örneği

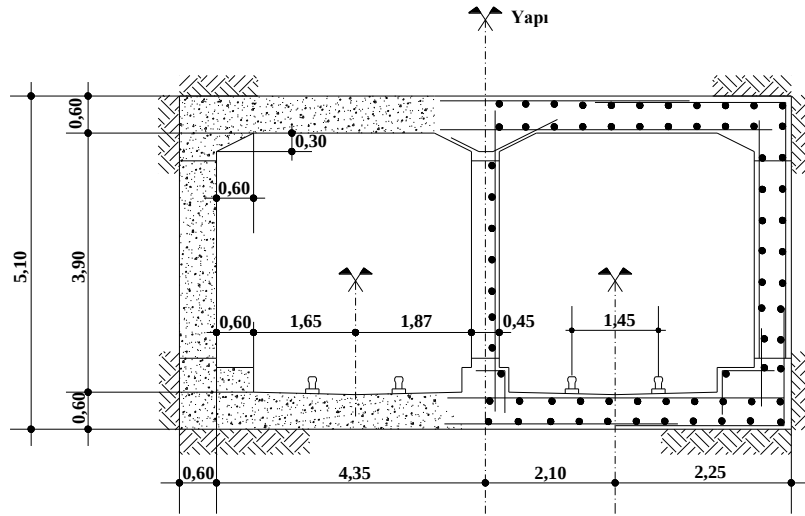
Bu yöntemle inşa edilen tünellerin, 10-14 m derinliğe kadar, delme yöntemiyle inşa edilen tünellere göre daha ekonomik ve pratik olduğu bilinmektedir. 18 m'den daha derinde inşa edilenler ise genellikle metro tünelleri için uygulanmaktadır. Bu tip tüneller genellikle kutu kesitli olarak tasarlanmakta ve yerleşim alanlarının kısıtlı olması nedeniyle bu tüneller çoğunlukla, yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, desteklenmiş kazı hendekleri içerisinde inşa edilmektedirler. Yeterli alanların mevcut olması durumunda, özellikle yerleşim bölgelerinin dışındaki boş alanlarda, ise desteklenmemiş açık kazı yöntemi daha ekonomik olmaktadır (bkz. Şekil 1.12). Tünel geçkisinin bir caddenin altından geçmesi durumunda, hendek kazısı ile yüzey trafiğinin aksayacağı açıktır. Bu sorun kazının (açımın) kademeli yapılmasıyla önlenabilmektedir. Bu durumda kazılan ilk kısım derhal inşa edilmekte ve üzeri kapatılmaktadır.

Burada aç-kapa tünellerinin yapım ve tasarımı için verilen bilgiler Amerika Birleşik Devletlerdeki uygulamalara ilişkindir (Bickel vd.,1996). Her ülkenin kendi özel koşullarına göre uygulamalarda bazı farklılıkların yapılması doğaldır.

1.2.1. Sığ Tünel Çeşitleri

1.2.1.1. Metro Tünelleri

Metro tünelleri ortada betonarme perde duvarlı yada kolon-kiriş sistemli kutu kesitli yapılar olarak inşa edilmekte ve içerisinde metro hatları bulunmaktadır. Bu tüneller genellikle hat tünelleri olarak adlandırılmaktadır. Tipik iki gözlü bir tünel kesitinde her bir gözün genişliği; araç ve yaya yolu ile diğer donanımlar için genellikle 4.20-4.60m arasında değer almaktadır (Şekil 1.15). Metro tünellerinin planları değişik hat geçkileri ve eğimlerine göre değişmektedir. Örneğin; standartlarda istasyonlarda platformların ortada tasarlanması istediğinden, istasyona yaklaşımdan önce uygun geçiş mesafesinde hat merkezleri arasındaki mesafe genişletilmektedir. Bazen bir hat diğerine göre farklı kotta olabilmekte, bu da doğrultunun ve eğimin kademeli olarak değiştirilmesini gerektirebilmektedir. Metro tünellerinin planları; hat geçkileri ve eğimleri açısından ulaşım sisteminin gereksinimlerine uygun olarak tasarlanması gerekmektedir.



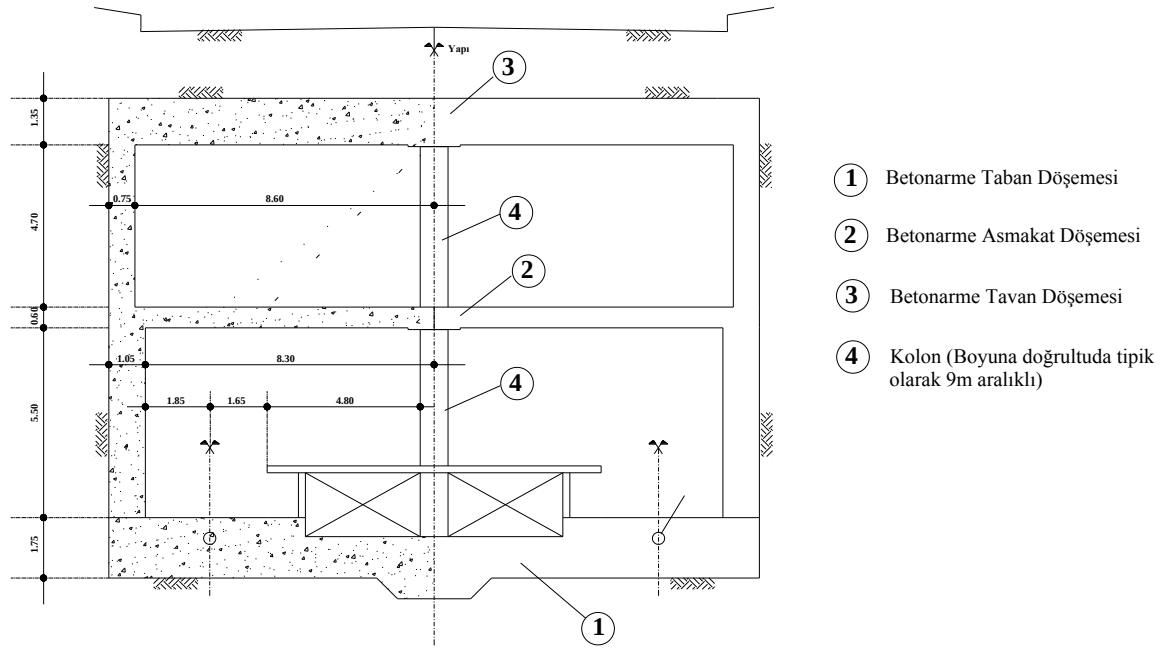
Şekil 1.15. İki gözlü kutu kesitli tipik bir metro tüneli enkesiti

1.2.1.2. İstasyon Tünelleri

İstasyon tünelleri; metro taşıtları için demiryolunu, inme ve binme platformlarını, merdiven ve yürüyen merdivenleri, bilet satış alanları ile servis odalarını içermektedir. Tünel, delme yöntemiyle inşa edilen iki dairesel tünelden oluşuyorsa, istasyon tek merkez

platform kullanılarak, iki gözlü aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünelden oluşuyorsa istasyon yan platform kullanılarak tasarlanmakta, ulaşım sistemi standartlarına uymak gerektiğinde bazen terminal platformları ortada da yapılabilmektedir.

Aç-kapa metro istasyonları genellikle 15-18 m genişlikte, 150-250 m uzunlukta ve 15-20 m derinlikte dikdörtgen bir kazı içinde inşa edilen iki yada üç katlı betonarme yapı olarak tasarlanmaktadır. İstasyon tünelleri genellikle iki katlı olarak tabana oturmuş merkez yada yan platformlardan oluşmaktadır (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir istasyon tünelinin enkesiti

Gerçekte metro istasyonları Şekil 1.16’de gösterilenden çok daha karmaşıktır. Daha önce de belirtildiği gibi iç tasarım; yürüyen merdiven, merdiven, havalandırma aygıtları, mekanik ve elektrik aksam odaları ile güvenlik ve servis yapıları gereksinimlerine göre şekillenmektedir. İstasyonun dış yapısı, istasyona girişin sağlandığı ara kat düzeyinin üzerinde standart bir düzende olmamaktadır.

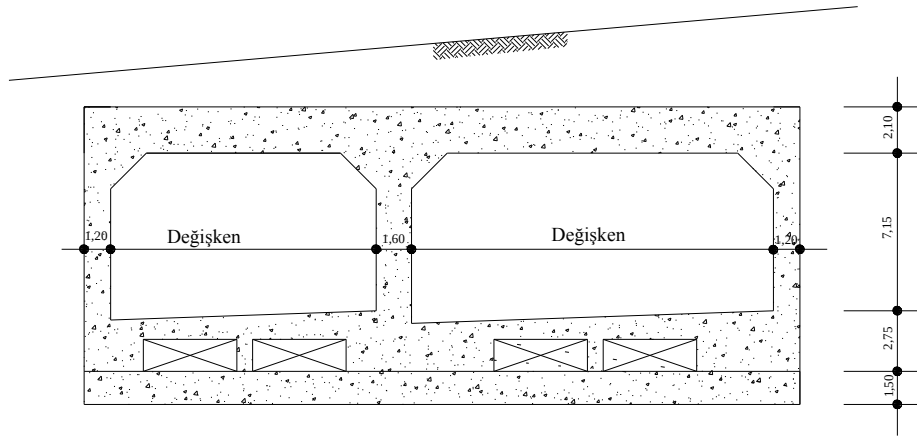
Genel olarak iki katlı metro istasyonları uygulansa da özellikle kent merkezleri ve civarında daha karmaşık olan istasyon tünelleri de bulunmaktadır. Bu gibi alanlarda istasyonlar, metro hat geçkilerinin kesişim noktalarında inşa edilmektedir. Bu durumda iki doğrultuda da inme ve binme platformlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Durum böyle olunca istasyon tüneli planda çarpı işareti şeklinde ve ikiden fazla katlı olarak inşa edilmesi

gerekmektedir. İstasyon yapılarının tasarımları, iki kattan daha fazlasını gerektiren bu gibi durumlarda, geleneksel metro istasyonlarına göre daha karmaşık olmaktadır.

1.2.1.3. Karayolu Tünelleri

Büyük uzunlukta ve aç-kapa yöntemiyle inşa edilen karayolu tünellerinin; yüksek maliyetli oluşları, başlangıçta ve işletmede havalandırma maliyetleri ve yola giriş-çıkış problemleri nedeniyle, çok sık rastlanmamaktadır. Bununla birlikte aç-kapa karayolu tünelleri; özellikle şehir içi kavşak düzenlemeleri, yeryüzündeki önemli zenginliklerin korunabilmesi gibi durumlarda daha uygun oldukları kanısına varıldığından inşa edilmektedirler.

Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen karayolu tünelleri sualtı geçişleri yaklaşımlarında da yapılmaktadır. Bunlar genellikle yeraltı su seviyesi altındaki mevcut koşullara göre tasarlanıp inşa edilmektedirler. Aşağıdaki Şekil 1.17’de batırılmış bir tüp geçide yaklaşan karayolu tünelinin enkesiti görülmektedir.

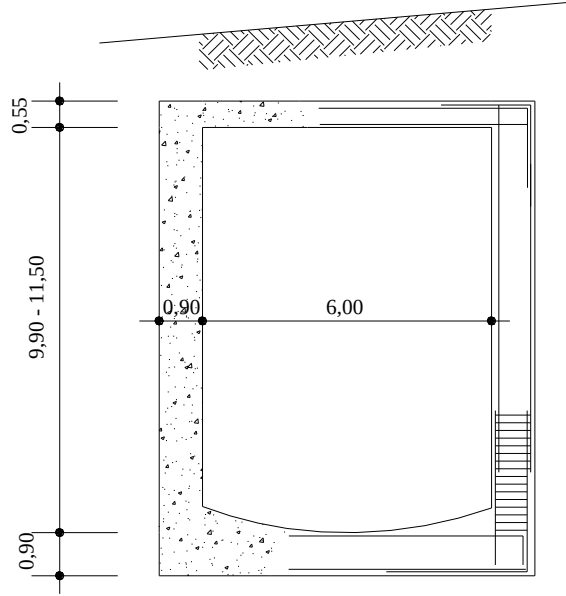


Şekil 1.17. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir karayolu tünelinin enkesiti

1.2.1.4. Su İletim Tünelleri

Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen su iletim tünelleri genellikle betonarme kutu kesitli olarak inşa edilmektedir. Bu tüneller temiz ve kirli suların taşınması ve/veya depolanması için kullanılmaktadır. Bunların enkesit alanları, ticari olarak mevcut en büyük enkesit alanlı öndöküm betonarme borularinkinden daha büyük olmaktadır. Aşağıdaki Şekil

1.18’de, 6 m genişliğe ve 10 m yüksekliğe sahip bir içme suyu iletim tünelinin enkesiti görülmektedir (Bickel vd., 1996).



Şekil 1.18. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tipik bir su iletim tünelinin enkesiti

1.2.2. Sığ Tünellerin Yapısal Çözümlerinde Dikkate Alınan Yük ve Yük Etkileri

Tüm yapılar gibi aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tüneller de öngörülen ekonomik ömürleri boyunca tüm yük ve yük etkilerini emniyetle taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Taşınacak başlıca yükler; uzun dönemde oluşan su ve zemin basınçları, zemin örtüsünün ağırlığından dolayı oluşan sabit yükler, yüzeydeki ek yükler ve hareketli yüklerdir.

Tüm bilinen ve olası yükler AASHTO HB-17 (2002) standardında sınıflandırılmıştır. Bunlar; sabit yükler, hareketli yükleri, darbe yükleri, merkezkaç yükleri, yuvarlanma yükleri, boyuna doğrultuda fren yükleri, yatay zemin basınçları, yeraltı suyunun kaldırma kuvvetleri, taşkın etkileri, rötire ve sıcaklık değişimi etkileridir. Dikkate alınacak yük sınıfları inşa edilecek aç-kapa tünelin gereksinimlerine göre belirlenerek tasarımda kullanılmaları gerekmektedir. Ayrıca deprem bölgelerinde inşa edilen tüneller için deprem yüklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Aç-kapa metro, karayolu ve su iletim tünellerine uygulanacak yükler çok az farkla birbirine benzer şekilde tanımlanabilmektedir. Bununla birlikte su iletim tünellerinde sabit yükler, yatay zemin basınçları ve diğer yük ve etkileri genellikle diğerlerinkine benzemekte, ancak tünel içindeki hareketli yük ise iletilen su yada atık suyun özelliğine göre dikkate alınması gerekmektedir. Birçok durumda hidrolik eğim çizgisi yapı tavanının üzerinden geçtiğinden bu durumun oluşturduğu iç basınçların da değerlendirilmesi gerekmektedir.

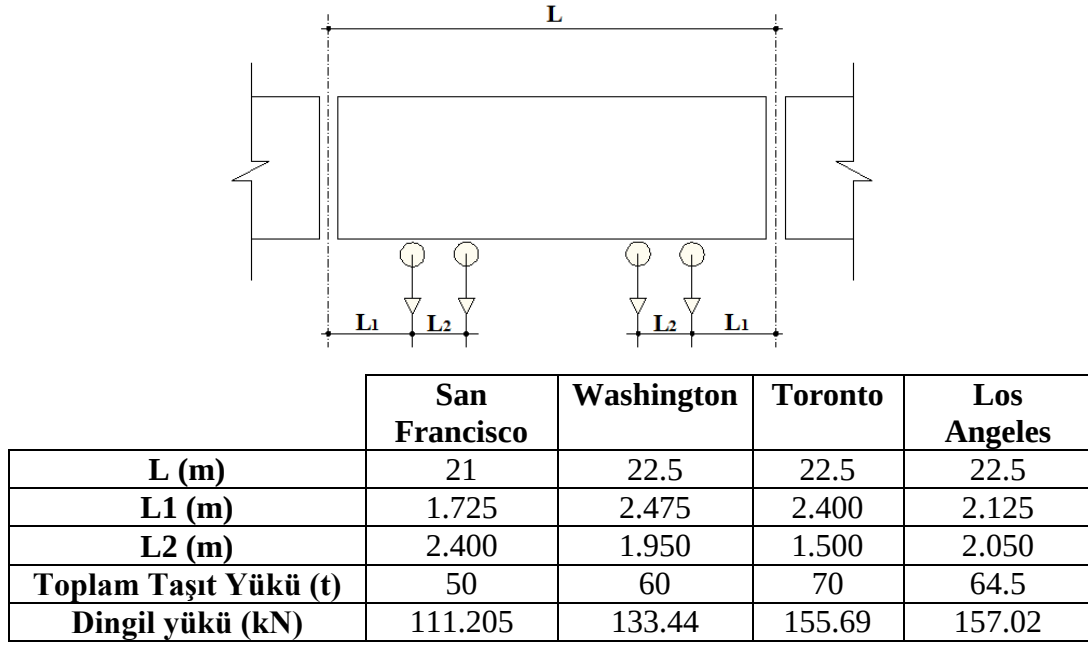
1.2.2.1. Sabit Yükler

Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin tasarımı için dikkate alınan sabit yükler; asıl tünelin ağırlığından, tünele sabit olarak bağlanmış elemanlardan ve tünelin tavanına yayılı yük olarak etkiyen örtü zemini ağırlığından oluşmaktadır. Tasarımda örtü zemininin birim ağırlığının AASHTO HB-17'ye (2002) göre kuru dolgu zemini için 19.22 kN/m^3 'den, ıslak zemin için 20.80 kN/m^3 'den az olmaması istenmektedir. Bazı araştırmacılar tünelin yeraltı su seviyesinin altında yada üstünde olması durumlarında minimum zemin birim ağırlığının 20.80 kN/m^3 olarak alınmasını önermektedir (Bickel vd., 1996).

Karayolu ve metro tünellerinde mevcut zemin örtü kalınlığından oluşan yüke göre tasarlanan boyutlar, daha sonraları oluşması muhtemel ek yükler için yeterli olamayabileceği açıktır. Bu nedenle, şehir içinde bulunan caddeler altından geçen tüneller, üzerlerinden normal dingil yüklerini aşan özel taşıtların da geçmesine izin verecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Diğer taraftan cadde altından geçmeyen tünellerin, üzerinde inşa edilebilecek bina yüklerini emniyetle taşıyabilmeleri de arzu edilmektedir. Bundan dolayı bu tünellerin, mevcut örtü kalınlığı 2.5 m 'den az olduğunda genellikle en az 2.5 m kalınlığındaki zemine eşdeğer düşey yüke göre tasarlanmaktadır. Ancak örtü tabakasının kaldırılması ihtimalinin de tasarımda dikkate alınması gerekebilmektedir.

1.2.2.2. Hareketli Yükler

Metro tünellerindeki taşıt yükleri, sistemde işletilen taşıtların türüne ve yolcu durumuna göre değişmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinin birçok eyaletinde metro taşıtları için kullanılan hareketli yükler (Q) Şekil 1.19’de verilmektedir.



Şekil 1.19. ABD’de metro tünellerinin tasarımında kullanılan taşıt yükleri

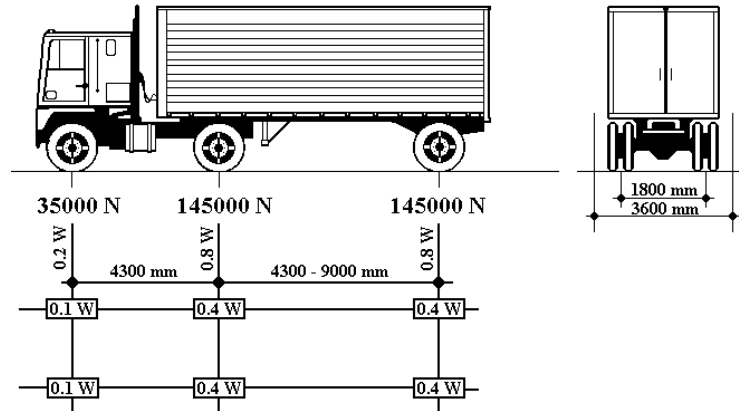
Bununla birlikte metro tünellerinde; darbe, merkezkaç, yuvarlanma ve frenlemeden dolayı oluşan dinamik yüklerin de dikkate alınması gerekmektedir. Hızlanmayla oluşan darbe yükleri eşdeğer statik yükler olarak tanımlanabilmektedir. Metro tünelleri için darbe yükü (DY) taşıt yükünün %30’u olarak alınabilmektedir. Merkezkaç yükü (MK) ise genellikle metro taşıt yüklerinin, proje hızının ve dönemeç açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Metro tünellerinin tasarımında sözkonusu merkezkaç yükü, ağırlık merkezinin yerini temsil eden noktaya (genellikle rayın üzerinden 1.50 m yukarıya) yatay olarak etkidiği kabul edilmektedir. Bu tip tünellerin tasarımında dikkate alınan yuvarlanma yükü (YY), taşıt yükünün %10’u olarak dikkate alınmakta ve bir raya yerçekimi yönünde, diğerine ise tersi yönde uygulanmaktadır. Boyuna frenleme yükü (FY) ise enkesite dik doğrultuda bir kuvvet olarak statik taşıt yükünün %15’ine eşit olarak dikkate alınabilmekte ve metro taşıtının ağırlık merkezine uygulanmaktadır.

İki hatlı tüneller için hareketli yük (Q), darbe yükü (DY), merkezkaç yükü (MY), yuvarlanma yükü (YY) ile boyuna frenleme yükü (FY) hatlara ayrı ayrı ve birlikte uygulanması ve bu yüklerin öngörülebilir tüm birleşimlerinin de dikkate alınması önerilmektedir.

Metro taşıt yükleri gibi yaya yükleri de hareketli yük olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte bir katlı tünellerde hareketli yaya yükleri, metro taşıt yükleri, darbe yükü ve diğer dinamik yükler genellikle taban döşemesi tarafından zemine iletiildiğinden, tünelin yapısal elemanları üzerinde etkileri çok az olduğundan bu yükler tasarımda dikkate alınmayabilmektedir. Eğer tünel iki yada daha fazla katlı ise, söz konusu yükler yapısal tasarımı genellikle daha çok etkilemektedir.

Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin, yeryüzünden etkileyen trafik yükleri ve diğer dinamik yükleri taşıyacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Genellikle tünel üzerinden etkileyen trafik yükü için Şekil 1.20.'de verilen HS20-44 yüklemesi kullanılmaktadır (AASHTO HB-17,2002). Bununla birlikte bazı uygulamalarda; 2.40 m'den daha derindeki aç-kapa tüneller için 14.36 KPa'lık düzgün yayılı hareketli yük kullanılmakta, 2.40 m'den daha sık tünellerde ise aşağıdaki iki durum dikkate alınmaktadır. Bunlar:

1. Tünel üzerindeki mevcut örtü zemini kalınlığından oluşan sabit yük ile AASHTO HB-17'ye (2002) uygun olarak alınan HS20-44 taşıt yükünü birlikte düşünmek,
 2. Gelecekte 2.40 m'lik örtü zemin kalınlığı tahminine göre hesaplanan sabit yük ile birlikte 14.36 KPa'lık eşit yayılı yük birlikte uygulanmak,
- şeklindedir



Şekil 1.20. AASHTO HB-17 (2002) yönetmeliğinde verilen HS20-44 taşıt yükü.

Tünel üzerine etkiyen karayolu taşıt yükleri nedeniyle oluşan darbe yüklerinin belirlenmesi için Washington Ulaşım Dairesi (WMATA) tarafından düzenlenen AASHTO yönetmeliği koşulları aşağıdaki Çizelge 1.2’de verilmektedir.

Çizelge 1.2. Tünel üzerine etkiyen darbe yükleri

Tünel Üzerindeki Örtü Zemini Kalınlığı (h_{or})	Darbe Yüğü (DY)
$h_{or} < 30$ cm	% 30 Q
$30 \text{ cm} < h_{or} < 60$ cm	% 20 Q
$60 \text{ cm} < h_{or} < 90$ cm	% 10 Q
$h_{or} > 90$ cm	% 0 Q

Çoğunlukla aç-kapa yöntemiyle inşa edilen karayolu tünellerine içten etkiyen hareketli yükler ile darbe ve diğer dinamik yükler, metro tünellerine etkiyen yüklere benzer şekilde hesaplanmaktadır. Taşıt yükü için genellikle HS20-44 yüklemesi kullanılmakta ve böylece AASHTO yönetmeliğindeki koşullara uyulmaktadır.

Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen su iletim tünellerinde iletilen sıvının cinsine göre elemanlara etkiyen iç basınçlar da bir hareketli yük olarak dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte tünel üzerindeki trafik nedeniyle oluşan taşıt yükleri ve diğer dinamik yükler de metro ve karayolu tünellerindekine benzer olarak hesaplanabilmektedir.

1.2.2.3. Yatay Zemin Basıncı

Yatay zemin basınçlarının kazının yapıldığı zeminin fiziksel özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Bu fiziksel özellikler yeraltı zemin koşullarının kapsamlı olarak incelemesiyle belirlenebilmektedir.

Zemin ortamda herhangi bir hareketin olmadığı sukunet durumunda H derinlikte oluşan yatay zemin basıncı (p_0); γ_z zeminin birim ağırlığını, ϕ zeminin içsel sürtünme açısını ve K_0 ,

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (1.1)$$

ile ifade edilen sukunet durumunda zemin basınç katsayısını göstermek üzere,

$$p_0 = K_0 \gamma_z H \quad (1.2)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Zemin ortamında yanal genişlemenin olmasıyla meydana gelen aktif durumda yüzeyden H derinlikte oluşan aktif yatay zemin basıncı (p_{as}); α duvar yüzünün düşeyle yaptığı açığı, δ duvarla zemin arasındaki sürtünme açısını, β şev açısını ve K_{as} ,

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos^2(\delta + \alpha) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha - \beta) \cos(\delta - \alpha)}} \right]^2} \quad (1.3)$$

ile ifade edilen aktif basınç katsayısını göstermek üzere,

$$p_{as} = K_{as} \gamma_z H \quad (1.4)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Benzer şekilde zemin ortamda bir sıkışmanın olmasıyla meydana gelen pasif durumda yüzeyden H derinlikte oluşan yatay zemin basıncı (p_{ps}), K_{ps} ,

$$K_{ps} = \frac{\cos^2(\varphi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos^2(\delta - \alpha) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\beta - \alpha) \cos(\delta - \alpha)}} \right]^2} \quad (1.5)$$

ile ifade edilen pasif basınç katsayısını göstermek üzere,

$$p_{ps} = K_{ps} \gamma_z H \quad (1.6)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Ancak tünelin yeraltı su seviyesinin altında olması durumunda kendisine zemin basıncına ek olarak hidrostatik bir basınç da etkimektedir. Diğer taraftan yatay zemin basınçları; varsa komşu bina temellerinden gelen yükler, yüzeyden geçen trafik yükleri ve diğer dinamik yükler gibi ek yükleri (sürşarj) de

taşımaktadır. Bu tip yükler nedeniyle aktif durumda tünele etkiyen ek zemin basıncı, q yüzeyden etkiyen ek yükü göstermek üzere,

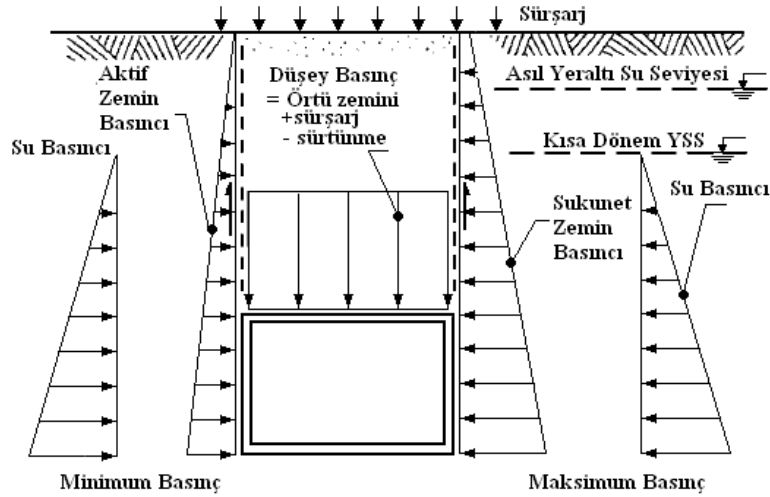
$$q_{as} = q \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} K_{as} \quad (1.7)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Benzer şekilde pasif durumda tünele etkiyen ek zemin basıncı,

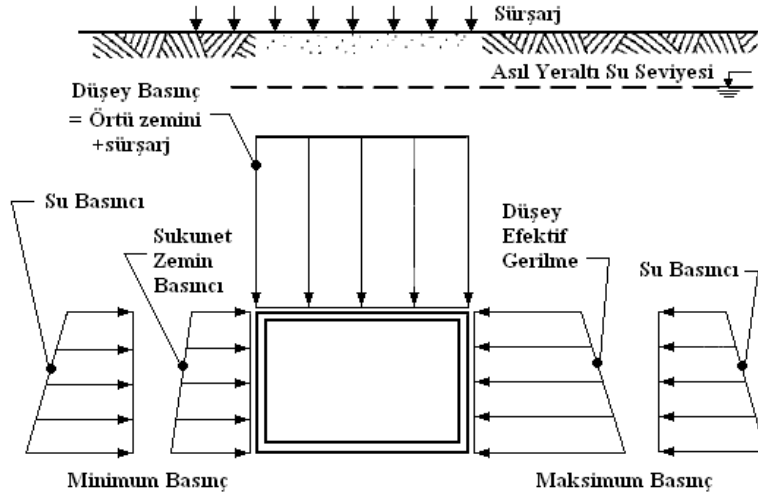
$$q_{ps} = q \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} K_{ps} \quad (1.8)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Söz konusu ek yüklerin tünel inşa edildiğinde mevcut olanlarla ve gelecekte öngörülenlerin dikkate alınmasıyla belirlenmesi gerekmektedir. Öyle ki yeraltı su seviyesinde zamanla meydana gelen değişimler tünellerde önemli sorunlar oluşturabilmektedir. Bu durumda söz konusu sorunları gidermek için gerekli onarım ve güçlendirmelerin yapılması oldukça pahalı olabilmektedir.

Diğer taraftan yatay zemin basıncında oluşan uzun ve kısa süreli değişimler de dikkate alınmalıdır. Bu değişimler kısmen tünel tipine, tünelin yerleşimine ve diğer yerel etkenlere bağlı olduğu gibi zeminin fiziksel özelliklerine de bağlı olmaktadır. Projenin uygulanmasının hemen ardından oluşan zemin basıncı, uzun süreli yüklemekten doğan basınçtan oldukça az olabilmektedir. Ayrıca tünelin işletmeye açılmasından sonraki dönemde tüneli kesen yada paralel bir kazının yapılması durumunda tünelin iki yanında farklı yanal basınçlar da oluşabilmektedir. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen metro tünelleri için kısa süreli yükleme durumu, WMATA tarafından Şekil 1.21’de görüldüğü gibi, tünelin bir tarafına aktif yatay basınç, diğer tarafına ise sükunet durumundaki yatay basınç uygulanarak temsil edilmektedir. Uzun süreli yükleme için ise tünelin bir tarafına sükunet durumundaki yatay basınç, diğer tarafına ise düşey basınca eşdeğer bir yatay basınç uygulanmaktadır.



(a) Kısa Süreli Yükleme



(b) Uzun Süreli Yükleme

Şekil 1.21. WMATA tarafından metro tünellerine uygulanan kısa (a) ve uzun (b) süreli yüklemelerden doğan yatay zemin basınçları

1.2.2.4. Kaldırma Kuvveti

Yeraltı suyu seviyesinin tünelin taban döşemesi üzerinde olması durumunda, taban döşemesini alttan kaldıran bir kuvvetin de dikkate alınması gerekmektedir. Kutu kesitli tüneller için bu basınç, taban döşemesinin genişliğiyle çarpılarak tünelin birim boyuna etkiyen kaldırma kuvvetiyle hesaplanmaktadır. Tünelin minimum ağırlığı ve üzerindeki dolgu ağırlığının toplamı bu kaldırma kuvvetini belirli bir emniyetle aşmalıdır. Bu güvenlik katsayısı için teknik literatürde farklı görüşler bulunmaktadır. ABD'nin San Francisco ilinde hızlı toplu taşıma sistemi için bu katsayının 1,1 olması yeterli görülmüş ve yanal yüzlerdeki sürtünmeler ihmal edilmiştir. Tünelin yan duvarları ile zemin arasındaki

sürtünme, kaldırma kuvvetine zıt yönde bir kuvvet oluşturmakla birlikte emniyet bakımından bu kuvvet genellikle ihmal edilmektedir.

Kaldırma kuvvetinin tünelin minimum ağırlığı ve üzerindeki dolgu ağırlığının toplamını aşması durumunda bu kuvveti dengeleyecek farklı tasarımların planlanması gerektiği açıktır. Bu tasarımlara ilişkin bazı öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- ✓ Duvarlar, tavan ve taban döşemesinin kalınlıkları artırılmak suretiyle yapıyı ağırlaştırmak,
- ✓ Taban döşemesini genişleterek üzerinde bulunan zemin ağırlığından yararlanmak,
- ✓ Taban döşemesine bağlanan çelik yada öngerilmeli beton kazık kullanmak,
- ✓ Taban döşemesini sağlam anakayaya bağlayan ankraj kullanmak.

1.2.2.5. Taşkın Etkileri

Taşkın tehlikesinin bulunduğu yerlerde, taşkın etkilerinin tünelin yapısal çözümlemesinde ek yük olarak dikkate alınması ve tünelin bu ek yüklere yeterli emniyetle dayanması gerekmektedir.

1.2.2.6. Rötire ve Sıcaklık Etkisi

Betonarme olarak aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin duvarlarında, tavan ve taban döşemelerinde rötire ve sıcaklık etkisi de oluşmaktadır. Bu etkiler nedeniyle elemanlarda meydana gelen gerilmeler sabit yüklere, darbe ve taşıt yüklerine dik doğrultuda oluşmakta, ancak yapısal çözümlemelerde bu etkiler genellikle dikkate alınmamaktadır.

1.2.2.7. Deprem Yükleri

Yeraltı yapılarından biri olan tünellerin yerüstü yapılarına göre depremlerden daha az etkilendikleri bilinmektedir. Tünellerin tasarımında deprem etkilerinin yakın zamana kadar dikkate alınmayışı bu duruma atfedilebilmektedir. Ancak 1995 Kobe (Japonya), 1999 Chi-chi (Tayvan) ve yine 1999 Marmara depremleri depremlerden tünellerin de hasar görebileceğini ortaya koymuştur.

Bazı araştırmacılar, aç-kapa yöntemiyle inşa edilenler gibi sığ tünellerin depremlerden daha fazla etkilendiğini ileri sürmektedir. Gerekçe olarak ise bu tünellerde zemin büyültme etkisinin fazla oluşu yanında zemin tabakasının ince oluşu nedeniyle tünel etrafındaki zemin rijitliğinin derindekilerden küçük oluşu gösterilmektedir (Hashash vd.,2001; Wang,2001; Öztürk ve Durmuş,2009).

Diğer yapılar gibi tünellere etkileyen deprem yükleri de sayısal, analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bununla birlikte bu yüklerin belirlenmesinde, bilgisayar modelleri ve dinamik çözümlemeler gerektirmeyen analitik yöntemler sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; Mononobe-Okabe, Steedman-Zeng, Seed-Withman, Prakash-Saran, Richard-Elms ve Whitman –Liao gibi yöntemlerdir (Gürsoy,2006).

Teknik literatürdeki diğer bir yöntemde ise depremden dolayı tünel enkesitinde meydana gelen kaykılma, yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak, belirlenmektedir (Penzien,2000; Hashash vd.,2001). Bu yöntemde dikdörtgen enkesitli tünellerin depreme göre hesabı için öncelikle zeminin serbest alan açılmal şekil değiştirme oranının hesaplanması gerekmektedir. Bu işlemin çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmak suretiyle gerçekleştirilebileceği açıktır. Bununla birlikte anılan açılmal şekil değiştirme; V_s ve C_s sırasıyla enine dalganın (S dalgasının) maksimum hızını ve maksimum zahiri hızını göstermek üzere,

$$\gamma_z = \frac{V_s}{C_s} \quad (1.9)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir (St John ve Zahrah,1987). Bu bağıntıdaki V_s değeri; depremin moment manyitüdü (M_w), tünelin merkez üstüne uzaklığı ve zemin cinsine göre aşağıdaki Çizelge 1.3'den alınan maksimum S dalgası hızının maksimum yer ivmesine oranı yardımıyla belirlenmektedir. Çizelgeden alınan bu oranda yer ivmesi olarak, yeryüzünde ölçülenden daha küçük olan, yeraltında ölçülen ivme değeri kullanılmaktadır. Bu durumda yeraltından alınan deprem kayıtlarının kullanılması yada yeryüzünden alınan deprem kayıtlarından yeraltındakinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Çizelge 1.4'de verilen oranlar yardımıyla yeraltında ölçülen maksimum ivme değeri yeryüzündeki kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

Çizelge 1.3. Zemindeki maksimum enine dalga hızının maksimum yer ivmesine oranı (Power vd.,1996).

Moment Manyitüdü (M_w)	Yapının merkez üstüne uzaklığı (km)		
	0-20	20-50	50-100
Maksimum enine dalga hızının maksimum yer ivmesine oranı (V_s/a'_{max}) $\rightarrow$ cm/s.g			
Kayaç			
6,5	66	76	86
7,5	97	109	97
8,5	127	140	152
Sağlam Zemin			
6,5	94	102	109
7,5	140	127	155
8,5	180	188	193
Yumuşak Zemin			
6,5	140	132	142
7,5	208	165	201
8,5	269	244	251

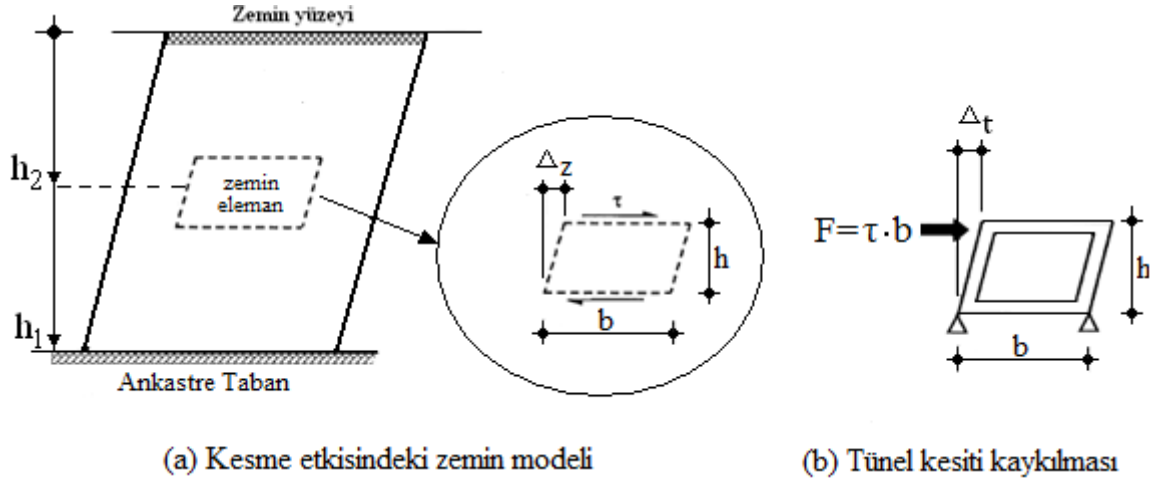
Çizelge 1.4. Yeraltındaki ivmenin yeryüzündekine oranının tünel derinliğine bağlı olarak değişimi (Power vd.,1996).

Tünel Derinliği (m)	Yeraltındaki ivmenin yeryüzündekine oranı
≤ 6	1,0
6-15	0,9
15-30	0,8
>30	0,7

Bu yöntemde Şekil 1.22’de görülen tünelin enkesiti kadar alana sahip zemin eleman dikkate alınarak, bu elemanın açısız şekildeğiştirmesi (γ_z); Δz zemin elemanın tepesinin tabanına göre bağıl yerdeğiştirmesini, h bu elemanın yüksekliğini göstermek üzere,

$$\gamma_z = \frac{\Delta z}{h} \quad (1.10)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 1.22. Kesme etkisindeki zemin modelinin (a) ve tünel kesitinin kaykılması (b)

Zemin eleman yerine tünelin bulunması durumunda, tünelin aynı şekildeğiştirmeyi yapacağı ve tünele $F = \tau \cdot b$ yükünün uygulanacağı dikkate alınarak (bkz. Şekil 1.22) tünele ilişkin açısal şekildeğiştirme; k_t tünel enkesitinin yatay rijitliğini göstermek üzere,

$$\gamma_t = \frac{\Delta_t}{h} \rightarrow \gamma_t = \frac{F}{h \cdot k_t} \rightarrow \gamma_t = \frac{\tau \cdot b}{h \cdot k_t} = \gamma_z \quad (1.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradan tünelin kayma modülü,

$$G_t = \frac{\tau}{\gamma_t} \rightarrow G_t = \frac{h \cdot k_t}{b} \quad (1.12)$$

olarak hesaplanmaktadır. Zemin kayma modülünün tünelinkine oranı olarak ifade edilen esneklik oranı ise; G_z zeminin kayma modülünü göstermek üzere,

$$f = \frac{G_z}{G_t} \rightarrow f = \frac{G_z \cdot b}{h \cdot k_t} \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada kullanılan k_t tünel rijitliği basit bir model üzerinde gerçekleştirilecek yapısal çözümleme sonucunda kolaylıkla bulunabilmektedir. Zeminin kayma modülü de deneysel olarak belirlenebileceği gibi kayma dalgasının zahiri hızı ve zeminin yoğunluğu (ρ_z) dikkate alınarak yaklaşık olarak,

$$G_z = \rho_z \cdot C_s^2 \quad (1.14)$$

ifadesiyle belirlenebilmektedir (Hashash vd.,2001).

Bununla birlikte esneklik oranına (f) bağlı olarak, dairesel ve dikdörtgen kesitli tünellerde kaykılma oranını ($K=\Delta_t/\Delta_z$) veren bazı eğriler de mevcuttur (Wang,2001).

Nishiyama vd. (1999) tarafından h_1 ve h_2 Şekil 1.22'deki zemin derinliklerini,

$$a_1 = 0.091(b/h) + 0.053(h_1/h_2) - 0.07 \quad (1.15)$$

$$a_2 = -0.036(b/h) + 0.040(h_1/h_2) - 0.92 \quad (1.16)$$

birer sabiti göstermek üzere, anılan kaykılma oranının,

$$K = 1.1[a_1 \ln(f) + a_2] \quad (1.17)$$

şeklinde hesaplanabileceği de belirtilmektedir. Buna göre depremde dolayı tünel tavanının tabanına göre bağlı yerdeğiştirmesi:

$$\Delta_t = K \cdot \Delta_z \quad (1.18)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir.

Bugün yürürlükte bulunan Türkiye Deprem Yönetmeliğinde de istinat yapıları için depremde dolayı oluşacak ek dinamik zemin basınçlarının hesaplanması konusunda bir bölüm bulunmaktadır (DBYBHY, 2007). Burada yatay eşdeğer deprem katsayısı (C_h); I yapı önem katsayısını, A_0 etkin yer ivmesi katsayısını göstermek üzere, düşeyde serbest konsol olarak çalışan yapılar için,

$$C_h = 0.2(I+1)A_0 \quad (1.19)$$

bağıntısıyla, yatay doğrultuda mesnetlenmiş yapı ve elemanlarda ise,

$$C_h = 0.3(I+1)A_0 \quad (1.20)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Düşey eşdeğer deprem katsayısı ise,

$$C_v = 2C_h / 3 \quad (1.21)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu ifadeler kullanılmak suretiyle λ açısı değeri ise, kuru zeminde,

$$\lambda = \arctan \left[\frac{C_h}{(1 \pm C_v)} \right] \quad (1.22)$$

bağıntısıyla, yeraltı su seviyesinin altındaki zeminlerde ise; γ_{zb} zeminin su altındaki birim ağırlığını, γ_{zs} zeminin suya doymun birim ağırlığını göstermek üzere:

$$\lambda = \arctan \left[\frac{\gamma_{zs}}{\gamma_{zb}} \frac{C_h}{(1 \pm C_v)} \right] \quad (1.23)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Buradan statik zemin basıncı ile depremde oluşan ek basıncın toplamını hesaplamak için kullanılan toplam aktif ve pasif basınç katsayıları sırasıyla:

$$K_{at} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2 (\varphi - \lambda - \alpha)}{\cos \lambda \cos^2 \alpha \cos (\delta + \alpha + \lambda)} \left[1 + \sqrt{\frac{\sin (\varphi + \delta) \sin (\varphi - \lambda - \beta)}{\cos (\delta + \alpha + \lambda) \cos (\beta - \alpha)}} \right]^{-2} \quad (1.24)$$

$$K_{pt} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2 (\varphi - \lambda + \alpha)}{\cos \lambda \cos^2 \alpha \cos (\delta - \alpha + \lambda)} \left[1 + \sqrt{\frac{\sin (\varphi + \delta) \sin (\varphi - \lambda + \beta)}{\cos (\delta - \alpha + \lambda) \cos (\beta - \alpha)}} \right]^{-2} \quad (1.25)$$

ifadeleriyle belirlenmektedir. Depremde oluşan dinamik aktif ve pasif basınç katsayıları ise; K_{as} ve K_{ps} statik durumdaki basınç katsayılarını göstermek üzere,

$$K_{ad} = K_{at} - K_{as} \quad (1.26)$$

$$K_{pd} = K_{pt} - K_{ps} \quad (1.27)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Burada K_{as} ve K_{ps} sırasıyla (1.3) ve (1.5) bağıntılarından alınabilir.

Depremden oluşan dinamik yatay basınç dağılımı ise zemin derinliğine bağlı olarak; H yüzeyden tünel tabanına kadar olan zemin derinliğini göstermek üzere,

$$p_{ad}(z) = 3K_{ad}(1 - z/H)\gamma_z \cdot z \quad (1.28)$$

$$p_{pd}(z) = 3K_{pd}(1 - z/H)\gamma_z \cdot z \quad (1.29)$$

bağıntılarıyla, tünel üzerinde bulunan ek yükler (q) nedeniyle oluşan ek dinamik basınç dağılımları ise,

$$q_{ad}(z) = 2 \cdot q \cdot K_{ad}(1 - z/H) \cos \alpha / \cos(\alpha - \beta) \quad (1.30)$$

$$q_{pd}(z) = 2 \cdot q \cdot K_{pd}(1 - z/H) \cos \alpha / \cos(\alpha - \beta) \quad (1.31)$$

bağıntılarıyla belirlenmektedir.

1.2.3. Yük Birleşimleri

Tünellerin zemin basınçlarıyla birlikte kendilerine etkiyen diğer yük ve yük etkilerini emniyetle taşımaları gerekmektedir. Tasarımda dikkate alınan yüklerin; tünelin tipine, konumuna, yeraltı su seviyesinin durumuna ve diğer yerel etmenlere göre belirlenmesi gerekmektedir.

Dikdörtgen kesitli betonarme tüneller için genellikle aşağıdaki dört yük birleşiminin dikkate alınması öngörülmektedir. Bunlar:

✓ 1. Birleşim: Düşey yükler ve tünelin her iki yanına uzun süreli yüklemenden oluşan yatay basınçlardan,

✓ 2. Birleşim: Düşey yükler, tünelin bir yanına uzun süreli yüklemelerden oluşan yatay basınçlar, diğer yanına kısa süreli yüklemelerden oluşan yatay basınçlar ve tünelin tavan döşemesinin yatay yerdeğiştirmesinin tutulu olup olmadığı durumlardan,

✓ 3. Birleşim: Birleşimde yeraltı su seviyesinden kaynaklanan hidrostatik basınç ihmal edilerek düşey yükler ve tünelin her iki yanına kısa süreli yüklemelerden oluşan yatay basınçlardan,

✓ 4. Birleşim: Sadece sabit düşey yükler ve tünelin her iki yanına hidrostatik basınçları da içeren uzun süreli yüklemelerden oluşan yatay basınçlardan oluşan birleşimler şeklinde özetlenmektedir.

Uluslararası geçerliliği olan AASHTO HB-17 (2002) yönetmeliğinde ise yük birleşimleri genel haliyle; γ yük çarpanını, β çeşitli katsayıları, G sabit yükü, Q hareketli yükü, DY darbe yükünü, P yatay zemin basınçlarını, E deprem yükünü, B taban basıncını, W rüzgar yükünü, WL hareketli yük üzerine etkiyen rüzgar yükünü, FY boyuna doğrultuda oluşan fren yükünü, MY merkezkaç yükünü, R elemanlarda oluşan kısılma etkisini, S rötre ve T sıcaklık etkisini, SF taşkın etkisini ve ICE buzlanma basıncını göstermek üzere,

$$F_d = \gamma \left[\beta_G \cdot G + \beta_Q \cdot (Q + DY) + \beta_M \cdot MY + \beta_P \cdot P + \beta_B \cdot B + \beta_S \cdot SF + \beta_W \cdot W + \beta_{WL} \cdot WL + \beta_F \cdot FY + \beta_R (R + S + T) + \beta_E \cdot E + \beta_{ICE} \cdot ICE \right] \quad (1.32)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu birleşimi tasarım yükü olarak adlandırmak da mümkündür. Söz konusu yönetmelikte tüneller için γ yük etmeninin 1.30, β_G katsayısının 1.0, β_Q katsayısının 1.67, β_P katsayısının aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerde sukunet durumu için 1.15, aktif durum için ise 1.30 olarak alınması gerektiği belirtilmektedir. Diğer taraftan tünellerde iki yandan etkiyen yatay basınçların teker teker yarıya indirilerek farklı yüklemelerle kesit etkilerinin denetlenmesi de istenmekte, ancak adı geçen yönetmelikte, genel bağıntıda bulunan diğer yük ve yük etkilerinin tüneller için dikkate alınmasına gerek olmadığı da belirtilmektedir. Bu koşullar altında tünel tasarımında dört birleşimin dikkate alınması öngörülmektedir. Bunlar,

$$1.30 \left[G + 1.67(Q + DY) + 1.15P^{sağ} + 1.15P^{sol} \right] \quad (1.33)$$

$$1.30 \left[G + 1.67(Q + DY) + 1.15P^{sağ} + 0.575P^{sol} \right] \quad (1.34)$$

$$1.30 \left[G + 1.67(Q + DY) + 0.575P^{\text{sağ}} + 0.575P^{\text{sol}} \right] \quad (1.35)$$

$$1.00 \left[G + 1.30P^{\text{sağ}} + 1.30P^{\text{sol}} + E \right] \quad (1.36)$$

şeklinde özetlenebilmektedir.

1.3. Yapısal Optimizasyon

Genel olarak optimizasyon problemleri, bir fonksiyonun birtakım değişkenler için maksimum yada minimumunu ararken aynı zamanda sağlaması gereken koşulların olduğu problemler olarak tanımlanmaktadır. Maksimumu yada minimumu aranan fonksiyona amaç fonksiyonu, sağlanması gereken koşullara ise sınırlayıcılar adı verilmektedir. Bir optimizasyon problemi; D tasarım değişkeni sayısını, m eşitsizlik tipi sınırlayıcı sayısını ve n eşitlik tipi sınırlayıcı sayısını göstermek üzere, matematiksel olarak:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_D) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (1.37)$$

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_D) = 0 \quad k = 1, \dots, n \quad (1.38)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad i = 1, \dots, D \quad (1.39)$$

ifadeleri sağlanmak koşuluyla,

$$\text{optimize } f(x_1, x_2, \dots, x_D) \quad (1.40)$$

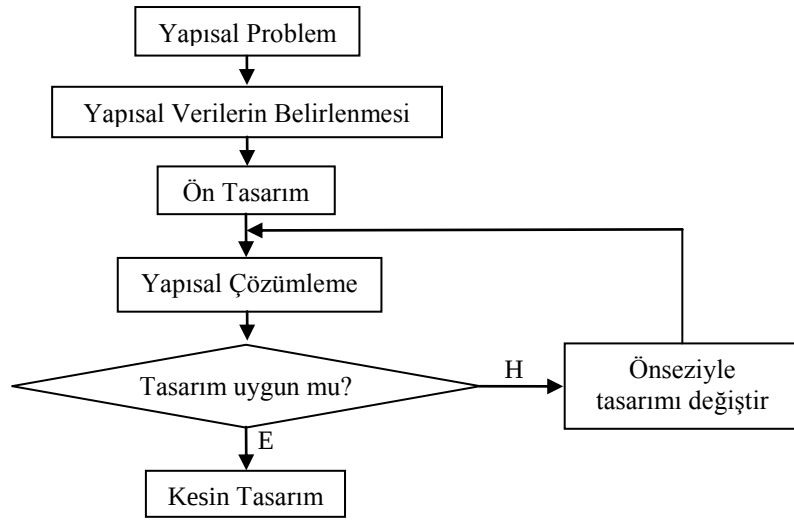
şeklinde ifade edilmektedir.

Bu tanımdan hareketle yapısal optimizasyonda da yapısal problem, çeşitli amaç fonksiyonları ve sınırlayıcılarla ifade edilmektedir. Yapısal optimizasyon sürecinin karmaşık matematiksel işlemler gerektirmesi ve bu işlemlerin elle yapılmasının mümkün olmamasından dolayı son 20 yıla kadar yapısal optimizasyon daha çok akademik düzeyde

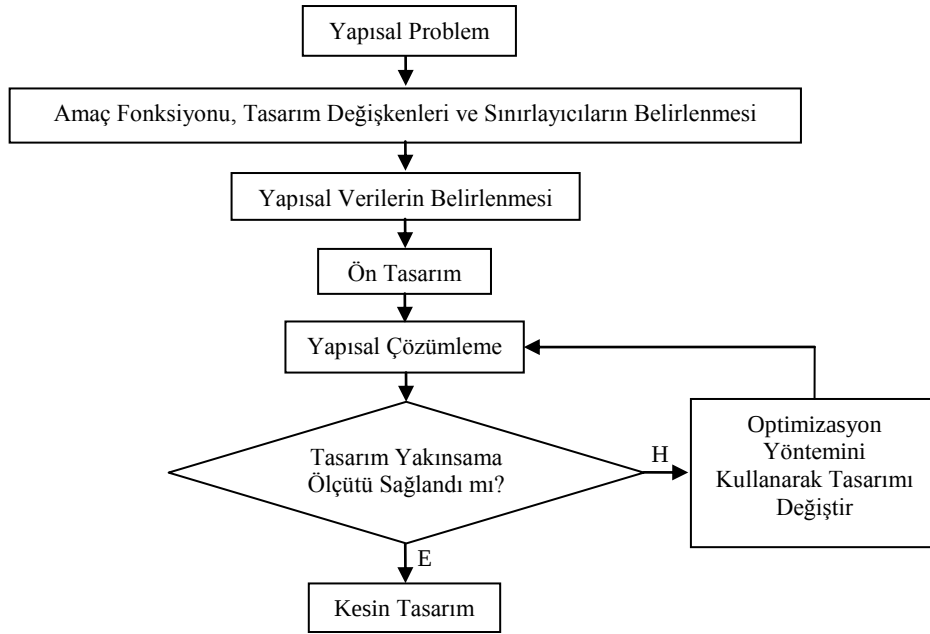
kalmıştır. Günümüzde optimizasyon ve yapısal çözümleme yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde yapısal tasarımda optimizasyon yöntemleri daha çok kullanılmaktadır.

Her tasarımcının bir yapısal sistemi tasarlarken yapının istenen davranışı ve başarımı göstermesini sağlamaya çalışması gerekmektedir. Geleneksel yapısal tasarım sürecinde de tasarımcı, deneyimlerini ve gözlemlerini yapısal sistemi oluşturmakta kullanmaktadır. Bu şekilde oluşturulan sistem istenen başarımı sağlayıncaya kadar birçok kez denetlenmektedir. Bu tür tasarımda deneme yanılma tekniği kullanıldığından tasarım yeterli derecede ekonomik olmayabilmektedir. Günümüzde artan malzeme maliyetleri ve kaynakların kısıtlı olması nedeniyle, inşaat mühendislerinin yapısal tasarımda yapı davranışı ve başarımı yanında yapı maliyetini ve/veya ağırlığını da dikkate almaları gerekli olmaktadır. Zira kaynakların verimli kullanılmasının ülkemiz ekonomisi bakımından çok önemli olduğu açıktır. Yapısal bir tasarım süreci oldukça zaman alıcıdır. Çünkü seçilen ön boyutların başta stabilite olmak üzere yapılara dayanım, dayanıklılık, rijitlik ve süneklik özellikleri kazandırması gerekmektedir. Durum böyle olunca geleneksel tasarım yöntemiyle gerçekleştirilen tasarımlar çoğu kez ekonomik olmamaktadır.

Yukarıda da belirtmeye çalışıldığı gibi geleneksel tasarımın başarılı olması mühendisin bilgi ve deneyimiyle yakından ilgili olduğundan bunlar karmaşık yapılarda uygun bir çözümün gerçekleştirilmesinde yeterli olamayabilmektedir. Geleneksel tasarım sürecinin aşamaları Şekil 1.23’de görülmektedir. Optimum tasarım sürecinde ise yapısal sınırlayıcılar sağlanırken aynı zamanda ekonomik bir tasarım da gerçekleştirilmektedir. Optimum tasarım sürecinin başında, mühendis tarafından; tasarım değişkenleri, yapı ağırlığını yada maliyetini ifade eden amaç fonksiyonu ve yürürlükteki yönetmelikler uyarınca belirlenen yapısal sınırlayıcılar tanımlanmaktadır. Daha sonra geleneksel tasarım sürecine benzer olarak yapısal sistem oluşturulmakta ve bu sisteme göre yapısal çözümleme gerçekleştirilmektedir. Böylece yapısal çözümlemeden elde edilen sonuçların sınırlayıcıları sağlama başarımı ve optimizasyon süreci önceden belirlenen bir yakınsama ölçütüne göre denetlenmektedir. Optimizasyon sürecinde yakınsama durumunun denetlenmesiyle, sürecin döngü (iterasyon) sayısı en az olacak şekilde sonlandırılmasını sağlanmaktadır. Yakınsamanın sağlanamaması durumunda kullanılan optimizasyon tekniğinin mantığına uygun olarak tasarım değiştirilerek süreç tekrarlanmaktadır. Bu optimum tasarım sürecine ilişkin şematik akış diyagramı Şekil 1.24’de verilmektedir.



Şekil 1.23. Geleneksel tasarım süreci (Coello vd.,1997).



Şekil 1.24. Optimum tasarım süreci

1.3.1. Yapısal Optimizasyon Elemanları

Optimizasyon sürecinin temel amacı; tasarım değişkenlerinin fonksiyonu olan bir yada birkaç amaç fonksiyonunu maksimum yada minimum yapacak ve çeşitli sınırlayıcıları sağlayacak, belirli bir tanım kümesinden değer alan değişkenlerin en uygun

değerlerini bulmaktır. Dolayısıyla bir optimizasyon problemi için, tasarım değişkenlerinin, amaç fonksiyonunun ve sınırlayıcıların tanımlanması gerekmektedir.

Yapısal optimizasyon problemlerinde, yapının davranışını uygun şekilde temsil etmek bakımından, yapının gerçeğe yakın bir biçimde modellenmesi önemli olmaktadır. Tasarımda yapı elemanlarının enkesit ve malzeme özellikleri değiştirildiğinde yapı davranışının ve elemanlardaki kesit etkilerinin değişimini belirleyebilmek için yapısal çözümleme yöntemlerinden birine başvurmak gerekmektedir. Kullanılan yöntemin doğru sonuç vermesi kadar hızlı sonuç alınabilmesi de önemli olduğu gibi kullanılan optimizasyon yönteminin de çözülecek probleme uygun olması gerekmektedir (Akın,2010).

1.3.1.1. Tasarım Değişkenleri

Tasarım değişkeni adı verilen değişkenler amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesinde kullanılmaktadır. Bu değişkenler yapıda enkesit boyutları, malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ve/veya yapının geometrisini temsil eden parametreler olabilmektedir. Örneğin şekil optimizasyon problemlerinde sistemin düğüm noktası koordinatları tasarım değişkenleri olarak seçilmektedir. En basit tasarım değişkeni; bir çubuk elemanın enkesit alanı, eğilme elemanın atalet momenti yada plak elemanın kalınlığı ile ifade edilen bir elemanın boyutudur. Birçok çalışmada, yapıların tasarımı esnasında sabit geometri ve malzeme özellikleri kullanılmasından dolayı, tasarım değişkeni olarak eleman boyutları seçilmektedir.

Tasarım değişkenleri sürekli yada ayrık değerler alabilmektedir. Sürekli tasarım değişkenleri bir değer aralığında tüm değerleri alabilmekteyken, ayrık tasarım değişkenleri önceden belirli bir değer kümesi içerisinde izin verilen değerleri alabilmektedir. Bununla birlikte bir problemi ayrık değişkenlerle çözmek sürekli değişkenlerle çözmeye göre daha zahmetli olmaktadır. Ancak yapısal optimizasyon problemlerinde tasarımın özeliği gereği ayrık değişkenlerin kullanılması daha uygun olmaktadır. Bilindiği gibi uygulamada çelik yapı elemanları, piyasada bulunan standart çelik profiller arasından seçilmekte, betonarme elemanlar ise ayrık boyut artımlarıyla tasarlanmaktadır. Bu tür problemler dinamik programlama gibi ayrık programlama teknikleriyle çözülebilmektedir.

1.3.1.2. Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu optimizasyon sürecinde maksimumu yada minimumu aranan, tasarım değişkenlerinin skaler bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon birçok kabul edilebilir tasarımdan en uygun olanını seçmeye imkan tanımaktadır. Tasarımın amaç fonksiyonu; yapı ağırlığı, maliyeti, düğüm noktası yerdeğiştirmeleri, eleman gerilmelerini ifade edebileceği gibi bunların ağırlıklı toplamalarını içeren bir fonksiyon da olabilmektedir. Bir problemin birden fazla amaç fonksiyonu da olabilmektedir. Bu tip problemler çok ölçütlü (multi-criteria) optimizasyon problemleri olarak adlandırılmaktadır.

Örneğin, N adet elemanı olan çelik kafes sisteme sahip bir yapıda, L_i herhangi bir i elemanının boyunu, A_i enkesit alanını ve γ_i elemanda kullanılan malzemenin birim ağırlığını göstermek üzere; yapının toplam ağırlığı:

$$W_y = \sum_{i=1}^N \gamma_i L_i A_i \quad (1.41)$$

bağıntısıyla, yapı maliyeti ise c_i elemanda kullanılan malzemenin birim maliyetini göstermek üzere:

$$C_y = \sum_{i=1}^N c_i \gamma_i L_i A_i \quad (1.42)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Tasarım ölçütü olarak yapı ağırlığı dikkate alındığında (1.41) bağıntısı, yapı maliyetinin dikkate alınması durumunda ise (1.42) bağıntısının amaç fonksiyonu olarak kullanılması gerekmektedir.

1.3.1.3. Sınırlayıcılar

Optimizasyon probleminin sağlaması gereken koşullar sınırlayıcı olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik ve eşitsizlik tipi olmak üzere iki tip sınırlayıcı bulunmaktadır. Bir problemdeki tüm sınırlayıcıları sağlayan çözümlere uygun çözüm kümesi adı verilmektedir. Yapısal bir optimizasyon problemi, sınırlayıcılar olmaksızın gerçekçi olamamaktadır. Yapısal problemlerde sınırlayıcı olarak genellikle; boyut, dayanım,

gerilme, detaylandırma, geometri, yerdeřiřtirmelerle mimari dűřűnceler dikkate alınabilmektedir. Bu sınırlayıcılar yűrűrlűkteki yűnetmeliklere yada műhendislik bilgi ve deneyimine gűre belirlenmektedir.

1.3.2. Optimizasyon Yűntemleri

İnsanlar varoluřlarından bu yana, sűrekli en iyiye ve en gűzele ulařmak istemiřlerdir. Bunu bařarmak için de zaman zaman sonucunu űnceden bilemediđi konularda karar vermek zorunda kalmıřlardır. űnceleri yerinde karar verebilmek için yildızlardan faydalanmaya, kuřların uçuřundan, karıncaların hareketlerinden bir anlam çıkarmaya çalıřmıřlardır. Hatta gűnűműze kadar gelmiř olan fala bakma iřlemine de bařvurmuřlardır.

Uzun yıllar geçmiř olmasına rađmen gűnűműz insanı da, hayatının çeřitli kademelerinde karar verme ihtiyaı duymaktadır. Hatta gűnlűk hayatımızda farkında olarak yada olmayarak bazı iřleri bařarmak için karar vermek zorunda kalınmaktadır. Durum bűyle olunca bu iřleri bařarmak için mevcut birçok yol içinden amaca en uygun olanının, diđer bir deyiřle optimumunun, seçilmesi gerekmektedir. űrneđin řehir içindeki acil bir hastayı hastaneye yetiřtirmeye çalıřan ambulans řofűrű en kısa zamanda hastayı hastaneye yetiřtirmeyi amaçlamaktadır. Bunun için genellikle takip edeceđi birden fazla yol bulabilir. Bunlar içinden en kısa olanını seçmesi hastaneye en kısa zamanda varacađı anlamına gelmemektedir. Yollardaki trafik yođunluđunun, ulařma zamanını etkileyeceđi açıktır. Buna gűre en kısa yola nazaran daha uzunca olmasına rađmen trafik yođunluđu fazla olmayan yol daha uygun olabilmektedir. Bűyle bir durumda řofűr ulařım zamanını minimum yapacak řekilde, yollardan birini seçmek için bir optimizasyon problemini űzmek durumundadır.

İnřaat műhendisliđi problemleri diđer műhendislik alanlarında olduđu gibi genellikle optimizasyon problemleridir. Yapı műhendisliđinde, tasarlanan yapının maliyetinin yada ađırlıđının minimum yapılması amaçlanmaktadır. Ulařım műhendisliđinde ise ulařım sűresini minimum yapacak yol ađlarının dűzenlenmesi amaçlanmaktadır. Bir beton űretim řantiyesinde beton karıřımına giren su, imento ve agrega miktarlarının beton dayanımını maksimum yapacak řekilde belirlenmesi istenmektedir.

Yukarıda verilen űrneklerden de anlařılabileceđi gibi problemin optimizasyon problemi olabilmesi için tařıması gereken kořullar:

- 1) Problemde bazı amaç yada amaçların olması,

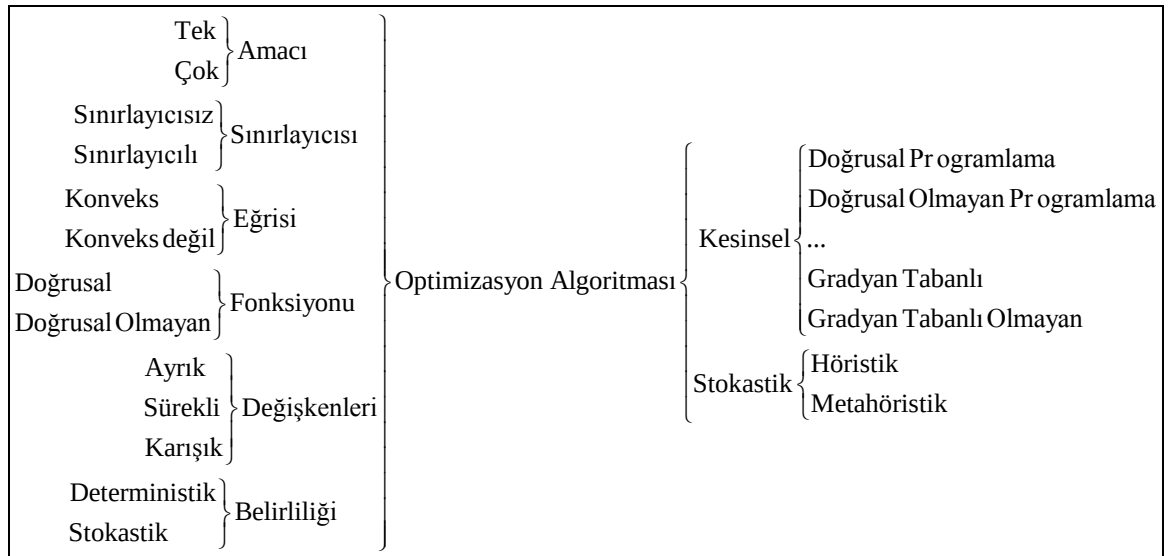
- 2) Bu amaç yada amaçlara varılmasında izlenecek çeşitli yolların bulunması,
- 3) Optimum yol yada yolların açıkça belli olmaması

şeklinde özetlenmektedir. Örneğin amaca varmak için yalnız bir yolun bulunması problemi optimizasyon problemi olmaktan çıkarmaktadır (Saka, 1982).

Optimizasyon tekniklerinin yapıları uygulamasının ilk örnekleri Gerard (1956) ve Livesley (1956) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda yapısal tasarımlarda doğrusal olmayan programlama kullanılmıştır. 1970'lerin başında bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yapısal optimizasyon büyük ölçekli problemlere de uygulanabilmektedir.

Optimizasyon algoritmaları çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Optimizasyon algoritmalarının çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılması aşağıdaki Çizelge 1.5'de verilmektedir. Genel olarak optimizasyon algoritmaları; kesinsel (deterministik) ve stokastik optimizasyon algoritmaları olarak ikiye ayrılabilir. Kesinsel optimizasyon algoritmaları matematik programlama ve optimumluk ölçütü gibi yöntemleri kapsamaktadır. Stokastik optimizasyon algoritmaları bir problemin kabul edilebilir çözümünü ihtimalci bir yolla üretebilen algoritmalar olarak ifade edilmektedir. Stokastik algoritmalar, arama yöntemlerinin rastgele stratejilere dayalı olarak yapan algoritmalar ise metahöristik algoritmalar adı verilmektedir. Bu tür algoritmalar örnek olarak; genetik algoritmaları, karınca kolonisi algoritmaları, tabu arama algoritmaları gösterilebilmektedir. Bazı optimizasyon algoritmaları aşağıda açıklanmaktadır.

Çizelge 1.5. Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması



1.3.2.1. Matematik Programlama

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi optimizasyon problemi, değişkenlere bağlı değer alan amaç fonksiyonun belli sınırlayıcılar kullanılarak optimum değerinin aranması olarak tanımlanmaktadır. Sınırlayıcılar, problemde değişkenlere göre hesaplanan bir takım fonksiyonlar olup, ulaşılan optimum çözümün geçerli olabilmesi için bu fonksiyonların aldığı değerlerin belli sınırlar içerisinde kalmasının sağlanması gerekmektedir.

Farklı problemlere uygulanmak üzere birçok matematiksel programlama yöntemi geliştirilmiştir. En yaygın şekilde kullanılan matematiksel optimizasyon yöntemleri; doğrusal programlama, tamsayılı programlama ve doğrusal olmayan programlama yöntemleridir (Gallagher ve Zienkiewicz, 1973; Majid, 1974; Akın,2010). Doğrusal programlama yöntemi, doğrusal amaç fonksiyonuna ve sınırlayıcılara sahip problemleri çözmekte kullanılmaktadır. Doğrusal programlama, problemin çözümünün yerel optimumlara takılmadığı sürece, global optimumu bulabilmektedir. Bununla birlikte doğrusal olmayan programlama problemleri de, ardışık doğrusal problemlere dönüştürülerek, bu yöntemle çözülebilmektedir.

Tamsayılı programlama yöntemi ile doğrusal programlama arasındaki tek fark tasarım değişkenlerinin tamsayılarla sınırlı olmasıdır. Tamsayılı programlama problemi doğrusal programlama gibi çözülmekte ancak tasarım değişkenlerinin tümünün tamsayı olduğunun denetlenmesi gerekmektedir. Optimizasyon probleminin bazı yada tüm fonksiyonlarının doğrusal olmaması durumunda problem, doğrusal olmayan programlama problemi olarak adlandırılmaktadır. Doğrusal olmayan programlama problemlerinin çözümü için birçok sayısal yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları: Ardışık Doğrusal Yaklaşım, Ardışık İkinci Dereceden Yaklaşım, Lagrange Çarpanı, Ceza Fonksiyonu, Gradyan yöntemleri olarak bilinmektedir (Venkataraman,2002).

1.3.2.2. Tabu Arama Algoritması

Tabu, kutsal sayılan bazı insanlara, hayvanlara, nesnelere dokunulmasını, kullanılmasını yasaklayan, aksi yapıldığında zararı dokunacağı düşünülen dinî inanç, kısaca yasaklanarak korunan şey anlamına gelmektedir. Tabu Arama Algoritması Glover (1989) tarafından geliştirilmiş iteratif bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritmanın amacı, her iterasyonda, problemin çözümünün istenmeyen sonuçlara gitmesinden

kaçınmaktır. Uygun bir başlangıç çözümüyle başlayan algoritma bu çözüme benzer ve benzer olmayan çözümler üreterek listelemektedir. Herhangi bir iterasyonda daha önce ürettiği çözümleri rastgele kullanırken bu çözümlerin tabu listesinde kaydedilen uygun olmayan çözüm sonuçlarından olmamasına dikkat edilmektedir. Algoritmanın ürettiği çözüm bir önceki çözümden daha uygunsa onunla yer değiştirilmektedir. (Morley ve Grover,2001)

Tabu aramanın diğer yöntemlerden en farklı özeliği problemin çözümünde kullanılan verileri kavraması olarak bilinmektedir. Tabu arama algoritması, tabu listesindeki verileri Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma gibi diğer algoritmalarından alabilmektedir. Bu özeliğiyle tabu arama algoritması bazı problemlerin çözümünde daha etkili ve ekonomik olabilmektedir.

1.3.2.3. Isıl İşlem Algoritması

Isıl işlem, metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle metalde, istenen amaca uygun olarak, özellik değişimlerinin sağlanması olayı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu olaydan esinlenerek oluşturulan algoritma Kirkpatrick vd. (1983) tarafından optimizasyon problemlerine uygulanmaya başlanmıştır.

Isıl İşlem algoritması, pek çok değişkene sahip fonksiyonların en büyük yada en küçük değerlerinin bulunması ve özellikle pek çok yerel en küçük değere sahip doğrusal olmayan fonksiyonların en küçük değerlerinin bulunması için tasarlanmıştır. Genetik Algoritmalar ve Tabu Arama Algoritması gibi diğer stokastik yaklaşımlar optimum çözümün en kısa zamanda üretimini sağlamaya çalışmaktadır. Isıl işlem algoritması; elektronik devre tasarımı, görüntü işleme, yol bulma problemleri, seyahat problemleri, malzeme fiziği simülasyonu, kesme ve paketleme problemleri ve iş planlama problemlerinin çözümlerinde başarılı sonuçlar vermiştir (Kirkpatrick vd.,1983).

Isıl işlem bir başlangıç verisiyle problemi optimize etmeye başlayıp iterasyonlar yaparak amaç fonksiyonunu değerlendirmektedir. Amaç fonksiyonu optimize edilirken herhangi bir iterasyon adımı referans olarak alınmaktadır. Daha sonra bu iterasyondan itibaren tekrar optimizasyon süreci başlatılmakta, böylece iterasyonlarda sonuca erken yakınsayarak optimum çözümün bulunamamasının önüne geçilmiş olunmaktadır. Bu yöntemde ilerleyen iterasyonlar referans alındığından iterasyon sayısı aşırı derecede çoğalmadan global optimum çözümlere yakınsama sağlanmaktadır. Isıl işlem algoritması

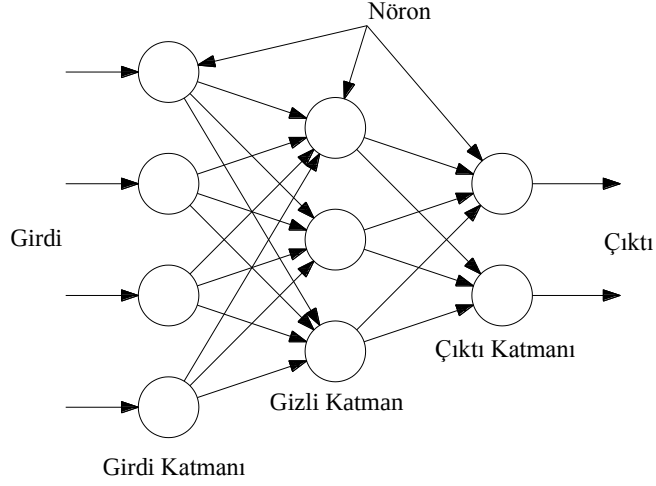
amaç fonksiyonuyla ilgili çok az varsayım yaptığı için sonuçlar güvenilir olmakta, ancak bu güvenilirlik derecesi problemin türüne göre değişik düzeylerde kalmaktadır (Dede,2003; Karaboğa, 2011).

1.3.2.4. Yapay Sinir Ağları Algoritması

Yapay sinir ağları, insan beyninin bilgi işleme teknolojisinden esinlenerek geliştirilmiş bir algoritma olarak bilinmektedir. Yapay sinir ağları ile basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli taklit edilmektedir. Taklit edilen sinir hücrelerinde nöronlar bulunmakta ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluşturmaktadır. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir deyişle, yapay sinir ağları, bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretebilmektedir.

Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ayarlanması ile olmaktadır. Diğer bir deyişle, insanlar doğumlarından itibaren yaşayarak öğrenme süreci içerisine girmektedirler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp deneyim kazandıkça sinaptik bağlantılar ayarlanmakta ve hatta yeni bağlantılar oluşmakta, böylece öğrenme gerçekleşmektedir. Bu durum yapay sinir ağları için de geçerli olmaktadır. Öğrenme, eğitime yoluyla örnekler kullanarak olmakta; başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıkı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitime algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla olmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 1.25'deki üç katmanın birbiriyle bağlantılı olduğu görülmektedir. Her katmandaki elemanlar bir sonraki katmanın tüm elemanlarıyla bağlantılıdır. Bu katmanlar sırasıyla girdi, gizli ve çıktı katmanlarıdır. Gizli katmanda veriler arasındaki ve verilerle çıktılar arasındaki ilişkiler değerlendirilmektedir. Gizli katman sayısı problemin türüne göre değişmektedir (Hagan vd., 1995; Dede, 2003).



Şekil 1.25. Yapay sinir ağları algoritmasında nöronlar

Yapay sinir ağlarının yukarıda belirtilen özelliklerinin yanında; sistem içerisinde ne olduğunun bilinmemesi ve farklı sistemlere uygulanmasının oluşu gibi sakıncaları da mevcuttur.

1.3.2.5. Karınca Kolonileri Algoritması

Karıncalar, koloni halinde yaşayan ve problem çözmede örnek alınabilecek önemli davranış özellikleri olan canlılardır. Karıncalar tam olarak görebilme yeteneğine sahip olmayan, dolayısıyla çevrelerinde ne olup bittiğini izleyemeyen böceklerdir. Ancak yuvalarından yiyecek kaynağına ulaşmada ve yiyecek kaynağından yuvalarına dönmeye en kısa yolu bulabilmektedirler. Karıncalar yiyecek ile yuva arasındaki bu en kısa yolu bulmak ve aralarındaki haberleşmeyi sağlamak için feromon adı verilen kimyasal bir madde kullanmaktadırlar. Karınca kolonisi algoritması da buradan hareketle matematiksel modellemeye dayalı bir algoritma olarak geliştirilmiştir.

Bu konuyla ilgili ilk çalışma Dorigo vd. (1991) tarafından yapılmış ve kendi sistemlerini karınca sistemi, ortaya çıkan algoritmayı ise karınca algoritması olarak tanımlamışlardır. Burada karınca kolonilerinin davranışlarının tam olarak modellenmesi yerine, yapay karınca kolonilerinin bir optimizasyon aracı olarak kullanılması amaçlanmıştır, dolayısıyla sözkonusu algoritma gerçek karınca davranışına göre biraz farklılık göstermiştir. Örneğin, yapay karıncaların belirli bir hafızaya sahip oldukları kabul edilmekte, ancak gerçek karıncaların aksine tamamen kör olmadıkları düşünülmektedir.

Ayrık optimizasyon problemleri için tanımlanan karınca koloni algoritmalarının en genel modellenmesi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Karaboğa,2011). Bu adımlar:

- 1) Parametrelere ve hatların feremon miktarlarına başlangıç değerlerinin atanması ve sayacın sıfırlanması,
 - 2) Tüm karıncalar için feremon maddesine bağlı olarak yolların üretilmesi,
 - 3) Yolların uzunluklarının hesaplanması,
 - 4) Yolların uzunluklarına göre bu yollarda mevcut olan feremon maddesinin miktarının değiştirilmesi,
 - 5) Bulunan en kısa yolun hafızada tutulması,
 - 6) Durdurma ölçütü sağlanmıyorsa 2. Adıma dönülmesi
- şeklindedir.

1.3.2.6. Yapay Bağışıklık Sistemi Algoritması

Bağışıklık sisteminin, vücudu patojen olarak adlandırılan virüs, bakteri ve diğer parazitlerden koruduğu bilinmektedir. Bu patojenler, antikorlar tarafından tanınmakta ve ortadan kaldırılmaktadır. Çok fazla sayıda patojen olduğundan, vücut tarafından bunların tanınması başlı başına büyük bir iş olmaktadır. Bağışıklık sisteminin en az 10^6 patojen tanımlama kapasitesinin olduğu ve bu sistemdeki genomların 10^5 gen içerdiği kabul edilmektedir. Muhtemel bütün patojenleri tanımak için bağışıklık sistemi antikor oluşturmak amacıyla genom parçalarını kullanmaktadır. Bu süreç bir genetik algoritma kullanılarak taklit edilmektedir. Patojenler ve antikorlar ikili sarmallarla temsil edilmekte ve genetik algoritmadaki uygunluk fonksiyonu bunlar arasındaki benzerlikleri ölçme için eşleştirme fonksiyonuyla yer değiştirilmektedir (Saka,2007).

Luh ve Chueh (2004) çelik çerçeve türü yapıların optimum tasarımında yapay bağışıklık sistemi algoritmasını kullanmışlardır. Geliştirilen bağışıklık sistemi algoritması yardımıyla 10 çubuklu sürekli tasarım değişkenli ve 25 çubuklu ayrık tasarım değişkenli kafeslerin optimum tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir. İki örnekte de amaç yapı hacmini ve düşey yerdeğiştirmeleri minimuma indirmektir. Çalışmanın sonunda geliştirilen algoritmanın çok amaçlı tasarım problemlerine uygulanabilir olduğunu da göstermişlerdir.

Miyamoto vd. (2004) çarpma etkilerinde kalacak olan betonarme döşemelerin optimum tasarımlarını bağışıklık sistemi algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çarpmanın neden olduğu göçmenin gerçekleşebilmesi için döşemelerin özellikleri ikili

kodla ifade edilmiştir. Geleneksel bağışıklık sistemi algoritması değiştirilerek betonarme döşemelere uygun hale getirilmiştir. Çalışmanın sonunda üç boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi ile bağışıklık sistemi algoritmasının birleştirilmesiyle daha uygun mesnet sistemlerinin geliştirebileceği sonucuna varmışlardır.

1.3.2.7. Armoni Arama Algoritması

Bir diğer meta-höristik algoritma da Geem vd. (2001) tarafından geliştirilen armoni arama algoritmasıdır. Bu algoritma, bir müzisyenin daha iyi bir armoni durumu ararken ortaya çıkan müzikal başarımlar sürecine dayanmaktadır. Müzisyenin güzel armoniyi araması, optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonunun değerlendirilmesiyle optimum çözümün elde edilmesine benzetilmektedir. Her bir çalgının ses perdesinin müziğin estetik kalitesini belirlemesi gibi amaç fonksiyonunun uygun değerleri de her bir değişkene atanan veri kümesi tarafından belirlenmektedir (Geem vd.,2001; Geem vd.,2005; Lee ve Geem,2005; Saka,2007).

1.3.2.8. Parçacık Sürü Algoritması

Parçacık sürü algoritması; böcek sürüleri ve kuş kümeleri gibi canlıların birlikte davranışlarını temel almaktadır (Kennedy ve Eberhart,1995). Bu süreçte toplum, bir arama fonksiyonunun arama uzayında rastgele oluşturduğu birkaç parçacıkla temsil edilen sürüden oluşmaktadır. Sürü içerisindeki her bir parçacık tasarım probleminin optimizasyonunda bir aday çözümü temsil etmektedir. Arama uzayında hareket eden parçacıkların konumları; mevcut konumları, hız vektörü ve zaman artımıyla güncellenmektedir.

Parçacık sürü optimizasyon algoritması 1995'te tanıtılmasının ardından birtakım gelişmeler geçirmiştir. Bu gelişmelerden çoğu yakınsama hızını geliştirmeye ve sürünün farklılaşmasının artırılmasına yönelik olduğu belirtilmektedir (Karaboğa,2011).

1.3.3. Sınırlayıcı İşleme Yöntemleri

Mühendislik optimizasyon problemleri genellikle sınırlayıcılara sahip problemlerdir. Sınırlayıcıların kullanılması, optimum sonucun istenen sınırlar içinde kalması ve böylece yönetmelik koşullarının sağlanması bakımından gerekli olmaktadır. Durum böyle olunca genellikle sınırlayıcısız problemler için geliştirilmiş olan optimizasyon algoritmalarına gerekli sınırlayıcıların işlenerek algoritma istenen sınırlayıcıları da dikkate alacak duruma gelmektedir.

Bazı araştırmacıların, farklı sınırlayıcı işleme yöntemlerini evrimsel algoritmalarda kullandıkları bilinmektedir (Glover, 1989; Kirkpatrick vd., 1983). Evrimsel sınırlayıcı işleme yöntemleri beş sınıfa ayrılabilir. Bunlar:

- 1) Çözümün uygunluğunu korumaya dayanan yöntemler,
- 2) Ceza fonksiyonlarına dayanan yöntemler,
- 3) Uygun ve uygun olmayan çözümler arasında ayırım yapabilen yöntemler,
- 4) Kod çözümlere dayanan yöntemler
- 5) Melez (Hibrit) yöntemler,

olarak adlandırılmaktadır.

İlk sınıfa giren yöntemlerde sınırlayıcıların yapısıyla ilgili bilgi ve çözümlerin uygunluğunu koruyan bir arama operatörü kullanılmaktadır. İkinci sınıfa giren yöntemlerde zamanla dinamik olarak ceza parametrelerinin uyarıldığı dinamik ceza yaklaşımlarını da içeren çeşitli ceza fonksiyonları kullanılmaktadır. Üçüncü sınıfa giren sınırlayıcı işleme yöntemleri ise uygun ve uygun olmayan çözümleri algoritmaya işleyen farklı arama operatörleri kullanılmaktadır. Dördüncü sınıftaki yöntemler ise uygun bir çözüm oluşturmak için komutları taşıyan dolaylı gösterim şemaları kullanılmaktadırlar. Beşinci olan melez yöntemlere gelince, bunlar hıristik ve klasik sınırlayıcı arama yöntemlerinin birleştirilmelerinden oluşmaktadırlar.

Evrimsel Algoritmalarda sınırlayıcıları işlemek için kullanılan en genel yaklaşım ceza fonksiyonlarıdır. Ceza fonksiyonları ilk defa Courant (1943) tarafından önerilmiş ve daha sonra Carroll (1961) ile Fiocco ve McCormick (1966) tarafından genişletilmiştir. Bu yöntemin esası sınırlayıcı optimizasyon problemini, amaç fonksiyonuna çözümdeki sınır ihlali değerinin bir miktarını ekleyerek, sınırlayıcısız probleme dönüştürmektir.

Geleneksel optimizasyonda iç ve dış olmak üzere iki tip ceza fonksiyonu dikkate alınabilmektedir. Dış ceza fonksiyonu yönteminde uygun olmayan bir çözümle

başlanmakta ve uygun bölgeye doğru hareket edilmektedir. İç yöntemde ise uygun bir çözüm başlanmakta ve ceza teriminin sınırlardan uzak bölgede küçük değerler alması, sınırlara yaklaştığında ise sonsuza gitmesi sağlanmaktadır. Böylece, optimizasyon sürecinde sınırlar bariyer görevi yapmakta ve uygun bölge içinde aramaya başlandığında ardışık noktalar devamlı uygun bölge içerisinde üretilmektedir (Rao,2009).

Evrimsel Algoritmelerde en çok kullanılan yöntemin dış ceza fonksiyonu yaklaşımı olduğu bilinmektedir. Söz konusu yöntemin araştırmacılar tarafından tercih edilmesinin nedeni, optimizasyonda kullanılan başlangıç çözümlerinin uygun bölge içerisinde olmasının zorunlu olmamasıdır. Çünkü birçok problemde başlangıç için uygun bir çözümün bulunmasının zor olduğu bilinmektedir (Coello,2002).

Evrimsel Algoritmelerde, yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, ceza fonksiyonları yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Aşağıdaki başlıklar altında bu fonksiyonlar üzerinde durulmaktadır.

1.3.3.1. Statik Ceza Fonksiyonları

Statik ceza fonksiyonları, ceza katsayılarının hiçbir şekilde nesil numarasına bağlı olmadığı fonksiyonlardır. Böylece tüm evrimsel süreç boyunca ceza katsayıları sabit kalmaktadır. Homaifar vd. (1994) birçok ihlal düzeyinin tanımlandığı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde ceza katsayısı, yüksek düzeydeki ihlale uğradığında artırılmaktadır. Yöntemde optimizasyona rastgele seçilen, dolayısıyla da uygun yada uygun olmayan bireylerden oluşan, bir nesille başlanmakta ve bir bireyin uygunluk değeri; $CK_{k,i}$ kullanılan ceza katsayılarını, p toplam sınırlayıcı sayısını, $f(x)$ cezalandırılmamış amaç fonksiyonunu ve i_d kullanıcı tarafından tanımlanan ihlal düzeyi sayısını göstermek üzere,

$$f'(x) = f(x) + \sum_{i=1}^p \left(CK_{k,i} \cdot \max[0, g_i(x)]^2 \right) \quad k \in \{1, 2, \dots, i_d\} \quad (1.43)$$

şeklinde belirlenmektedir (Michalewicz, 1995). Diğer bir statik ceza yöntemi ise Kuri Morales ve Quezada (1998) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde bireyin uygunluğu; ss sağlanan sınırlayıcı sayısını, p toplam sınırlayıcı sayısını ve S_b araştırmacı tarafından 1.10^9 olarak alınması önerilen bir sabiti göstermek üzere,

$$f'(x) = \begin{cases} f(x) & \text{eğer çözüm uygunsa,} \\ S_b - \sum_{i=1}^{ss} \left(\frac{S_b}{p} \right) & \text{uygun değilse} \end{cases} \quad (1.44)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi yöntemde, uygun olmayan bir bireyin uygunluk değeri hesaplanmamakta ve uygun bölgeye olan uzaklığına bakılmaksızın aynı sayıda sınırlayıcı ihlali olan bireyler aynı ceza değerini almaktadır.

Araştırmacılar tarafından bu yaklaşımlar dışında farklı birçok statik ceza fonksiyonları da kullanılmıştır (Richardson vd.,1989; Back ve Khuri,1994; Olsen,1994; Carlson,1995; Thangiah,1995). Tüm bu yaklaşımlarda bir yada birkaç ceza katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayılar problemin türüne bağlı olarak değişik değerler aldığından belirlenmeleri kolay olmamaktadır.

1.3.3.2. Dinamik Ceza Fonksiyonları

Bu tip ceza fonksiyonlarında, optimizasyon sürecinde ulaşılan iterasyon sayısı ceza katsayılarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Joines ve Houck (1994) herhangi bir t. iterasyonda bireylerin uygunluk değerleri hesaplamak için; S_b^1 , S_b^2 ve S_b^3 önceden tanımlanan sabitleri, m eşitsizlik tipi, n eşitlik tipi sınırlayıcı sayılarını göstermek ve,

$$D_i(x) = \begin{cases} 0, & g_i(x) \leq 0 \\ |g_i(x)|, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq m \quad (1.45)$$

$$D_j(x) = \begin{cases} 0, & -\varepsilon \leq h_j(x) \leq \varepsilon \\ |h_j(x)|, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq n \quad (1.46)$$

$$SVC(S_b^3, x) = \sum_{i=1}^m D_i^{S_b^3}(x) + \sum_{j=1}^n D_j(x) \quad (1.47)$$

olmak üzere,

$$f'(x) = f(x) + (S_b^1 \cdot t)^{S_b^2} \cdot \text{SVC}(S_b^3, x) \quad (1.48)$$

bağıntısını kullanmışlardır. Bu araştırmacılar S_b^1 için 0.5, S_b^2 ve S_b^3 için 1 ya da 2 değerlerinin kullanılmasını önermektedirler. Bu dinamik fonksiyon amaç fonksiyonuna uygulanan cezayı, iterasyon sayısı ilerledikçe artırmaktadır.

Kazarlis ve Petridis (1998) gerçekleştirdikleri çalışmada; F_o önem faktörünü, p toplam sınırlayıcı sayısını, wf_i i sınırlayıcısı için ağırlık katsayısını, $d_i(S)$ S çözümünün i . sınırlayıcısı ihlal miktarını, $\Phi_i(.)$ ihlalin bir fonksiyonunu, C_e ceza eşik değerini, η_s S çözümü uygun bölgede ise 1 diğer durumlarda 0 değerini alan bir katsayıyı, $V(t)$ 0 ile 1 arasında değer alan mevcut iterasyon numarasının (t) bir fonksiyonunu ve,

$$\eta_i = \begin{cases} 1, & i \text{ sınırlayıcısı ihlal edilirse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (1.49)$$

şeklinde belirlenen bir katsayıyı göstermek üzere, bir bireyin uygunluk değeri,

$$f'(x) = f(x) + V(t) \cdot \left(F_o \sum_{i=1}^p (\eta_i \cdot wf_i \cdot \Phi(d_i(S))) + C_e \right) \cdot \eta_s \quad (1.50)$$

şeklinde ifade edilen dinamik ceza fonksiyonuyla belirlenmektedir. Aynı araştırmacılar $V(t)$ fonksiyonu için en iyi başarımının, tt toplam iterasyon sayısını göstermek üzere,

$$V(t) = \left(\frac{t}{tt} \right)^2 \quad (1.51)$$

şeklindeki fonksiyonla elde edilebileceğini savunmaktadırlar.

Bazı araştırmacılar dinamik ceza fonksiyonlarının statik fonksiyonlara göre daha iyi sonuç verdiğini ileri sürmektedir. Diğer taraftan ceza katsayılarının uygun bir şekilde belirlenememesi durumunda, ceza fonksiyonu yönteminin kullanıldığı evrimsel algoritma uygun bölgede bulunan optimum olmayan yada uygun bölgede bulunmayan sonuçlara yakınsadığı belirtilmektedir (Coello,2002).

1.3.3.3. Isıl İşlem Ceza Fonksiyonları

Michalewicz ve Attia (1994) metallerdeki ısıtma işlemine benzetmeye dayanan bir ceza fonksiyonu yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemde ceza katsayıları, bir yerel optimum çözüm yakalandıktan sonra birçok iterasyonda değiştirilmektedir. Herbir iterasyonda sadece aktif sınırlayıcılar dikkate alınmakta ve ceza, iterasyon ilerledikçe, artırılmaktadır. Durum böyle olunca uygun olmayan bireyler son iterasyonlarda ağır bir şekilde cezalandırılmaktadır.

Bu araştırmacılar kullandıkları ceza fonksiyonu yönteminde sınırlayıcıları; doğrusal eşitlik ve eşitsizlikler, doğrusal olmayan eşitlik ve eşitsizlikler olmak üzere dört gruba ayırmaktadırlar. Tüm doğrusal olmayan eşitlik ve ihlal edilen doğrusal olmayan eşitsizlik tipi aktif sınırlayıcılardan oluşan bir küme oluşturulmaktadır. τ soğuma sürecinde kullanılan bir sıcaklık değerini, m eşitsizlik tipi sınırlayıcı sayısını, p toplam sınırlayıcı sayısını, S_a aktif sınırlayıcılardan oluşturulan bir kümeyi göstermek ve,

$$\chi_i(x) = \begin{cases} \text{Eğer } 1 \leq i \leq m \text{ ise} & \max[0, g_i(x)] \\ \text{Eğer } m+1 \leq i \leq p \text{ ise} & |h_i(x)| \end{cases} \quad (1.52)$$

olmak üzere, nesildeki bireylerin uygunluk değerleri,

$$f'(x) = f(x) + \frac{1}{2\tau} \sum_{i \in S_a} \chi_i^2(x) \quad (1.53)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Her bir iterasyonda τ sıcaklığı düşürülmekte, önceki iterasyondaki en iyi birey kullanılarak yeni bir nesil oluşturulmaktadır. Önceden tanımlı bir soğuma sıcaklığına ulaşıldığında ise süreç sonlandırılmaktadır.

Bu konuda benzer bir yöntem de Carlson ve Shonkwiler (1998) tarafından geliştirilmiştir. Bu araştırmacılar, g sınırlayıcı aşım miktarını gösteren ve sınırlayıcı ihlal edilmediğinde sıfır değerini alan bir katsayıyı, T_s evrim süreci boyunca sıfıra yaklaşan algoritma koşum süresinin bir fonksiyonunu göstermek üzere, ceza katsayısını,

$$CK = e^{-g/T_s} \quad (1.54)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Bu katsayı kullanılarak herhangi bir birey için uygunluk değeri,

$$f'(x) = CK \cdot f(x) \quad (1.55)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu şekilde hesaplanan ceza katsayısı başlangıçta küçük olmakta ve zamanla artmaktadır. Bu durumda son nesillerde uygun olmayan bireyler saf dışı bırakılmaktadır. Anılan araştırmacılar soğuma sürecini (T_s) tanımlamak için, T_{i-1} önceki iterasyonda kullanılan sıcaklığı göstermek üzere,

$$T_s = \frac{1}{\sqrt{T_{i-1}}} \quad (1.56)$$

ifadesini kullanmışlardır.

Joines ve Houck (1994) tarafından önerilen ısıtma işlemine dayalı bir ceza fonksiyonu yönteminde ise, S_b^1 , S_b^2 ve S_b^3 önceden belirlenen katsayıları, t nesil numarasını, $SVC(S_b^3, x)$ (1.47) bağıntısındaki ifadeyi göstermek üzere, bir bireyin uygunluk değeri,

$$f'(x) = f(x) + e^{(S_b^1 \cdot t)^{S_b^2} SVC(S_b^3, x)} \quad (1.57)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu araştırmacılar bu bağıntıdaki S_b^1 katsayısının 1, S_b^2 ve S_b^3 katsayılarının ise 0.5 olarak dikkate alınmasını önermektedirler. Bu yöntemde normalize edilmemiş sınırlayıcılar kullanıldığından yöntemin başarımı problemin türüne göre farklı olmaktadır.

1.3.3.4. Uyarlanabilen Ceza Fonksiyonları

Hadj-Alouane ve Bean (1997) arama sürecinde önceki iterasyonlardaki bilgiyi kullanan bir ceza fonksiyonu yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde belirli bir sayıdaki (k) nesilde belirlenen en iyi bireyin uygun ve uygun olmama durumları sırasıyla Durum 1 ve Durum 2 olarak gösterilmektedir. Yöntemde, m eşitsizlik tipi sınırlayıcı sayısını, n eşitlik tipi sınırlayıcı sayısını, $CK(t)$ ceza katsayısını göstermek üzere, bir bireyin uygunluk değeri,

$$f'(x) = f(x) + CK(t) \left[\sum_{i=1}^m g_i^2(x) + \sum_{j=1}^n |h_j(x)| \right] \quad (1.58)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. β_1 ve β_2 ; $\beta_1, \beta_2 > 1$, $\beta_1 > \beta_2$ ve $\beta_1 \neq \beta_2$ koşullarını sağlayan birtakım katsayıları göstermek üzere, bir sonraki nesilde kullanılan ceza katsayısı,

$$CK(t+1) = \begin{cases} \text{Durum 1 için} & (1/\beta_1) CK(t) \\ \text{Durum 2 için} & \beta_2 CK(t) \\ \text{Diğer durumlar için} & CK(t) \end{cases} \quad (1.59)$$

şeklinde değiştirilmektedir. Diğer bir deyişle bir sonraki nesilde kullanılacak ceza katsayısı ($CK(t+1)$), son k adet nesildeki en iyi bireylerin tümünün uygun olması durumunda, azaltılmakta, tümü uygun olmaması durumunda artırılmakta, uygun yada uygun olmayan bireyler bazı nesillerde en iyi birey olarak bulunması durumunda ise değiştirilmemektedir. Bu yöntemin sakıncası, aramada önemli bir bilgi sağlayan k nesil sayısının nasıl seçileceği ve verilen çözümün yeterli düzeyde cezalandırılmasını sağlayan, β_1 ve β_2 değerlerinin nasıl tanımlanacağı sorularının cevaplandırılmasıdır.

Smith ve Tate (1993) tarafından önerilen ceza fonksiyonu yöntemini daha sonra Coit vd. (1996) geliştirmiştir. Bu yöntemde ulaşılan iterasyona kadar bulunan en iyi çözümlerin uygunluklarına göre ceza büyüklüğü dinamik olarak iyileştirilmektedir. ff_t herhangi bir t nesline kadar bulunan uygun bölgedeki en iyi bireyin amaç fonksiyonu değerini, ff en iyi bireyin cezalandırılmamış amaç fonksiyonu değerini, $g_i(x)$ i sınırlayıcısının ihlal miktarını, k ceza derecesini ayarlayan bir katsayıyı, NFT çözümün uygun bölgeye yakınlığına karar vermede kullanılan bir eşik değeri göstermek üzere, bir bireyin uygunluğu,

$$f'(x) = f(x) + (ff_t - ff) \sum_{i=1}^m \left(\frac{g_i(x)}{NFT(t)} \right)^k \quad (1.60)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Bu yöntem Norman ve Smith (1997) tarafından tesis düzenleme problemine uygulanmıştır. Yöntemin en önemli sakıncası NFT'nin, probleme bağlı olması nedeniyle, her problem için farklı bir değerin belirlenmesini gerektirmesidir.

NFT_0 ; NFT için bir üst sınırı, t nesil numarasını ve S_b uygun bölgenin araştırılmasını sağlayan bir sabiti göstermek üzere, Coit vd. (1996) NFT'nin,

$$NFT = \frac{NFT_0}{1 + S_b(t)} \quad (1.61)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Burada verilen bağıntıda olduğu gibi NFT'nin tanımlanması için bazı bağıntılar bulunmasına rağmen, bunun değeri kullanıcı tarafından belirlenen ek bir parametre olarak kalmıştır. Bununla birlikte ff_t 'nin ff 'den çok büyük olması, nesildeki tüm bireyler için cezanın oldukça büyük olması sonucuna götürmektedir. Bu duruma uygulamada çok fazla rastlanmamaktadır (Coit vd., 1996). Ancak bu araştırmacılar her ne olursa olsun başlangıç nesilleri için ff_t ve ff değerlerini değiştirmeyi önermişlerdir. Ayrıca bağıntı (1.60)'dan görüldüğü gibi ff_t ile ff 'nin eşit olması durumda ceza "0" değerini almaktadır. Bu durum nesildeki tüm uygun olmayan bireylerin cezalandırılmaması anlamına gelmektedir. Bu husus en iyi cezalandırılmamış bireyin uygun bölgede bulunduğu kabulüne dayanmaktadır. Ancak birey her zaman uygun bölgede bulunmak durumunda olmadığından anılan kabul yanıltıcı olmaktadır.

Gen ve Cheng (1996) ise Coit vd. (1996)'nin önerdiği yöntemin değiştirilmiş bir biçimini kullanmışlardır. Bu değiştirilmiş yöntemde $\Delta b_i(x)$,

$$\Delta b_i(x) = \max[0, g_i(x) - NFT] \quad (1.62)$$

ile ifade edilen i sınırlayıcısının ihlalinin göstermek üzere, ceza katsayısı ve her bir bireyin uygunluğu sırasıyla:

$$CK(x) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\Delta b_i(x)}{NFT} \right)^k \quad (1.63)$$

$$f'(x) = f(x) \cdot CK(x) \quad (1.64)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Yöntem Gen ve Cheng (1996) tarafından test problemlerine uygulanmamış, sadece tümleşik (combinatorial) optimizasyon problemlerinde kullanılmıştır (Coello,2002).

Eiben vd. (1998) 3 renkli grafik problemine başarılı bir şekilde uygulanabilen uyarlanabilen bir ceza fonksiyonu önermişlerdir. Bu yöntemde de, diğer uyarlanabilen ceza fonksiyonu yöntemlerinde olduğu gibi, kullanılan ceza katsayıları evrim süreci esnasında değiştirilmektedir. Bununla birlikte yöntem çeşitli katsayıların önceden belirlenmesini gerektirmekte ve sadece tümleşik optimizasyon problemlerine uygulanabilmektedir.

Rasheed (1998) evrimsel sürecin başında ceza katsayısının küçük bir değer alındığı ve birey uygunluklarının azalmasıyla artırıldığı, birey uygunluklarının artmasıyla azaldığı bir ceza fonksiyonu yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, optimumun genellikle sınırlayıcılara yakın bölgelerde olması nedeniyle, bu bölgelerde iyi bir araştırmanın gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Teknik literatürde çok hızlı uçak tasarımı gibi birçok mühendislik problemine başarıyla uygulanmıştır. Smith ve Tate (1993)'nin çalışmasından esinlenerek geliştirilmiş bu yöntemde ceza katsayısı için bir başlangıç değerinin tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca, ani değişimleri engellemek amacıyla ceza katsayısının artım ve azalımı için, belirli sınırların tanımlanması da gerekmektedir.

Crossley ve Williams (1997) mevcut nesil sayısına, nesildeki bireylerin uygunluk değerlerinin standart sapma ve varyansına dayalı birçok ceza fonksiyonu yöntemini farklı mühendislik problemleri üzerinde denemişler ve uyarlanabilen ceza fonksiyonu yöntemlerinin diğerlerine göre üstünlüğünü göstermişlerdir. Bununla birlikte nesildeki bireylerin uygunluk değerlerinin standart sapma ve varyansına dayanan bu yöntemler çok fazla bilgisayar kapasitesi gerektirmektedir.

1.3.3.5. Yarı Evrimsel Cezalar

Yarı evrimsel cezalardan biri Coello (2000) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, $f(x)$ bir kromozomda kodlanan değişken kümesinden elde edilen amaç fonksiyonunun değerini, CK_1 ve CK_2 tamsayı olan iki ceza katsayısını, i_s sıfırdan başlayan ve ihlal edilen her bir sınırlayıcı için, ihlal miktarına bakılmaksızın, birer artırılan bir sayacı göstermek ve sınırlayıcıların ihlal miktarının toplamı,

$$g = \sum_{i=1}^n g_i(\bar{x}) \quad \forall g_i(\bar{x}) > 0 \quad (1.65)$$

olmak üzere herhangi bir bireyin uygunluğu,

$$f'(\bar{x}) = f(\bar{x}) - (g \cdot CK_1 + i_s \cdot CK_2) \quad (1.66)$$

bağıntıyla hesaplanmaktadır. Bu yöntemde ceza iki kısma ayrılmak suretiyle evrimsel algoritmada ihlal miktarı bilgisiyle birlikte kaç sınırlayıcının ihlal edildiği bilgisi de kullanılmaktadır. Bu yolla hesaplamada P_1 ve P_2 ile ifade edilen ve boyutları M_1 ve M_2 olan iki farklı nesil dikkate alınmaktadır. Bunlardan P_1 neslinde asıl bireyler bulunmakta, P_2 neslinde ise P_1 'deki bireylerin uygunluk değerini hesaplamak için ceza katsayıları (CK_1 ve CK_2) bulunmaktadır. Yöntemde iki nesil için kullanılan maksimum iterasyon sayıları $G_{\max1}$, $G_{\max2}$ ve M_1 , M_2 nesil boyutlarının önceden deneysel (ampirik) olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Burada anılan değerlerin uygun seçilmemesi durumunda, çok fazla uygunluk fonksiyonunun değerlendirilmesinin gerekebileceğini ve bunun da optimizasyon süresini uzatacağını belirtmek uygun olmaktadır.

1.3.3.6. Ayrık Genetik Algoritma

Le Riche vd. (1995) çalışmalarında her sınırlayıcı için iki ceza katsayısı kullanan ayrık bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. İki farklı katsayı kullanılmasının amacı; bireylerin iki alt neslini koruyarak ağır ve ılımlı cezalar arasında dengeyi sağlamaktır. Yöntemde birey sayısının iki katı olan ($2m$) bir nesil oluşturulmakta ve bireyler biri ağır diğeri ılımlı olmak üzere iki ceza katsayısıyla cezalandırılmaktadır. Daha sonra iki sıralı liste oluşturulmakta ve bu listeler birleştirilmektedir. Çaprazlama ve mutasyon gibi genetik işlemcilerin kullanılması için en iyi m adet birey listeden yeni neslin ebeveynleri olarak seçilmektedir. Bu yöntemde ceza katsayılarının tanımlanması için bazı öneriler yapılmış olmasına rağmen, her farklı problemde kullanılabilecek elverişli katsayı değerlerinin üretilmesi kolay olmamaktadır.

1.3.3.7. Yok Etme Ceza Fonksiyonları

Yok etme (ölüm) cezası olarak adlandırılan ve uygun olmayan bireylerin reddedilmesi şeklinde uygulanan bu yöntemde, sınırlayıcıları işlemek kolay olduğu gibi hesaplamalar da hızlı olmaktadır (Coello, 2002). Çünkü bu tür hesaplamada bir çözüm, sınırlayıcıları ihlal ettiğinde bunun uygunluk değeri sıfır olarak atanmaktadır. Bu durumda çözümün ihlal derecesini değerlendirmek için ek bir çözümlemeye gerek kalmamaktadır. Bu işlem genel olarak her iterasyonda uygun bir çözüm bulunana kadar, yeni bir aday çözüm oluşturulduğundan bu işlem zaman almakta ve uygun bölgeye yaklaşmak zor olmaktadır.

Evrimsel algoritmalar arasında yok etme cezası kullanılmakla birlikte bu sadece uygun arama uzayının dışbükey olduğu ve tüm arama uzayının büyük bir kısmını kapladığı problemlerle sınırlı olmaktadır. Bu yaklaşımın sakıncası aramaya yol göstermek üzere, evrimsel algoritma tarafından oluşturulabilecek, uygun olmayan çözümlere ilişkin bilgileri kullanmamasıdır. Yaklaşımın bir diğer sakıncası da, genellikle rastgele üretilen başlangıç nesillerinde uygun birey olmaması durumunda, tüm birey uygunluklarının sıfır olarak alınmasından dolayı evrimsel sürecin gelişmemesidir. Teknik literatürde de evrimsel algoritmalarla yok etme cezası kullanımının iyi bir seçenek olmadığını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır (Michalewicz,1995; Michalewicz ve Nazhiyath,1995; Coit ve Smith,1996; Michalewicz ve Schoenauer,1996).

1.3.4. Algoritma Durdurma Ölçütleri

Algoritma durdurma ölçütleri konusunda teknik literatürde birçok ölçüt bulunmaktadır. Bu ölçütler; kaynak (reference), tükenme (exhaustion), gelişim (improvement), dağılım (dispersion) tabanlı ölçütler ve birleşik ölçütler olarak sınıflandırılmaktadır. Aşağıda kısaca bu ölçütler üzerinde durulmaktadır (Zielinski vd., 2005).

✓ **Kaynak Ölçütleri:** Bu ölçüte göre algoritmada kullanılan nesildeki bireylerin önceden belirlenmiş bir oranı optimum sonuca ulaştığında yakınsamanın sağlandığı kabul edilerek iterasyon durdurulmaktadır. Mühendislik problemlerinde genellikle optimum sonuç önceden bilinmemektedir. Durum böyle olunca bu ölçüt optimum sonucu önceden

bilinen problemlere uygulanmakta ve buradan elde edilen bilgiler diğer problemlere uygulanmaktadır.

✓ Tükenme Tabanlı Ölçütler: Evrimsel algoritmalarda sıkça kullanılan bu ölçütte göre, bilgisayarla hesap olanaklarının sınırlı olması nedeniyle, belirli bir iterasyon sayısı, amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı yada bilgisayar çalışma süresi dikkate alınarak optimizasyon işlemi durdurulmaktadır.

✓ Gelişim Tabanlı Ölçütler: Bu ölçüte göre, algoritmanın işleyişi esnasında iterasyonlarda elde edilen değerler arasındaki farkın çok küçük olması durumunda elde edilen son değer potimum olduğu kabul edilerek optimizasyon işlemi durdurulmaktadır. Bu ölçütlerin birine göre algoritma, belirli sayıdaki nesil boyunca en iyi amaç fonksiyonu değerindeki gelişim bir eşik değer altına indiğinde durdurulmaktadır. Bir diğerinde ise en iyi amaç fonksiyonu yerine ortalama amaç fonksiyonu değeri kullanılmaktadır.

✓ Dağılım Tabanlı Ölçütler: Bu ölçütlere göre algoritmalarda genellikle bireylerin tümü optimum değere yakınsamaya çalışmaktadır. Nesildeki bireylerin amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark pratik olarak kalmayınca yakınsamanın gerçekleştiği düşünülmekte, optimum sonuca nesildeki bireylerin en iyi bireye olan mesafesi denetlenmek suretiyle ulaşılmaktadır.

✓ Birleşik Ölçütler: Bu ölçütler yukarıda özetlenen ölçütlerin birkaçının birlikte kullanılmasıyla oluşturulan ölçütlerdir.

1.4. Optimizasyon Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar

1.4.1. Betonarme Yapı Elemanlarıyla İlgili Bazı Çalışmalar

Haug Jr ve Kirmser (1967) yinelemeli bir yöntem olan Genelleştirilmiş Newton Algoritmasını izostatik kirişlere uygulamışlardır. Bu çalışma dijital bilgisayarların, optimum tasarım aracı olarak, kullanıldığı ilk uygulamalardan biridir.

Enerji ölçütü ve sınırlama gradyanına dayanan bir arama algoritması kullanan bir yöntem Venkayya (1971) tarafından geliştirilmiş ve statik yükleme altındaki yapı elemanlarına uygulanmıştır. Bu çalışmada minimize edilecek parametre olarak yapı elemanın ağırlığı alınmış, yöntem kafes, çerçeve ve kirişlere uygulanmıştır.

Chou (1977) Lagrange çarpanı yöntemi kullanarak tablalı kirişlerin ACI yönetmeliğine göre minimum maliyetli tasarımlarını yapmıştır.

Karihaloo (1979) tekil yüklenmiş basit kirişte oluşan en büyük sehimini minimize etmek için bir yöntem kullanmıştır.

Kirsch (1983) çok açıklıklı betonarme sürekli kirişin yinelemeli bir yöntemle boyut optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

Saouma ve Murad (1984), Newton yöntemine benzer bir yolla sınırlamasız optimizasyon tekniği ile ceza fonksiyonu yöntemlerinin birleştirilmiş halini kullanarak, eşit yayılı yüklü öngerilmeli basit bir kirişin maliyetinin minimizasyonu üzerinde çalışmışlardır.

Prakash vd. (1988) Lagrange ve Simpleks yöntemiyle betonarme kesitlerin optimizasyonu için, kalıp, donatı ve beton maliyetini dikkate alan bir model önermişlerdir.

Chakrabarty (1992) betonarme kirişlerin optimum tasarımı için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde minimum maliyet için çelik, kalıp ve beton maliyetleri dikkate alınmış, çözümde geometrik programlamayı kullanmıştır.

Al-Salloum ve Siddiqi (1994) çalışmalarında basit kirişin yüksekliğini ve donatı alanını dikkate alarak maliyetini optimize eden kapalı bir çözüm sunmuşlardır.

Zielinski vd. (1995) iç ceza fonksiyonu yöntemini kullanarak Kanada yönetmeliklerine göre dikdörtgen kesitli kalın kolonların minimum maliyetli tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir.

Lin ve Frangopol (1996) Otoyol köprülerine ilişkin betonarme tablalı kirişlerin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada AASHTO'nun karayolu köprüleri yönetmeliği hükümlerine uyulmuştur. Yük ve Dayanım katsayılarının kullanıldığı tasarım yöntemi ile güvenilirliğe dayalı başka bir yöntemle göre iki farklı çözüm gerçekleştirmişlerdir. Her iki yöntemle çözümler doğrusal olmayan programlamayla gerçekleştirilmiştir.

Sarıbaş ve Erbatur (1996) betonarme istinat duvarlarının boyut optimizasyonunu sınırlayıcı doğrusal olmayan programlamayla yapmışlardır. Amaç fonksiyonu duvarın ağırlık ve maliyet fonksiyonu olarak iki şekilde seçilmiş, uygulamalardan elde ettikleri bulguları irdelemişlerdir.

Coello vd. (1997) donatı, beton ve kalıp maliyetlerine göre genetik algoritma kullanmak suretiyle betonarme basit kirişin maliyet optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bunların bu çalışması metahöristik optimizasyon yöntemlerinin betonarme yapılar da kullanıldığı ilk çalışmalardan biri olmuştur.

Fadaee ve Grierson (1998) betonarme perde duvarlı yapıların optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Bu araştırmacılar çalışmalarında ACI yönetmeliği ve optimizasyonda Optimumluk Ölçütünü kullanmışlardır.

Ceranic vd. (2001) betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımında Isıl İşlem Algoritmasını kullanmışlardır. Elde edilen bulguların irdelenmesiyle Isıl İşlem Algoritmasının bu tip yapılara başarılı bir şekilde uygulanabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Lepš ve Šejnoha (2003) betonarme sürekli kirişlerin maliyet optimizasyonunu Isıl İşlem Algoritması kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çözümleri çeşitli mutasyon oranları için gerçekleştirmiş ve kesme donatısının etkisini de dikkate almışlardır.

Govindaraj ve Ramasamy (2005) çalışmalarında betonarme sürekli kirişlerin optimizasyonunu Hindistan Yönetmeliğini (IS456,2000) kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Govindaraj ve Ramasamy (2007) Genetik Algoritmayı, Akın ve Saka (2010) Armoni Arama Algoritmasını kullanarak betonarme kolonları maliyet bakımından optimize etmişler ve sonuçlarını ZielinskiI vd. (1995)'nin çalışmasından elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

Babu ve Basha (2008) Betonarme istinat duvarlarının güvenilirliğe dayalı optimum dayanımını gerçekleştirmişlerdir. Toplam 10 göçme modunun dikkate alındığı çalışmadan elde edilen bulgular belirlenen kesitlerin teknik literatürde mevcut olanlardan (Bowles,1996; Sarıbaş ve Erbatur,1996; Das, 1999) daha küçük olduğunu göstermiştir.

Fragiadakis ve Papadrakakis (2008) deprem yükleri altındaki betonarme yapıların optimum tasarımı için doğrusal olmayan tepki spektrumu çözümlemesine dayanan bir yöntem önermişlerdir. Tasarımı, kesinsel (deterministik) bir yöntem ve güvenilirliğe dayalı stokastik yöntem olmak üzere iki şekilde gerçekleştirmişler, optimizasyon yöntemi olarak Evrimsel Stratejiyi kullanmışlar, bu yöntemin, deprem etkisindeki yapıların tasarımında, maliyeti azaltabileceği kanısına varılmıştır.

Biondini ve Frangopol (2009) kemirici ortamlardaki betonarme kesitlerin güvenilirliğe dayalı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyonda Monte Carlo simülasyonu ile ayırık gradyan tabanlı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda donatı yeri ve miktarı ile beton örtüsü kalınlığının yapının dayanıklılığında önemli rol oynadığını göstermişlerdir.

Akın ve Saka (2010) betonarme konsol istinat duvarlarının maliyet optimizasyonun Armoni Arama Algoritması kullanarak gerçekleştirmiş ve hesaplarda ACI 318'e (2005) uymuşlardır.

Martí ve González-Vidos (2010) çalışmalarında öndöküm betonarme yaya köprüsünün maliyet bakımından optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu optimizasyon işleminde beton, çelik ve kalıp maliyetlerini dikkate alınmışlardır. Optimizasyon algoritması olarak Kabul Eşiği (Threshold Acceptance) algoritması ile Isıl İşlem Algoritmasını kullanmış, elde edilen bulgular karşılaştırılarak bazı sonuçlara varılmışlardır.

Kaveh ve Abadi (2011) betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımında Armoni ve Geliştirilmiş Armoni Arama Algoritmalarını kullanmışlardır. Amaç fonksiyonunun yapının maliyet fonksiyonu olarak alındığı bu çalışmada ACI318 yönetmeliğine uyulmuştur.

Fedghouche ve Tiliouine (2012) betonarme tablalı kirişlerin tasarım yükleri altında minimum maliyet bakımından optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Eurocode 2 (2005) yönetmeliğine uyulan bu çalışmada İndirgenmiş Gradyan adıyla anılan bir yöntem kullanılmıştır. Sonuç olarak bu araştırmacılar geleneksel yöntemle tasarıma göre daha ekonomik kesitlerin etkili bir şekilde elde edilebildiğini ileri sürmüşler ve yöntemin teknik literatürde bulunan diğer yöntemlere göre daha kolay uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Pei ve Xia (2012) betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımını Genetik, Parçacık Sürü ve Isıl İşlem Algoritmalarını kullanarak gerçekleştirmişler ve bu yapılar için anılan algoritmaların başarıyla kullanılabileceği kanısına varmış olmakla birlikte etkinliği yönünden Parçacık Sürü Algoritmasının kullanılmasını önermişlerdir.

Betonarme çerçevelerin optimum tasarımı da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu incelemelerde; Doğrusal Programlama (Krishnamoorthy,1973), Doğrudan Arama Yöntemi (Choi ve Kwak,1990; Kwak ve Kim,2008), Isıl İşlem Algoritması (Balling ve Yao,1997), Armoni Arama Algoritması (Akın,2010) ve Genetik Algoritma (Rajeev ve Krishnamoorthy,1998; Camp vd.,2003; Lee ve Ahn,2003; Kwak ve Kim,2009) gibi birçok yöntemi kullanılmıştır.

1.4.2. Sığ Tünellerle İlgili Bazı Çalışmalar

Bilindiği gibi aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tüneller sığ tünellerdir. Bu yapılarla ilgili çalışmaların büyük bir kısmında deprem esnasındaki davranışları incelenmiştir. Zemin içerisine gömülü olan bu yapılar, depremlerden yerüstü yapıları kadar

etkilenmemekle birlikte, birçok araştırma sığ tünellerin depremlerden derin tünellere göre daha fazla etkilendiklerini göstermektedir (Sharma ve Judd,1991; Power vd.,1998; Kirzhner ve Rosenhouse,2000; Hashash vd.,2001; Öztürk ve Durmuş,2009).

Kovari ve Tisa (1982) dairesel kesitli aç-kapa tüneller için geliştirdikleri birtakım modellerden elde ettikleri bulguları aynı tünellerden aldıkları ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Hesaplanan ve ölçülen bulgular arasında yeterli bir yakınlık elde etmişlerdir.

Kovari ve Tisa (1998) dairesel kesitli çift gözlü aç-kapa tüneller için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Bu model yardımıyla çeşitli zemin koşulları ve belirli kaplama kalınlık değerleri için tasarımda kullanılabilecek bazı çizelgeler oluşturmuşlardır.

Nishiyama vd. (1999) aç-kapa tünellerinin deprem davranışlarını incelemek amacıyla öncelikle üç aç-kapa tünelineki hasarları incelemişler ve bunların sayısal modellerini oluşturmuşlardır. Bu aç-kapa yapılar için oluşturulan birçok laboratuvar modeli için sarsma tablası deneyleri de gerçekleştirerek elde edilen bulguları, sayısal olarak elde edilenlerle birlikte değerlendirmişlerdir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında aç-kapa yapılar için yeni bir sismik tasarım yöntemi önermişlerdir.

Penzien (2000) çalışmasında dikdörtgen kesitli aç-kapa tünellerde depremden dolayı oluşan kaykılmayı, geliştirdiği yapı-zemin etkileşimi modeliyle, analitik olarak ifade etmiştir.

Yoo vd. (2000) oluşturdukları büyük ölçekli laboratuvar modeliyle aç-kapa yöntemiyle inşa edilen kemer enkesitli tünellerin kısa dönemde oluşan yerdeğiştirmelerini incelemişlerdir. Bu incelemede dolgu zemininde herhangi bir sıkıştırma yapılmadığı kabul edilmiş, tünel kaplamasına etkileyen yükler ve yerdeğiştirmeler dolgu ilerledikçe ölçülmüştür. Deneyler sonucunda doldurulacak alanın dar olması durumunda tünele daha az zemin basıncının geleceği ve tünel kaplamasının yerdeğiştirmelerinin azalacağı kanısına varılmıştır.

Kim ve Yoo (2005) dikdörtgen kesitli aç-kapa yöntemiyle inşa edilen derin tünellere etkileyen düşey basınç gerilmelerini sonlu elemanlar yöntemini kullanan çeşitli bilgisayar programlarıyla ve AASHTO yönetmeliğindeki yöntemlere göre belirleyerek karşılaştırmışlardır.

Wang vd. (2005) kuvvetli deprem hareketi etkisindeki dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünellerin davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla doygun ve kuru zemin koşulları

için oluşturdukları laboratuvar modelleriyle, sayısal modellerden elde edilen bulguları karşılaştırmışlardır.

Nam vd. (2006) betonarme aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellerin etrafındaki zeminle etkileşimini dikkate alan bir sonlu elemanlar yazılımı gerçekleştirerek bu yapının tahmin edilen statik ve dinamik davranışını doğrulamaya çalışmışlardır. Bu incelemeyi betonarme tünelle onu çevreleyen zemin arasında arayüzey eleman kullanarak da gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada farklı donatı oranlarının davranışa etkileri de incelenmiş ve bu suretle betonarme aç-kapa tünellerin kırılma mekanizmaları, depreme göre yapısal çözümlemeyle araştırılmıştır.

Plumey vd. (2006) çalışmalarında gerçekleştirdikleri yapı-zemin etkileşimli yapısal çözümlemelerle zemin-yapı arayüzeyinde oluşan basınçların gerçek dağılımını elde etmeye çalışmışlardır. Çalışma dikdörtgen ve kemer en kesitli aç-kapa tüneller için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen basınç dağılımları Rankine teorisinden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

Akbas ve Yuksel (2007) betonarme dikdörtgen kesitli aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünellere etkiyen düşey tasarım yüklerini sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS programıyla belirleyerek bunları AASHTO yönetmeliğinde önerilen yöntemden elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

Ding vd. (2008) Kanada'da bulunan hızlı ulaşım amacıyla inşa edilmiş dikdörtgen kesitli aç-kapa tünellerin inşa teknikleriyle depreme göre betonarme tasarımlarında kullanılan gerilme ve kayılma tabanlı yöntemler konusunda bazı bilgiler vermişlerdir.

Perea vd. (2008) Dikdörtgen kesitli betonarme menfezlerin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu optimizasyon işleminde beton, çelik, kalıp, kazı ve dolgu maliyetleri dikkate alınmıştır. Optimizasyon algoritması olarak Rasgele Yürüme (Random Walk), Azalan Yerel Arama (Descent Local Search), Kabul Eşiği (Threshold Acceptance) ve Isıl İşlem Algoritmaları kullanılmış, bu yöntemlerle elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır.

Tang vd. (2008) kamu hizmetlerinde kullanılan dikdörtgen kesitli aç-kapa tünellerinin deprem başarımlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada sarsma tablası üzerinde oluşturulan laboratuvar modeli üzerinde yapılan deneyler ve ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modellerin yapısal çözümlemesi sonucunda elde edilen bulgular çeşitli durumlar için karşılaştırılmıştır.

Yubin ve Rushan (2008) 1995 Kobe depreminde hasar gören Dakai metro istasyonunu, yapı zemin etkileşimini dikkate alan, bir sonlu elemanlar modeliyle incelemiştir. Doğrusal olmayan yapısal çözümlemede iki boyutlu düzlem şekildeğiştirme elemanı kullanmışlar ve betonarme istasyon yapısını çubuk elemanlarla modellemiştir. Kobe deprem kayıtlarının kullanıldığı bu çalışmada yapının göçme mekanizması belirlenmiştir.

Zhang vd. (2008) sığ yeraltı yapılarında serbest alan yerdeğiştirmelerinin yapıya nasıl aktarıldığını incelemiştir. Bu incelemede sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri iki boyutlu doğrusal olmayan yapısal çözümlemelerden şekildeğiştirme aktarma katsayısı olarak adlandırdıkları bir katsayı tanımlamışlardır.

Anastasopoulos ve Gazetas (2009) çalışmalarında Yunanistandaki fay hattı üzerinde bulunan aç-kapa yöntemiyle inşa edilen iki karayolu tünelinin yapısal çözümlemesi ile tasarımı üzerinde durmuşlardır. Yapısal çözümleme tünel-zemin arayüzeyini modelleyerek sonlu elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada zeminin davranışı elastoplastik bir model kullanılarak temsil edilmiştir. Sonuç olarak büyük tektonik depremlerin beklendiği bölgelerde de aç-kapa tünellerin tasarımının mümkün olabileceği kanısına varılmıştır.

Carbonell vd. (2011) kesitleri dairesel kemer şeklinde olan betonarme menfezlerin maliyet yönünden optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu optimizasyon işleminde beton, çelik, kalıp, kazı ve dolgu maliyetleri dikkate alınmıştır. Algoritması olarak Azalan Yerel Arama (Descent Local Search), Kabul Eşiği (Threshold Acceptance) ve Isıl İşlem Algoritmalarını kullanarak, elde edilen bulgular karşılaştırmışlardır.

1.4.3. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla İlgili Bazı Çalışmalar

Baykaşoğlu vd. (2007) Yapay Arı Koloni Algoritmasını genelleştirilmiş atama problemine uygulamışlardır.

Karaboğa vd. (2007) Yapay Arı Koloni Algoritmasını Yapay Sinir Ağlarının eğitilmesi için kullanmışlar ve algoritmanın yapay sinir ağları için optimum ağırlık kümesinin elde edilmesinde etkili olduğu kanısına varılmıştır.

Quan ve Shi (2008) Yapay Arı Koloni Algoritmasını geliştirmişler, bu algoritmayı çok değişkenli 10 test problemine uygulayarak başarımını değerlendirmişlerdir.

Akay ve Karaboğa (2009) Yapay Arı Koloni Algoritmasını tamsayı programlama problemlerine uygulamışlar ve bazı test problemlerinden elde ettikleri bulguları Parçacık

Sürü Optimizasyon Algoritmasından elde edilenlerle karşılaştırmışlararak Yapay Arı Koloni algoritmasının tamsayı programlama problemlerine etkin bir şekilde uygulanabileceği kanısına varmışlardır.

Akay ve Karaboğa (2009) Yapay Arı Koloni Algoritmasında da kullanılan ve optimizasyon algoritmalarında başarımlı oldukça etkileyen denetim parametrelerinin etkisini incelemişlerdir.

Bao ve Zeng (2009) sınırlayıcısız problemlerde kullanılan basit Yapay Arı Koloni Algoritmasına çeşitli seçim mekanizmaları uygulamışlardır. Bu mekanizmalarla bazı test fonksiyonlarını çözmek suretiyle kullanılan bu mekanizmaların temel algoritmadan daha iyi sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir.

Kang vd. (2009) Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Nelder-Mead Simpleks yöntemini birleştirerek bir Melez Simpleks Yapay Arı Koloni Algoritması oluşturmuş ve bu algoritmayı ters çözümleme problemleri için önermişlerdir. Bu algoritmayı beton baraj-temel sisteminin çözümüne uygulamışlardır.

Karaboğa (2009) dijital IIR filtrelerinin tasarımı için Yapay Arı Koloni Algoritmasına dayanan bir yöntem tanımlamış ve diğer bazı algoritmalarla karşılaştırmıştır.

Karaboğa ve Akay (2009) Temel Yapay Arı Koloni Algoritmasını iyi bilinen test problemlerine uygulayarak, Armoni Arama, Arı Algoritmaları ve Geliştirilmiş Arı Algoritmalarıyla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada problem boyutunun algoritma başarımı üzerindeki etkisi incelenmiş ve algoritmalar denetim parametrelerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

Karaboğa ve Akay (2009) Yapay Arı Koloni Algoritmasını birçok test problemine uygulayarak elde edilen bulguları Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Algoritması, Differansiyel Gelişim Algoritması ve evrimsel strateji algoritmalarından elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

Narasimhan (2009) Yapay Arı Koloni algoritmasının paralel koşturulabilen şeklini geliştirmiştir. Bununla elde edilen sonuçların kalitesinin düşmediğini ve hızın arttığını savunmaktadır.

Pacurib vd. (2009) Yapay Arı Koloni Algoritmasının sudoku bulmacalarının çözümünde kullanmışlar ve bu tür bulmacaların çözümünde bu algoritmanın etkin olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Mezura-Montes ve Velez-Koeppel (2010) sınırlayıcı optimizasyon problemlerini çözümü için geliştirdikleri bir Yapay Arı Koloni algoritmasını 18 test problemine uygulayarak elde ettikleri bulguları irdelemişlerdir.

Zhang vd. (2010) Çalışmalarında Yapay Arı Koloni Algoritmasını kümeleme probleminin çözümünde kullanmışlar ve elde ettikleri bulguları genetik, tabu arama, ısıt işlem, karınca kolonisi ve K-NM-PSO algoritmalarından elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

Zhao vd. (2010) Genetik Algoritmayı ve Yapay Arı koloni algoritmasını birleştirerek melez bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı Genetik algoritmanın paralel hesaplama ve Yapay Arı Koloni Algoritmasının hız ve kendini geliştirme özelliklerinden faydalanabilmektir. Algoritmanın etkinliği boyutları farklı 4 test problemine uygulanmak suretiyle gösterilmiştir.

Zhu ve Kwong (2010) en iyi çözüm bilgisini Yapay Arı koloni Algoritmasına ekleyerek bu algoritmanın çözüm kümesini sömürme yeteneğini arttırdıklarını iddia etmektedirler.

Karaboğa ve Ozturk (2011) kümeleme problemlerinde Yapay Arı koloni Algoritmasını kullanmışlardır. Algoritmanın başarımı çeşitli kümeleme problemlerinde Parçacık Sürü Algoritması ve teknik literatürdeki diğer tekniklerle karşılaştırarak incelemişler, elde ettikleri sonuçlar Yapay Arı koloni Algoritmasının çok değişkenli veri kümelemesinde etkin bir biçimde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Omkar vd. (2011) tabakalı kompozit elemanların çok amaçlı tasarım optimizasyonu için genel bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma paralel vektör değerlendiren çok amaçlı Yapay Arı Koloni Algoritmasını temel almaktadır. Problemden, belirli dayanım koşulları sağlanırken, ağırlığı ve toplam maliyeti minimum yapmak amaçlanmaktadır. Bu çalışmada tasarım değişkenleri; tabaka sayısı, tabaka yönelimi ve her tabakanın kalınlığı olarak alınmıştır. Algoritma kullanılarak elde edilen bulgular, Parçacık Sürü Optimizasyon, Yapay Bağışıklık Sistemi ve Genetik Algoritmalar kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılmak suretiyle algoritmanın başarımı, çeşitli yükleme durumları için incelenmiştir.

Pan vd. (2011) çok-akışlı çizelgeleme problemini çözmek amacıyla Ayrık bir Yapay Arı Koloni Algoritması önermişlerdir. Önerdikleri algoritmanın teknik literatürde en iyi sonucu veren algoritmalarından başarımının daha yüksek olduğunu savunmaktadırlar.

Qian ve Su (2011) optimum kanal kesitinin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlemişlerdir. Bu algorithmada kullanılan çok amaçlı fonksiyon hidrolik ve ekonomik koşulları dikkate almaktadır. Araştırmacılar bu algoritmanın yüksek verimliliğe ve duyarlılığa sahip olması yanında uygulamasının kolay olduğunu göstermişlerdir.

Sönmez (2011) Yapay Arı Koloni Algoritması, kendini uyarlayabilen bir ceza fonksiyonuyla birleştirilmek suretiyle bu algoritmayı çelik kafes yapıların ağırlık optimizasyonunda kullanılmıştır. 5 farklı kafes sisteme uygulanan algorithmadan elde edilen bulgular, teknik literatürdeki diğer bazı algorithmalardan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak algoritmanın yapısal optimizasyon için etkin bir araştırma ve optimizasyon tekniği olduğu kanısına varmıştır.

Akay ve Karaboga (2012) Yapay arı Koloni Algoritmasını genellikle büyük ölçekli, doğrusal olmayan ve/veya sınırlamalı optimizasyona ilişkin mühendislik tasarım problemlerine uygulamışlardır. Bu araştırmacılar sınırlayıcısız problemler için etkili olan algorithmaya bir sınırlayıcı işleme yöntemi ilave etmişler ve bunu 9 sınırlayıcısız test problemi ile 5 iyi bilinen mühendislik problemine uygulanarak algoritmanın başarımını değerlendirmişlerdir.

Akay ve Karaboğa (2012) Yapay Arı Koloni Algoritmasını sınırlamalı optimizasyon problemlerine uygulanabilecek şekilde geliştirerek bunu bazı test problemlerine uygulamışlardır.

Chen vd. (2012) su kalitesi modellerinde benzetim hatalarının minimize etmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada çözdükleri iki örnekte Yapay Arı Koloni, Yapay Balık Sürüsü, Isıl işlem ve Genetik Algoritmalarını kullanmışlardır. Buna göre Yapay Arı Koloni Algoritmasının diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği kanısına varmışlardır.

Faluyi ve Arum (2012) İndirgeniş Gradyan Yöntemi ve Yapay Arı koloni Algoritması kullanarak çelik kirişlerin boyut optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. İngiliz yönetmeliklerine uyulan çalışmada iki algorithmadan elde edilen bulguların birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Gerhardt ve Gomes (2012) Yapay Arı Koloni Algoritmasını yay problemi ve frekans sınırlamalı çeşitli kafes sistemler gibi mühendislik problemlerine uygulayarak bunların şekil optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri bulguları teknik literatürdeki çeşitli yöntemlerle elde edilen bulgularla karşılaştırmış ve algoritmanın etkili bir optimizasyon aracı olduğu göstermişlerdir.

Kişi vd. (2012) nehirlerde sediment-akıntı ilişkisini Yapay Arı Koloni Algoritmasını Yapay Sinir Ağlarıyla birlikte kullanmak suretiyle modellemişler ve bu algoritmanın teknik literatürdeki diğer modellerden daha iyi sonuç verdiği kanısına varmışlardır.

Diğer taraftan Yapay Arı Koloni Algoritması çeşitli zaman çizelgelerinin ve ders programlarının hazırlanmasında (Bolaji vd.,2011; Küçüksille ve Tokmak,2011; Tahoeoneh ve Ziarati,2011), elektrik-elektronik alanında (Anandhakumar vd.,2011; Kadioğlu vd.,2010; Gozde ve Taplamacıoğlu,2011), güç iletim sistemlerinin tasarımında (Liu vd.,2011; Hemamalini ve Simon,2008; Ayan ve Kılıç,2011; Öztürk vd.,2011; Özyön vd.,2011) ve görüntü işleme problemlerinde (Cao vd.,2012; Fister vd.,2012; Hanbay vd.,2012) de kullanılmıştır.

1.5. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen enkesitli betonarme sığ tünellerin minimum maliyetle tasarımlarını Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritma kullanarak gerçekleştirmektir.

Bu amaçla çalışmanın birinci bölümünde tünellerin sınıflandırılması ve bunların kaplamaları konusunda birtakım bilgiler verilmiş, sığ tünel çeşitleri, bu tip tünellerin yapısal çözümlemelerinde dikkate alınan yük ve yük etkileriyle bu yüklerin birleşimleri, yapısal optimizasyona ilişkin gerekli bilgiler üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde Yapay Arı Koloni ve Genetik Algoritmalar tanıtılmakta, Yapay Arı Koloni Algoritması teknik literatürde mevcut bazı örnek tasarımlar üzerinde denenmekte, dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünellerin tasarımı için amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar için matematiksel ifadeler burada oluşturularak bunlarla Trabzon Kalekapısı Kavşağı Altgeçit tüneline minimum maliyetle tasarımı gerçekleştirilmesinden elde edilen bulguların geleneksel tasarım bulgularıyla karşılaştırılması da burada verilmektedir.

Çalışmanın bütününden çıkarılabilen bazı sonuç ve öneriler ise üçüncü bölümde özetlenmekte ve bu son bölümü kaynaklar listesi, ANOVA testinde kullanılan F dağılım çizelgesi ve hazırlanan yazılım arayüzünün (OPUS) kullanımına ilişkin iki adet ek bölüm izlemektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER

2.1. Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritma

2.1.1. Yapay Arı Koloni Algoritması

Gerçek arıların nektar arama davranışları: bal arısı sürüsü, dinamik olarak iş bölümü yapabilme ve çevresel değişimlere karşı uyarlanabilir cevap verebilme yeteneklerine sahip olan doğadaki en ilginç sürülerden biri olduğu bilinmektedir. Bal arılarının fotoğraflık hafıza, yol bulma becerisi, sezgisel kavrama yeteneği ve yeni yuva yeri seçerken toplu olarak karar verebilme yeteneği gibi birçok özeliğe sahip oldukları da bilinen bir gerçektir. Arıların sözkonusu iletişimleri, yiyecek aramaları, taşımaları, dağıtmaları ve saklamalarının kusursuz olarak yapılması gibi özellikleri araştırmacıları bunların davranışlarını modellemeye yöneltmiştir (Akay, 2009). Araştırmacılar çalışmalarında arıların; yiyecek aramalarından (Sato ve Hagiwara,1997; Lucic ve Teodorovic,2001; Bianco,2004; Wedde vd.,2004; Drias vd.,2005; Teodorović ve Dell’Orco,2005; Yang,2005; Chong vd.,2006; Pham vd.,2006; Karaboga ve Basturk,2007; Marković vd.,2007), çiftleşmelerinden (Abbass ve Teo,2001; Benatchba vd.,2005; Chong vd.,2006; Haddad vd.,2006; Afshar vd.,2007; Fathian vd.,2007; Koudil vd.,2007) ve kraliçe arılarla olan ilişkilerinden (Jung,2003; Azeem ve Saad,2004; Karcı,2004; Qin vd.,2004) esinlenmişlerdir.

Doğal bir arı kolonisindeki işler, arılar tarafından, bir iş bölümüne göre yapılmaktadır. Arıların iş bölümü yapabilme ve belli bir amaç için bir araya gelebilmeleri sürü zekasının önemli özellikleri olarak bilinmektedir. Tereshko (2000) tarafından önerilen yiyecek arama modelinde; yiyecek kaynakları, görevli ve görevsiz işçi arılar olmak üzere üç bileşen bulunmaktadır.

Yiyecek kaynakları, arıların nektar yada polen elde etmek amacıyla ulaşmaya çalıştıkları kaynaklar olarak bilinmektedir. Bir yiyecek kaynağının değeri o kaynağın; çeşidi, kovana yakınlığı, nektar kıvamı ve nektarın alınmasındaki kolaylık gibi birçok etmene bağlı olmaktadır. Basite indirmek için bazen kaynağın değeri, kaynağın zenginliği gibi tek bir ölçütle de ifade edilebilmektedir.

Görevi belirli işçi arılar, daha önceden belirlenen kaynaklardaki nektarların kovana getirilmesini sağlamaktadırlar. Bunlar aynı zamanda kaynağın kalitesi ve yeriyle ilgili bilgiyi de kovandaki arılarla paylaşmaktadırlar.

Görevi belirsiz arılar ise nektar toplayabilmek için kaynak arayışında olan arılardır. Bunlar içsel dürtüye yada bir dış etmene bağlı olarak rastgele kaynak arayışında olan kaşif arılar ve kovanda bekleyerek görevli arılardan gelen bilgiyi kullanmak suretiyle yeni bir kaynağa yönelen gözcü arılardan oluşmaktadır.

Arılar arasında bilgi paylaşımı gerçekleştirdikleri dansla sağlanmaktadır. Kovanda bulunan dans alanında bir arının gerçekleştirdiği dans esnasında diğer arılara ona antenleriyle dokunarak bulduğu kaynağın tadı ve kokusu ile ilgili bilgiyi almaktadırlar. Ziyaret edilen kaynağa daha fazla arı gönderebilmek için arı bu dansı kovandaki çeşitli alanlarda gerçekleştirerek kaynağa geri dönmektedir. Yapılan dansı; nektarın tadı, çıkarılmasındaki kolaylığı, kovandan olan uzaklığı, kıvamı, hava koşulları ve günün hangi vakti olduğu gibi birçok etmen etkilemektedir. Nektar kaynağının yön bilgisi de yine dansla verilmekte ve arılar yapılan dans sayesinde kaynak ile güneş arasındaki açığı anlayabilmektedirler. Arılar birleşik gözleriyle güneşle kendi yörüngeleri arasındaki açığı ölçebilmekte ve bu işlemi güneşin önünün kapalı olması durumunda bile polarize olmuş gün ışığından faydalananarak yapabilmektedirler. Uzaklığı ise enerji tüketimlerine göre hesaplayabilmekte, yüklerine göre farklı yüksekliklerde uçarak enerji tüketimlerini ayarlayabilmektedirler. Kaynağın uzaklığına göre arılar; dairesel dans, kuyruk dansı ve titreme dansı olarak adlandırılan dansları gerçekleştirebilmektedirler (Akay,2009).

Kaşif arılar tarafından kaynaklarla ilgili bilgiler dans alanında gözcü arılara iletildikten sonra gözcü arılar hangisini tercih edeceklerine kaynağın zenginliğine göre karar vermektedirler. Kaynak bulunduktan sonra arı kaynağın yerini hafızasında tutmakta ve nektar toplamaya başlamaktadır. Böylece bunlar görevli arı haline dönüşmektedir. Nektar toplayan arı kovana geri dönmekte ve topladığı nektarı yiyecek depolarına aktarmaktadır. Bu aktarım gerçekleştikten sonra arı aşağıdaki üç davranıştan birini yapmaktadır.

1) Gittiği kaynağı bırakarak bağımsız gözcü olmakta,

2) Gittiği kaynağa dönmeden önce dans ederek diğer arıları da aynı kaynağa yönlendirmekte,

3) Herhangi bir yönlendirme yapmadan kaynağa dönmektedir.

Arıların kendi kendilerine organize olabilmeleri:

- ✓ Negatif geribesleme (tüketilen kaynağın bırakılması),
- ✓ Pozitif geribesleme (kaynağın nektar miktarı ne kadar fazlaysa kaynağı seçen gözcü arı sayısının da buna bağlı olarak artması),
- ✓ Salınımlar (kaşif arıların nektar kaynağı bulabilmek üzere rastgele salınım yapmaları)
- ✓ Çoklu etkileşimler (Arıların nektar kaynağıyla ilgili bilgiyi dans alanında paylaşması) gibi özellikleri sayesinde sağlanmaktadır (Akay,2009).

Yapay Arı Koloni Algoritması adıyla anılan optimizasyon algoritması yukarıda açıklanan arıların gerçek nektar arama davranışlarından esinlenerek Karaboga (2005) tarafından geliştirilmiştir. Bu algoritma dışında teknik literatürde yine arı davranışlarını modelleyen Arı Koloni (Teodorovic,2003; Teodorović ve Dell’Orco,2005), Sanal Arı (Yang,2005) ve Arı (Pham vd.,2006) optimizasyon algoritmaları da mevcuttur. Tüm bu algoritmaların arasında birtakım farklılıklar bulunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasının temeli bazı kabullere dayanmaktadır. Bunlardan biri, her bir kaynaktaki nektarın sadece bir arı tarafından alınması ve dolayısıyla görevli arı sayısı ile toplam nektar kaynağı sayısının eşit olmasıdır. Bir nektar kaynağının yeri optimizasyon problemindeki olası çözümlerden birine, bu kaynaktaki nektar miktarı ise o kaynağın uygunluğuna karşılık gelmektedir. Nektarı tükenmiş olan kaynağın görevli arısı kâşif arı haline dönüşmektedir. Bu şekilde Yapay Arı Koloni Algoritması en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak arama uzayındaki çözümlerden problem için optimum çözümü bulmaya çalışmaktadır.

Bu algoritmaya ilişkin süreç aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- 1) Kaşif arılar sürecin başında rastgele nektar kaynağı aramaya başlamaktadırlar.
- 2) Nektar kaynağı bulan kaşif arılar görevli arı haline dönüşmekte ve buldukları kaynaklardan kovana nektar taşımaya başlamaktadırlar. Her bir görevli arı kovana getirdiği nektarı boşalttıktan sonra geldiği kaynağına tekrar geri dönmekte yada dans alanında sergilediği dans aracılığıyla taşıdığı bilgiyi gözcü arılara iletmektedir. Eğer görevli arının kullandığı kaynak tükenmiş ise bu arı kaşif arıya dönüşerek yeniden kaynak arayışına koyulmaktadır.

- 3) Kovanda bekleyen gözcü arılar da, zengin kaynakları işaret eden dansları izlemek suretiyle kaynağın uygunluğuna bağlı olarak, bir kaynağı tercih etmektedirler.

Bu süreç Yapay Arı Koloni Algoritmasında aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- 1) Başlangıç nektar kaynaklarını üret,

- 2) Üretilen kaynakları değerlendir,
- 3) İterasyon sayısını 1'e eşitle,
- 4) Görevli arılar nektar bölgelerine gönder (Görevli arı aşaması),
- 5) Görevli arılardan gelen bilgiye göre gözcü arılar için olasılık değerlerini hesapla,
- 6) Gözcü arıların olasılık değerlerine göre nektar kaynaklarını seç (gözcü arı aşaması),
- 7) Bırakılacak kaynaklara karar ver ve kaşif arı üretimi yap (kaşif arı aşaması),
- 8) Elde edilen en iyi kaynağı hafızada tut,
- 9) İterasyon sayısını bir artır,
- 10) Maksimum cevrim sayısına ulaşılmışsa işlemi bitir, ulaşılmamışsa 4. adıma dön.

2.1.1.1. Başlangıç Nektar Kaynaklarının Üretim Aşaması

Başlangıç nektar kaynaklarının üretilmesinde kovan çevresinde bulunan nektar kaynakları arama uzayı olarak düşünülmekte ve algoritmayı başlatmak üzere rastgele yiyecek kaynaklarının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Başlangıçta üretilen tüm nektar kaynaklarının uygun bir çözüme karşılık geleceği bir neslin oluşturulması zaman alıcı olduğu gibi bazı problemler için de çok zor olmaktadır. Zira Yapay Arı Koloni Algoritması başlangıçta üretilen çözümlerin uygun bölgede olmalarını önemsememektedir. Kâşif arıların gerçekleştirdiği bu işlem matematiksel olarak; $x_{\min}^j$ ve $x_{\max}^j$ sırasıyla j. tasarım değişkeninin alt ve üst sınırlarını, D tasarım değişkeni sayısını, SN nektar kaynağı sayısını göstermek ve $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$ olmak üzere:

$$x_i^j = x_{\min}^j + \text{rand } 0,1 \cdot x_{\max}^j - x_{\min}^j \quad (2.1)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Ayrıca her kaynağın geliştirilememe sayısını ifade eden ve ileriki aşamalarda kaynağın terk edilip edilmeyeceğini belirlemeye yarayan sayaç sıfırlanmaktadır.

Başlangıç aşamasını takiben tüm kaynakların uygunluklarının belirlenmesinin ardından görevli, gözcü ve kaşif arı aşamalarına geçilmek suretiyle çözümün iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Bu çözümde kullanılan algoritma, maksimum iterasyon

sayısına ulaştığında durdurulabileceği gibi diğer optimizasyon algoritmaları için kullanılan bir başka durdurma ölçütü de kullanılabilir.

2.1.1.2. Görevli Arı Aşaması

Görevli arı aşamasında herbir nektar kaynağının bir görevli arısı bulunduğu kabul edildiğinden nektar kaynaklarının sayısı görevli arı sayısına eşit olmaktadır. Bu aşamada görevli arı gittiği nektar kaynağı yakınında yeni bir kaynak belirleyerek bu kaynağı değerlendirmektedir. Mevcut kaynağın yakınında yeni bir kaynak belirleme işlemi; $i=1 \dots SN$, $j=1 \dots D$ 'ye kadar değişmek ve Φ_{ij} -1 ile 1 aralığında rastgele değer alan bir parametreyi, $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ olmak ve i 'den farklı bir çözüm indisini göstermek üzere:

$$v_i^j = x_i^j + \Phi_{ij} \cdot x_i^j - x_k^j \quad (2.2)$$

ifadesiyle yapılmaktadır. Sınırlamalı optimizasyon problemlerinde ise yeni bir kaynak belirleme işlemi; R_j $[0,1]$ aralığında düzgün dağılımlı rastgele bir sayıyı ve MR $[0,1]$ aralığında değer alan bir denetim parametresini göstermek üzere:

$$v_i^j = \begin{cases} R_j < MR & \Rightarrow x_i^j + \Phi_{ij} \cdot x_i^j - x_k^j \\ R_j \geq MR & \Rightarrow x_i^j \end{cases} \quad (2.3)$$

ifadesiyle gerçekleştirilmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi $[0,1]$ aralığında rastgele üretilen düzgün dağılımlı R_j parametresi, MR parametresinden küçükse çözüm değiştirilmektedir.

Bu işlem sonrasında çözümde en az bir değişim gerçekleşmemişse bu çözüme ilişkin tasarım değişkenlerinden rastgele seçilen bir tanesi kullanılmak suretiyle çözümde kullanılan nektar kaynağı değiştirilmektedir. Böylece en az bir tasarım değişkeninin değiştirilmesi garantilenmiş olmaktadır. Yukarıdaki bağıntıdan da görüleceği gibi x_i^j ve x_k^j arasındaki fark azaldıkça, diğer bir deyişle çözümler birbirine benzedikçe, x_i^j çözümündeki değişim azalmaktadır. Bu durum, arama uzayında optimum çözüme yaklaşıldıkça adım büyüklüğünün de azaltılarak ayarlandığı anlamına gelmektedir. Üretilen komşu çözümdeki

tasarım değişkenlerinin alt yada üst sınır değerlerinin aşılması durumunda, bu değer tasarım değişkeninin alt yada üst sınırına ötelenmektedir.

$$v_i^j = \begin{cases} v_i^j < x_{\min}^j & \Rightarrow x_{\min}^j \\ x_{\min}^j \leq v_i^j \leq x_{\max}^j & \Rightarrow v_i^j \\ v_i^j > x_{\max}^j & \Rightarrow x_{\max}^j \end{cases} \quad (2.4)$$

Üretilen komşu nektar kaynağı ile eski kaynak arasında seçim yapılabilmesi için bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Sınırlamasız optimizasyon problemlerinde eski x_i nektar kaynağı ile yeni komşu nektar kaynağı v_i arasında uygunluk değerine göre bir aç gözlülük diye adlandırılan (greedy) bir seçme işlemi uygulanmaktadır. Yeni bulunan v_i çözümü daha iyi ise görevli arı hafızasındaki eski nektar kaynağını silerek yerine yenisini almaktadır. Eğer yeni çözüm daha optimum bir çözüm değilse eski nektar kaynağına gitmeye devam etmekte ve geliştirememeye sayacı ($failure_i$) bir artırılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan Deb (2000) tarafından önerilen sınırlayıcı işleme yöntemi, ceza fonksiyonlarına dayanan yöntemler ve uygun ile uygun olmayan çözümler arasında ayırım yapabilen yöntemlerden her ikisinin özeliğini de taşımaktadır. Bu yolla uygun olmayan çözümlerin cezalandırılması için amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklenmesine rağmen, bu fonksiyon önceki evrimsel algoritma uygulamalarından ve geleneksel yöntemlerde tanımlanan ceza fonksiyonlarından farklılık göstermektedir.

Yöntemde özel bir seçim operatörünün kullanılması önerilmekte ve seçim iki çözüm arasından,

- 1) Uygun olan çözümleri uygun olmayanlara tercih etmek,
- 2) İki uygun çözüm arasından, daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olanı seçmek,
- 3) İki uygun olmayan çözüm arasından, sınırlayıcı ihlali daha küçük olanı seçmek suretiyle yapılmaktadır.

Ceza fonksiyonu yaklaşımlarında kullanılacak ceza katsayılarının sınırlayıcı ihlallerini, amaç fonksiyonuyla aynı mertebeye getirmeleri gerekmektedir. Ancak Deb (2000) tarafından önerilen yöntemde ceza katsayıları gerekmemektedir. Çünkü yukarıda ifade edilen üç ölçütte çözümlerin sınırlayıcı ihlal ve amaç fonksiyonu bilgilerinden oluşan terimlerin her ikisi birlikte değerlendirilerek karşılaştırma yapılmamaktadır. Yukarıda ifade edilen üç ölçütten ilkinde amaç fonksiyonu ve sınırlayıcı ihlal bilgisi kullanılmadan uygun

olan çözüm tercih edilmektedir. Karşılaştırmalar ikinci ölçütte sadece amaç fonksiyonu değerlerine göre ve üçüncü ölçütte ise sınırlayıcı ihlali değerine göre yapılmaktadır. Bu durumda çözümler uygun değilse, tasarımcı optimizasyonda yapının ağırlığı yada maliyetini temsil eden amaç fonksiyonunu hesaplama zahmetinden kurtulmuş olmaktadır. Zira uygun olmayan bir çözümün pratikte uygulanabilir olmamasından dolayı amaç fonksiyonu değerini hesaplamak pek gerekli de olmamaktadır.

Durum böyle olunca Deb (2000), uygun olmayan çözümlerin sadece kendilerinin sınır ihlalleri dikkate alarak bunların uygunluk değerlerinin hesabı için; $f_{\max}$ nesil içindeki en kötü bireyin amaç fonksiyonu değerini, $f(x)$ ise hesaplanan bireyin amaç fonksiyonu değerini, m eşitsizlik tipi toplam sınırlayıcı sayısını ve $g(x)$ sınırlayıcıları göstermek üzere,

$$f' x = \begin{cases} \text{eğer sınırlar ihlal edilmemişse} & f x \quad (g_j x \leq 0 \quad j=1,2,...,m) \\ \text{eğer sınırlar ihlal edilmişse} & f_{\max} + \sum_{j=1}^m g_j x \end{cases} \quad (2.5)$$

bağıntısını önermektedir. Bu durumda uygun olmayan çözümlerin uygunluk değerleri ($f'(x)$) sadece sınır ihlallerine bağlı olmayıp bu değerler aynı zamanda mevcut nesildeki çözümlere de bağlanmış olmakta, uygun çözümlerin uygunluk değeri ise amaç fonksiyonu değerine eşitlenmektedir.

Deb (2000) geliştirdiği bu sınırlayıcı işleme yöntemini genetik algoritmaya dâhil etmek suretiyle bu yöntemi içbükey ve dışbükey uygun bölgeye sahip birçok probleme uygulamış ve yöntemin etkili ve güvenilir olduğu kanısına varmıştır.

Karaboga ve Akay (2011) sözkonusu sınırlayıcı işleme yöntemini, basit Yapay Arı Koloni Algoritmasına uygulanarak, sınırlayıcısız optimizasyon problemleri için geliştirilmiş olan algoritmanın sınırlayıcılı problemlerde kullanılmasını sağlamıştır. Ancak Karaboga ve Akay (2011)'in algoritmasında uygunluk değeri yukarıdaki (2.5) bağıntısıyla değil, nesildeki en kötü bireyin amaç fonksiyonu değeri kullanılmadan:

$$f'_i x = \begin{cases} f_i \geq 0 & \Rightarrow 1 / (1 + f_i) \\ f_i < 0 & \Rightarrow 1 + |f_i| \end{cases} \quad (2.6)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda bireylerin seçilme olasılıkları uygun bireyler için uygunluk değeriyle, uygun olmayan bireyler için ise sınırlayıcı ihlalleriyle ifade edilmektedir. Durum böyle olunca Deb'in yöntemindeki, amaç fonksiyonu ve ihlalleri aynı mertebeden ifade etmek üzere belirlenen, ceza parametrelerinin kullanılmasına gerek kalmamakta, dolayısıyla da Karaboga ve Akay'ın (2011) uyarladığı sınırlayıcı işleme yöntemini uygun ve uygun olmayan çözümler arasında ayırım yapan bir yöntem haline dönüştürmüş oldukları anlaşılmaktadır.

2.1.1.3. Gözcü Arı Aşaması

Daha önce de belirtildiği gibi, görevli arılar araştırmalarını tamamladıktan sonra kovana dönerek buldukları kaynaklarla ilgili bilgiyi gözcü arılara aktarmaktadırlar. Gözcü arılar da bu bilgidен faydalanarak kaynakta bulunan nektar miktarına göre bir kaynak seçmektedirler. Olasılıksal bu seçme işlemi, bağıl nektar miktarlarına karşılık gelen uygunluk değerlerinden yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlem teknik literatürde bulunan rulet tekerleği, sıralamaya dayalı, stokastik örnekleme, turnuva yöntemi yada diğer seçim şemalarından herhangi biri kullanılarak yapılmaktadır. Sınırlamasız optimizasyon problemlerinde kullanılmış olan basit Yapay Arı Koloni Algoritmasında ise bu işlem rulet tekerleği seçim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tür problemlerde sözkonusu olasılık değeri,

$$p_i = \frac{f'_i \cdot x}{\sum_{i=1}^{SN} f'_i \cdot x} \quad (2.7)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi, kaynağın nektar miktarının (uygunluğunun) artmasıyla seçilme olasılığı da artmaktadır.

Sınırlamalı optimizasyon problemlerinde ise bu olasılık değeri (p_i) uygun bölgede olan ve uygun bölgede olmayan çözümler için, ihlal j . nektar kaynağının sınırlayıcı ihlal değerini göstermek üzere,

$$P_i = \begin{cases} \text{uygun bölgede ise} & 0.5 + \left(f_i' \cdot x / \sum_{i=1}^{SN} f_i' \cdot x \right) \cdot 0.5 \\ \text{uygun bölgede değil ise} & 1 - \left(ihlal_j / \sum_{j=1}^{SN} ihlal_j \right) \cdot 0.5 \end{cases} \quad (2.8)$$

ifadelerinin biriyle hesaplanmaktadır. Sınırlamalı problemler için yapılan bu değişiklik, uygun bölgede olmayan çözümlerin de nesilde bulunması açısından, bu tür çözümlere de olasılık değeri verilmesi sağlanmıştır. Yukarıdaki (2.8) bağıntısından görüldüğü gibi; uygun bölgede olan çözümlere 0.5 ile 1 arasında uygunluk değeriyle orantılı artan, uygun bölgede olmayan çözümlere ise 0 ile 0.5 arasında sınır ihlal değeriyle orantılı azalan bir olasılık değeri atanmakta, böylece uygun bölgedeki çözümler 0.5'lik bir eşik değere sahip olmaktadır.

Olasılık değerlerinin hesaplanmasının ardından her bir kaynak için $[0,1]$ aralığında rastgele bir sayı üretilmekte ve olasılık değerinin bu sayıdan büyük olması durumunda (2.3) ifadesi kullanılarak tekrar yeni bir çözüm üretilmektedir. Bu aşamada da görevli arı aşamasında olduğu gibi bu çözüm değerlendirilmek suretiyle eski çözümle karşılaştırılmakta ve hangi çözümle devam edileceğine seçim işlemi uygulanarak karar verilmektedir. Eğer çözüm, yeni çözümle değiştirilmişse geliştirememeye sayacı sıfırlanmakta, aksi durumda bu sayaç bir arttırılmakta ve bu süreç tüm gözcü arılar nektar kaynaklarına ulaşana kadar devam etmektedir.

2.1.1.4. Kâşif Arı Aşaması

Kâşif arı aşaması, yeni çözümlerin nesle katılarak farklılık sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Bir çevrim sonunda görevli ve gözcü arılar arama süreçlerini tamamladıktan sonra, gittikleri nektar kaynaklarının tükenip tükenmediği hakkında bilgi veren, geliştirememeye sayaçları denetlenmektedir. Denetlenen kaynak için geliştirememeye sayacı önceden belirlenmiş sınır bir değerin (LIMIT) üzerindeyse, bu kaynağın nektarının tükendiği kabul edilmekte ve bunun görevli arısı kâşif arıya dönüşmektedir. Kâşif arı (2.1) bağıntısına göre rastgele bir kaynak aramakta ve böylece bulunan kaynakla, tükenmiş kaynak yer değiştirilmektedir. Sınırlamasız optimizasyon problemlerinde yukarıda ifade edilen LIMIT parametresinin aşılp aşılmadığı her adımda, sınırlamalı problemlerde ise

belli periyotlarla denetlenmektedir. Bu periyot SPP adı verilen bir optimizasyon parametresine göre ayarlanmaktadır.

Burada Yapay Arı Koloni Algoritmasının;

- 1) Oldukça basit ve esnek olan,
- 2) Nektar arayan arıların davranışlarını oldukça gerçeğe yakın modelleyen,
- 3) Sürü zekasına dayanan,
- 4) Sürekli ve ayrık değişkenlere sahip problemlere uygulanabilen,
- 5) Oldukça az denetim parametresine sahip olan,

6) Kaşif arılar tarafından gerçekleştirilen küresel, görevli ve gözcü arılar tarafından gerçekleştirilen bölgesel araştırma kabiliyetine sahip bir algoritma olduğu belirtilmelidir (Karaboğa,2011).

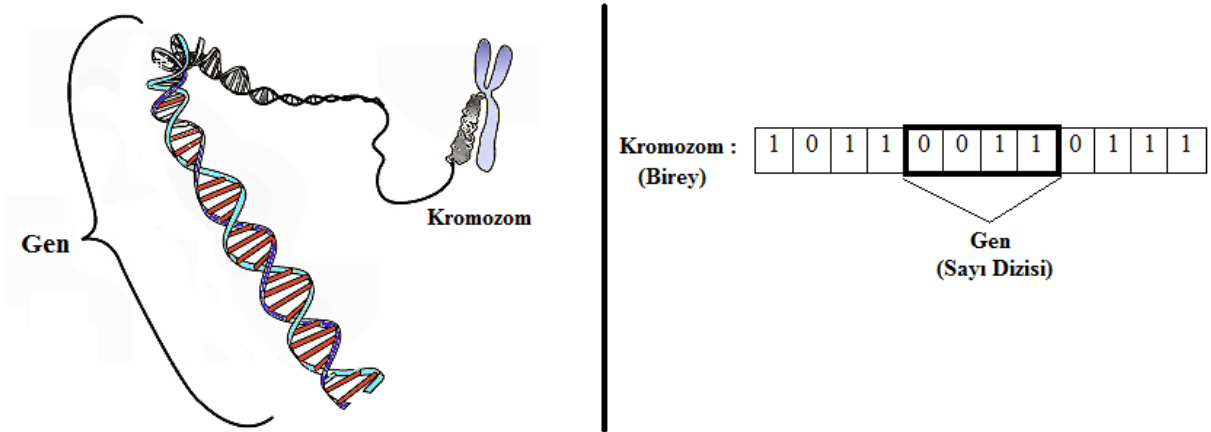
2.1.2. Genetik Algoritma

Genetik algoritma yirminci yüzyılın ortalarında psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı John Holland tarafından Michigan Üniversitesinde geliştirilmiştir. Bilgisayar biliminin mekanik öğrenme konusunda çalışan Holland, Darwin'in evrim kuramından etkilenerek canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşünmüştür. Bu süreçte kopyalama, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik işlemlerle bireyin çevreye uyum sağlayarak daha uygun hale gelmesi, bu şekilde de en iyinin bulunması amaçlanmaktadır.

Genetik algoritma adı teknik literatüre Holland'ın 1975'te çalışmalarının sonucunu yayınladığı kitabıyla girmiştir. Holland'ın öğrencisi olan David E. Goldberg, 1989 yılında konusunda geleneksel sayılan kitabını yayınlayarak genetik algoritmanın pratikte uygulanabileceğini göstermiştir. Bu araştırmacı 1985 yılında gaz boru hatlarının denetimi konusunda gerçekleştirdiği doktora teziyle "National Science Foundation" adıyla anılan bilim ödülünü kazanmıştır (Goldberg,1989).

Yukarıda da ifade edilmeye çalışıldığı gibi genetik algoritma doğal evrim teorisine dayanan stokastik ve metahöristik bir optimizasyon yöntemidir. Bu algoritma optimizasyon probleminin çözümünde biyolojik evrim sürecinden yararlanmaktadır. Bireylerden oluşan neslin evrimi, biyolojik benzetimli operatörler olan; kopyalama, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemler tarafından gerçekleştirilmektedir. Nesildeki her bir birey uygunluk ölçütüyle nesilde kalmakta yada çıkarılmaktadır. Sadece uygunluğu yüksek olan bireyler hayatta kalarak ürün vermekte ve bu suretle kalıtlarını yeni nesillere aktarabilmektedirler.

Genetik algoritmada, herbir çözüm nesildeki bir bireyle (kromozomla) gösterilmekte, bireyleri de sayı dizileri simgelemektedir (Şekil 2.1). Bireyleri simgeleyen sayıların her birine ise gen adı verilmektedir. Bu şekilde ifade edilen bireylerden uygun olanlarına diğer bir deyişle kalitesi yüksek olanlara genetik operatörler uygulanıp böylece daha iyi çözümler aranmaktadır.



Şekil 2.1. Biyolojideki gen ve kromozomun genetik algoritmadaki karşılıkları

Diğer evrimsel algoritmalarda olduğu gibi Genetik Algoritmada da nesilde bulunan birey sayısı seçimi önemlidir. Bir nesildeki birey sayısı ne kadar çoksa, bir sonraki nesilde devamlılığını sürdüren birey sayısı ve çeşidi o kadar çok olmaktadır. Çok sayıda ve çeşitte birey olması nesil içinde tek bir türün baskın olmasını önlemektedir. Ancak bu durum genetik algoritmanın fazla sayıda olan bireyleri değerlendirmesi için yavaş ilerlemesine neden olmaktadır. Nesildeki toplam birey sayısının az olması ise başlangıç neslinde uygunluk değeri yüksek olan bireylerin bir sonraki nesillerde baskın olmalarına neden olmakta ve bu durum erken yakınsamaya neden olmaktadır. Yakınsamanın erken olması ise genetik algoritmanın, çaprazlama işlemiyle yeni birey üretmesini zorlaştırdığından algoritma yeni bireyleri sadece mutasyon operatörüyle üretilmektedir.

Bu algoritmada optimizasyon sürecine başlanabilmesi için gerekli olan başlangıç nesli yazılım tarafından rastgele seçilebilmektedir. Rastgele seçilen bireylerin uygunluk değerlerinin düşük olması durumunda çözüm çok sayıda iterasyonla bulunabilmekte yada bulunamayabilmektedir. Bu durumda başlangıç nesli değiştirilerek optimizasyon sürecinin yeniden başlatılması gerekmektedir. Durum böyle olunca kullanıcı tarafından bazen

başlangıç neslinin rastgele seçilmesi yerine başlangıçta belirlenmesi de tercih edilebilmektedir.

Kopyalama işlemi uygunluk değeri kötü olan bireylerin uygunluk değeri iyi olanlarla değiştirilmesini sağlamaktadır. Bu işlemde nesildeki tüm bireylerin uygunluk değerleri hesaplanmakta ve önceden belirlenmiş bir değerden daha küçük uygunluğa sahip olan bireyler nesilden çıkarılmaktadır. Nesilde kalan iyi bireylerden uygunluk değeri yüksek olanlar çıkarılan birey sayısı kadar kopyalamak suretiyle nesildeki toplam birey sayısı tamamlanmaktadır. Eşleme havuzuna alınan bu bireyler birbirleriyle rastgele eşlenmekte ve çaprazlama işlemi bu eşler arasında gerçekleştirilmektedir. Tam bir eşleme olması için birey sayısının çift olması gerekmektedir. Nesildeki bireylerin kendisiyle eşlenmesine izin verilmemekte ancak birey, kendilerinden üretilen kopyalarla eşlenebilmektedir. Çaprazlama genetik algoritmada yakınsama olasılığını artırmakta ve böylece topluma yeni bireyler kazandırmaktadır. Çaprazlama işlemiyle her iterasyonda yeni bireyler üretilerek genetik algoritmanın bu yeni bireyler üzerinde araştırma yapması sağlanmaktadır. Bu işlemi uygulamak üzere eşleme havuzunda eşleştirilen bireyler çaprazlama havuzuna alınarak burada rastgele çaprazlama noktaları belirlenmektedir. Teknik literatürde tek noktalı ve iki noktalı gibi çeşitli çaprazlama yöntemleri bulunmaktadır (Goldberg,1989).

Mutasyon işlemi genetik algoritmanın erken yakınsamasını önlerken, düşük uygunluk değerine sahip bireylerin problemde çözüm olarak belirlenmesini de önlemeye çalışmaktadır. Mutasyon işlemi uygunluk değeri yüksek bireylere uygulanarak algoritmanın erken yakınsamaması sağlanmaktadır. Bununla birlikte bu işlem rastgele seçilen bireylere de uygulanabilmektedir. Bazı araştırmacılar mutasyon operatörünün en iyi bireyi nesilden çıkarabileceği gerekçesiyle bu operatörün kullanılmamasını, kullanılacaksa da kullanılma oranının düşük tutulmasını önermektedirler (Hinterding vd.,1995).

Daha önce de belirtildiği gibi evrimsel algoritmalar, genellikle sınırlayıcısız problemler için geliştirildiklerinden, sınırlayıcıların bu algoritmalar içerisinde dikkate alınabilmeleri için bir sınırlayıcı işleme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte genetik algoritma gibi evrimsel algoritmalarda en çok tercih edilen sınırlayıcı işleme yönteminin ceza fonksiyonları yöntemi olduğu bilinmektedir (Coello,2002). Ceza fonksiyonu yönteminde, bireyler sınır ihlallerine göre cezalandırılarak, belirlenen bir ceza terimi amaç fonksiyonuna eklenmek suretiyle cezalandırılmış amaç fonksiyonu elde edilmekte ve algoritmada bu fonksiyon kullanılarak uygunluk değerleri hesaplanmaktadır.

Daha önce madde 1.4.3’de ceza terimini belirlemek üzere geliştirilmiş birçok yöntemin bulunduğu belirtilmişti.

Genetik Algoritmayla bu çalışmada gerçekleştirilen uygulamalarda Toğan ve Daloğlu (2006) tarafından da kullanılan uyarlanabilen bir ceza fonksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu ceza fonksiyonu yöntemine göre; n sınırlayıcı sayısını, $g(i)$ i . sınırlayıcının ihlal miktarını ($i=1, \dots, n$), $g_{\min}$, g_{ort} ve $g_{\max}$ sırasıyla nesildeki en küçük, ortalama ve en büyük ihlal değerini göstermek üzere, ceza katsayısı:

$$CK = \begin{cases} g_{\max} + g_i / g_{\max} - g_{\text{ort}} & \Rightarrow g_i \geq g_{\text{ort}} \\ g_{\text{ort}} + g_i / g_{\text{ort}} - g_{\min} & \Rightarrow g_i \geq g_{\text{ort}} \\ 0 & \Rightarrow g_i = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. $f(x)$ amaç fonksiyonunu göstermek üzere, bu katsayı kullanılarak cezalandırılmış amaç fonksiyonu,

$$\Phi(x) = f(x) + CK \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bir bireyin uygunluk derecesi $\Phi_{\max}(x)$ ve $\Phi_{\min}(x)$ sırasıyla nesildeki en büyük ve en küçük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini göstermek üzere,

$$f_i^d(x) = \Phi_{\max}(x) + \Phi_{\min}(x) - \Phi_i(x) \quad (2.11)$$

bağıntısıyla, bir bireyin uygunluk değeri ise, f_{ort} nesildeki bireylerin ortalama uygunluk derecesini göstermek üzere,

$$f_i'(x) = \frac{f_i^d(x)}{f_{\text{ort}}} \quad (2.12)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir.

Görüldüğü gibi bu yöntem deneme yanılma yoluyla önceden belirlenmesi gereken bir ceza katsayısı gerektirmemektedir. Bu yöntemde tüm bireyleri aynı oranda

cezalandırmamakta, ancak ihlal miktarları arttığında ceza terimi büyüterek uygulanan ceza ağırlaşmakta ve böylece sözkonusu ceza fonksiyonu yöntemi nesilden nesile ve bireyden bireye kendini uyarlamaktadır.

Bununla birlikte yeni aday çözümleri üretmek için kullanılan çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin uygulanma olasılıkları da algoritmanın başarımını etkilemektedir. Bu olasılık değerleri önceden belirlenen sabit değerler olarak alınabileceği gibi, kendini uyarlayabilecek şekilde de hesaplanabilmektedir. Burada çaprazlama ve mutasyon olasılıklarının belirlenmesi için, Srinivas ve Patnaik (1994) tarafından önerilen ve Toğan ve Daloğlu (2006) tarafından üzerinde bazı değişiklikler yapılan, uyarlanabilen bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle göre; f^* herhangi bir bireyin uygunluk değerini, $f_{\min}$, f_{ort} ve $f_{\max}$ sırasıyla bir nesildeki en küçük, ortalama ve en büyük uygunluk değerini ve f_m çaprazlanacak bireylerden uygunluğu küçük olanın değerini göstermek üzere, çaprazlama (p_c) ve mutasyon (p_m) olasılık değerleri;

$$p_c = \begin{cases} f_{\max} - f_m / f_{\max} - f_{\text{ort}} & \Rightarrow f_m \geq f_{\text{ort}} \\ 1.0 & \Rightarrow f_m < f_{\text{ort}} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$p_m = \begin{cases} 0.5 f_{\max} - f' / f_{\max} - f_{\text{ort}} & \Rightarrow f' \geq f_{\text{ort}} \\ f_{\text{ort}} - f' / f_{\text{ort}} - f_{\min} & \Rightarrow f' < f_{\text{ort}} \end{cases} \quad (2.14)$$

şeklinde belirlenmektedir.

2.1.3. Karşılaştırmalarda Kullanılabilecek Optimizasyona İlişkin Örnek Tasarımlar

2.1.3.1. Himmelblau Fonksiyonu

Himmelblau vd. (1972) tarafından önerilen bu fonksiyon, doğrusal olmayan sınırlamalı optimizasyon problemleri için genel bir değerlendirme fonksiyonudur. He vd. (2004) geliştirdikleri Parçacık Sürü Algoritmalarını 5 tasarım değişkeni ve 6 doğrusal olmayan sınırlayıcı içeren bu problemde denemişler ve problemi matematiksel olarak:

$$\text{Minimize } f(x) = 5.3578547x_3^2 + 0.8356891x_1x_5 + 37.293239x_1 - 40792.141 \quad (2.15)$$

sınırlayıcıları ise:

$$\left. \begin{aligned} g_1(x) &= 85.334407 + 0.0056858x_2x_5 + 0.0006262x_1x_4 - 0.0022053x_3x_5 \\ g_2(x) &= 80.51249 + 0.0071317x_2x_5 + 0.0029955x_1x_2 + 0.0021813x_3^2 \\ g_3(x) &= 9.300961 + 0.0047026x_3x_5 + 0.0012547x_1x_3 + 0.0019085x_3x_4 \end{aligned} \right| \quad (2.16)$$

ve

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq g_1(x) \leq 92 \\ 90 &\leq g_2(x) \leq 110 \\ 20 &\leq g_3(x) \leq 25 \end{aligned} \right| \quad (2.17)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Değişken sınırlarını ise;

$$78 \leq x_1 \leq 102, \quad 33 \leq x_2 \leq 45, \quad 27 \leq x_3 \leq 45, \quad 27 \leq x_4 \leq 45 \quad \text{ve} \quad 27 \leq x_5 \leq 45 \quad (2.18)$$

olarak dikkate almışlardır.

Himmelblau vd. (1972) bu problemin çözümünde Genel İndirgenmiş Gradyan (generalized reduced gradient) yöntemini kullanmışlardır. Gen ve Cheng (1997) ve Coello(2000) bu problemi Genetik Algoritmayla, Lee ve Geem (2005) Armoni Arama Algoritmasıyla, Runarsson ve Yao (2000) ise stokastik sıralamaya dayalı evrimsel strateji kullanılarak çözülmüşlerdir.

Himmelblau fonksiyonu için teknik literatürde elde edilen bazı sonuçlar Çizelge 2.1’de verilmektedir. Diğer bazı araştırmacılar da bu problemi farklı yaklaşımlar kullanarak çözmüştür. Örneğin Koziel ve Michalewicz (1999) bu problemi yeni bir yaklaşımla çözerek, -30664.5 değerini en iyi değer olarak bulmuşlardır. Parsopoulos ve Vrahatis (2002) bu problemde sınırlayıcıları ihlal eden amaç fonksiyonu değerini -31528.289 olarak elde etmişlerdir. Hu ve Eberhart (2002) ise amaç fonksiyonunun -30665.5 değerini en iyi değer olarak elde etmişlerdir. Bu araştırmacılar elde ettikleri

optimum tasarım değişkenlerini çalışmalarında belirtmemiş olduklarından bu değerler Çizelge 2.1’de verilememiştir.

Çizelge 2.1. Himmelblau fonksiyonu için bulunan optimum değerler

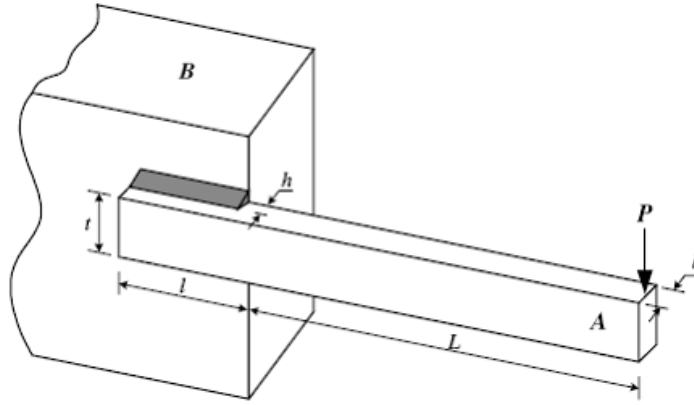
Yöntem	Tasarım Değişkeni Değerleri					Amaç Fonksiyonu Değeri
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
Gen ve Cheng (1997) Genetik Alg.	81.4900	34.0900	31.2400	42.2000	34.3700	-30183.576
Himmelblau vd. (1972) Genel İndirgenmiş Gradyan	78.6200	33.4400	31.0700	44.1800	35.2200	-30373.949
Runarsson ve Yao (2000) Evrimsel Strateji	78.0000	33.0000	29.9952	45.0000	36.7758	-30665.539
He vd. (2004) Parçacık Sürü Opt. Alg.	78.0000	33.0000	29.9952	45.0000	36.7758	-30665.539
Lee ve Geem (2005) Armoni Arama Alg.	78.0000	33.0000	29.9950	45.0000	36.7760	-30665.539
Coello (2000)* Genetik Alg.	78.0490	33.0070	27.0810	45.0000	44.9400	-31020.900
Bu çalışma Yapay Arı koloni Alg.	78.0000	33.0000	29.9952	45.0000	36.7758	-30665.539

He vd. (2004) tarafından önerilen Parçacık Sürü Algoritmasında maksimum nesil sayısı ve değerlendirilen fonksiyon sayısı sırasıyla 3000 ve 90000 olarak alınmıştır. Bu çalışmadan elde edilen optimum sonuç Runarsson ve Yao (2000) ve Lee ve Geem (2005)’in çalışmalarından elde edilenlerle örtüşmüştür. Burada Runarsson ve Yao (2000) tarafından bu sonucun 350000 fonksiyonun, Lee ve Geem (2005) tarafından ise 65000 fonksiyonun değerlendirilmesi suretiyle elde edildiği belirtilmelidir. Bu durum Armoni Arama Algoritmasının daha hızlı sonuç verdiğini göstermektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasında maksimum nesil sayısı ve değerlendirilen fonksiyon sayısı sırasıyla 2500 ve 50000 olarak alınmış, Çizelge 2.1’den de görüldüğü gibi elde edilen optimum sonuç diğer yöntemlerle elde edilenlerle pratik olarak örtüşmüştür. Değerlendirilen fonksiyon sayısı diğer yöntemlerinkinden daha az olması nedeniyle bu çalışmada kullanılan algoritma en yüksek başarılı algoritma olmuştur. Burada Coello (2000)’un sonucu sınırlayıcı ihlaliyle elde etmiş olduğu belirtilmelidir.

2.1.3.2. Kaynaklı Kiriş Tasarımı

Bu örnekte bir P yükü altındaki dikdörtgen kesitli ankastre kirişin maliyeti minimum yapılacak şekilde tasarlanması istenmektedir. Tasarımda; kaynak kalınlığı $h=x_1$, kaynak uzunluğu $l=x_2$, kiriş yüksekliği $t=x_3$ ve kiriş genişliği $b=x_4$ olmak üzere dört tasarım değişkeni seçilmiştir (Şekil 2.2). Tasarımda sınırlayıcı olarak; kirişdeki kayma gerilmesi (τ), Normal gerilmeyi (σ), burkulma yükünü (P_c), sehimi (δ) ve boyutları sınırlayan toplam yedi adet sınırlayıcı dikkate alınmıştır.



Şekil 2.2. Tasarımı yapılan kaynaklı kiriş

Bu tasarıma ilişkin amaç fonksiyonu,

$$f(x) = 1.10471x_1^2x_2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilmekte, kayma gerilmesi,

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2}, M = P\left(L + \frac{x_2}{2}\right) \\ J &= 2\left(\frac{x_1x_2}{\sqrt{2}}\left(\frac{x_2^2}{12} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2}\right)^2\right)\right), \tau' = \frac{P}{\sqrt{2}x_1x_2}, \tau'' = \frac{MR}{J} \end{aligned} \right| \quad (2.20)$$

olmak üzere,

$$\tau_x = \sqrt{\tau'^2 + 2\tau'\tau''\frac{x_2}{2R} + \tau''^2} \quad (2.21)$$

şeklinde hesaplanmakta, kesitteki normal gerilme,

$$\sigma_x = \frac{6PL}{x_4 x_3^2} \quad (2.22)$$

ifadesiyle, sehim ve burkulma yükü ise sırasıyla,

$$\delta_x = \frac{4PL^3}{Ex_3^3 x_4} \quad (2.23)$$

$$P_c = \frac{4.013 \sqrt{EGx_3^2 x_4^6 / 36}}{L^2} \left(1 - \frac{x_3}{2L} \sqrt{\frac{E}{4G}} \right) \quad (2.24)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Tasarımda kullanılan sınırlayıcılar,

$$\left. \begin{aligned} g_1 \quad x &= \tau_x - \tau_{\max} \leq 0 \\ g_2 \quad x &= \sigma_x - \sigma_{\max} \leq 0 \\ g_3 \quad x &= x_1 - x_4 \leq 0 \\ g_4 \quad x &= 0.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4 - 14.0 + x_2 - 5 \leq 0 \\ g_5 \quad x &= 0.125 - x_1 \leq 0 \\ g_6 \quad x &= \delta_x - \delta_{\max} \leq 0 \\ g_7 \quad x &= P - P_c \leq 0 \end{aligned} \right| \quad (2.25)$$

olarak, tasarım değişkenlerinin değişim aralığı ise:

$$0.1 \leq x_1 \leq 2 \quad 0.1 \leq x_2 \leq 10 \quad 0.1 \leq x_3 \leq 10 \quad 0.1 \leq x_4 \leq 2 \quad (2.26)$$

Şeklinde dikkate alınmıştır. Teknik literatürde kirişe uygulanan tekil yük $P=6000$ N, kirişin açıklığı $L=14$ mm, elastisite modülü $E=30 \times 10^6$ N/mm², kayma modülü $G=12 \times 10^6$

N/mm^2 , kesitte izin verilen maksimum normal gerilme $\sigma_{max}=30000 N/mm^2$, kayma gerilmesi $\tau_{max}=13600 N/mm^2$ ve izin verilen maksimum sehim $\delta_{max}=0.25mm$ olarak verilmektedir (He vd.,2004).

Bu tasarımı Ragsdell ve Phillips (1976) geometrik programlama, Deb (1991) ise ikilik kodlamalı basit genetik algoritma, Deb (2000) gerçek parametrelili genetik algoritma, Ray ve Liew (2003) toplum ve uygarlık algoritması, Lee ve Geem (2005) armoni arama algoritması, He vd. (2004) ise güçlendirilmiş parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanarak yapmışlardır.

Yukarıda anılan çalışmalardan ve bu tezde kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasından elde edilen optimum değerler ile tasarım değişkenleri Çizelge 2.2’de verilmektedir.

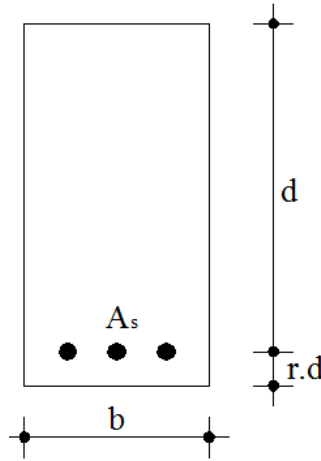
Çizelge 2.2. Kaynak kiriş problemine ilişkin bu çalışma ve diğer çalışmalardan elde edilen optimum değerler

Yöntem	Tasarım Değişkeni Değerleri				Amaç Fonksiyonu Değeri
	X_1	X_2	X_3	X_4	
Deb (1991) Genetik Algoritma	0.2489	6.1730	8.1789	0.2533	2.4331
Ragsdell ve Phillips (1976) Geometrik Programlama	0.2455	6.1960	8.2730	0.2455	2.3859
Ray ve Liew (2003) Toplum ve Uygarlık Algoritması	0.244438276	6.237967234	8.288576143	0.244566182	2.3854
He vd. (2004) Parçacık Sürü Algoritması	0.24436898	6.21751974	8.29147139	0.24436898	2.3810
Lee ve Geem (2005) Armoni Arama Algoritması	0.2442	6.2231	8.2915	0.2443	2.3808
Bu çalışma Yapay Arı Koloni Algoritması	0.245177	6.280087	8.197913	0.245190	2.3782

Bu çalışmada kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasında maksimum nesil sayısı ve değerlendirilen fonksiyon sayısı sırasıyla 2000 ve 40000 olarak dikkate alınmıştır. Çizelge 2.2’den görüldüğü gibi bağımsız 100 koşturma sonrasında diğer araştırmacıların sonuçlarından, sınırlayıcı ihlali yapmadan, amaç fonksiyonunun daha uygun değeri elde edilmiştir.

2.1.3.3. Tek Donatılı Betonarme Kiriş Tasarımı

Bu örnekte sonuçların karşılaştırılabilmesi bakımından, Chakrabarty (1992) ve Coello vd.'nin (1997) çalışmalarında dikkate aldıkları tasarım değişkenleri seçilmiştir (Şekil 2.3). Bu şekilden görüldüğü gibi bunlar; kirişin genişliği (b), derinliği (d) ve asal donatı alanı (A_s)'dır.



Şekil 2.3. Tek donatılı kirişin şematik enkesiti ve tasarım değişkenleri

Amaç fonksiyonu ise kalıp, beton ve donatı dikkate alarak hesaplanan kirişin birim uzunluğunun maliyetidir. Bu maliyet; C_1 asal donatı hacmi için maliyet katsayısını ($\$/\text{cm}^3$), C_2 beton hacmi için maliyet katsayısını ($\$/\text{cm}^3$), C_3 kirişin düzey yüzlerinde kullanılan kalıp için maliyet katsayısını ($\$/\text{cm}^2$) ve C_4 kirişin taban yüzeyinde kullanılan kalıp için maliyet katsayısını ($\$/\text{cm}^2$) göstermek üzere:

$$f_{\text{maliyet}} \cdot x = C_1 \cdot A_s + C_2 \cdot b \cdot d + C_3 \cdot d + C_4 \cdot b \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Chakrabarty,1992; Coello vd.,1997). Buradaki katsayılar sırasıyla, γ_s çeliğin birim ağırlığı ($\gamma_s=0.00785 \text{ daN}/\text{cm}^3$), c_s çeliğin birim maliyeti ($\$/\text{daN}$) olmak üzere:

$$C_1 = \gamma_s \cdot c_s \quad \$/\text{cm}^3 \quad (2.28)$$

C_c betonun birim maliyeti ve r paspayı oranı olmak üzere,

$$C_2 = 1 + r \cdot c_c \cdot 10^{-6} \quad \$ / \text{cm}^3 \quad (2.29)$$

ve C_k kalıbın birim maliyeti olmak üzere,

$$C_3 = 2 \cdot 1 + r \cdot c_k \cdot 10^{-4} \quad \$ / \text{cm}^2 \quad (2.30)$$

$$C_4 = c_k \cdot 10^{-4} \quad \$ / \text{cm}^2 \quad (2.31)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Dikkate alınan sınırlayıcılar ise normalize edilmiş şekilde, M_d kesite uygulanan tasarım momenti, M_r kesitin direnme momenti ve Φ direnme momenti azaltma katsayısı olmak üzere:

$$\left. \begin{aligned} g_1 \quad x &= \frac{M_d}{\Phi M_r} - 1 \leq 0 \\ g_2 \quad x &= \frac{0.25 \cdot d}{b} - 1 \leq 0 \\ g_3 \quad x &= \frac{b}{0.60 \cdot d} - 1 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Coello vd.'nin (1997) Everard'ın (1993) çalışmasından alarak optimizasyonunu gerçekleştirdikleri örnekte açıklığı 10m, üzerindeki sabit yükü (G) 15 kN/m³ ve hareketli yük (Q) 20 kN/m³ olan tek donatılı dikdörtgen kesitli basit kirişin betonarme tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bu hesaplarda donatının akma dayanımı $f_{yd}=300$ MPa, betonun tasarım dayanımı $f_{cd}=30$ MPa olarak alınmıştır. Donatının, betonun ve kalıbın birim maliyetleri sırasıyla $c_s=0.75$ \$/daN, $c_c=64.5$ \$/m³ ve $c_k=2.155$ \$/m³ dür. Beton örtü kalınlığının faydalı yüksekliğe oranı (r) 0.10, direnme momenti azaltma katsayısı 0.90 ve betonun birim ağırlığı 23.23 kN/m³ olarak kullanılmıştır. Kirişin eşit yayılı tasarım yükü,

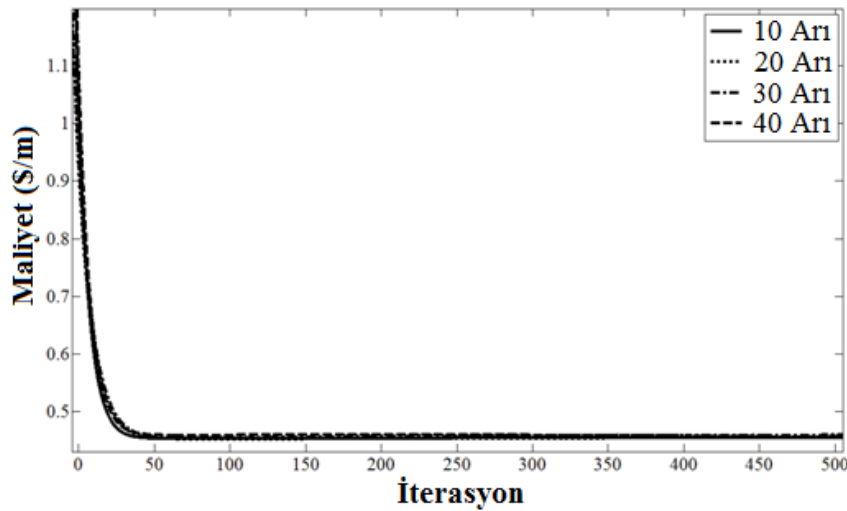
$$p_d = 1.4 \cdot G + 1.7 \cdot Q \quad (2.33)$$

olarak hesaplanmıştır. Her iterasyonda boyutlar farklı olabileceğinden kirişin kendi ağırlığı her adımda hesaplanarak sabit yüke eklenmektedir. 1 kiriş açıklığını göstermek üzere maksimum tasarım momenti,

$$M_d = p_d \cdot l^2 / 8 \quad (2.34)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir.

Yapay arı koloni algoritmasıyla gerçekleştirilen bu örnekte koloni boyutunun yakınsamaya etkisini incelemek için 10, 20, 30 ve 40 arıdan oluşan dört koloni boyutu denenmiştir. Her bir koloni boyutu için 20 bağımsız koşturma gerçekleştirilmiştir. Bu 20 bağımsız koşturmada elde edilen optimum değerlerin ortalaması her bir koloni boyutu için iterasyon sayısına bağlı olarak Şekil 2.4'de verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi tüm koloni boyutları için yakınsama eğrileri pratik olarak birbiriyle örtüşmektedir. Bu durum koloni boyutu olarak, seçilen dört koloni boyutundan herhangi birinin alınabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.4. Tek donatılı betonarme kirişte maliyetteki yakınsamanın dört koloni boyutu için karşılaştırılması

Bu örnekte maksimum iterasyon sayısı 500 ve koloni boyutu 20 olarak seçilmiştir. Karaboğa ve Baştürk (2007) araştırmalarında optimizasyon sürecinde kullanılan denetim

parametreleri; MR için 0.3-0.8, SPP için $0.5 \cdot SN \cdot D \cdot SN \cdot D$ ve LIMIT için $0.1 \cdot SN \cdot D \cdot 2 \cdot SN \cdot D$ aralıklarını sonucu etkilemeyen sınırlar olarak belirtmektedirler. Bu kaniya uyularak bu çalışmada MR, SPP ve LIMIT parametreleri sırasıyla 0.7, 30 ve 60 olarak seçilmiştir.

Bu örneğin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla çözümünden elde edilen bulgular, geometrik programlama (Chakrabarty, 1992) ve genetik algorithmadan (Coello vd., 1997) elde edilen bulgularla birlikte Çizelge 2.3'de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Geometrik programlama, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Koloni Algoritmasından elde edilen bulgular

Parameterler ve maliyetler	Chakrabarty (1992)	Coello vd. (1997)			Bu çalışma
	Geometrik programlama	GA (İkili Kod)	GA (Bulanık Kod)	GA (Kayan noktalı kod)	Yapay Arı Koloni Algoritması
As (cm ²)	37.6926	36.1893	41.5905	37.5205	37.4455
d (cm)	86.0629	89.5402	78.6177	86.6221	86.6221
b (cm)	30.0000	30.0162	30.0447	30.0022	30.0000
Maliyet (\$/m)	0.4435	0.4442	0.4464	0.4436	0.4435

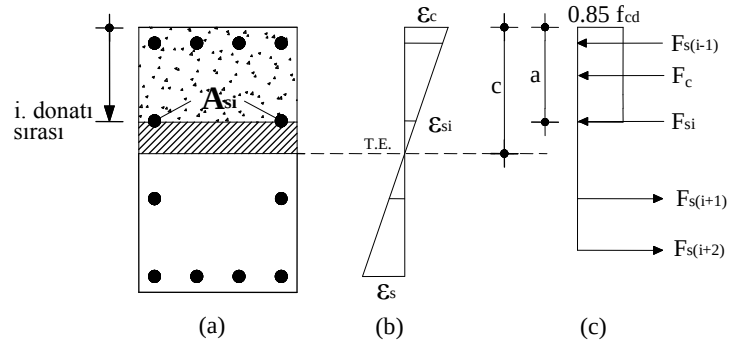
Bu çizelgeden de görüldüğü gibi Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen bulgular, Chakrabarty (1992) ve Coello vd.'ninkilere (1997) çok yakındır. Bu durum Yapay Arı Koloni Algoritmasının bu örnek için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

2.1.3.4. Bir Doğrultuda Birleşik Eğilme Etkisinde Betonarme Kolon Tasarımı

Bir doğrultuda birleşik eğilme etkisinde etriyeli kolonların moment taşıma kapasitesi deneme yanılma yöntemiyle hesaplanabilmektedir. Bu hesapta izlenen yol aşağıda verilmektedir.

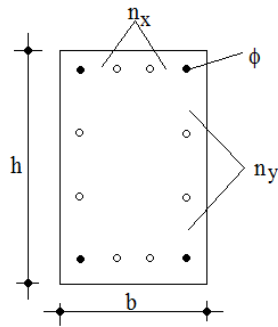
1. Tarafsız eksen derinliği (c) seç.
2. Benzer üçgenlerden çeşitli düzeylerdeki donatılar için birim şekildeğiştirmeler (ϵ_{si}) hesapla.
3. Donatı gerilmelerini ($\sigma_{si} = \epsilon_{si} E_s \leq f_{yd}$) ve bu gerilmelerin bileşkelerini ($F_{si} = A_{si} \sigma_{si}$) hesapla.
4. Basınç gerilmeleri bileşkesini $F_c = 0.85 f_{cd} A_{cc}$ hesapla.

5. Denge koşulunu $\left(N = F_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma_{si} \right)$ denetle.
6. Denge sağlanıyorsa 7. adıma geç, sağlanmıyorsa 1. adıma geri dönerek denge sağlanıncaya kadar c için yeni değerler seç.
7. Denge sağlanınca iç kuvvetlerin kesit ağırlık merkezine göre direnme momentini (M_r) hesapla.



Şekil 2.5. Kolon enkesiti (a), şekildeğiştirme diyagramı (b), gerilmeler ve bileşkeleri (c)

Bu örneğin çözümünden elde edilen bulguların ZielinskiI vd. (1995); Govindaraj ve Ramasamy (2007) ve Akın ve Saka (2010) tarafından elde edilenlerle karşılaştırılabilmesi için tasarım değişkenleri değiştirilmemiştir (Şekil 2.6). Bu şekilden de görüldüğü gibi kolon enkesit boyutları (b, h), donatı çapı(ϕ) ve köşe donatıları hariç x ve y eksenleri doğrultularındaki diğer donatı adetleri (n_x ve n_y) tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Bunların alt ve üst sınırları ile değişim aralıkları aşağıdaki Çizelge 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.6. Kolon enkesiti ve tasarım değişkenleri

Çizelge 2.4. Kolon örneğine ilişkin tasarım değişkenlerinin sınır ve değişim aralıkları

Tasarım değişkenleri	Alt sınır	Üst sınır	Değişim aralığı	Alabileceği değer sayısı
b (cm)	20	100	1 cm	81
h (cm)	20	100	1 cm	81
n_x ve n_y (adet)	0	14	2 adet	8
$\emptyset$ (mm)	14,16,18,20,22,25,28		-	7

Tek donatılı betonarme kiriş tasarımına benzer şekilde bu tasarım için de amaç fonksiyonu; V_c kullanılan betonun hacmi (m^3), W_s çelik ağırlığı (daN) ve A_k toplam kalıp alanı (m^2) olmak üzere:

$$f_{\text{maliyet}} \quad x = c_c V_c + c_s W_s + c_k A_k \quad (2.35)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Bu uygulama için dikkate alınan sınırlayıcılar; N_d kesitin tasarım eksenel yükünü, $\rho_{\min}$, $\rho_{\max}$ sırasıyla minimum ve maksimum donatı oranlarını, $s_{\min}$ ve $s_{\max}$ ise donatılar arasındaki minimum ve maksimum net mesafeleri göstermek üzere;

$$\left. \begin{aligned} g_1 \quad x &= \frac{N_d}{\Phi N_r} - 1 \leq 0 & g_2 \quad x &= \frac{M_d}{\Phi M_r} - 1 \leq 0 & g_3 \quad x &= \frac{\rho_{\min}}{\rho} - 1 \leq 0 \\ g_4 \quad x &= \frac{\rho}{\rho_{\max}} - 1 \leq 0 & g_5 \quad x &= \frac{h/b}{h/b_{\max}} - 1 \leq 0 & g_6 \quad x &= \frac{b_{\min}}{b} - 1 \leq 0 \\ g_7 \quad x &= \frac{h_{\min}}{h} - 1 \leq 0 & g_8 \quad x &= \frac{s_{\min}}{s_x} - 1 \leq 0 & g_9 \quad x &= \frac{s_x}{s_{\max}} - 1 \leq 0 \\ g_{10} \quad x &= \frac{s_{\min}}{s_y} - 1 \leq 0 & g_{11} \quad x &= \frac{s_y}{s_{\max}} - 1 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

ifadeleriyle belirtilmektedir.

Gerçekleştirilen üç kolon örneğinin çözümünde kullanılan bir kısım veriler Çizelge 2.5.'de verilmektedir. Karşılaştırma yapabilmek için malzeme maliyetleri ZielinskiI vd. (1995), Govindaraj ve Ramasamy (2007) ve Akın ve Saka'nın kilerin (2010) aynı olması üzere çelik, beton ve kalıp için sırasıyla 2.1 \$/daN, 110 \$/m³ ve 27 \$/m², donatı ve betonun birim ağırlıkları da yine sırasıyla 78,5 kN/m³ ve 25 kN/m³ olarak dikkate alınmış ve

tasarımda ACI-318 (2008) yönetmeliğine uyulmuştur. Minimum donatı oranı 0.008, maksimum donatı oranı 0.06, donatılar arası minimum net mesafe 50mm, maksimum net mesafe 300mm, minimum enkesit boyutu 200mm, kolon enkesit boyutları arasındaki maksimum oran 3 olarak dikkate alınmıştır (ZielinskiI vd.,1995; Govindaraj ve Ramasamy,2007; Akın ve Saka,2010). Kapasite azaltma katsayısı için moment-normal kuvvet etkileşim diyagramının çekme kırılması bölgesinde 0.90, basınç kırılması bölgesinde 0.65 ve ara bölgede ACI-318 (2008) yönetmeliğinde belirtilen doğrusal oranlamayla hesaplanan değer kullanılmıştır.

Çizelge 2.5. Kolon örneğinde kullanılan bazı veriler

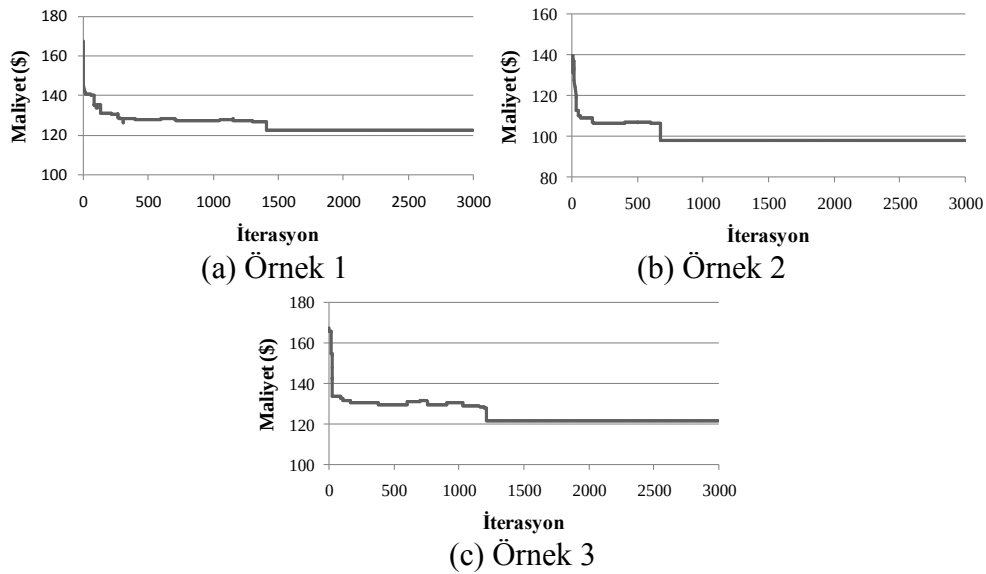
	f_{cd} N/mm ²	f_{yd} N/mm ²	Paspayı mm	N_d kN	M_d kNm
Örnek 1	25	400	65	2460	443
Örnek 2	30	400	70	1780	362
Örnek 3	30	400	75	2000	562

Bu örnekte de koloni boyutu kiriş örneğinde olduğu gibi 20, yakınsamanın yeterli olması için maksimum iterasyon sayısı ise 3000 olarak seçilmiştir. Optimizasyon denetim parametrelerinin en uygun değerleri, Akay (2009)'ın çalışmasında belirtilen sınırlar içinde kalarak, MR=0.7, SPP=30 ve LIMIT=60 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular ZielinskiI vd. (1995), Govindaraj ve Ramasamy (2007) ve Akın ve Saka (2010)'nın çalışmalarından elde edilenlerle birlikte aşağıdaki Çizelge 2.6'da verilmektedir.

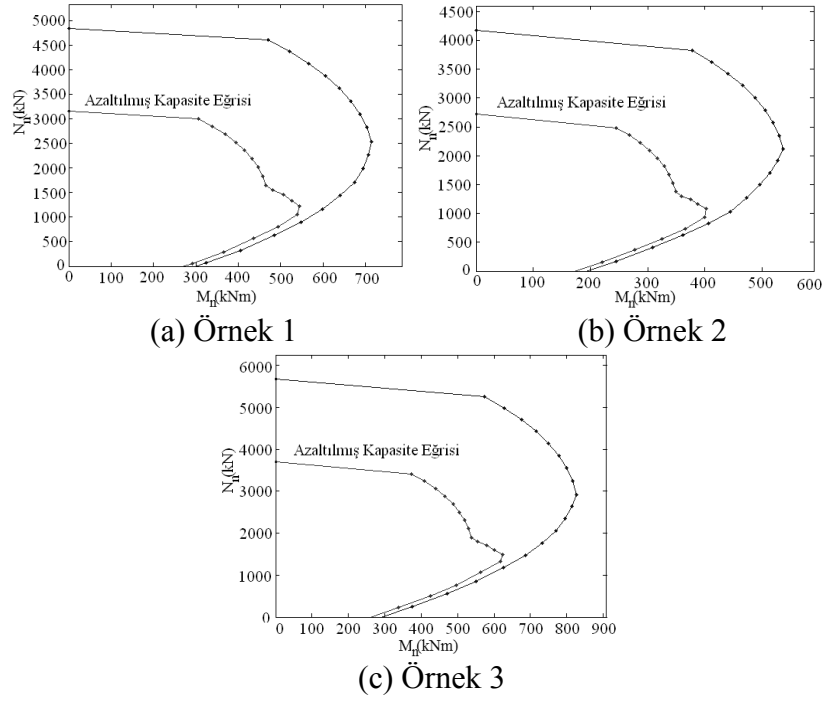
Çizelge 2.6. Kolon örneğinde elde edilen bulguların diğer araştırmacılarınkilerle karşılaştırılması

	Çalışmalar	Tasarım Değişkenleri					Maliyet \$/m
		b	h	ø	nx	ny	
Örnek 1	ZielinskiI vd. (1995)	400	700	3000 mm ²			139.65
	Govindaraj ve Ramasamy (2007)	325	900	14	0	0	138.94
	Akın A. ve Saka M.P. (2010)	375	750	16	4	4	131.46
	Bu Çalışma	290	860	16	0	6	122.68
Örnek 2	ZielinskiI vd. (1995)	350	600	3000 mm ²			123.85
	Govindaraj ve Ramasamy (2007)	300	750	16	2	4	114.61
	Akın A. ve Saka M.P. (2010)	275	725	16	2	2	102.45
	Bu Çalışma	250	730	18	0	2	98.16
Örnek 3	ZielinskiI vd. (1995)	500	500	7500 mm ²			205.14
	Govindaraj ve Ramasamy (2007)	350	825	16	4	4	135.00
	Akın A. ve Saka M.P. (2010)	325	825	14	4	6	127.12
	Bu Çalışma	300	830	16	2	4	121.56
Not: ZielinskiI vd. (1995) Doğrusal Olmayan Programlama, Govindaraj ve Ramasamy (2007) Genetik Algoritma, Akın ve Saka (2010) ise Armoni Arama Algoritması kullanmışlardır.							

Bu çizelgeden de görüldüğü gibi bu tezde kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen optimum değerler diğerlerinden daha düşüktür. Bu örnek çözümlerin yakınsamaları Şekil 2.7'de verilmektedir. Burada yakınsama hızlarının diğer yöntemlerle sağlananlara yakın olduğu belirtilmelidir. Bu uygulamaya konu olan üç kolon enkesiti için moment-normal kuvvet etkileşim diyagramları Şekil 2.8'de verilmektedir. Bu bulgular bu tezde kullanılan Yapay Arı Koloni Algoritmasının bir doğrultuda birleşik eğilme etkisindeki kolonlar için de başarıyla kullanılabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 2.7. Kolon çözümlerinin yakınsama durumları



Şekil 2.8. Bu çalışmada belirlenen optimum üç örnek kolon enkesitlerinin optimum değerleri için moment-normal kuvvet etkileşim diyagramları

2.2. Dikdörtgen Kesitli Betonarme Sığ Tünellerin Optimum Tasarımı

Optimum tasarım probleminin matematiksel ifadesi; tasarım değişkenlerinin, amaç fonksiyonunun ve sağlanması gereken sınırlayıcıların tanımlanmasını gerektirmektedir. Yapısal optimizasyon problemi genellikle matematiksel olarak; $f(x)$ amaç fonksiyonunu, $g_j(x)$ eşitsizlik türü sınırlayıcıları ve $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ tasarım değişkenlerini göstermek ve bu durumda,

$$g_j(x) = g_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0; \quad j=1, \dots, k \quad (2.37)$$

eşitsizliklerini sağlamak koşuluyla amaç fonksiyonu,

$$\text{optimize } f(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.2.1. Amaç Fonksiyonu

Yapısal optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu genellikle yapının ağırlığı yada toplam maliyetiyle ifade edilmektedir. Betonarme beton ve çelik gibi birbirinden farklı malzemeler içerdiğinden, bu yapıların optimum tasarımı için amaç fonksiyonu olarak yapı maliyetinin dikkate alınması çoğunlukla daha uygun olmaktadır. Çünkü çelik yapıların aksine minimum ağırlıklı betonarme yapının aynı zamanda minimum maliyetli olması mümkün olmayabilmektedir. Betonarme yapıdaki beton ve çelik maliyetlerinin farklı oluşu yapının toplam maliyetini etkilediğinden, betonarme yapıların optimum tasarımı için amaç fonksiyonunun; beton, çelik ve kalıp maliyetlerini içeren toplam maliyet cinsinden tanımlanmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada amaç fonksiyonu, beton, çelik, kalıp, iskele, kazı ve dolgu maliyetlerini ve bunlara ilişkin işçilikleri dikkate alan birim uzunluktaki tünel için toplam maliyetin minimizasyonu olarak ifade edilmektedir. Bu amaç fonksiyonu (f_{maliyet}) matematiksel olarak; C_c beton, C_s çelik, C_k kalıp, C_{is} iskele, C_{kz} kazı ve C_{dl} dolgu maliyetleriyle bunlara ilişkin işçilik giderlerini göstermek üzere:

$$f_{\text{maliyet}} = C_c + C_s + C_k + C_{is} + C_{kz} + C_{dl} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada V_c beton hacmini (m^3/m), c_c betonun birim maliyetini ($₺/m^3$) göstermek üzere betonun maliyeti,

$$C_c = V_c c_c \quad (2.40)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu bağıntı da bir gözlü tünel için; h^{dv} , h^{tv} ve h^{tb} sırasıyla duvarın, tavan ve taban döşemelerinin kalınlıklarını, l^{dv} , l^{tv} ve l^{tb} sırasıyla duvarın, tavan ve taban döşemelerinin boylarını, c_c^{tv} , c_c^{dv} ve c_c^{tb} yine sırasıyla tavan döşemesi, duvar ve taban döşemesinde kullanılan betonun birim maliyetlerini göstermek üzere:

$$C_c = h^{tv} l^{tv} c_c^{tv} + 2h^{dv} l^{dv} c_c^{dv} + h^{tb} l^{tb} c_c^{tb} \quad (2.41)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Tünel iki gözlü ise bu maliyete orta duvar betonun maliyetini de eklenmek gerekmektedir. Bu eklenirse; h^{odv} ve l^{odv} sırasıyla orta duvarın kalınlık ve boyunu göstermek üzere (2.41) bağıntısı,

$$C_c = h^{tv} l^{tv} c_c^{tv} + 2h^{dv} l^{dv} c_c^{dv} + h^{tb} l^{tb} c_c^{tb} + h^{odv} l^{odv} c_c^{odv} \quad (2.42)$$

şeklini almaktadır.

Kullanılan çeliğin toplam maliyeti (C_s) ise; W_s toplam çelik ağırlığını (daN/m) ve c_s çeliğin birim maliyetini (₺/daN) göstermek üzere,

$$C_s = W_s c_s \quad (2.43)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bir gözlü tünelin birim uzunluğu için; A_s asal donatı alanını, l_s asal donatı uzunluğunu, A_{sw} kesme donatısı alanını, l_{sw} kesme donatısı uzunluğunu, A_{sd} dağıtma donatısı alanını, l_{sd} dağıtma donatısı uzunluğunu γ_s çelik birim ağırlığını, n asal, p kesme, r dağıtma donatısı adedini, dv , tv ve tb üst indisleri sırasıyla duvarı, tavan ve taban döşemesine ilişkin indisler olmak üzere toplam çelik donatı ağırlığı,

$$W_s = \delta_s \left(\sum_{i=1}^n A_{s,i}^{tv} \cdot l_{s,i}^{tv} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{tv} \cdot l_{sw,j}^{tv} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{tv} \cdot l_{sd,k}^{tv} + \sum_{i=1}^n A_{s,i}^{dv} \cdot l_{s,i}^{dv} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{dv} \cdot l_{sw,j}^{dv} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{dv} \cdot l_{sd,k}^{dv} + \sum_{i=1}^n A_{s,i}^{tb} \cdot l_{s,i}^{tb} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{tb} \cdot l_{sw,j}^{tb} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{tb} \cdot l_{sd,k}^{tb} \right) \quad (2.44)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Tünelin iki gözlü olması durumunda bu bağıntıya orta duvarda kullanılan donatı maliyetlerini de eklenmek gerekmektedir. Bu eklenirse odv üst indisi orta duvara ilişkin indis olmak üzere (2.46) bağıntısı,

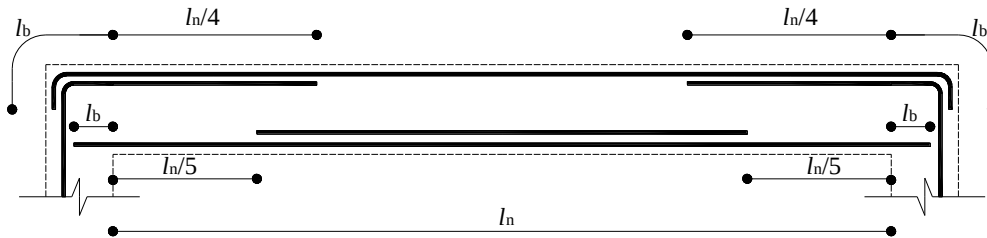
$$\begin{aligned}
W_s = \delta_s \left(\sum_{i=1}^n A_{s,i}^{tv} \cdot l_{s,i}^{tv} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{tv} \cdot l_{sw,j}^{tv} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{tv} \cdot l_{sd,k}^{tv} + \sum_{i=1}^n A_{s,i}^{dv} \cdot l_{s,i}^{dv} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{dv} \cdot l_{sw,j}^{dv} \right. \\
+ \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{dv} \cdot l_{sd,k}^{dv} + \sum_{i=1}^n A_{s,i}^{tb} \cdot l_{s,i}^{tb} + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{tb} \cdot l_{sw,j}^{tb} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{tb} \cdot l_{sd,k}^{tb} + \sum_{i=1}^n A_{s,i}^{odv} \cdot l_{s,i}^{odv} \\
\left. + \sum_{j=1}^p A_{sw,j}^{odv} \cdot l_{sw,j}^{odv} + \sum_{k=1}^r A_{sd,k}^{odv} \cdot l_{sd,k}^{odv} \right) \quad (2.45)
\end{aligned}$$

şeklini almaktadır. Bir gözlü tünel için asal donatı uzunlukları; tavan döşemesi için Şekil 2.9, taban döşemesin için Şekil 2.10 ve duvar için Şekil 2.11 yardımıyla hesaplanmaktadır. İki gözlü tünel için asal donatı uzunlukları ise; yan duvarlar için Şekil 2.11, tavan döşemesi için Şekil 2.12, taban döşemesi için Şekil 2.13 ve orta duvar için Şekil 2.14 yardımıyla hesaplanmaktadır.

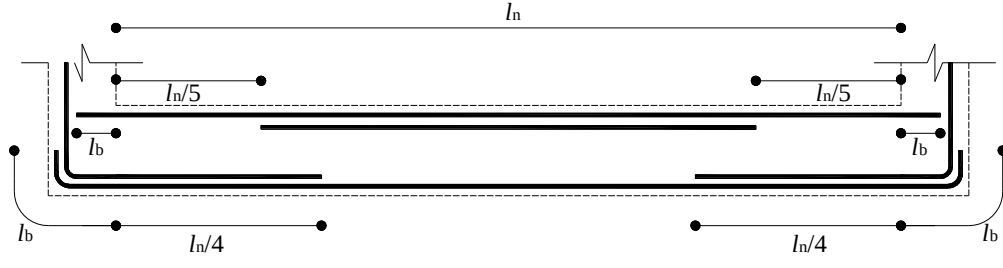
Burada kesme donatısı uzunluğunun, asal donatılara ilişkin paspayları (d') hariç eleman kalınlıklarına ($h-2d'$) kancalar için kenetlenme boyunun iki katı eklenerek hesaplandığı, her bir dağıtma donatısı uzunluğu, tünelin birim boyuna göre hesap yapıldığından 1m olarak dikkate alındığı, kenetlenme boylarının belirlenmesinde ise TS500'de (2000) önerilen,

$$l_b \geq \begin{cases} 0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \phi \\ 20\phi \end{cases} \quad (2.46)$$

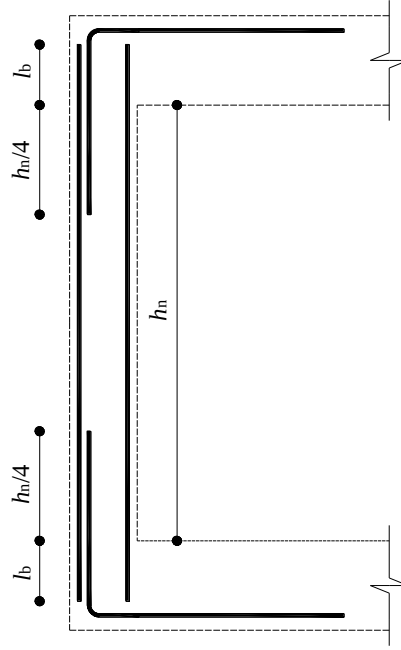
koşuluna uyulduğunun belirtilmesi uygun olmaktadır.



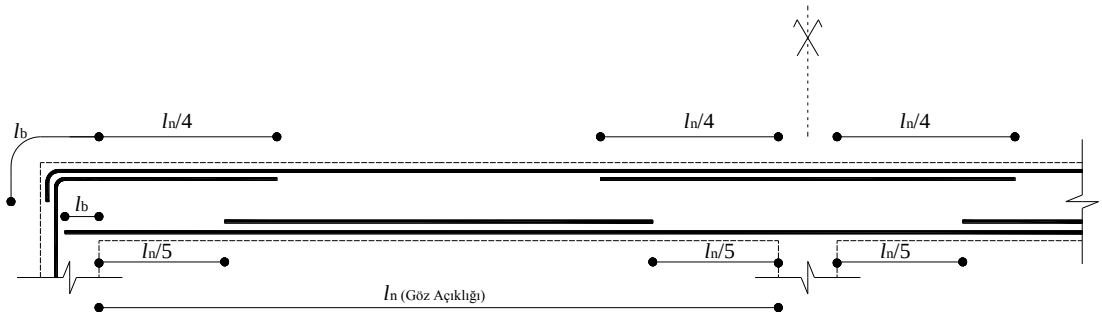
Şekil 2.9. Bir gözlü tünelin tavan döşemesine ilişkin asal donatı şeması



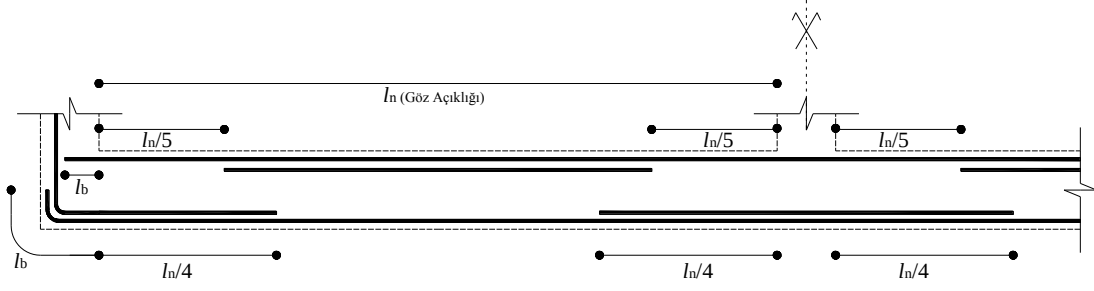
Şekil 2.10. Bir gözlü tünelin taban döşemesine ilişkin asal donatı şeması



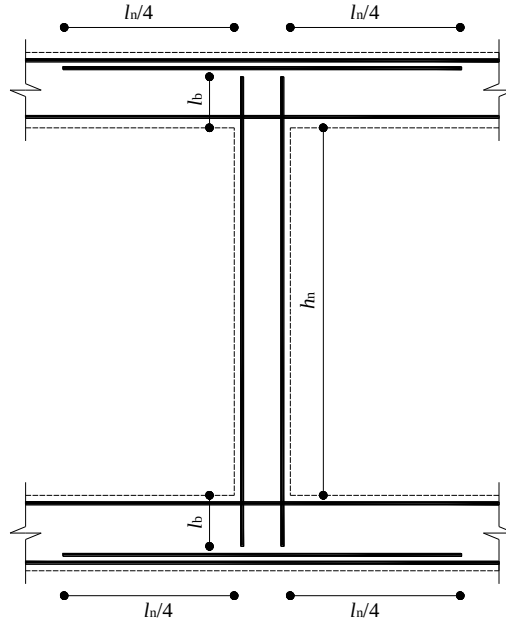
Şekil 2.11. Bir ve iki gözlü tünelin yan duvarlarına ilişkin asal donatı şeması



Şekil 2.12. İki gözlü tünelin tavan döşemesine ilişkin asal donatı şeması



Şekil 2.13. İki gözlü tünelin taban döşemesine ilişkin asal donatı şeması



Şekil 2.14. İki gözlü tünelin orta duvarına ilişkin asal donatı şeması

Kalıp maliyetine gelince; A_k kalıp alanını, c_k kalıbın birim maliyetini (₺/m²) göstermek üzere:

$$C_k = A_k c_k \quad (2.47)$$

şeklinde belirlenmektedir. Buna göre bir gözlü tünelin birim uzunluğunun kalıp maliyeti (C_k); h_n tünelin net yüksekliğini ve l_n tünelin net genişliğini göstermek üzere,

$$C_k = 2 \cdot h_n + 2 h_n + h^{tv} + h^{tb} + l_n \cdot c_k \quad (2.48)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu bağıntı iki gözlü tünel için, l_n bir gözün net genişliği olmak üzere,

$$C_f = 4 \cdot h_n + 2 h_n + h^{tv} + h^{tb} + 2 \cdot l_n \cdot c_k \quad (2.49)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Maliyet birleşenlerinden biri olan iskele maliyeti tünelin iç boşluk alanına göre hesaplanması gerekmektedir. Buna göre c_{is} iskele birim maliyetini (₺/m^3) göstermek üzere, bir gözlü tünelin iskele maliyeti,

$$C_{is} = h_n \cdot l_n \cdot c_{is} \quad (2.50)$$

bağıntısıyla iki gözlününüki ise,

$$C_{is} = h_n \cdot 2l_n \cdot c_{is} \quad (2.51)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Benzer olarak kazı (C_{kz}) ve dolgu maliyetleri (C_{dl}) de; V_{kz} kazı hacmini, V_{dl} dolgu hacmini, c_{kz} kazı birim maliyetini (₺/m^3) ve c_{dl} dolgu birim maliyetini (₺/m^3) göstermek üzere,

$$C_{kz} = V_{kz} \cdot c_{kz} \quad (2.52)$$

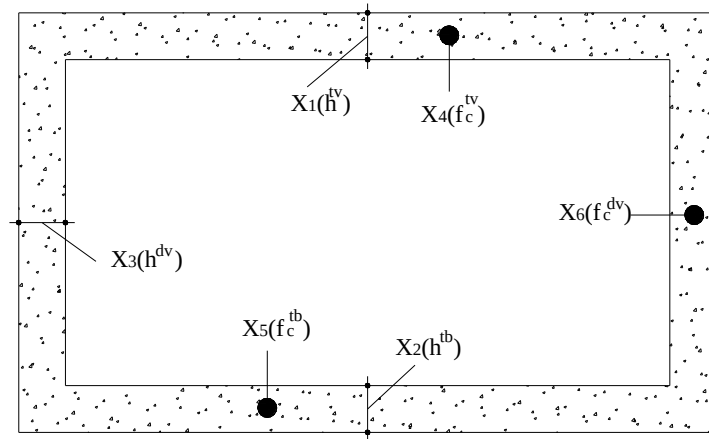
$$C_{dl} = V_{dl} \cdot c_{dl} \quad (2.53)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Burada birim fiyatların dolayısıyla da birim maliyetlerin zamanla değiştiği belirtilmelidir. Bu nedenle çalışmanın yapıldığı yıl ve ülkeye göre farklı birim maliyetler (fiyatlar) kullanılmaktadır.

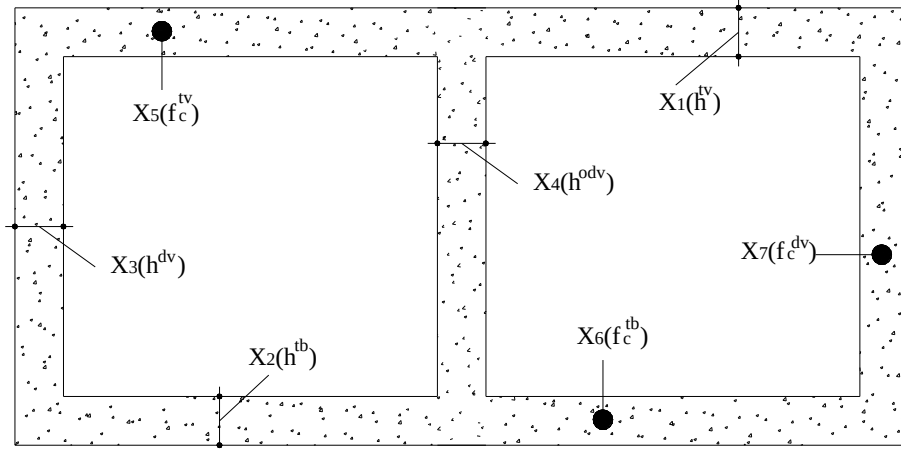
2.2.2. Tasarım Değişkenleri

Bu çalışmada tasarım değişkenleri; boyutlar, beton sınıfı ve donatıyla ilgililer olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Bu üç sınıfa ilişkin toplam değişken sayısı bir gözlü tünel için 28, iki gözlü tünel için ise 32'dir. Bir gözlü tünel için belirlenen tasarım değişkenlerinin ilk üç tanesi boyutlara ilişkin değişkenlerdir. Bunları; tavan, taban döşemeleriyle duvar kalınlıkları oluşturmaktadır. Bunları takip eden diğer üç değişken ise; tavan, taban döşemeleri ve duvarda kullanılan beton sınıflarına ilişkindir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Bir gözlü tünelde boyut ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenleri

İki gözlü tünel için belirlenen tasarım değişkenlerinin ilk dört tanesi boyutlara ilişkin değişkenlerdir. Bu değişkenleri; tavan, taban döşemeleriyle yan ve orta duvar kalınlıkları oluşturmaktadır. Bunları takip eden diğer üç değişken ise, bir gözlü tünel uygulamasında olduğu gibi; tavan, taban döşemeleriyle duvarda kullanılan beton sınıflarına ilişkin olanlardır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. İki gözlü tünelde boyut ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenleri

Boyutlara ilişkin değişkenler pratikte uygulanabilir kesitler olması bakımından 400mm-1500mm aralığında, 50mm'lik artımla oluşturulan tanım kümesinden değerler almaktadırlar. Beton sınıfıyla ilgili değişkenlere gelince bunlar, Türkiye'de üretilen beton sınıflarından (C20'den C50'ye kadar) oluşturulan tanım kümesinden seçilmektedir. Bu değişkenlerin sınırları, değişim aralıkları ve alabilecekleri değer sayıları aşağıdaki Çizelge 2.7.'de verilmektedir.

Çizelge 2.7. Boyutlara ve beton sınıfına ilişkin tasarım değişkenlerinin sınırları, değişim aralıkları ve alabilecekleri değer sayıları

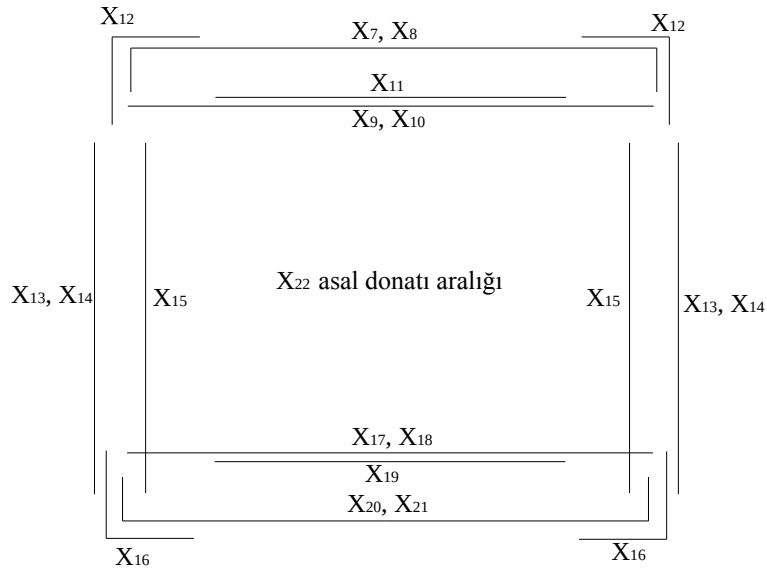
Tasarım Değişkeni	Simgesi	Alt Sınır	Üst Sınır	Artım	Alabileceği Değer Sayısı
Boyutlara İlişkin	$h^{tv}, h^{dv}, h^{tb}, h^{odv}$	400 mm	1500 mm	50 mm	21
Beton Sınıfına İlişkin	$f_c^{tv}, f_c^{dv}, f_c^{tb}$	{C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50}			7

Optimizasyon algoritmasında kullanılan beton sınıflarına ilişkin bazı mekanik özellikler aşağıdaki Çizelge 2.8'de verilmektedir.

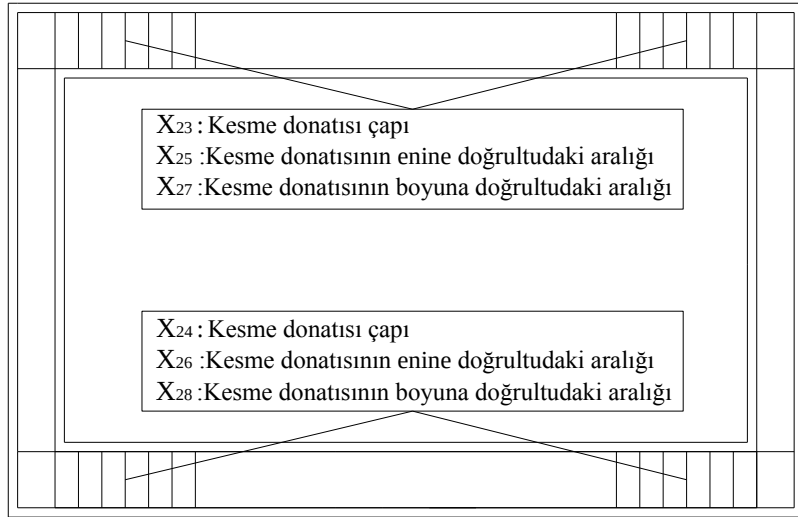
Çizelge 2.8. Optimizasyon algoritmasında kullanılan beton sınıflarına ilişkin bazı mekanik özellikler

Beton Sınıfı	Tasarım Basınç Dayanımı (f_{cd}) (MPa)	Tasarım Çekme Dayanımı (f_{ctd}) (MPa)	28 Günlük Elastisite Modülü (MPa)	Basınç Bloğu Katsayısı (k_1)
C20	13	1	28000	0.85
C25	17	1.15	30000	0.85
C30	20	1.25	32000	0.82
C35	23	1.35	33000	0.79
C40	27	1.45	34000	0.76
C45	30	1.55	36000	0.73
C50	33	1.65	37000	0.70

Bir gözlü tüneller için kalan 22 tasarım değişkenin; 15 tanesi asal ve ek donatı çaplarına, 2 tanesi kesme donatı çaplarına ve kalan 5 tanesi ise bu donatıların aralıklarına ilişkindir. Bunlardan asal ve ek donatıların değişken numaraları Şekil 2.17’de, kesme donatılarınıninkiler ise Şekil 2.18’de verilmektedir.

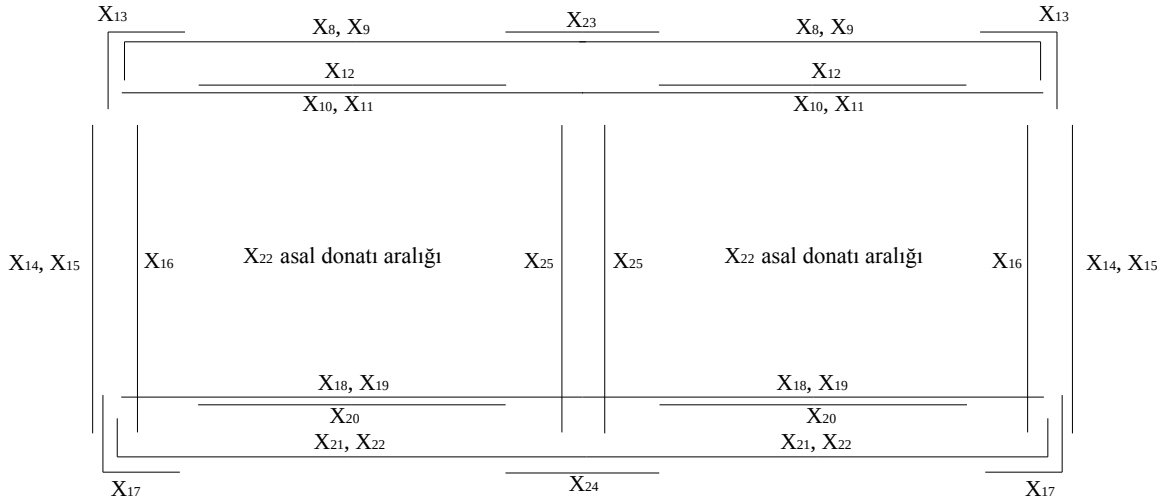


Şekil 2.17. Bir gözlü tünellerde asal ve ek donatı değişkenleri

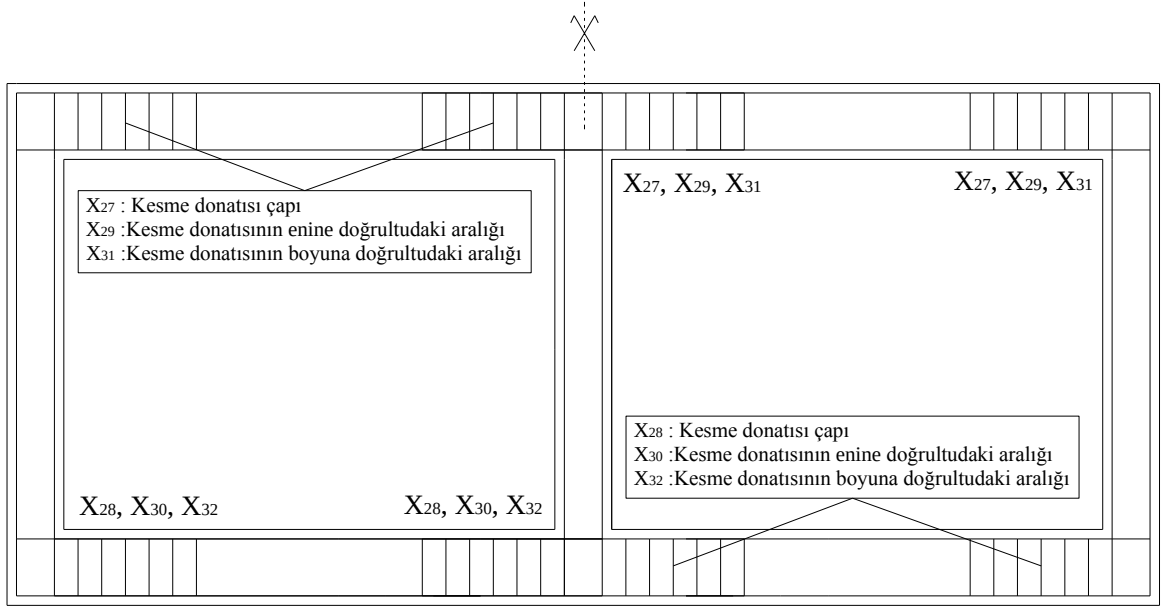


Şekil 2.18. Bir gözlü tünellerde kesme donatısı değişkenleri

İki gözlü tünellerde boyut ve betona ilişkin tasarım değişkenleri dışında kalan diğer 25 tasarım değişkeninin; 18 tanesi asal ve ek donatı çaplarına, 2 tanesi kesme donatı çaplarına ve kalan 5 tanesi ise bu donatıların aralıklarına ilişkindir. Bunlardan asal ve ek donatıların değişken numaraları Şekil 2.19’da, kesme donatılarınıninkiler ise Şekil 2.20’de verilmektedir.



Şekil 2.19. İki gözlü tünellerde asal ve ek donatı değişkenleri



Şekil 2.20. İki gözlü tünellerde kesme donatısı değişkenleri

Asal donatı çaplarına ilişkin değişkenlerin tanım kümesi 12 mm'den başlayarak 32mm'ye kadar 2mm'lik artımlarla, kesme donatısı çaplarına ilişkin değişkenlerin tanım kümesi ise 8mm'den başlayarak 32mm'ye kadar 2mm'lik artımlarla elde edilen donatı çaplarından oluşmaktadır. Asal donatı aralıklarına ilişkin tasarım değişkenlerinin tanım kümesinde 50, 75, 100, 125, 150 ve 200mm'den oluşan aralıklar, kesme donatılarının tünelin boyuna doğrultusundaki aralıklarına ilişkin tasarım değişkenlerinin tanım kümesinde 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250 ve 300mm'den oluşan aralıklar, tünelin enine doğrultusundaki aralıklarına ilişkin tasarım değişkenlerinin tanım kümesinde ise 50, 100, 150 ve 200mm'den oluşan aralıklar bulunmaktadır. Ancak algoritma içerisinde pratikte uygulanabilir olması bakımından donatı aralıklarının uyumu da denetlenmektedir. Örneğin kesme donatılarının asal donatılara bağlanabilmesi için boyuna doğrultudaki kesme donatısı aralığının asal donatı aralığına uyumluluğunun denetlenmesi zorunlu olmaktadır. Öyle ki asal donatı aralığının 200mm seçilmesi, kesme donatısının boyuna doğrultudaki aralığının 200mm'den küçük olamamasını gerektirmektedir. Asal donatı aralığının 75mm seçilmesi durumunda ise kesme donatısının tünelin boyuna doğrultusundaki aralığı tanım kümesi gereği ancak 75, 150 yada 300mm değerlerini alabilmektedir. Bu denetimlerin tümü hazırlanan yazılım içerisinde yapılmaktadır.

2.2.3. Yapısal Sınırlayıcılar

Yapısal sınırlayıcılar tünelin tasarımı yürürlükte bulunan yönetmeliklere göre sağlanması gereken koşullardır. Bu koşulların sağlanabilmesi için tünel kesit etkilerinin ve kullanım yükleri altında meydana gelen sehimlerin hesaplanması gerekmektedir.

Bilindiği gibi eğilme etkisindeki kesitlerde gevrek kırılmaların önlenmesi için normal donatıya sahip olması gerekmektedir. Normal donatıya sahip kesitte eşdeğer basınç diyagramı derinliği,

$$a = \frac{A_s f_{yd}}{0.85 f_{cd} b} \quad (2.54)$$

bağıntısı, kesitin direnme momenti ise,

$$M_r = A_s f_{yd} \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.55)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Algoritmanın işleyişinde herhangi bir nektar kaynağı (çözüm) için kesitteki asal donatı alanı ve donatı oranı tasarım değişkenlerinden asal donatı aralığı (s_a), asal donatı çapı ($\emptyset$) kullanılarak hesaplanmaktadır. Kesitin direnme momenti (M_r) belirlenen alan ve tasarım değişkenlerinden betonun tasarım dayanımı (f_{cd}) ve kesitin faydalı yüksekliği (2.54) ve (2.55) bağıntılarında yerine konulmak suretiyle hesaplanmaktadır. Yürürlükte bulunan TS500'e (2000) göre kesitteki donatı oranı,

$$\rho > \rho_{\min} = \begin{cases} 0.80 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \\ 0.002 \end{cases} \quad (2.56)$$

minimum donatı oranı ve,

$$\rho_b = 0.85 k_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (2.57)$$

dengeli donatı oranı olmak üzere,

$$\rho < \rho_{\max} = 0.85\rho_b \quad (2.58)$$

maksimum donatı oranı koşullarını sağlaması gerekmektedir. Bu donatı oranı bu çalışmada normal donatı olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda algoritmada,

$$\left. \begin{aligned} g_1 \quad x &= \frac{\rho_{\min}}{\rho} - 1 \leq 0 \\ g_2 \quad x &= \frac{\rho}{\rho_{\max}} - 1 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

sınırlayıcıları kullanılarak (2.56) ve (2.58) bağıntılarının ifade ettiği koşulların sağlanıp sağlanmadığının denetlenmesi gerekmektedir. Direnme momentlerinin yapısal çözümlemeden elde edilen tasarım momentlerini karşılayıp karşılamadığı,

$$g_3 \quad x = \frac{M_d}{M_r} - 1 \leq 0 \quad (2.60)$$

sınırlayıcısı tavan döşemesinin kullanım yükleri altında sehiminin, kullanılabilirlik sınır durumu bakımından, izin verilen sehimi (1/250) geçip geçmediği ise (Eurocode-2, 2005),

$$g_4 \quad x = \frac{\delta_d}{\delta_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (2.61)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir.

Kesmeye göre tasarımda da herhangi bir nektar kaynağı (çözüm) için atanan tasarım değişkenlerinden kesme donatının tünel boyuna doğrultusundaki aralığı (s_1), kesme donatısı çapı (ϕ) kullanılarak kesitteki kesme donatısı alanı,

$$A_{sw} = \frac{1000 \pi \phi^2}{4s_1} \quad (2.62)$$

bağıntısı, bu alana göre karşılanabilecek kesme kuvveti (V_w); f_{ywd} kesme donatısının tasarım dayanımını, s_t tasarım değişkenlerinden biri olan kesme donatısının tünel enkesitindeki aralığını göstermek üzere,

$$V_w = \frac{A_{sw} f_{ywd} d}{s_t} \quad (2.63)$$

bağıntılarıyla belirlenmektedir. Betonun karşılayacağı kesme kuvveti (V_c) ise, f_{ctd} tasarım değişkenlerinden betonun tasarım çekme dayanımını göstermek üzere,

$$V_c = 0.80 \cdot 0.65 f_{ctd} b d \quad (2.64)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada hesap tünelin bir metre uzunluğu için yapıldığından kesit genişliğinin $b_w=100$ cm alınabileceği belirtilmelidir. Buna göre kesitin kesme dayanımı (V_r),

$$V_r = V_w + V_c \quad (2.65)$$

olarak hesaplanmaktadır. Kesme dayanımının, yapısal çözümlemeden elde edilen tasarım kesme kuvvetinden büyük olup olmadığının belirlenmesine gelince bunun,

$$g_5 \quad x = \frac{V_d}{V_r} - 1 \leq 0 \quad (2.66)$$

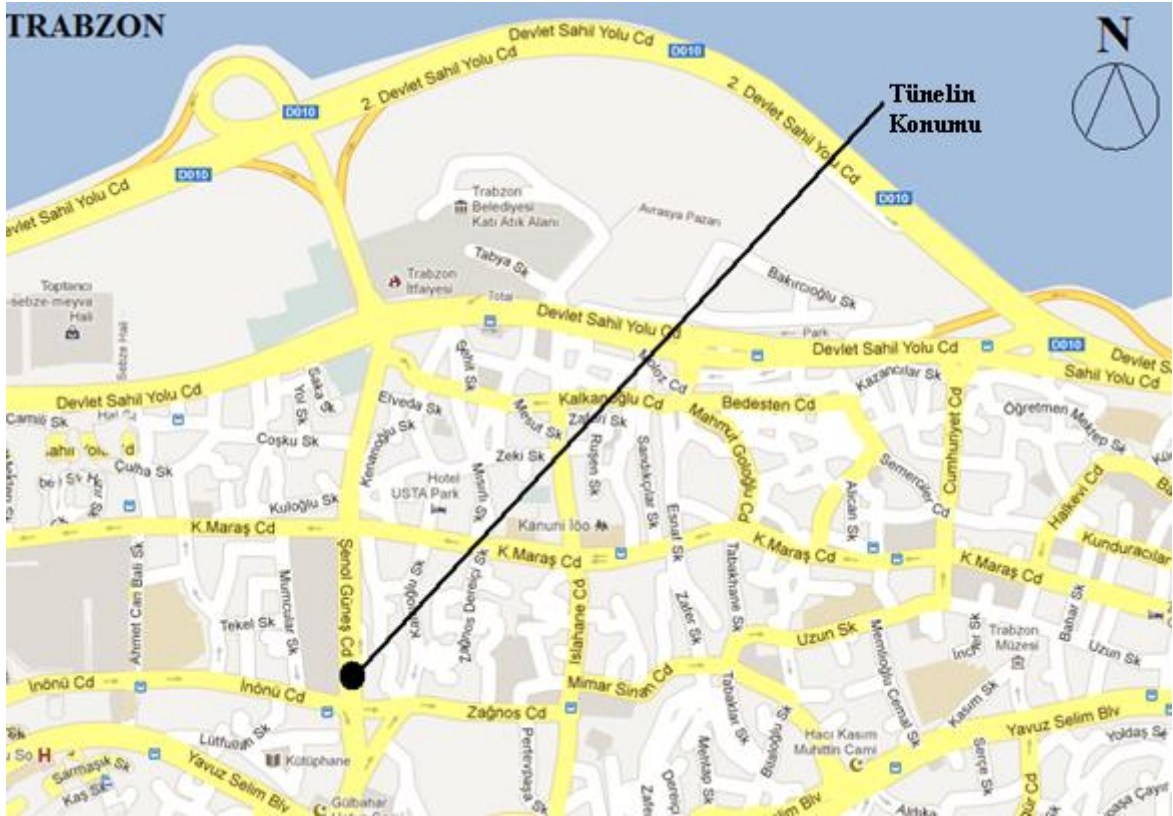
sınırlayıcısıyla denetlenmesi gerektiği gibi, yazarın kanısınca kesme donatısının tünel boyuna doğrultudaki aralığının, asal donatı aralıklarıyla uygunluğunun da denetlenmesi gerekmektedir. Bu durumda sınırlayıcı ihlalleri,

$$g_6 \quad x = \begin{cases} s_l < s_a \Rightarrow \frac{s_a}{s_l} - 1 \\ s_l \geq s_a \text{ ve } s_l \text{ } s_a \text{ 'ya bölünebiliyorsa} \Rightarrow 0 \\ s_l \geq s_a \text{ ve } s_l \text{ } s_a \text{ 'ya bölünemiyorsa} \Rightarrow \frac{\text{mod } s_l, s_a}{s_a} \end{cases} \quad (2.67)$$

ifadeleriyle belirlenmektedir.

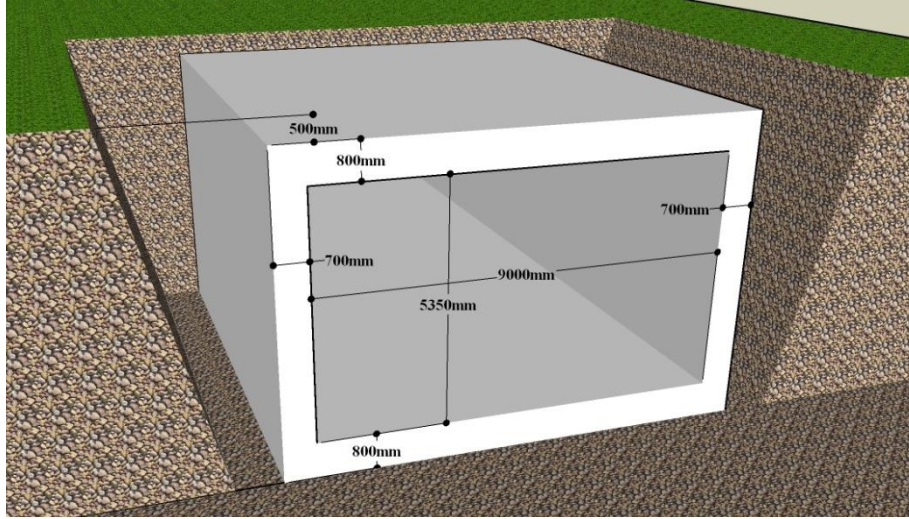
2.3. Trabzon Kalekapısı Kavşağı Alt Geçidi İle İlgili Bilgiler

Çalışma kapsamında optimizasyonu gerçekleştirecek olan tünel T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü denetimi altında inşa edilen, projesi Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. tarafından gerçekleştirilen aç-kapa yöntemiyle inşa edilen betonarme bir yeraltı yapısıdır. Bu yapı Trabzon devlet sahil yolu ile Yavuz Selim Bulvarını birbirine bağlayan Şenol Güneş Caddesi üzerinde bulunmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Optimum tasarımı yapılan Trabzon Kalekapısı kavşağı altgeçit tünelinin konumu

Enkesiti dikdörtgen şeklinde olan bu tünelin uzunluğu yaklaşık 70m'dir. Tünelin enkesiti Şekil 2.22'de verilmektedir.



Şekil 2.22. Tünel enkesitinin boyutları

Bu tünelin tasarımında kullanılan beton ve donatıya ilişkin veriler Çizelge 2.9’da, tünel üzerine ve etrafında dolgu için kullanılan zemine ilişkin özellikler ise Çizelge 2.10’da verilmektedir.

Çizelge 2.9. Tünel inşasında kullanılan beton ve donatıya ilişkin bazı özellikler

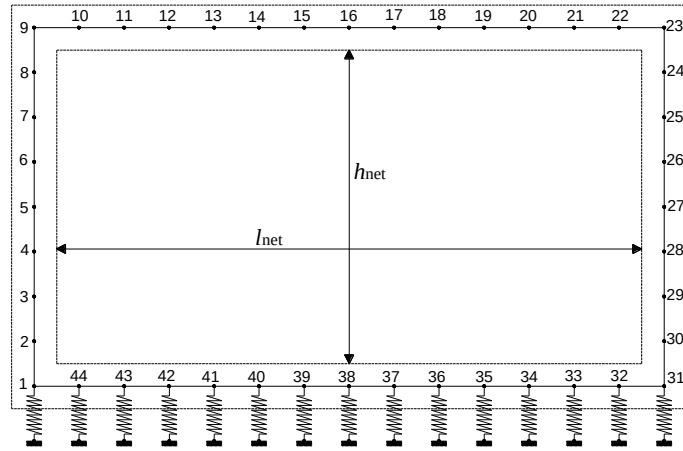
Özellikler	Değer	Birim
Karakteristik Beton dayanımı	25	MPa
Betonun Tasarım Basınç Dayanımı	16.7	MPa
Betonun Tasarım Çekme Dayanımı	1.20	MPa
Betonun Birim Ağırlığı	25.00	kN/m ³
Paspayı	5	cm
Minimum donatı oranı	0.002	-
Donatının Karakteristik Akma Dayanımı	420	MPa
Donatının Tasarım Akma Dayanımı	365	MPa

Çizelge 2.10. Zemine ilişkin bazı özellikler

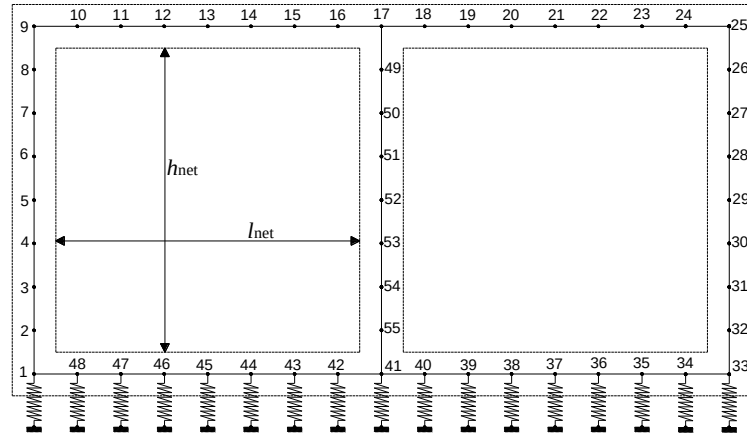
Veri	Değer	Birim
Zemin Birim Ağırlığı (γ_z)	19	kN/m ³
İçsel sürtünme açısı (ϕ)	30	°
Şev açısı (β)	0	°
Duvar arka yüzünün düşeyle yaptığı açı (α)	0	°
Zemin-duvar sürtünme açısı (δ)	22.50	°
Zeminin yatak katsayısı	20000	kN/m ³

2.3.1. Tünelin Sonlu Elemanlar Modeli

Yapısal modelin çözümlenmesi için MATLAB programlama dilinde bir sonlu elemanlar yazılımı hazırlanmıştır. Bu yazılım kesit etkilerinin ve sehimin hesaplanması için geliştirilen optimizasyon algoritması içerisinde kullanılmaktadır. Bir gözlü tünel modelinde 44 düğüm noktası (Şekil 2.23), iki gözlü tünel modelinde ise 55 düğüm noktası (Şekil 2.24) bulunmakta, taban zemininin davranışı yaylarla gösterilmekte ve kullanılan malzeme davranışlarının izotropik doğrusal elastik olduğu kabul edilmektedir.

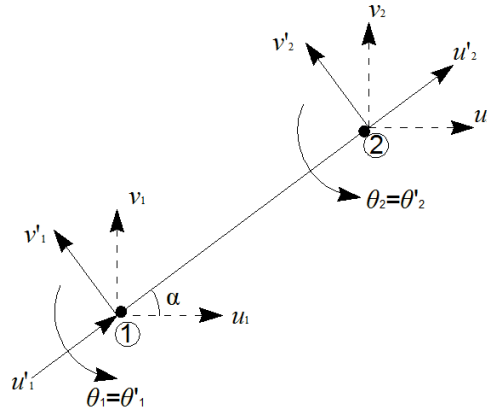


Şekil 2.23. Bir gözlü tünelin için sonlu elemanlar modeli



Şekil 2.24. İki gözlü tünelin için sonlu elemanlar modeli

Bu sonlu elemanlar modelinde iki boyutlu çerçeve eleman kullanılmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. İki boyutlu çerçeve eleman

Bu elemanın herbir düğüm noktasında, iki yerdeğiştirme ve bir dönme olan üç serbestlik derecesi vardır. Sistem eksen takımında yerdeğiştirme vektörü,

$$u^T = u_1 \quad v_1 \quad \theta_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \theta_2 \quad (2.68)$$

şeklinde, eleman eksen takımındaki yerdeğiştirmeler için dönüşüm matrisi ise,

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

şeklindedir. Eleman eksen takımındaki yerdeğiştirmeler,

$$u'^T = [u'_1 \quad v'_1 \quad \theta'_1 \quad u'_2 \quad v'_2 \quad \theta'_2] \quad (2.70)$$

olarak ifade edilmekte ve bu yerdeğiştirmeler sistem eksen takımındaki yerdeğiştirmelerden,

$$u' = T u \quad (2.71)$$

ifadesiyle elde edilmektedir.

Eleman eksen takımında çerçeve elemanın rijitlik matrisi, E elastisite modulünü, A elemanın en kesit alanını, L elemanın boyunu ve I atalet momentini göstermek üzere,

$$K' = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ sim. & & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

şeklindedir. Sistem eksen takımındaki rijitlik matrisi ise,

$$K = T^T K' T \quad (2.73)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Zeminle etkileşimi dikkate almak için tünel tabanında yay elemanlar kullanılmıştır. Yayların rijitliği taban zeminin yatak katsayısına göre hesaplanarak sistem rijitlik matrisine eklenmektedir.

2.3.2. Yükler

2.3.2.1. Sabit yükler

Bu çalışmada sabit yük olarak; tünel üzerindeki örtü zemininin ağırlığı ve tünelin öz ağırlığı dikkate alınmıştır. Bu durumda zemin örtüsünden oluşan sabit yük, h_{or} tünel üzerindeki zemin kalınlığını göstermek üzere,

$$G_{zemin} = \gamma_z \cdot h_{or} = 19 \cdot 0.5 = 9.5 \text{ kN / m}^2 \quad (2.74)$$

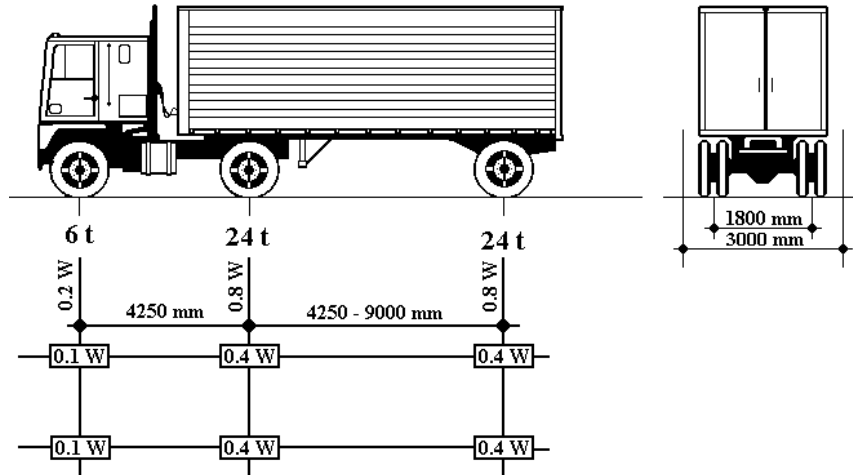
olarak hesaplanmakta ve $G_{\text{yapı}}$ tünelin öz ağırlığını göstermek üzere toplam sabit yük,

$$G = G_{\text{zemin}} + G_{\text{yapı}} \quad (2.75)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

2.3.2.2. Hareketli Yükler

Hareketli yükler yönetmeliklerde tanımlanan standart kamyon yüklerinden yada standart kamyon katarlarına eşdeğer olan şerit yüklerden oluşmaktadır. Bu çalışmada H30-S24 simgesiyle tanımlanan taşıt yükü kullanılmaktadır (YKTŞ,1973). Kullanılan taşıt yükünün dağılımı Şekil 2.26'de verilmektedir.



Şekil 2.26. H30-S24 taşıt yükleme dağılımı

Tünel üzerinden geçen taşıtların dinamik etkilerini hesaba katmak için, standart taşıt yüklerinin dinamik yük çarpanıyla (ϕ_d) çarpılması gerekmektedir. Bu çarpan, L hesap uzunluğunu göstermek üzere,

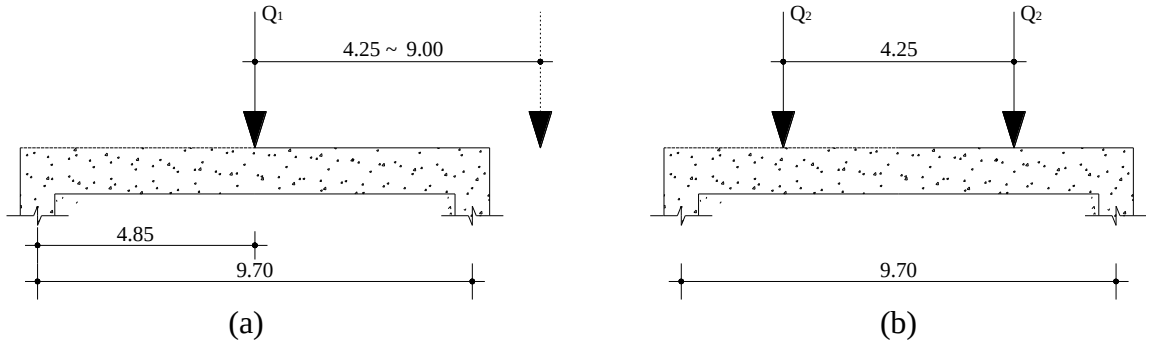
$$\phi_d = 1 + \frac{15}{L + 37} \leq 1.30 \quad (2.76)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Kalekapısı (Trabzon) altgeçidi uygulamasında hesap uzunluğu 9.70 m olduğundan, buna göre dinamik yük çarpanı,

$$\varphi_d = 1 + \frac{15}{9.70 + 37} \rightarrow \varphi_d = 1.32 \quad (2.77)$$

olarak hesaplanmaktadır. Ancak (2.76) ifadesi gereği bu çarpanı $\varphi_d=1.30$ olarak dikkate almak gerekmektedir.

Açıklık ve mesnet momentlerinin mutlak değerce en büyük değerlerini veren hareketli yük yükleme durumları Şekil 2.27'de verilmektedir.



Şekil 2.27. En büyük açıklık (a) ve cebrik olarak en küçük mesnet momentleri (b) için yükleme durumları

2.3.2.3. Yatay Zemin Basınçları

Tünel üzerindeki zeminden dolayı meydana gelen basınçlar ($p_{G1}^{sağ}$ ve p_{G1}^{sol}), sukunet durumundaki yatay basınç katsayısı $K_0=0.50$ olmak üzere,

$$\left. \begin{aligned} p_{G1}^{sol} = p_{G1}^{sağ} &= h_{or} + h^{tv} / 2 \cdot K_0 \cdot \gamma_z \\ &= 0.50 + 0.80 / 2 \cdot 0.50 \cdot 19 = 8.6 \text{ kN} / \text{m}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

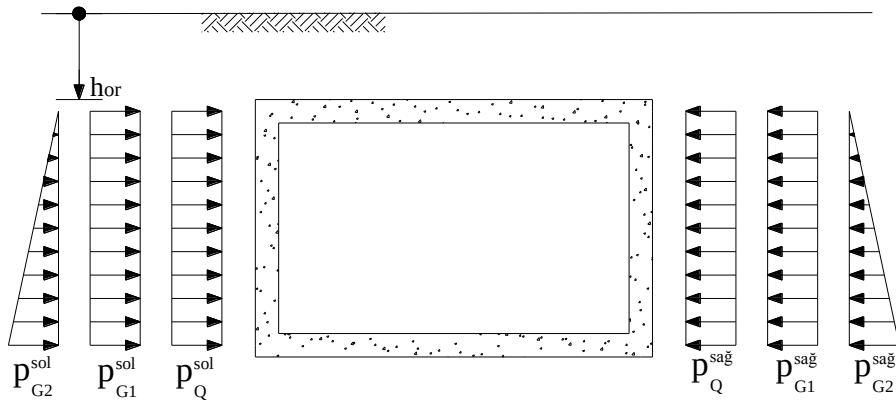
olarak hesaplanmaktadır. Üçgen şeklindeki zemin yatay basınçları da ($p_{G2}^{sağ}$ ve p_{G2}^{sol}),

$$\left. \begin{aligned} p_{G2}^{sol} = p_{G2}^{sağ} &= h_{or} - h^{tv} / 2 + h^{tb} / 2 \cdot K_0 \cdot \gamma_z \\ &= 6.15 \cdot 0.5 \cdot 19 = 58.4 \text{ kN} / \text{m} \end{aligned} \right\} \quad (2.79)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Hareketli yükten doğan yatay basınçlar ($p_Q^{sağ}$ ve p_Q^{sol}) ise, q eşit yayılı hareketli yükü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} p_Q^{sağ} = p_Q^{sol} &= q \cdot K_o \\ &= 11.4 \cdot 0.50 = 5.7 \text{ kN / m}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

olarak hesaplanmaktadır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Tünele etkiyen yatay zemin basınçları

2.3.2.4. Deprem Yükleri

Deprem yükleri Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe (DBYBHY,2007) göre hesaplanmaktadır. Zemin özellikleri kullanılarak (bkz. Çizelge 2.11) statik durumda aktif yatay basınç katsayısı (1.3) bağıntısına göre $K_{as}=0.2963$ olarak belirlenmekte, dinamik durumda toplam aktif basınç katsayısı ise (1.24) bağıntısına göre $K_{at}=0.3515$ olarak elde edilmektedir. Bu durumda depremden doğan aktif basınç katsayısı,

$$K_{ad} = K_{at} - K_{as} = 0.0552 \quad (2.81)$$

olarak hesaplanmaktadır.

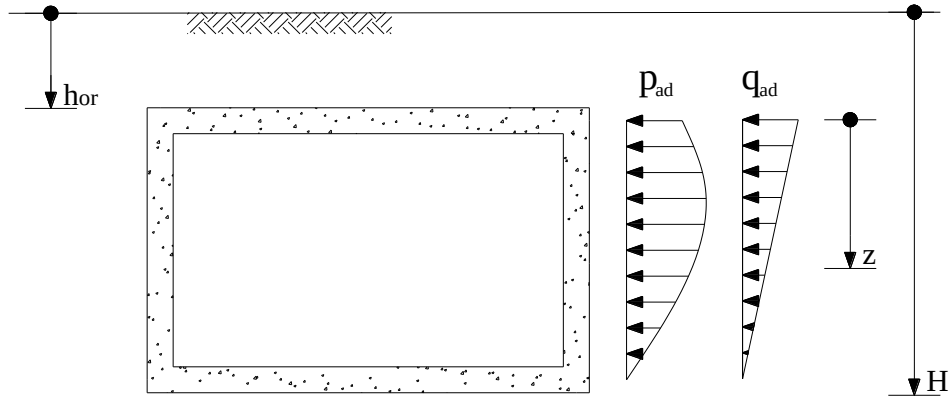
Tünele etkiyen depremden doğan yatay basıncın (p_{ad}), derinlikle (z) değişimi, H toplam zemin derinliğini göstermek üzere,

$$p_{ad} \ z = 3 \left(1 - \frac{z}{H} \right) \gamma_s \cdot z \cdot K_{ad} \quad (2.82)$$

bağıntısıyla, deprem anında hareketli yükten doğan yatay basıncın (q_{ad}), derinlikle (z) değişimi ise,

$$q_{ad} \ z = 2q_0 K_{ad} \left(1 - \frac{z}{H} \right) \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha - \beta} \quad (2.83)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Deprem etkisinde tünele gelen yatay basınçlar

2.3.3. Yük Birleşimleri

Aç-kapa tünelin tasarımında dikkate alınması gereken yük birleşimleri aşağıda verilmektedir.

$$1.30 \left[G + 1.67Q_1 + 1.15 \left(p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} \right) + 1.15 \left(p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right) \right] \quad (2.84)$$

$$1.30 \left[G + 1.67Q_2 + 1.15 \left(p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} \right) + 1.15 \left(p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right) \right] \quad (2.85)$$

$$1.30 \left[G + 1.67Q_1 + 1.15 \left(p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} \right) + 0.575 \left(p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right) \right] \quad (2.86)$$

$$1.30 \left[G + 1.67Q_2 + 1.15 p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} + 0.575 p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right] \quad (2.87)$$

$$1.30 \left[G + 1.67Q_1 + 0.575 p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} + 0.575 p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right] \quad (2.88)$$

$$1.30 \left[G + 1.67Q_2 + 0.575 p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} + 0.575 p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \right] \quad (2.89)$$

$$1.00 \left[G + 1.30 p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} + 1.30 p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} + p_{ad} + q_{ad} \right] \quad (2.90)$$

Boyutlandırmalarda bu birleşimlerden en elverişsizinin verdiği kesit etkileri dikkate alınmaktadır. Normal kullanım koşulları bakımından sehimlerin denetlenmesinde ise,

$$G + Q_1 + Q_2 + p_{G1}^{sağ} + p_{G2}^{sağ} + p_Q^{sağ} + p_{G1}^{sol} + p_{G2}^{sol} + p_Q^{sol} \quad (2.91)$$

yük birleşimi kullanılmaktadır.

2.3.4. Tasarım Parametreleri

Algoritmanın işleyişinden bağımsız olarak sabit değer alan verilere optimizasyon parametreleri adı verilmektedir. Bu parametreler; boyutlarla, donatıyla, zeminle, depremle ve dikkate alınan yönetmeliklerle ilgili parametreler olmak üzere altı guruba ayrılmaktadır. Bu grupların herbirine giren parametreler Çizelge 2.11’de verilmektedir.

Çizelge 2.11. Aç-kapa tünele ilişkin tasarım parametreleri

Parametre	Değeri	Birimi
Boyutlarla İlgili Parametreler		
Yatay serbest açıklık	9.00	m
Düşey serbest açıklık	5.35	m
Tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığı	0.50	m
Paspayı	0.05	m
Zeminle İlgili Parametreler		
Zemin birim ağırlığı	19	kN/m ³
İçsel sürtünme açısı (ϕ)	30	°
Şev açısı (β)	0	°
Duvar arka yüzünün düşeyle yaptığı açı (α)	0	°
Zemin-duvar sürtünme açısı (δ)	22.50	°
Zeminin yatak katsayısı	20000	kN/m ³
Donatıyla İlgili Parametreler		
Donatı karakteristik akma dayanımı	420	MPa
Donatı tasarım akma dayanımı	365	MPa
Donatının birim ağırlığı	78.50	kN/m ³
Depremle İlgili Parametreler		
Etkin yer ivme katsayısı	0.15	-
Yatay eşdeğer deprem katsayısı	0.060	-
Düşey eşdeğer deprem katsayısı	0.040	-
Dinamik aktif basınç katsayısı	0.0552	-
Dikkate Alınan Yönetmelikler		
AASHTO-17 HB	-	-
TS 500-2000	-	-
DBYBHY-2007	-	-

Maliyetlerle ilgili parametrelerin belirlenmesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ve Karayolları Genel Müdürlüğünün belirlemiş olduğu birim fiyatlar dikkate alınmıştır. Buna göre; yıkanmış, elenmiş ve/veya kırılmış gronülometrik agrega ile projesinde öngörülen dayanımı sağlayacak şekilde hazırlanmış betonun satın alınması, transmikserlere yüklenmesi, işyerine kadar nakli, döküm yerine beton pompası ile basılması, serilmesi, vibratör ile sıkıştırılması, gerektiğinde sulanması, soğuktan, sıcaktan ve diğer dış etkilere korunması, gerekli ve yeter sayıda deney için numune alınıp gerekli deneylerin yapılması, her türlü işçilik, malzeme ve malzeme kaybı, makine araç, gereç ve laboratuvar giderleri, işyerindeki her türlü taşımalar, yükleme ve boşaltmalar betonun şantiyeye nakli ile yüklenici kârı ve genel giderleri dâhil olmak üzere betonun birim fiyatını

oluşturmaktadır. Beton sınıfına göre 2010 yılı birim fiyatları aşağıdaki Çizelge 2.12’de verilmektedir.

Çizelge 2.12. 2010 yılı beton birim fiyatları

Beton Sınıfı	Birim Fiyat
C20	105.30 ₺/m ³
C25	112.55 ₺/m ³
C30	120.99 ₺/m ³
C35	125.55 ₺/m ³
C40	133.36 ₺/m ³
C45	138.55 ₺/m ³
C50	142.43 ₺/m ³

Donatıyla ilgili birim fiyatlara gelince bu fiyat; beton çelik çubukların projesine göre hazırlanması, yerine konması, bağlama teli ve gerekli her türlü malzeme ve kaybı, inşaat yerindeki yükleme, taşıma, boşaltma, işçilik, yüklenici kârı ve genel giderler toplamından oluşmaktadır. Donatı çapına göre 2010 yılı birim fiyatları Çizelge 2.13’de verilmektedir.

Çizelge 2.13. 2010 yılı donatı birim fiyatları

Tanım	Birim Fiyat
Ø8 - Ø12 mm çaplı donatı çubuklarının bükülmesi ve yerine konulması	1,613.25 ₺/ton
Ø14 - Ø50 mm çaplı donatı çubuklarının bükülmesi ve yerine konulması	1,454.19 ₺/ton

Kalıp, iskele, kazı ve dolguya ilişkin 2010 yılı birim fiyatları Çizelge 2.14’de verilmektedir.

Çizelge 2.14. Kalıp, iskele, kazı ve dolguya ilişkin birim fiyatlar

Tanım	Birim Fiyat
Menfez gibi 10m’den küçük açıklıklı yapılarda düz yüzeyli, rendeli beton ve betonarme kalıbı	22.20 ₺/m ²
Menfezler gibi 6 m’den büyük göz açıklıkları için iskeleleri	13.75 ₺/m ³
Eksplozörle yumuşak kayanın kazılması	7.79 ₺/m ³
Makine ile işlem görmemiş kum çakıl temini, makine ile serilmesi, sulanması, sıkıştırılması	4.28 ₺/m ³

2.4. Örnek Uygulamalar

2.4.1. Denetim Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapay Arı Koloni Algoritması denetim parametreleri (MR, LIMIT ve SPP) için seçilen değerler optimizasyon sürecini etkileyebilmektedir. Bu nedenle en uygun parametre değerlerini belirlemek için farklı parametre değerleriyle elde edilen bulgulara bazı istatistiksel testlerin uygulanması gerekmektedir.

Kullanılan farklı denetim parametreleriyle elde edilen bulgular arasında anlamlı bir farkın olup olmadığı, bu bulguların ortalama varyansını kullanan ANOVA testiyle belirlenmektedir. Bu test çeşitli nesiller arasındaki farklılıkları tanımlamak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir.

Sözkonusu test için kullanılan H_0 kabulü (hipotezi) farklı parametrelerle elde edilen bulgular arasında anlamlı bir fark olmaması, H_1 kabulü (hipotezi) ise kullanılan parametrelerden en az biriyle elde edilen bulgunun farklı olması şeklinde dikkate alınmıştır. Bu test için gerçekleştirilen koşumlardan elde edilen bulguların dikkate alınmasıyla hesaplanan guruplar arası ortalama karelerin grup içi ortalama karelere oranı (F), seçilen anlamlılık düzeyi ve problemin serbestlik derecelerine göre Ek Çizelge 1'den alınan F_{α} değeriyle karşılaştırılmakta ve hangi kabulün dikkate alınacağına karar verilmektedir. Eğer bulgular yardımıyla belirlenen F değeri çizelgeden alınandan büyükse H_1 kabulü dikkate alınmakta, diğer durumda ise H_0 kabulü kullanılmaktadır.

En iyi parametrelerin belirlenmesinde ise ANOM testi kullanılmaktadır. Bu test her bir gurup ortalamasının tüm gurupların ortalamasından farkını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte anlamlılık düzeyi ile problemin serbestlik derecesine bağlı olarak ilgili çizelgelerden alınan değer yardımıyla kullanılabilir alt ve üst sınırlar belirlenerek gurup ortalamalarının belirlenen sınırlar içinde kalıp kalmadığını gösteren ANOM grafikleri adı verilen grafikler hazırlanmaktadır.

Testler Yapay Arı Koloni Algoritması denetim parametrelerinde; MR için Akay'ın (2009) çalışmasına benzer olarak 0.1 ile 0.9 arasında 0.1 artımlarla 9 farklı değer, LIMIT için $0.1 \times SN \times D$, $0.5 \times SN \times D$, $SN \times D$, $2 \times SN \times D$, $4 \times SN \times D$ ile hesaplanan 5 farklı değer ve SPP için yine $0.1 \times SN \times D$, $0.5 \times SN \times D$, $SN \times D$, $2 \times SN \times D$, $4 \times SN \times D$ ile hesaplanan 5 farklı değer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Herbir MR, SPP ve LIMIT denetim parametreleri için 10 bağımsız koşul yapıldığından toplam $10 \times (9 \times 5 \times 5) = 2250$ koşul gerçekleştirilmektedir. Bu

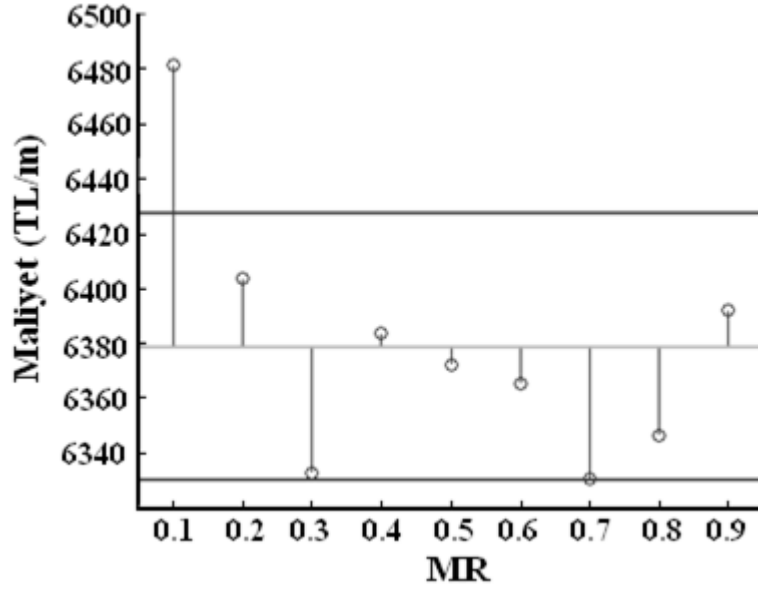
koşumlar KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Laboratuvarında mevcut bilgisayarlarda gerçekleştirilmiştir.

Denetim parametrelerinden MR'nin değişiminin, bulgulara etkisinin olup olmadığını belirlemek için gerçekleştirilen ANOVA testi bulguları Çizelge 2.15'de verilmektedir. Bu çizelgede SD serbestlik derecesini, SS her bir kaynağın kareler toplamını, MS hesaplanan ortalama kareleri göstermekte, F değerleri de ortalama karelerin oranı olarak elde edilmekte ve bu F değeri, çizelge değeriyle (Ek Çizelge 1) karşılaştırıldığında H1 kabulü geçerli olduğundan, en az bir MR parametre değerinin bulguları etkilediğine karar verilmektedir.

Çizelge 2.15. Denetim parametresi MR için ANOVA testinin bulguları

	SD	SS	MS	F
Guruplar arası	8	171409.6168	21426.2021	6.5325
Gurup içi	81	265676.8891	3279.9616	
Toplam	89	437086.506		
F'nin çizelge değeri $F_{\alpha}=2.0688 < F=6.5325$ olduğundan H0 kabulü reddedilerek H1 kabulü dikkate alınmaktadır.				

Denetim parametresi MR için, anlamlılık düzeyi 0.05, gurup sayısı 9 ve serbestlik derecesi 81 olarak dikkate alınmak suretiyle çizilen ANOM grafiği aşağıdaki Şekil 2.30'da verilmektedir. Bu grafikten MR'nin 0.1 değeri için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulguların kabul edilebilir sınırlar dışında olduğu, diğer MR değerleri; 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9 için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulgular arasında ise anlamlı bir farkın olmadığı görülmektedir.



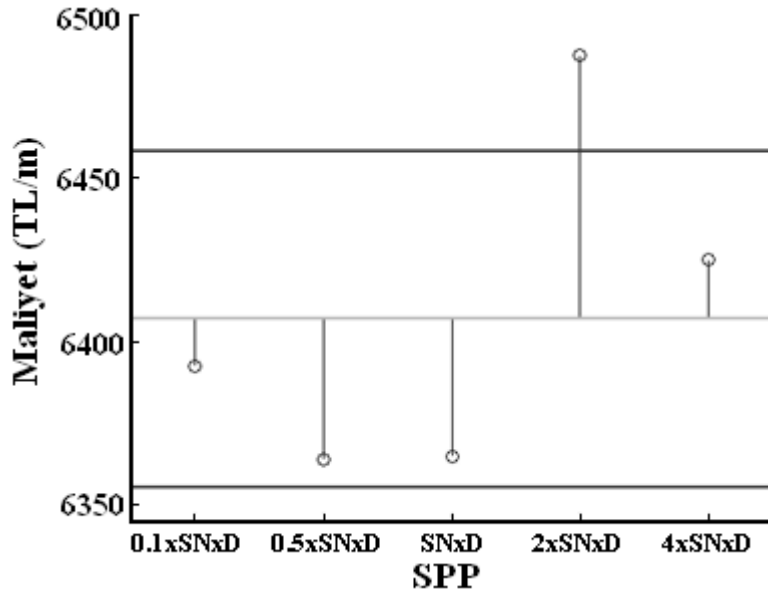
Şekil 2.30. Denetim parametresi MR için ANOM grafiği

Denetim parametrelerinden SPP'nin değişiminin, bulgulara etkisinin olup olmadığını belirlemek için gerçekleştirilen ANOVA testi bulguları Çizelge 2.16'de verilmektedir. Elde edilen F değeri, çizelge değeriyle (Ek Çizelge 1) karşılaştırıldığında H1 kabulü geçerli olduğundan, en az bir SPP parametre değerinin bulguları etkilediğine karar verilmektedir.

Çizelge 2.16. Denetim parametresi SPP için ANOVA testinin bulguları

	SD	SS	MS	F
Guruplar arası	4	107046.5086	26761.6272	5.7201
Gurup içi	45	210533.285	4678.5174	
Toplam	49	317579.7936		
F'nin çizelge değeri $F_{\alpha}=2.5858 < F=5.7201$ olduğundan H0 kabulü reddedilerek H1 kabulü dikkate alınmaktadır.				

Denetim parametresi SPP için, anlamlılık düzeyi 0.05 ve grup sayısı 5 ve serbestlik derecesi 45 olarak dikkate alınmak suretiyle çizilen ANOM grafiği aşağıdaki Şekil 2.31'de verilmektedir. Bu grafikten SPP'nin 2xSNxD değeri için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulguların kabul edilebilir sınırlar dışında olduğu, diğer SPP değerleri; 0.1xSNxD, 0.5xSNxD, SNxD ve 4xSNxD için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulgular arasında da anlamlı bir farkın olmadığı görülmektedir.



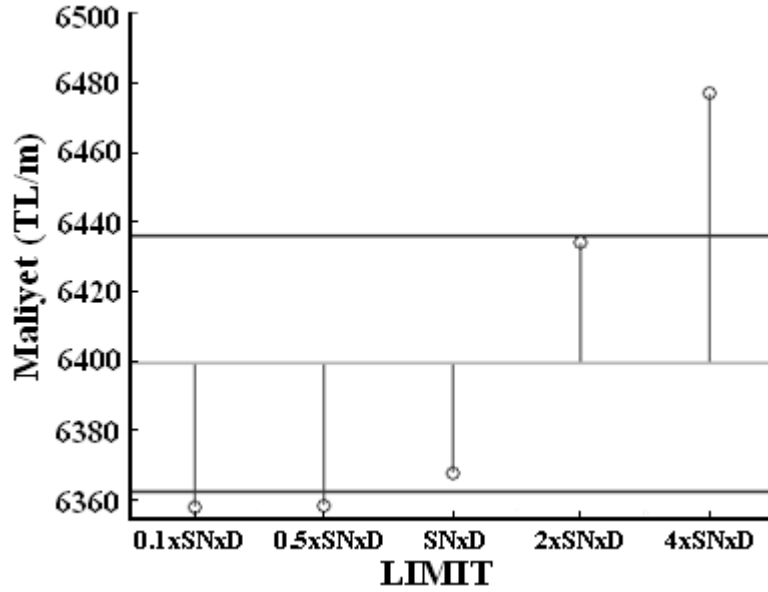
Şekil 2.31. Denetim parametresi SPP için ANOM grafiği

Denetim parametrelerinden LIMIT değişiminin, bulgulara etkisinin olup olmadığını belirlemek için gerçekleştirilen ANOVA testi bulguları Çizelge 2.17’de verilmektedir. Elde edilen F değeri, çizelge değeriyle (Ek Çizelge 1) karşılaştırıldığında H1 kabulü geçerli olduğundan en az bir LIMIT parametre değerinin bulguları etkilediğine karar verilmektedir.

Çizelge 2.17. Denetim parametresi LIMIT için ANOVA testinin bulguları

	SD	SS	MS	F
Guruplar arası	4	115695.1761	28923.794	12.0584
Gurup içi	45	107939.2662	2398.6504	
Toplam	49	223634.4423		
F’nin çizelge değeri $F_{\alpha} = 2.5858 < F = 12.0584$ olduğundan H0 kabulü reddedilerek H1 kabulü dikkate alınmaktadır.				

Denetim parametresi LIMIT için, anlamlılık düzeyi 0.05 ve grup sayısı 5 ve serbestlik derecesi 45 olarak dikkate alınmak suretiyle çizilen ANOM grafiği aşağıdaki Şekil 2.32’de verilmektedir. Bu grafikten LIMIT’nin 0.1xSNxD, 0.5xSNxD ve 4xSNxD değerleri için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulguların kabul edilebilir sınırlar dışında olduğu, grafikten, diğer LIMIT değerleri; SNxD ve 2xSNxD için gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen bulgular arasında yine anlamlı bir farkın olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.32. Denetim parametresi LIMIT için ANOM grafiği

2.4.2. Bir Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Optimum Tasarımı

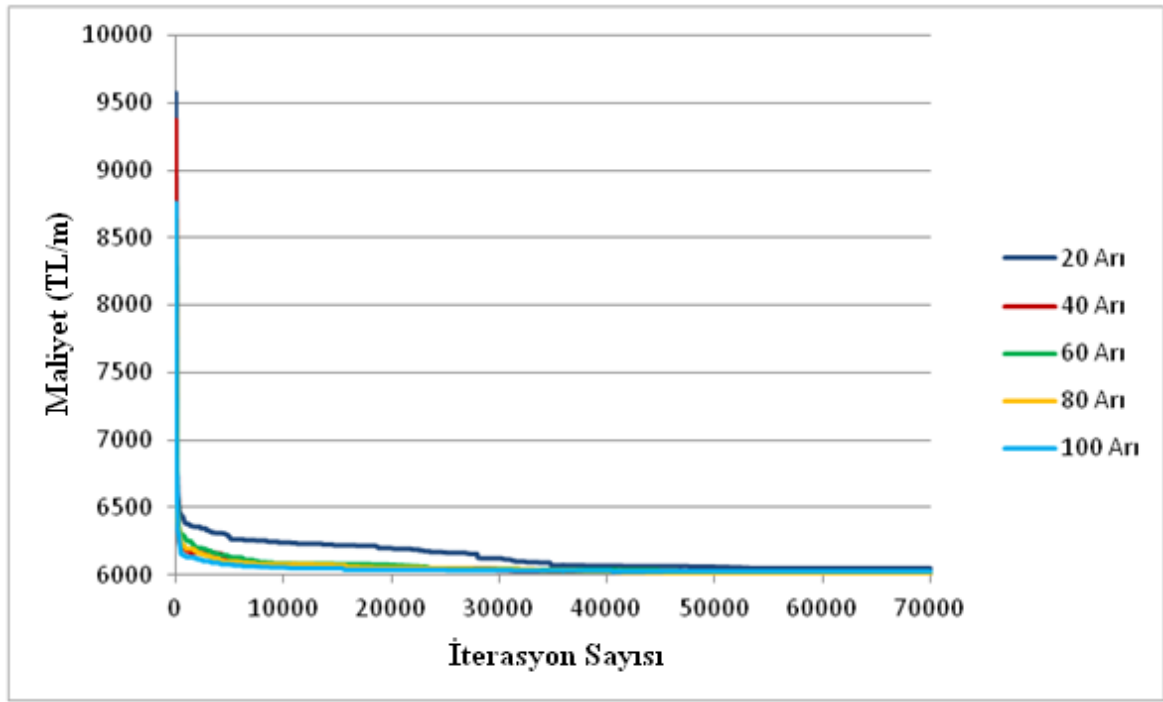
Bu uygulamada aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen enkesitli betonarme bir gözlü tünelin maliyeti minimum olacak şekilde Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu tünelle ilgili gerekli bilgiler Madde 2.3.'de, kullanılan amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar ise Madde 2.2'de verilmektedir.

Yapısal çözümlemede kullanılan sonlu elemanlar ve optimizasyon algoritmasına ilişkin yazılımlar MATLAB programlama dilinde (Matlab, 2008) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yazılımın araştırmacılar tarafından kolaylıkla kullanılabilmesi için, buna bir kullanıcı arayüzü (OPUS) kazandırılmıştır. Arayüzün kullanım bilgileri Ek-2'de verilmektedir. Yazılım KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Laboratuvarında koşturulmuştur.

Denetim parametreleri MR, SPP ve LIMIT; Madde 2.4.1'de gerçekleştirilen ANOVA ve ANOM testlerinden elde edilen bulgular yardımıyla parametrelerin uygun değerleri arasından MR=0.7, SPP=SNxD ve LIMIT=SNxD olarak seçilmiştir.

Burada sınırlayıcı işleme yöntemi olarak, Madde 2.1'de açıklanan, Karaboğa ve Akay (2011) tarafından de Yapay Arı koloni Algoritmasına uyarlanan, Deb'in (2000) sınırlayıcı işleme yönteminin kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

Kolonide bulunan arı sayısının elde edilen optimum çözüm üzerindeki etkisini belirlemek için çözümler; 20, 40, 60, 80 ve 100 arıdan oluşan koloniler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir koloni 10 bağımsız koşum yapılmıştır. Yakınsamanın kolay izlenebilmesi için iterasyon sayısı tasarım değişkeni sayısının 2500 katı (2500 D) olarak alınmıştır. Bir gözlü dikdörtgen kesitli aç-kapa tünelin tasarımında 28 tasarım değişkeni kullanıldığından iterasyon sayısı 70000 olarak alınmıştır. Bu iterasyon sayısı ile 20, 40, 60, 80 ve 100 arıdan oluşan her bir koloni için amaç fonksiyonunun değerlendirme sayıları sırasıyla 1400010, 2800020, 4200030, 5600040 ve 7000050 olarak elde edilmektedir. Dikkate alınan her bir koloni için elde edilen bulguların yakınsaması aşağıdaki Şekil 2.33’de verilmektedir.

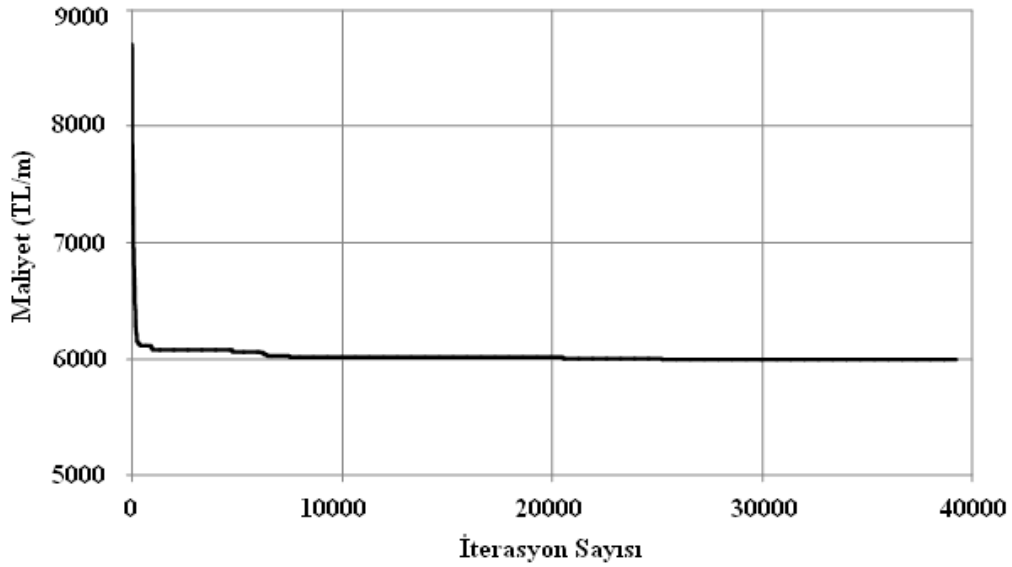


Şekil 2.33. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir koloni için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi

Şekilden görüldüğü gibi 20 arı bulunan koloni dışındaki diğer kolonilerin yakınsama hızlarının yakın ve hızlı olduğu, 20 arı bulunan koloniyle gerçekleştirilen optimizasyonda yakınsama hızının daha düşük olduğu görülmektedir.

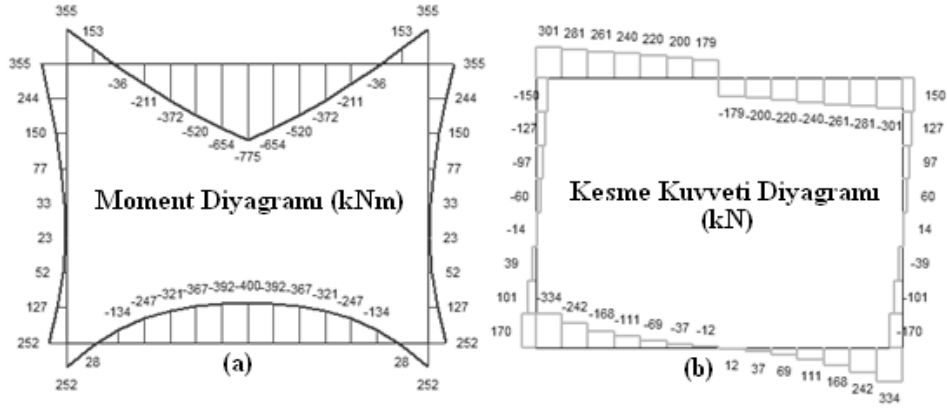
Yazılımın bağımsız olarak yazılımın koşturulmandan elde edilen optimum çözümlerden minimum maliyetli tasarım; 60 arı bulunan koloniyle yapılan 10 çözümünden biri için elde edilmiştir. Maksimum iterasyon sayısına göre algoritmanın durdurulmasına

karar verilen tükenme tabanlı bit ölçüt, 14000 iterasyon süresince amaç fonksiyonunun en iyi değerinde bir gelişim olmaması durumunda yakınsamanın sağlandığını kabul eden gelişim tabanlı diğer bir ölçütle birleştirilerek bir durdurma ölçütü oluşturulmuştur (bkz. Madde 1.4.4). Bu birleşik ölçüt, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözüme uygulandığında, yakınsama 39199. iterasyonda sağlanmaktadır anlaşılmaktadır. Bu çözümün yakınsamaya kadar olan maliyet değişimi Şekil 2.34’de verilmektedir.

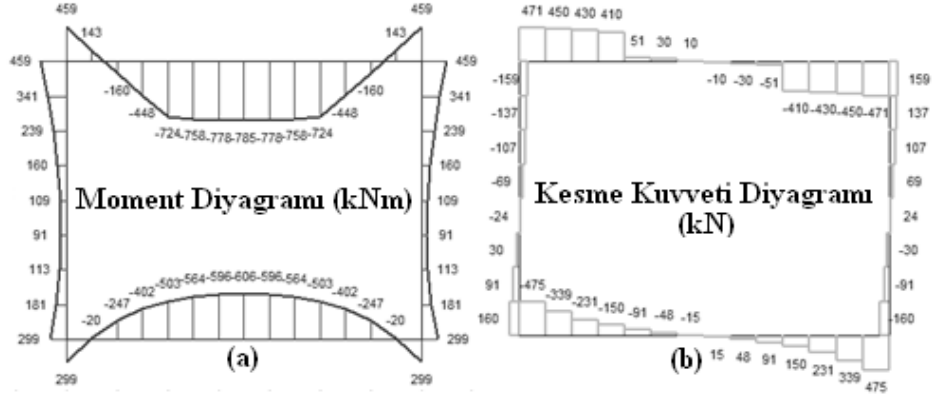


Şekil 2.34. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin tasarımı için 60 arı koloniyle yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi

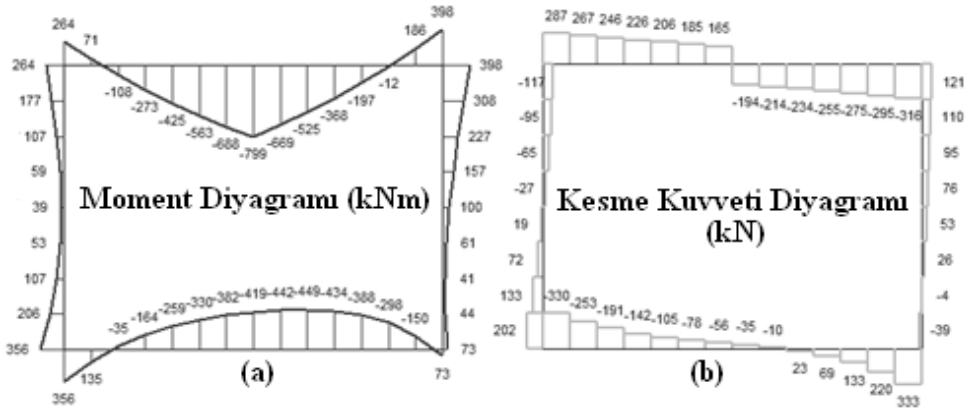
Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen optimum maliyetli tasarımda (bkz. Şekil 2.34) dikkate alınan yük birleşimleri altında (AASHTO,2002) yapısal çözümlemeden elde edilen kesit etkileri aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 2.35-Şekil 2.41).



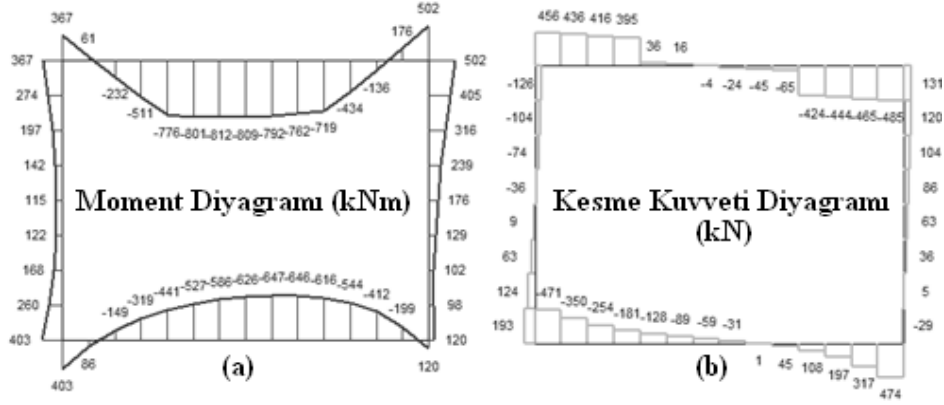
Şekil 2.35. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



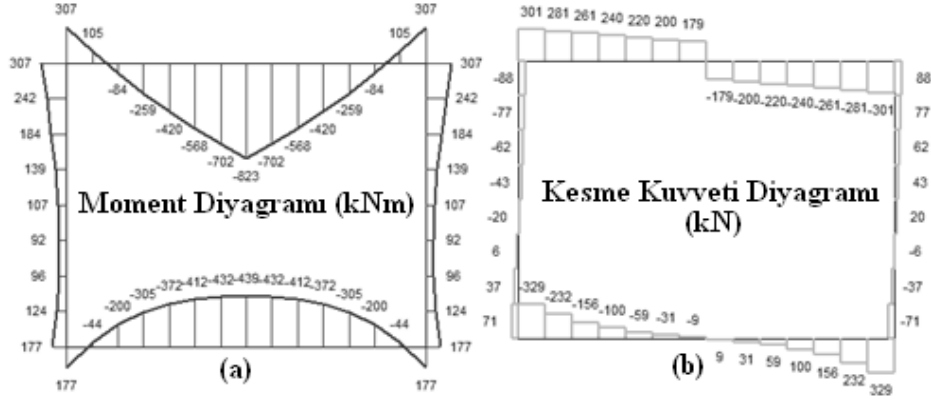
Şekil 2.36. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



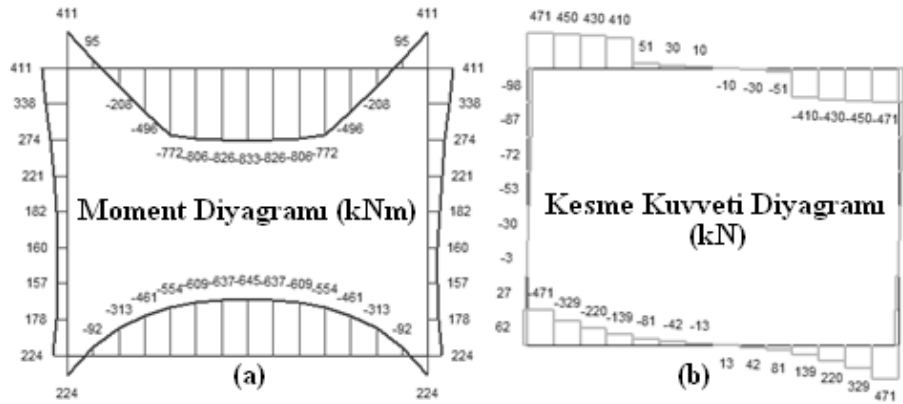
Şekil 2.37. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



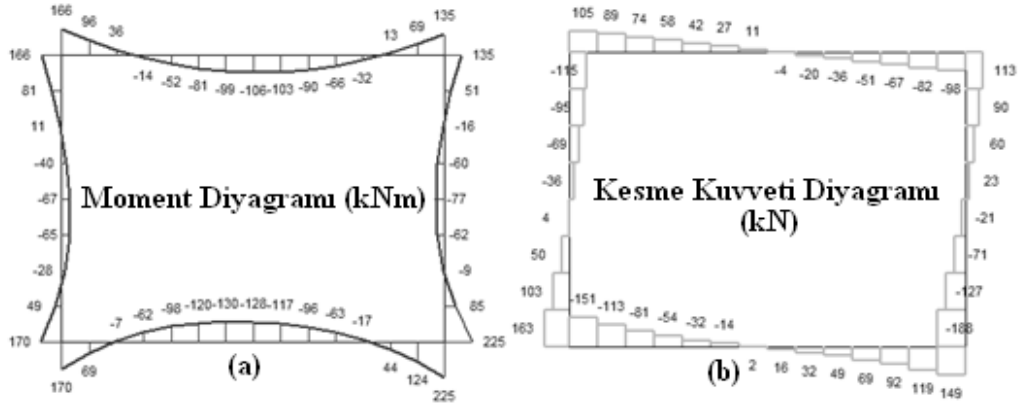
Şekil 2.38. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.39. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

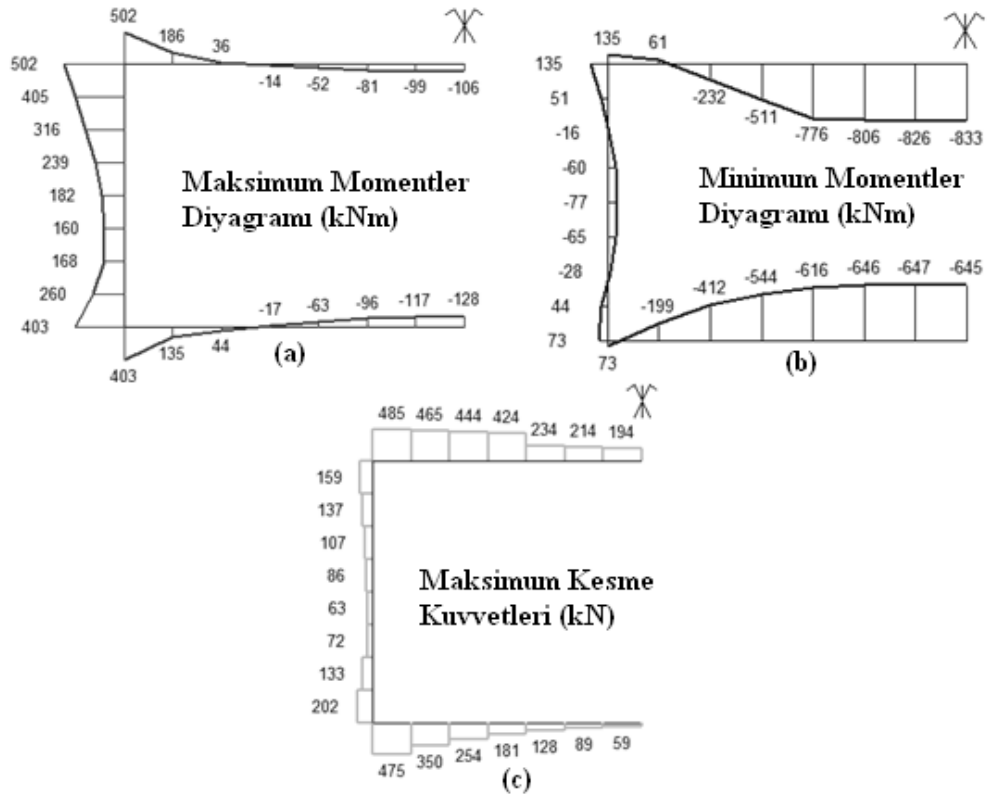


Şekil 2.40. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.41. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

Yedi farklı yük birleşimi altında gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden elde edilen elverişsiz tasarım moment ve kesme kuvveti diyagramları ise Şekil 2.42’de verilmektedir.



Şekil 2.42. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları

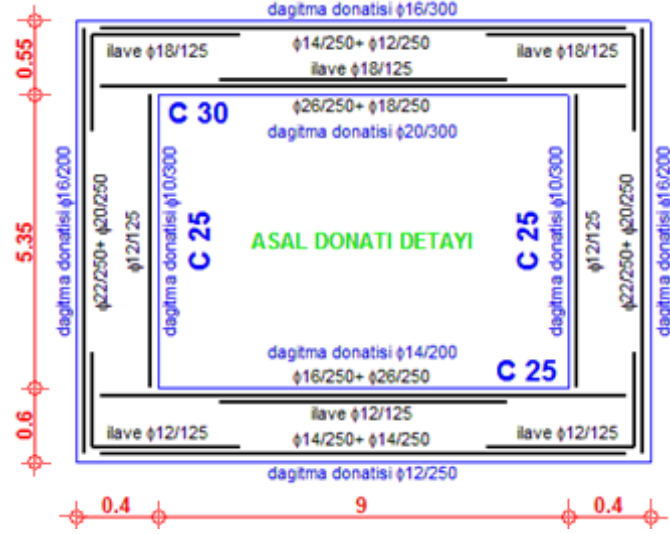
Bir gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Çizelge 2.18’de verilmektedir.

Çizelge 2.18. Bir gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Yapay Arı Koloni algoritmasıyla elde edilen, optimum değerleri

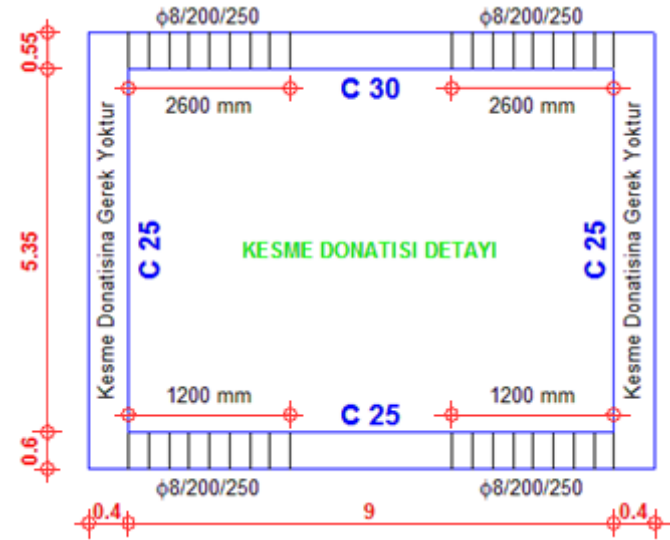
Değişken Numarası	Değişken Tanımı	Optimum Değer
1	Tavan Döşemesi Kalınlığı	0.55 m
2	Taban Döşemesi Kalınlığı	0.60 m
3	Duvar Kalınlıkları	0.40 m
4	Tavan Döşemesi Beton Sınıfı	C30
5	Taban Döşemesi Beton Sınıfı	C25
6	Duvarların Beton Sınıfı	C25
7	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 1	Ø 14 mm
8	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 2	Ø 12 mm
9	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 1	Ø 26 mm
10	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 2	Ø 18 mm
11	Tavan Döşemesinin Alt Ek Donatısı	Ø 18 mm
12	Tavan Döşemesinin Üst Ek Donatısı	Ø 18 mm
13	Duvar Dış Donatısı 1	Ø 22 mm
14	Duvar Dış Donatısı 2	Ø 20 mm
15	Duvar İç Donatısı	Ø 12 mm
16	Taban Döşemesinin Alt İlave	Ø 12 mm
17	Taban Döşemesinin Üst Donatı 1	Ø 16 mm
18	Taban Döşemesinin Üst Donatı 2	Ø 26 mm
19	Taban Döşemesinin Üst İlave	Ø 12 mm
20	Taban Döşemesinin Alt Donatı 1	Ø 14 mm
21	Taban Döşemesinin Alt Donatı 2	Ø 14 mm
22	Tavan Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
23	Taban Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
24	Asal Donatı Aralıkları	125 mm
25	Tavan Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
26	Taban Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
27	Tavan Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	250 mm
28	Taban Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	250 mm

Geliştirilmiş olan yazılımla, optimum tasarım için; tavan döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 2600 mm, taban döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1200 mm, tavan döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø16/300, tavan döşemesinin alt dağıtma donatısı Ø20/300, taban döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø14/200, taban döşemesinin alt dağıtma donatısı Ø12/250, duvarların dış dağıtma donatıları Ø16/200, duvarların iç dağıtma donatıları ise Ø10/300 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilmeye çalışılan çözümlemeyle elde edilen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Şekil 2.43 ve Şekil 2.44’de verilmektedir.



Şekil 2.43. Bir gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı



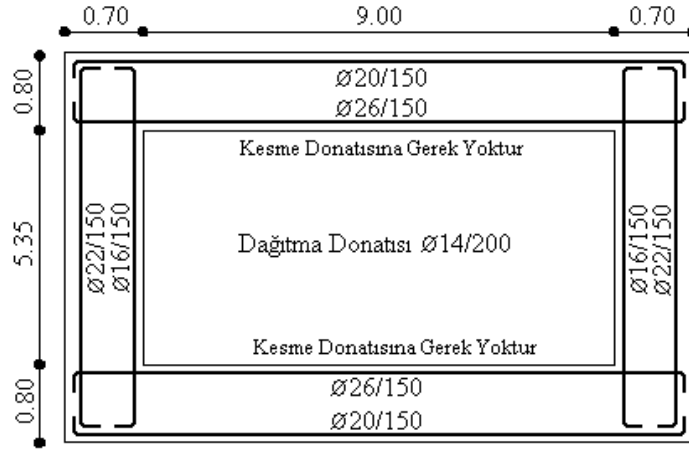
Şekil 2.44. Bir gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı

Gerçekleştirilen çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri aşağıdaki Çizelge 2.19’da verilmektedir.

Çizelge 2.19. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözümlemelerden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri

Beton	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
Tavan Döşemesi Beton (C 30)	5.39	560.56
Taban Döşemesi Beton (C 25)	5.88	576.24
Duvar Beton (C 25)	4.28	419.44
Toplam	15.55	1556.24
Donatı	Miktar (daN/m)	Maliyet (₺/m)
Çap 8 mm	41.54	67.02
Çap 10 mm	10.99	17.73
Çap 12 mm	215.96	348.39
Çap 14 mm	199.96	290.78
Çap 16 mm	166.02	241.43
Çap 18 mm	310.12	450.97
Çap 20 mm	209.56	304.73
Çap 22 mm	167.72	243.90
Çap 24 mm	0.00	0.00
Çap 26 mm	363.48	528.56
Çap 28 mm	0.00	0.00
Çap 30 mm	0.00	0.00
Çap 32 mm	0.00	0.00
Toplam		2493.51
Kalıp	Miktar (m²/m)	Maliyet (₺/m)
	32.70	725.94
İskele	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	48.15	662.06
Kazı	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	68.60	534.39
Dolgu	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	4.90	20.97
Genel Toplam (₺/m)		5993.12

Bu çalışmanın uygulamasına konu olan tünelin yapım şirketi (Yüksel Proje A.Ş., 2007) tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarımın enkesit detayı aşağıdaki Şekil 2.45’de verilmektedir. Bu kesitin birim uzunluğu için maliyeti, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen maliyetle birlikte Çizelge 2.20’de verilmektedir.



Şekil 2.45. Bu çalışmanın uygulamasına konu olan tünelin yapım şirketi tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarımın enkesit detayı

Çizelge 2.20. Bir gözlü tünelin geleneksel ve optimum tasarımına ilişkin maliyetler

	Şirketin Geleneksel Tasarımı		Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Tasarım	
1 m için	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet
Beton	24.13 m ³	2364.74 ₺	15.55 m ³	1556.24 ₺
Donatı	1809.64 daN	2631.56 ₺	1685.35 daN	2496.51 ₺
Kalıp	33.60 m ²	745.92 ₺	32.70 m ²	725.94 ₺
İskele	48.15 m ³	662.06 ₺	48.15 m ³	662.06 ₺
Kazı	77.48 m ³	603.57 ₺	68.60 m ³	534.39 ₺
Dolgu	5.2 m ³	22.26 ₺	4.90 m ³	20.97 ₺
	Toplam	7030.11 ₺	Toplam	5993.12 ₺

Şirketin gerçekleştirdiği tasarımla, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen optimum tasarım karşılaştırıldığında, şirket aynı beton sınıfını kullandığı halde, optimum tasarım ise tavan döşemesi için farklı beton sınıfı önermektedir. Optimum kesit kalınlıkları daha küçük olduğundan beton hacmi 24.13 m³/m'den beton hacmi 15.55 m³/m'ye düşmektedir. Diğer taraftan şirketin kullandığı donatı miktarı 1809.64daN/m'dan 1685.35daN/m'ye, kalıp miktarı 33.60 m²/m'den 32.70 m²/m'ye, kazı miktarı 77.48m³/m'den 68.60 m³/m'ye, dolgu miktarı 5.2 m³/m'den 4.9 m³/m'ye düşmektedir. İskelede ise bir değişiklik olmamaktadır. Bu bulgulara göre şirketin tasarladığı tünelin maliyeti 7030.11 ₺/m iken Yapay Arı Koloni optimizasyon tekniğiyle maliyet 5993.12₺/m'ye düşmektedir. Bu durum Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen tasarım maliyetinin %14.75 daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

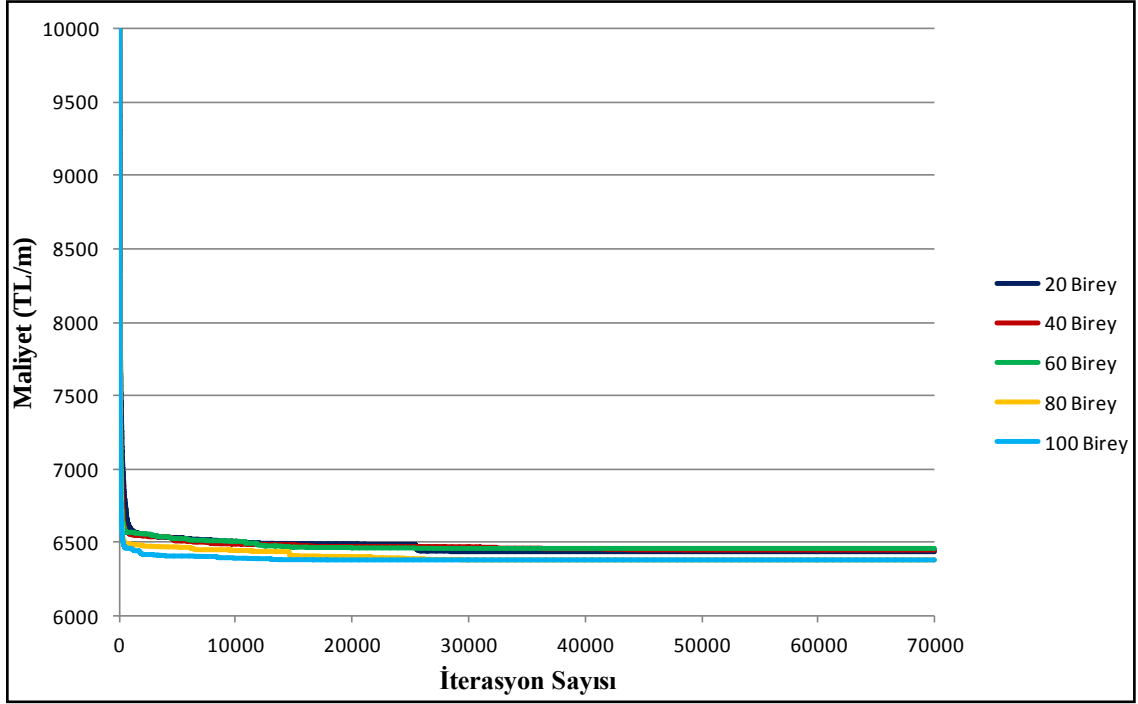
2.4.3. Bir Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı

Bu uygulamada, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen bulgularla karşılaştırmak için, aynı tünelin yine maliyeti minimum olacak şekilde bu kez Genetik Algoritmayla optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Yapısal çözümlemede kullanılan sonlu elemanlar ve optimizasyon algoritmasına ilişkin yazılımlar yine MATLAB programlama dilinde (Matlab, 2008) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yazılımın kolaylıkla kullanılabilmesi için, buna da aynı kullanıcı arayüzü (OPUS) kazandırılmıştır. Arayüzün kullanımına ilişkin bilgiler Ek-2’de verilmektedir.

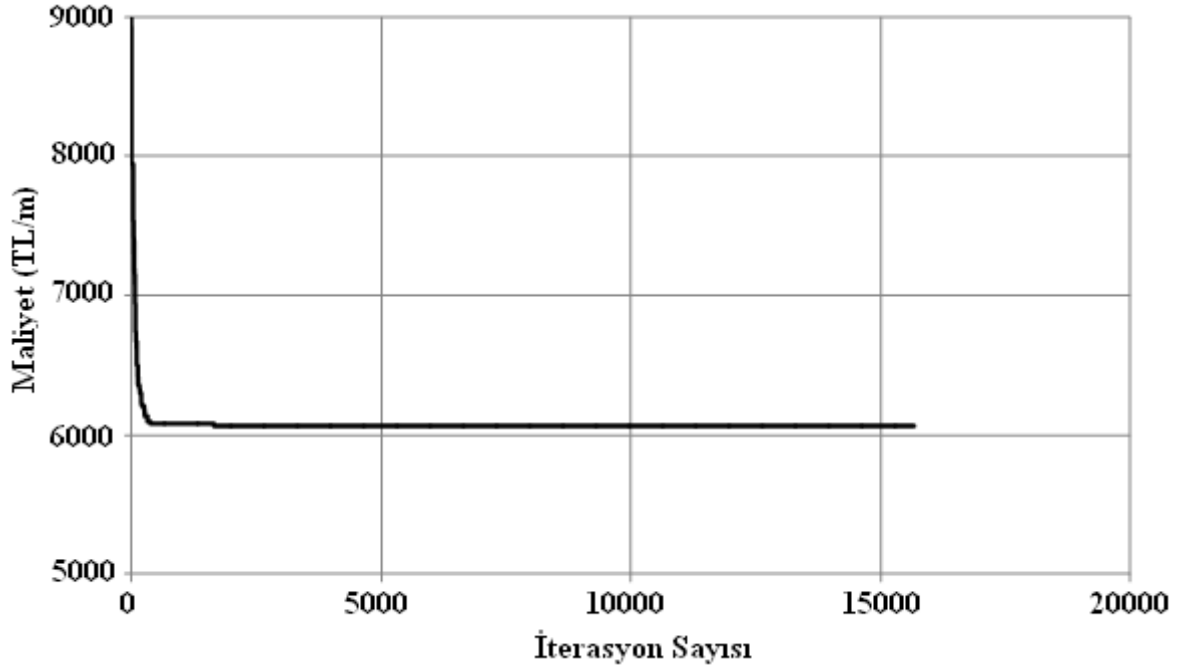
Burada bu algorithmada sınırlayıcı işleme yöntemi olarak, Madde 2.1’de açıklanan, kendini uyarlayabilen ceza fonksiyonu yönteminin kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

Nesilde bulunan birey sayısının optimum çözüm üzerindeki etkisini belirlemek için çözümler; yine 20, 40, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir nesil için 10 bağımsız koşum yapılmıştır. Yapay Arı Koloni Algoritmasında olduğu gibi yakınsamanın kolay izlenebilmesi için iterasyon sayısı tasarım değişkeni sayısının 2500 katı (2500 D) olarak alınmıştır. Bu tünelin tasarımında 28 tasarım değişkeni kullanıldığından iterasyon sayısı yine 70000 olmuştur. Bu iterasyon sayısı ile 20, 40, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan her bir nesil için amaç fonksiyonunun değerlendirme sayıları ise sırasıyla 1400020, 2800040, 4200060, 5600080 ve 7000100 olarak elde edilmektedir. Dikkate alınan her bir nesil için elde edilen bulguların yakınsaması aşağıdaki Şekil 2.46’da verilmektedir.



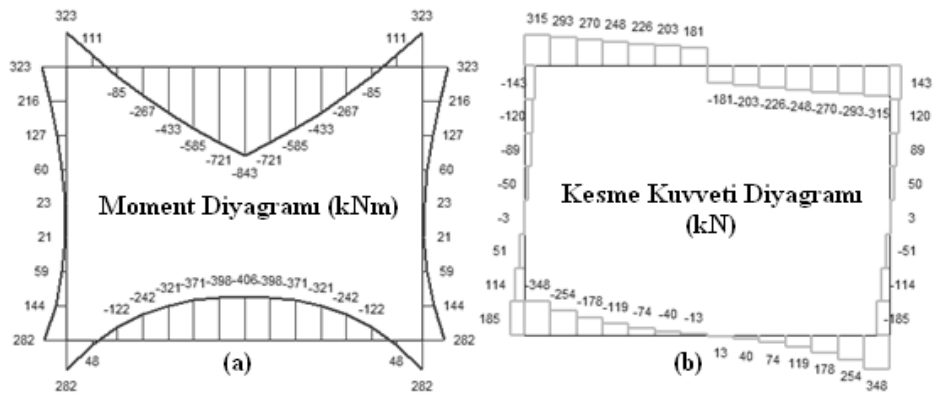
Şekil 2.46. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir nesil için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi

Bu şekilden nesillerin yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller için elde edilen ortalama maliyetin diğer nesillere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Minimum maliyetli tasarım; 100 birey bulunan nesille yapılan 10 çözümden biri için elde edilmiştir. Durdurma ölçütü olarak, maksimum iterasyon sayısına göre algoritmanın durdurulmasına karar verilen tükenme tabanlı bir ölçüt ile, 14000 iterasyon süresince amaç fonksiyonunun en iyi değerinde bir gelişim olmaması durumunda yakınsamanın sağlandığını kabul eden gelişim tabanlı diğer bir ölçütü birleştirilerek bir durdurma ölçütü oluşturulmuştur (bkz. Madde 1.4.4). Bu birleşik ölçüt, Genetik Algoritmasıyla yapılan çözüme uygulandığında, yakınsama 15654. iterasyonda sağlanmaktadır. Bu çözümün yakınsamaya kadar olan maliyet değişimi Şekil 2.47’de verilmektedir.

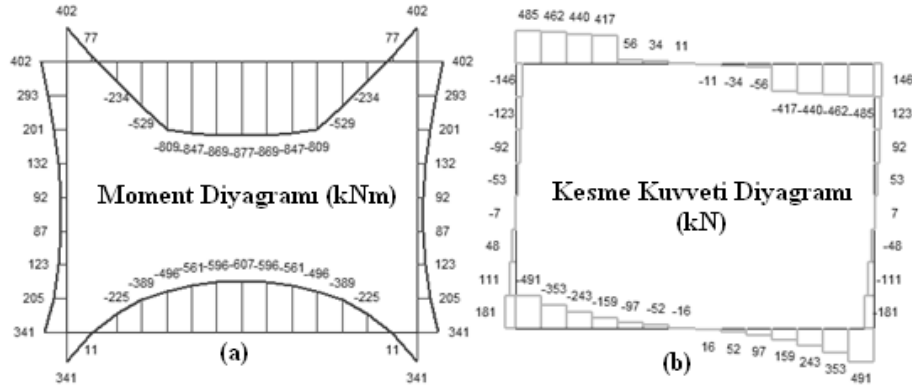


Şekil 2.47. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin tasarımı için 100 bireyden oluşan nesille yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi

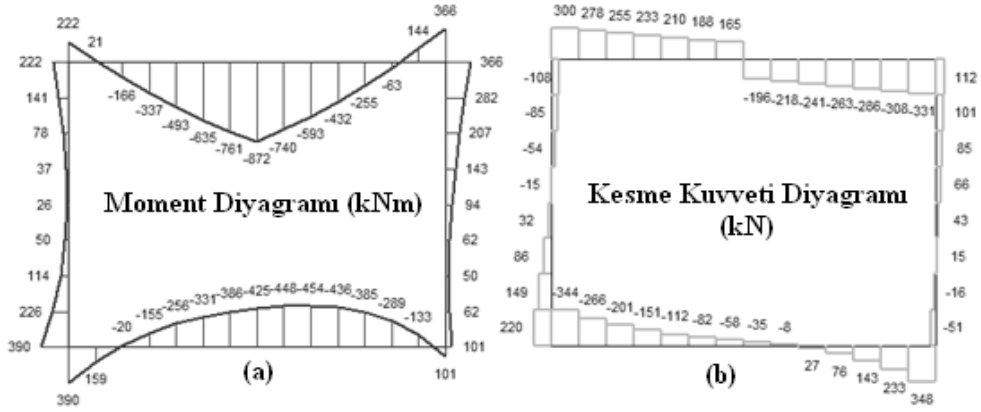
Genetik Algoritmayla belirlenen minimum maliyetli tasarım için (bkz. Şekil 2.47) dikkate alınan yük birleşimlerine göre (AASHTO,2002) gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden elde edilen moment ve kesme kuvveti diyagramları aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 2.48-Şekil 2.54).



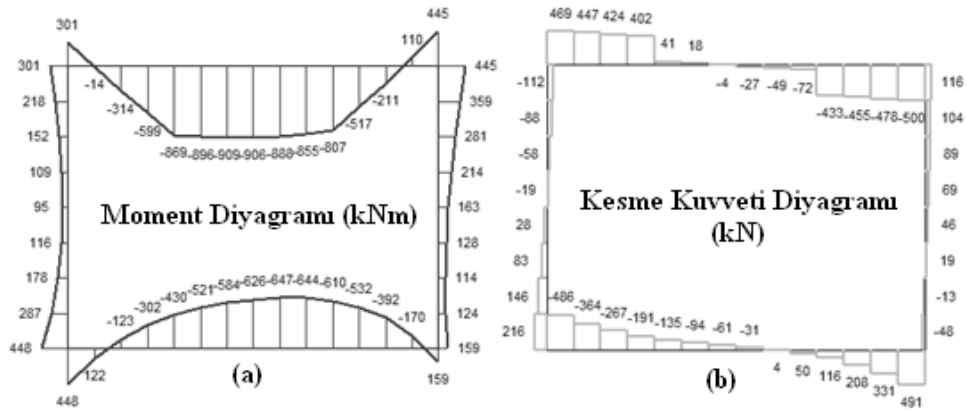
Şekil 2.48. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



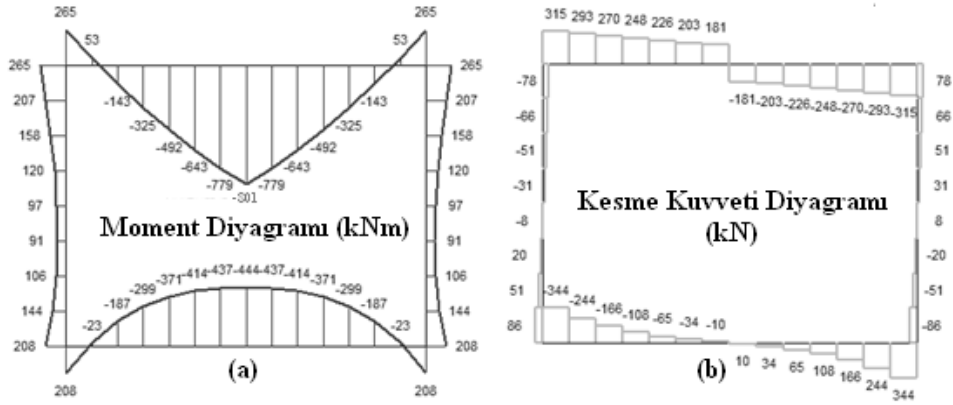
Şekil 2.49. Genetik Algoritmayla bir gözölü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



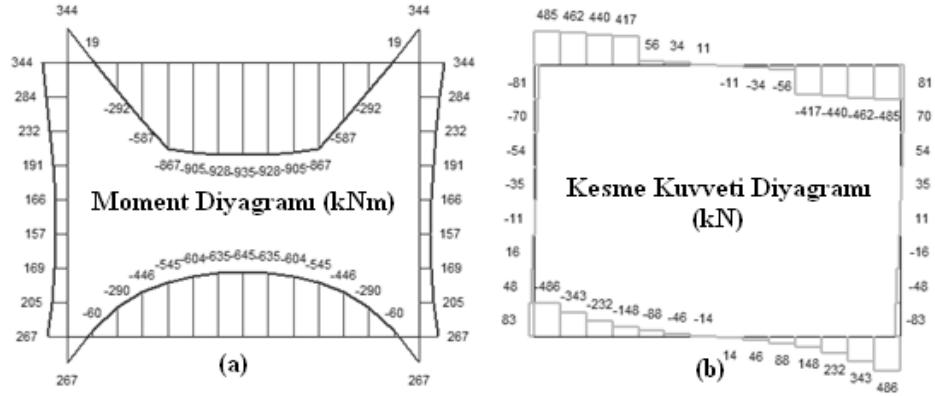
Şekil 2.50. Genetik Algoritmayla bir gözölü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



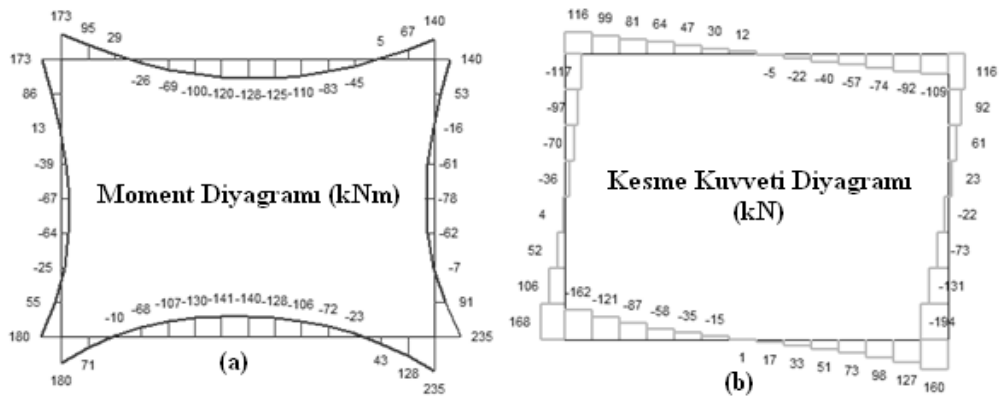
Şekil 2.51. Genetik Algoritmayla bir gözölü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.52. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

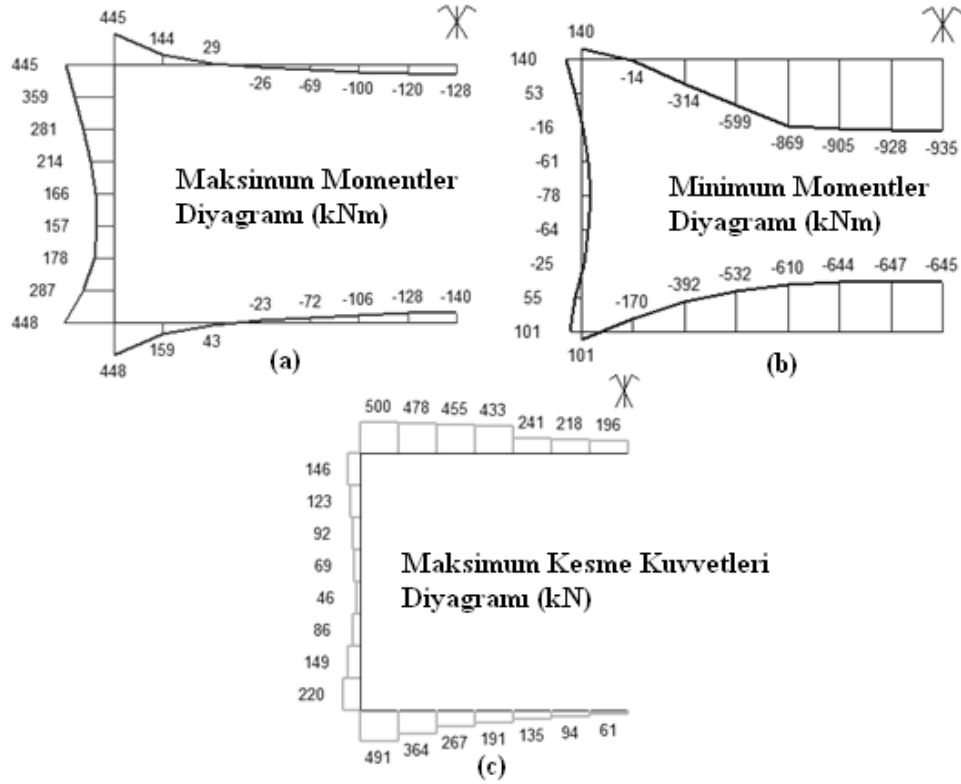


Şekil 2.53. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.54. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

Yedi farklı yük birleşimi altında gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden elde edilen elverişsiz tasarım moment ve kesme kuvveti diyagramları ise Şekil 2.55’de verilmektedir.



Şekil 2.55. Genetik Algoritmayla bir gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları

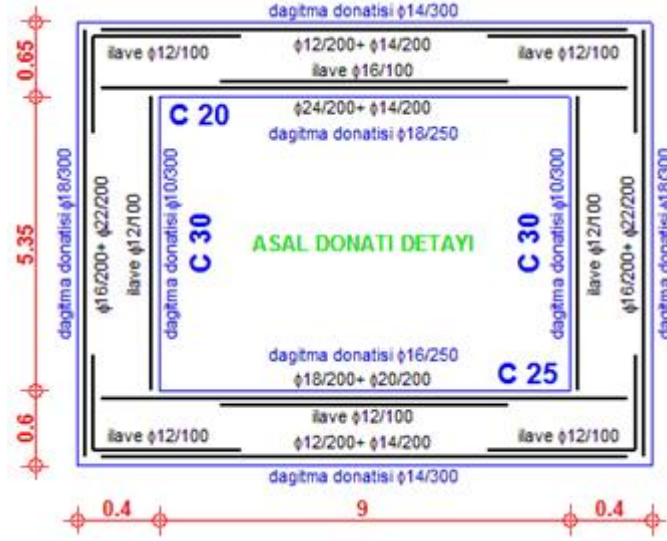
Bir gözlü tünelin Genetik Algoritmayla elde edilen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Çizelge 2.21’de verilmektedir.

Çizelge 2.21. Bir gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Genetik algoritmayla elde edilen, optimum değerleri

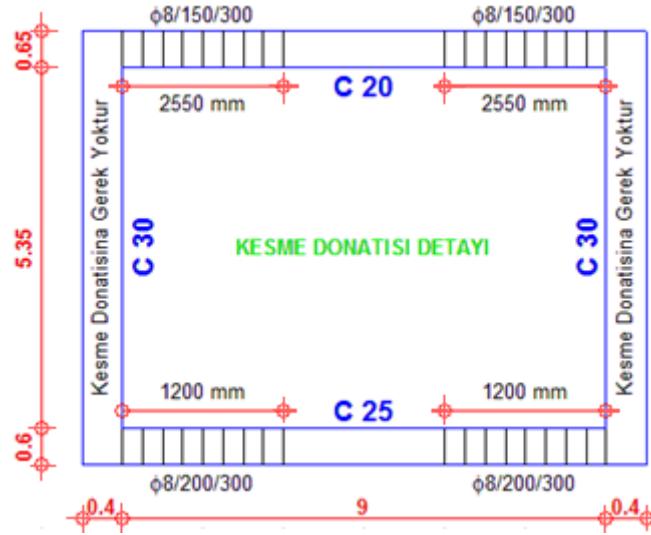
Değişken Numarası	Değişken Tanımı	Optimum Değer
1	Tavan Döşemesi Kalınlığı	0.65 m
2	Taban Döşemesi Kalınlığı	0.60 m
3	Duvar Kalınlıkları	0.40 m
4	Tavan Döşemesi Beton Sınıfı	C20
5	Taban Döşemesi Beton Sınıfı	C25
6	Duvarların Beton Sınıfı	C30
7	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 1	Ø 12 mm
8	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 2	Ø 14 mm
9	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 1	Ø 24 mm
10	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 2	Ø 14 mm
11	Tavan Döşemesinin Alt Ek Donatısı	Ø 16 mm
12	Tavan Döşemesinin Üst Ek Donatısı	Ø 12 mm
13	Duvar Dış Donatısı 1	Ø 16 mm
14	Duvar Dış Donatısı 2	Ø 22 mm
15	Duvar İç Donatısı	Ø 12 mm
16	Taban Döşemesinin Alt İlave	Ø 12 mm
17	Taban Döşemesinin Üst Donatı 1	Ø 18 mm
18	Taban Döşemesinin Üst Donatı 2	Ø 20 mm
19	Taban Döşemesinin Üst İlave	Ø 12 mm
20	Taban Döşemesinin Alt Donatı 1	Ø 12 mm
21	Taban Döşemesinin Alt Donatı 2	Ø 14 mm
22	Tavan Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
23	Taban Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
24	Asal Donatı Aralıkları	100 mm
25	Tavan Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	150 mm
26	Taban Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
27	Tavan Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	300 mm
28	Taban Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	300 mm

Bu çalışmada geliştirilmiş olan yazılımla, optimum tasarım için; tavan döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 2550 mm, taban döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1200 mm, tavan döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø14/300, alt dağıtma donatısı Ø18/250, taban döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø16/250, alt dağıtma donatısı Ø14/300, duvarların dış dağıtma donatıları Ø18/300, iç dağıtma donatıları Ø10/300 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilmeye çalışılan çözümlemeyle belirlenen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Şekil 2.56 ve Şekil 2.57’de verilmektedir.



Şekil 2.56. Bir gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı



Şekil 2.57. Bir gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı

Gerçekleştirilen çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri aşağıdaki Çizelge 2.22’de verilmektedir.

Çizelge 2.22. Genetik Algoritmayla yapılan çözümlemelerden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri

Beton	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
Tavan Döşemesi Betonu (C 20)	6.37	598.78
Taban Döşemesi Betonu (C 25)	5.88	576.24
Duvar Betonu (C 30)	4.28	445.12
Toplam	16.53	1620.14
Donatı	Miktar (daN/m)	Maliyet (₺/m)
Çap 8 mm	45.772	73.84
Çap 10 mm	10.989	17.23
Çap 12 mm	351.784	567.52
Çap 14 mm	262.574	381.83
Çap 16 mm	244.171	355.07
Çap 18 mm	218.568	317.84
Çap 20 mm	129.762	188.70
Çap 22 mm	205.653	299.06
Çap 24 mm	197.137	286.67
Çap 26 mm	0	0
Çap 28 mm	0	0
Çap 30 mm	0	0
Çap 32 mm	0	0
Toplam		2488.26
Kalıp	Miktar (m²/m)	Maliyet (₺/m)
	32.90	730.38
İskele	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	48.15	662.06
Kazı	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	69.58	542.03
Dolgu	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	4.90	20.97
Genel Toplam (₺/m)		6063.84

Bu çalışmanın uygulamasına konu olan bir gözlü tünelin geleneksel yöntemle yapım şirketi tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarım enkesitinin birim uzunluğu için maliyeti, Genetik Algoritmayla ve Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen maliyetlerle birlikte Çizelge 2.23’de verilmektedir.

Çizelge2.23. Bir gözlü tünelin geleneksel ve optimum tasarımına ilişkin maliyetler

	Şirketin Geleneksel Tasarımı		Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Tasarım		Genetik Algoritmayla Tasarım	
1 m için	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet
Beton	24.13 m ³	2364.74 ₺	15.55 m ³	1556.24 ₺	16.53 m ³	1620.14 ₺
Donatı	1809.64 daN	2631.56 ₺	1685.35 daN	2496.51 ₺	1666.41 daN	2488.26 ₺
Kalıp	33.60 m ²	745.92 ₺	32.70 m ²	725.94 ₺	32.90 m ²	730.38 ₺
İskele	48.15 m ³	662.06 ₺	48.15 m ³	662.06 ₺	48.15 m ³	662.06 ₺
Kazı	77.48 m ³	603.57 ₺	68.60 m ³	534.39 ₺	69.58 m ³	542.03 ₺
Dolgu	5.2 m ³	22.26 ₺	4.90 m ³	20.97 ₺	4.90 m ³	20.97 ₺
Toplam		7030.11 ₺	Toplam	5993.12 ₺	Toplam	6063.84 ₺

Şirketin gerçekleştirdiği geleneksel tasarımla, Genetik Algoritmayla gerçekleştirilen optimum tasarım karşılaştırıldığında, şirket tünelin tüm elemanlarında aynı beton sınıfını (C25) kullandığı halde, optimum tasarım geleneksel tasarımda kullanılan beton sınıfından farklı olarak tavan döşemesi için C20, duvarlar için C30 sınıfı betonları önermektedir. Geleneksel tasarımına göre kullanılan beton hacmi 24.13 m³/m iken bu hacim optimum kesit için 16.53 m³/m'ye düşmektedir. Geleneksel tasarımda kullanılan donatı miktarı 1809.64daN/m'dan 1666.41daN/m'ye, kalıp miktarı 33.60 m²/m'den 32.90 m²/m'ye, kazı miktarı 77.48m³/m'den 69.58 m³/m'ye, dolgu miktarı 5.2 m³/m'den 4.9 m³/m'ye düşmektedir. İskelede ise bir değişiklik olmamaktadır. Bu bulgulara göre geleneksel tasarımla tünelin maliyeti 7030.11 ₺/m iken Genetik Algoritmayla bu maliyet 6063.84 ₺/m'ye düşmektedir. Böylece Genetik Algoritmayla gerçekleştirilen tasarım maliyeti geleneksel tasarımla gerçekleştirilenden %13.74 daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır.

2.4.4. İki Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Optimum Tasarımı

Bu uygulamada dikdörtgen enkesitli betonarme bir gözlü aç-kapa tünelin, iki gözlü olarak inşa edildiği düşünülerek, bu tünelin maliyeti minimum olacak şekilde Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu tünelle ilgili gerekli bilgiler daha önce Madde 2.3.'de, amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar ise Madde 2.2'de verilmektedir.

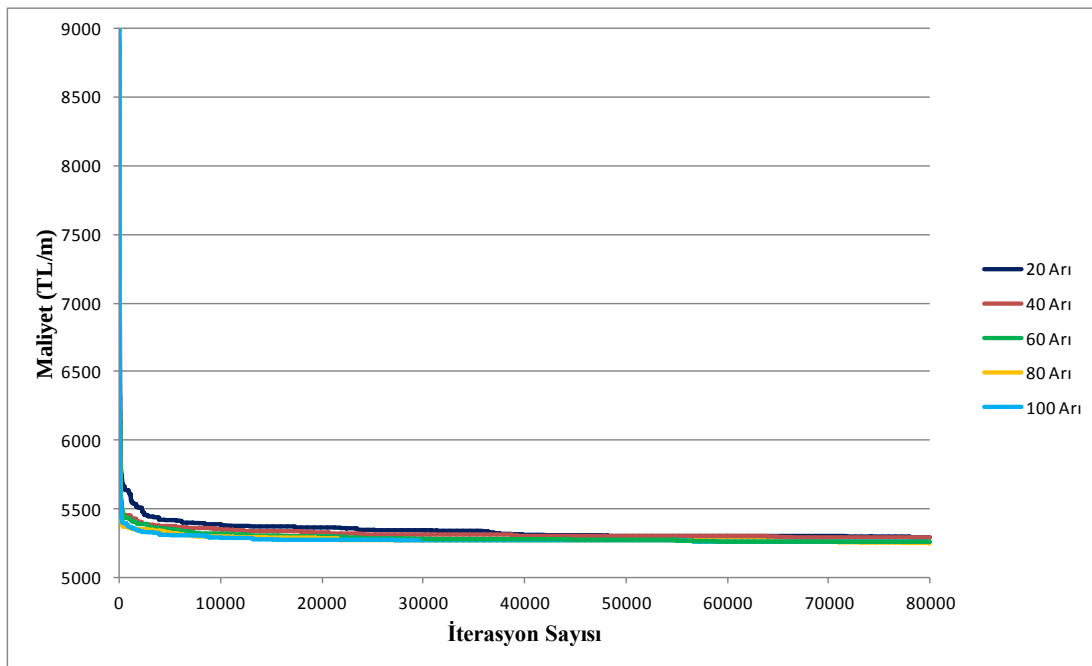
Bir gözlü tünelin tasarımında olduğu gibi yapısal çözümlemede kullanılan sonlu elemanlar ve optimizasyon algoritmasına ilişkin yazılımlar MATLAB programlama dilinde (Matlab, 2008) gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi sözkonusu yazılımın

kolayca kullanılabilmesi için, bu yazılıma bir kullanıcı arayüzü de (OPUS) kazandırılmıştır. Arayüzün kullanım bilgileri Ek-2’de verilmektedir.

Denetim parametreleri MR, SPP ve LIMIT; Madde 2.4.1’de gerçekleştirilen ANOVA ve ANOM testlerinden elde edilen uygun parametreleri arasından $MR=0.7$, $SPP=SNxD$ ve $LIMIT=SNxD$ olarak seçilmiştir.

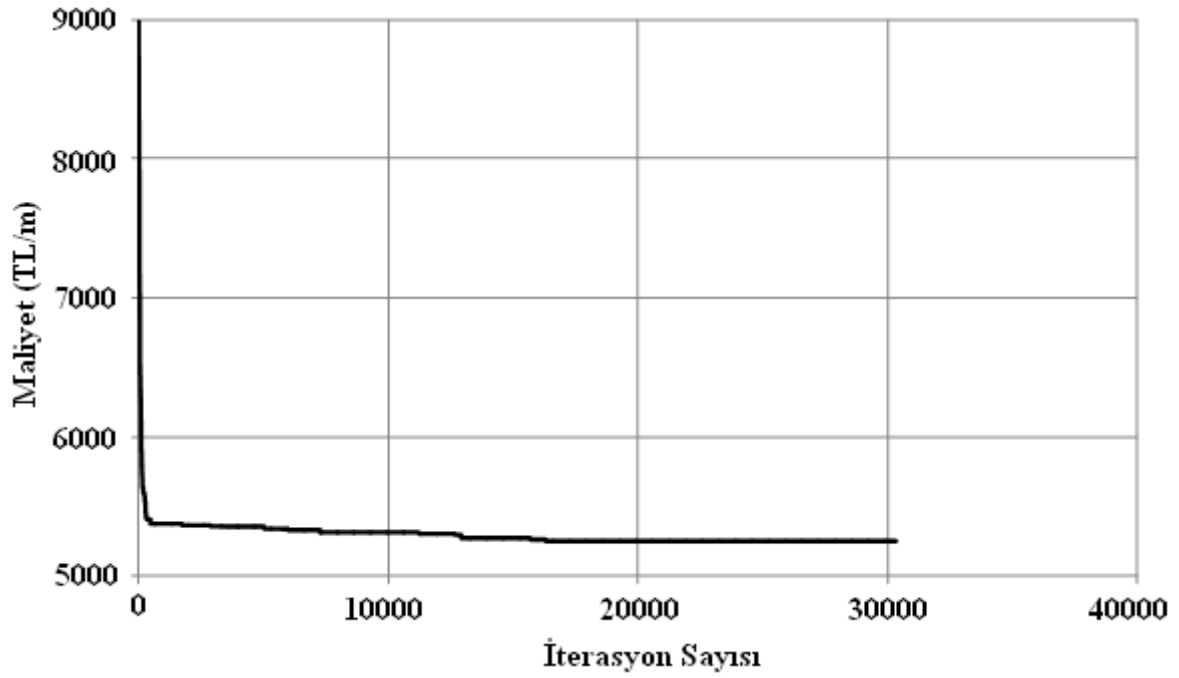
Burada sınırlayıcı işleme yöntemi olarak, Madde 2.1’de açıklanan, Karaboğa ve Akay (2011) tarafından da Yapay Arı Koloni Algoritmasına uyarlanan, Deb’in (2000) sınırlayıcı işleme yönteminin kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

Kolonide bulunan arı sayısının optimum çözüm üzerindeki etkisini belirlemek için çözümler; 20, 40, 60, 80 ve 100 arıdan oluşan koloniler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir koloni için 10 bağımsız koşum yapılmıştır. Yakınsamanın kolay izlenebilmesi için iterasyon sayısı yine tasarım değişkeni sayısının 2500 katı (2500 D) olarak alınmıştır. İki gözlü dikdörtgen kesitli aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünelin optimizasyonunda 32 tasarım değişkeni kullanıldığından iterasyon sayısı 80000 olarak alınmıştır. Bu iterasyon sayısı ile 20, 40, 60, 80 ve 100 arıdan oluşan her bir koloni için amaç fonksiyonunun değerlendirme sayıları sırasıyla 1600010, 3200020, 4800030, 6400040 ve 8000050 olarak elde edilmektedir. Dikkate alınan her bir koloni için elde edilen bulguların yakınsaması aşağıdaki Şekil 2.58’de verilmektedir.



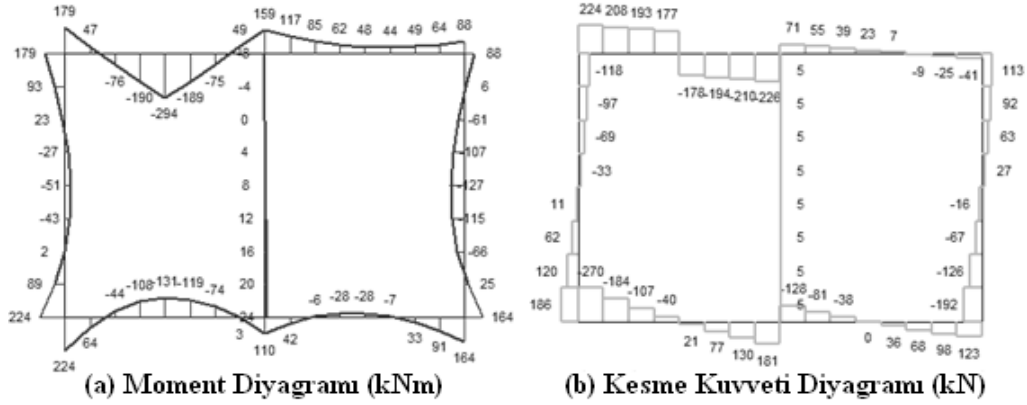
Şekil 2.58. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir koloni için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi

Bu şekilden görüldüğü gibi 20 arı bulunan koloni dışındaki diğer kolonilerin yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Minimum maliyetli tasarım; 60 arı bulunan koloniyle yapılan 10 çözümden biri için elde edilmektedir. Bir gözlü tünelin optimizasyonunda ayrıntılı olarak açıklanmış olan (Madde 2.4.2) birleşik durdurma ölçütü, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözüme uygulandığında, yakınsama 30306. iterasyonda sağlanmaktadır. Bu çözümün yakınsamaya kadar olan maliyet değişimi Şekil 2.59’da verilmektedir.

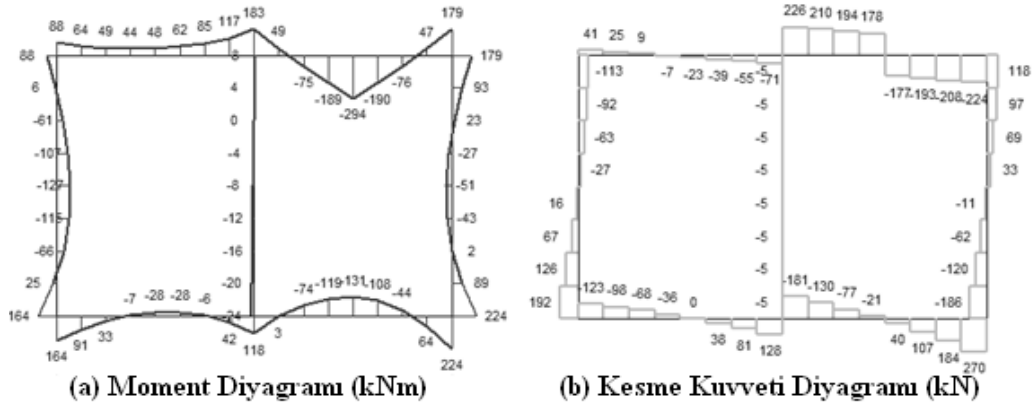


Şekil 2.59. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin tasarımı için 60 arılı koloniyle yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi

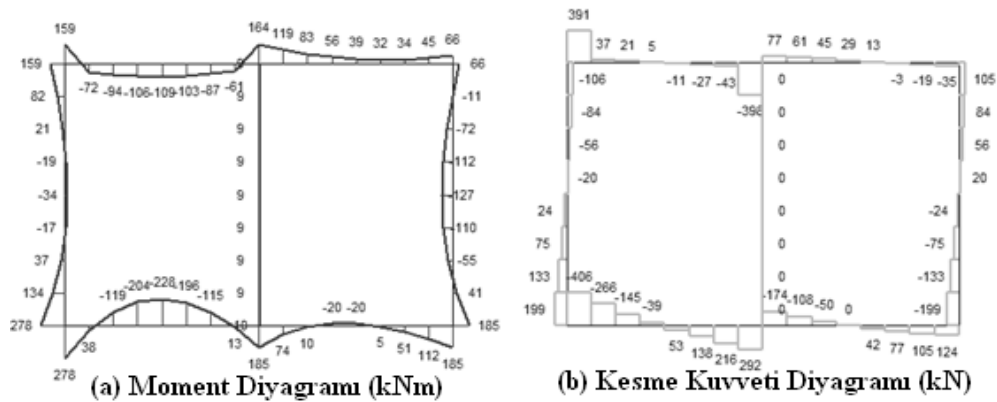
Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen minimum maliyetli tasarım için (bkz. Şekil 2.34) dikkate alınan yük birleşimlerine göre (AASHTO,2002) gerçekleştirilen yapısal çözümlemeden elde edilen moment ve kesme kuvveti diyagramları aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 2.60-Şekil 2.66).



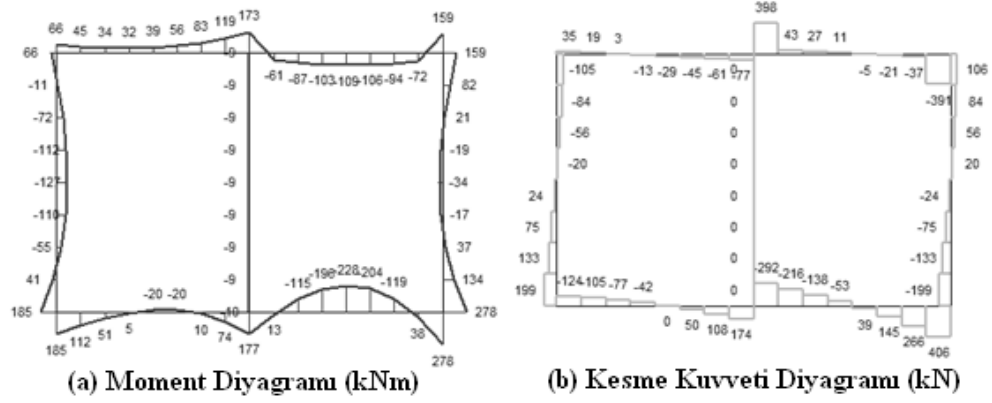
Şekil 2.60. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



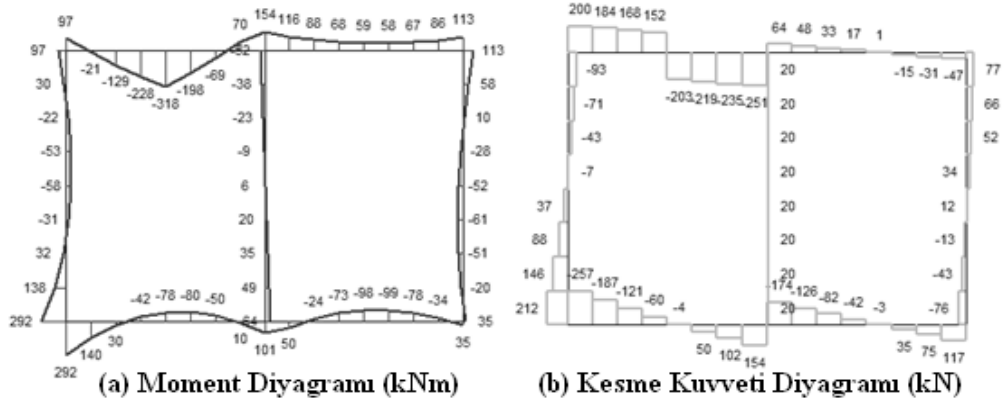
Şekil 2.61. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



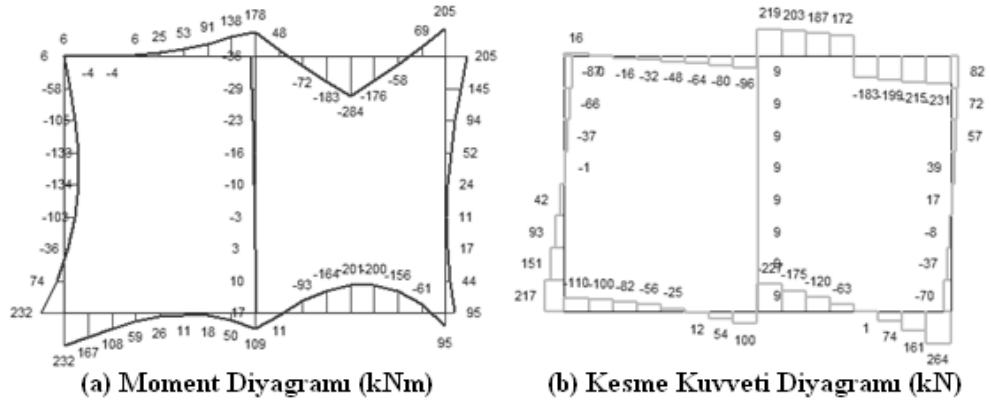
Şekil 2.62. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



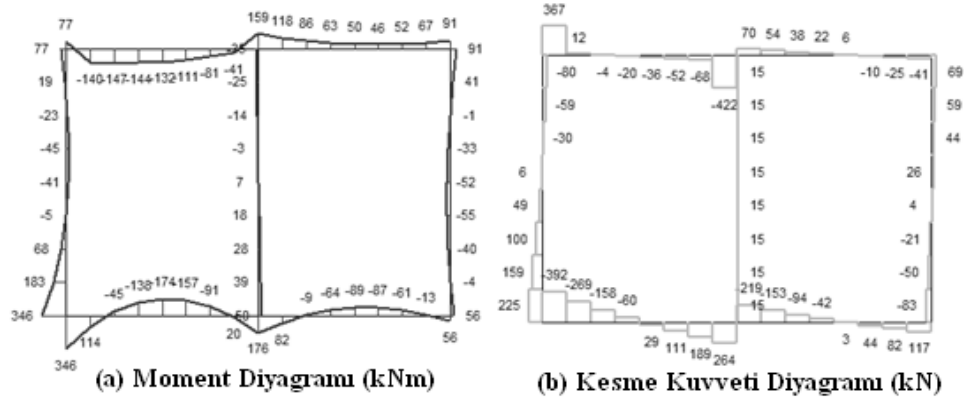
Şekil 2.63. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.64. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

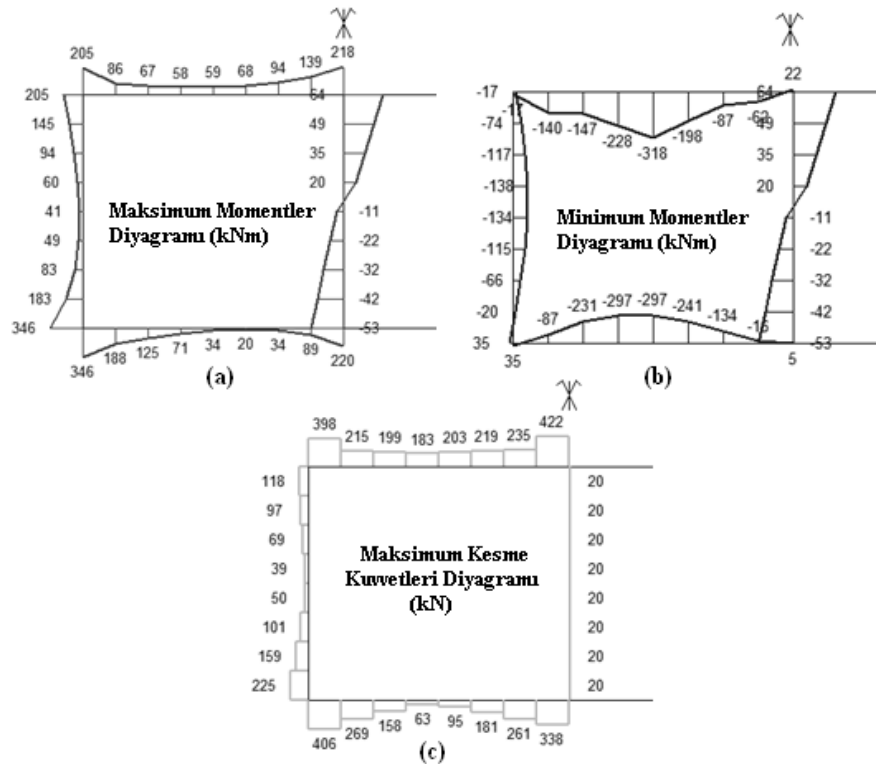


Şekil 2.65. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.66. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

Bir gözlü tünelin çözümlemesinde olduğu gibi bu tünel için de yine yedi farklı yük birleşimi altında gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden elde edilen elverişsiz tasarım moment ve kesme kuvveti diyagramları ise aşağıdaki Şekil 2.67’de verilmektedir.



Şekil 2.67. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla iki gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları

İki gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Çizelge 2.24’de verilmektedir.

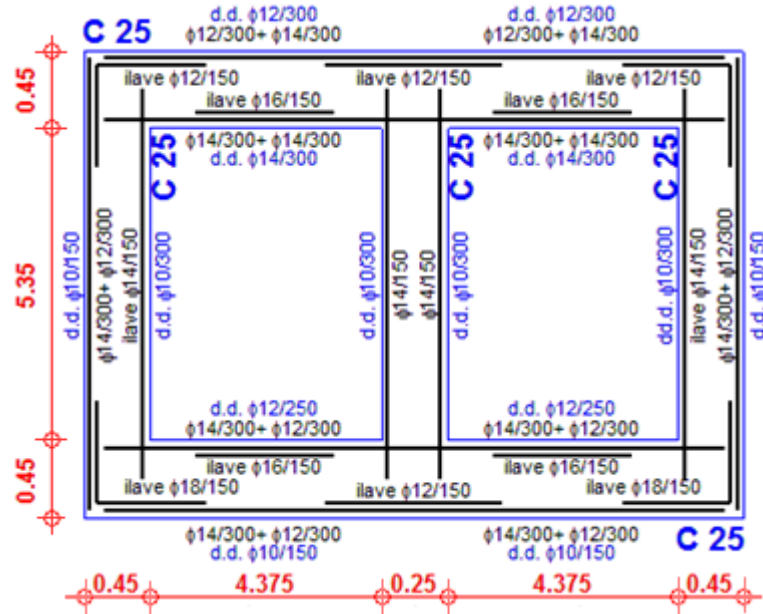
Çizelge 2.24. İki gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla elde edilen, optimum değerleri

Değişken Numarası	Değişken Tanımı	Optimum Değer
1	Tavan Döşemesi Kalınlığı	0.45 m
2	Taban Döşemesi Kalınlığı	0.45 m
3	Duvar Kalınlıkları	0.45 m
4	Orta Duvar Kalınlığı	0.25 m
5	Tavan Döşemesi Beton Sınıfı	C25
6	Taban Döşemesi Beton Sınıfı	C25
7	Duvarların Beton Sınıfı	C25
8	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 1	Ø 12 mm
9	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 2	Ø 14 mm
10	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 1	Ø 14 mm
11	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 2	Ø 14 mm
12	Tavan Döşemesinin Alt Ek Donatısı	Ø 16 mm
13	Tavan Döşemesinin Üst Ek Donatısı	Ø 12 mm
14	Duvar Dış Donatısı 1	Ø 14 mm
15	Duvar Dış Donatısı 2	Ø 12 mm
16	Duvar İç Donatısı	Ø 14 mm
17	Taban Döşemesinin Alt İlave	Ø 18 mm
18	Taban Döşemesinin Üst Donatı 1	Ø 14 mm
19	Taban Döşemesinin Üst Donatı 2	Ø 12 mm
20	Taban Döşemesinin Üst İlave	Ø 16 mm
21	Taban Döşemesinin Alt Donatı 1	Ø 14 mm
22	Taban Döşemesinin Alt Donatı 2	Ø 12 mm
23	Tavan döşemesi orta mesnet ek donatısı	Ø 12 mm
24	Taban döşemesi orta mesnet ek donatısı	Ø 12 mm
25	Orta duvar asal donatısı	Ø 14 mm
26	Tavan Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
27	Taban Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
28	Asal Donatı Aralıkları	150 mm
29	Tavan Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
30	Taban Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
31	Tavan Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	150 mm
32	Taban Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	150 mm

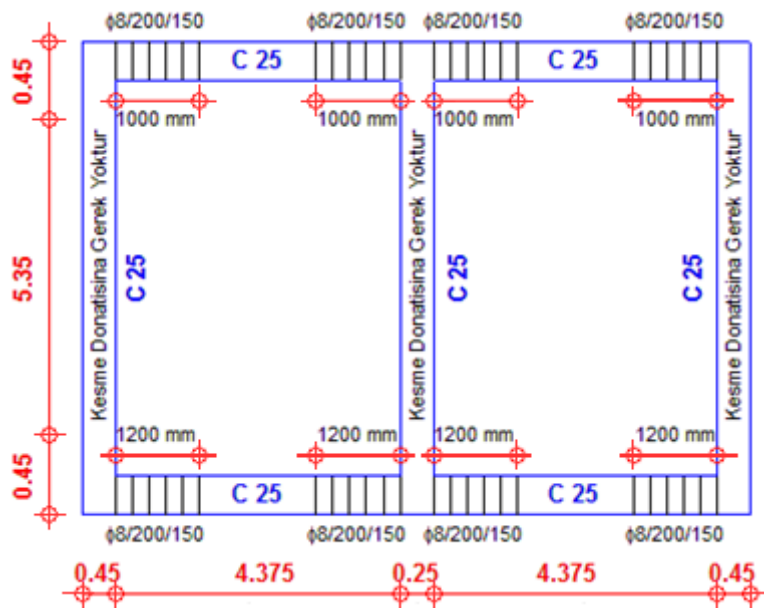
Bu çalışmada geliştirilmiş olan yazılımla, optimum tasarım için; tavan döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1000 mm, taban döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1200 mm, tavan döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø12/300, alt dağıtma donatısı Ø14/300, taban döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø12/250, alt dağıtma

donatısı Ø10/150, yan duvarların dış dağıtma donatıları Ø10/150, iç dağıtma donatıları Ø10/300, orta duvarın dağıtma donatıları Ø10/300 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilmeye çalışılan çözümlemeyle belirlenen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Şekil 2.68 ve Şekil 2.69’da verilmektedir.



Şekil 2.68. İki gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı



Şekil 2.69. İki gözlü tünelin Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı

Gerçekleştirilen çözümlemelerden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri aşağıdaki Çizelge 2.25’de verilmektedir.

Çizelge 2.25. Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan çözümlemelerden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri

Beton	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
Tavan Döşemesi Beton (C 30)	4.46	436.59
Taban Döşemesi Beton (C 25)	4.46	436.59
Duvar Beton (C 25)	4.81	471.87
Orta Duvar Beton (C 25)	1.34	131.08
Toplam		1476.12
Donatı	Miktar (daN/m)	Maliyet (₺/m)
Çap 8 mm	69.762	112.54
Çap 10 mm	87.504	141.16
Çap 12 mm	281.963	454.88
Çap 14 mm	445.773	648.24
Çap 16 mm	110.483	160.66
Çap 18 mm	86.062	125.15
Çap 20 mm	0.00	0.00
Çap 22 mm	0.00	0.00
Çap 24 mm	0.00	0.00
Çap 26 mm	0.00	0.00
Çap 28 mm	0.00	0.00
Çap 30 mm	0.00	0.00
Çap 32 mm	0.00	0.00
Toplam		1642.64
Kalıp	Miktar (m²/m)	Maliyet (₺/m)
	42.65	946.83
İskele	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	46.81	643.67
Kazı	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	66.82	520.57
Dolgu	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	4.95	21.19
Genel Toplam (₺/m)		5251.02

Bu çalışmanın uygulamasına konu olan bir gözlü tünelin geleneksel yöntemle yapım şirketi tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarım enkesitinin birim uzunluğu için maliyeti, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen iki gözlü tünelin optimizasyonu sonucunda elde edilen maliyetle birlikte Çizelge 2.26’da verilmektedir.

Çizelge 2.26. Bir gözlü tünelin geleneksel ve iki gözlü tünelin optimum tasarımına ilişkin maliyetler

	Şirketin Geleneksel Tasarımı (Bir Gözlü)		Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Tasarım (İki Gözlü)	
1 m için	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet
Beton	24.13 m ³	2364.74 ₺	15.07 m ³	1476.12 ₺
Donatı	1809.64 daN	2631.56 ₺	1081.55 daN	1642.64 ₺
Kalıp	33.60 m ²	745.92 ₺	42.65 m ²	946.83 ₺
İskele	48.15 m ³	662.06 ₺	46.81 m ³	643.67 ₺
Kazı	77.48 m ³	603.57 ₺	66.82 m ³	520.57 ₺
Dolgu	5.2 m ³	22.26 ₺	4.95 m ³	21.19 ₺
	Toplam	7030.11 ₺	Toplam	5251.02 ₺

Şirketin bir gözlü tünel için gerçekleştirdiği geleneksel tasarımla, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen iki gözlü optimum tasarım karşılaştırıldığında, şirketin geleneksel tasarıma göre kullanılan beton hacmi 24.13 m³/m iken bu hacim optimum kesit için 15.07 m³/m'ye düşmektedir. Geleneksel tasarımda kullanılan donatı miktarı 1809.64daN/m'dan 1081.55daN/m'ye, iskele miktarı 48.15 m³/m'den 46.81 m³/m'ye, kazı miktarı 77.48m³/m'den 66.82 m³/m'ye, dolgu miktarı 5.2 m³/m'den 4.95 m³/m'ye düşmektedir. Kalıp miktarı ise 33.60 m²/m'den 42.65 m²/m'ye çıkmaktadır. Bu bulgulara göre geleneksel yöntemle tasarlanan tünelin maliyeti 7030.11 ₺/m iken Yapay Arı Koloni optimizasyon tekniğiyle maliyet 5251.02₺/m'ye düşmektedir. Böylece Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen iki gözlü tasarım maliyeti geleneksel tasarımla gerçekleştirilenden %25.31 daha ekonomik olduğunu anlaşılmaktadır.

2.4.5. İki Gözlü Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Bir Tünelin Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı

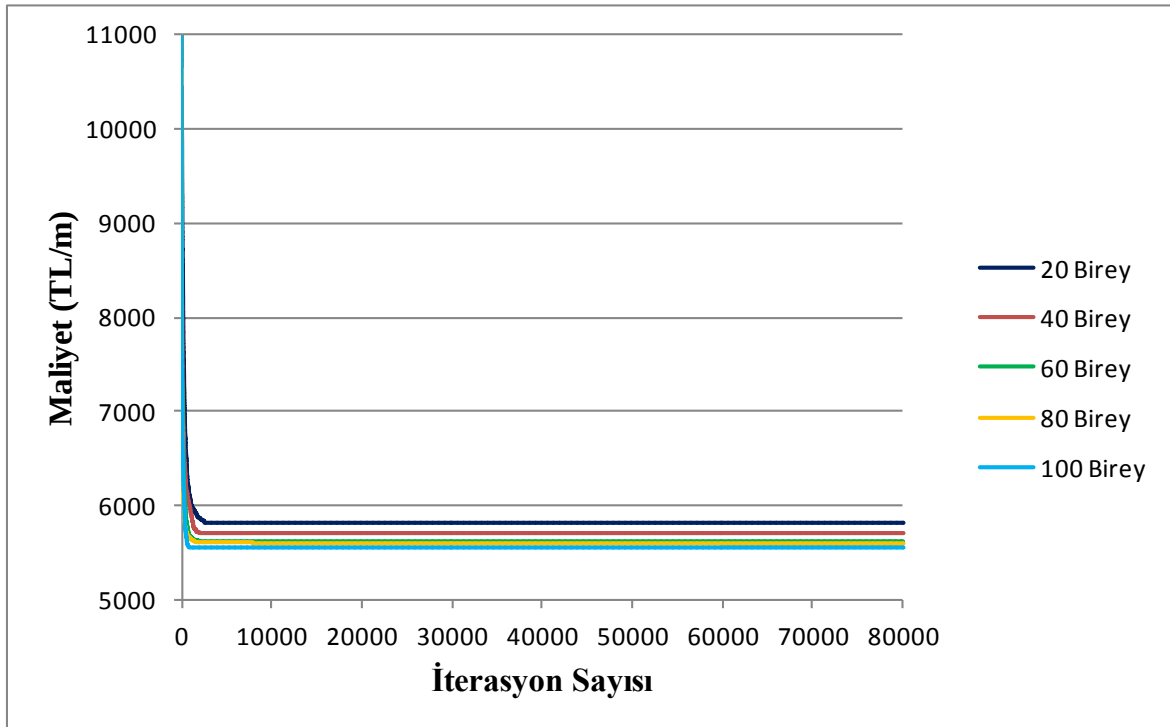
Bu uygulamada dikdörtgen enkesitli betonarme bir gözlü aç-kapa tünelinin, iki gözlü olarak inşa edildiğinde maliyetinin minimum olacak şekilde Genetik Algoritmayla optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu tünelle ilgili gerekli bilgiler daha önce Madde 2.3.'de, amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar ise Madde 2.2'de verilmektedir.

Yapısal çözümlemede kullanılan sonlu elemanlar ve optimizasyon algoritmasına ilişkin yazılımlar MATLAB programlama dilinde (Matlab, 2008) gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen yazılımın kolaylıkla kullanılabilmesi için, yazılıma bir kullanıcı arayüzü de (OPUS) kazandırılmıştır. Arayüzün kullanımı için gereken bilgiler Ek-2’de verilmektedir.

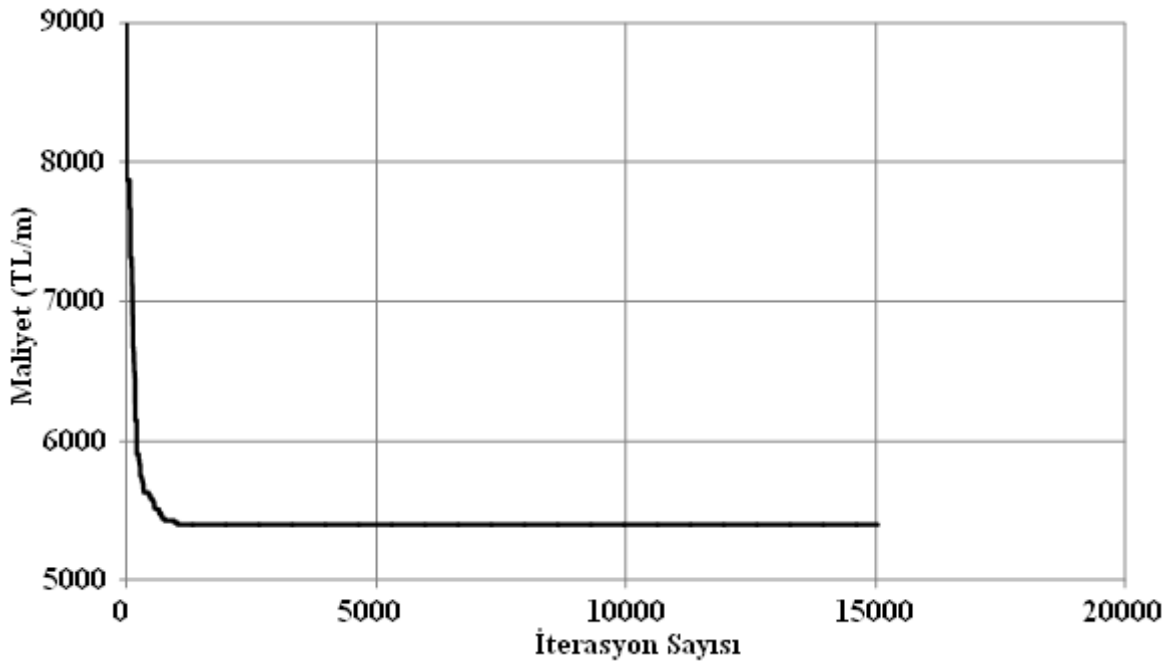
Burada yine sınırlayıcı işleme yöntemi olarak, Madde 2.1’de açıklanan, uyarlanabilen ceza fonksiyonu yönteminin kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

Nesilde bulunan birey sayısının elde edilen optimum çözüm üzerindeki etkisini belirlemek için çözümler; 20, 40, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir nesil için 10 bağımsız koşum yapılmıştır. Yakınsamanın kolay izlenebilmesi için iterasyon sayısı yine tasarım değişkeni sayısının 2500 katı (2500 D) olarak alınmıştır. Bu tünelin optimizasyonunda 32 tasarım değişkeni kullanıldığından iterasyon sayısı 80000 olarak alınmıştır. Bu iterasyon sayısı ile 20, 40, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan her bir nesil için amaç fonksiyonunun değerlendirme sayıları sırasıyla 1600020, 3200040, 4800060, 6400080 ve 8000100 olarak elde edilmektedir. Dikkate alınan her bir nesil için elde edilen bulguların yakınsaması aşağıdaki Şekil 2.70’de verilmektedir.



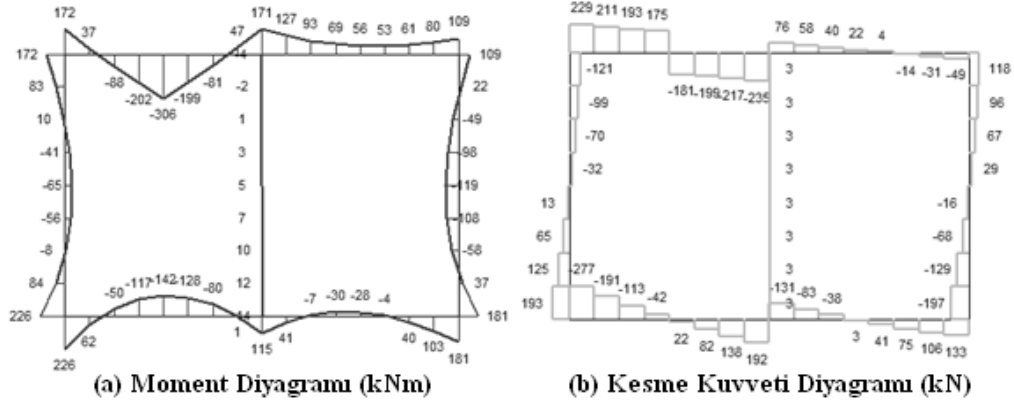
Şekil 2.70. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin tasarımında dikkate alınan her bir nesil için iterasyon sayısına göre tünel maliyetinin değişimi

Bu şekilden görüldüğü gibi nesillerin yakınsama hızlarının birbirine çok yakın olduğu, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller için elde edilen ortalama maliyetin diğerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Minimum maliyetli tasarım; 80 birey bulunan nesille yapılan 10 çözümden biri için elde edilmektedir. Bu çözümde de bir gözlü tünelin optimizasyonunda ayrıntılı olarak açıklanmış olan (Madde 2.4.2) birleşik durdurma ölçütü, Genetik Algoritmayla yapılan çözüme uygulandığında, yakınsama 15031. iterasyonda sağlanmaktadır Bu çözümün yakınsamaya kadar olan tünel maliyetinin değişimi Şekil 2.71’de verilmektedir.

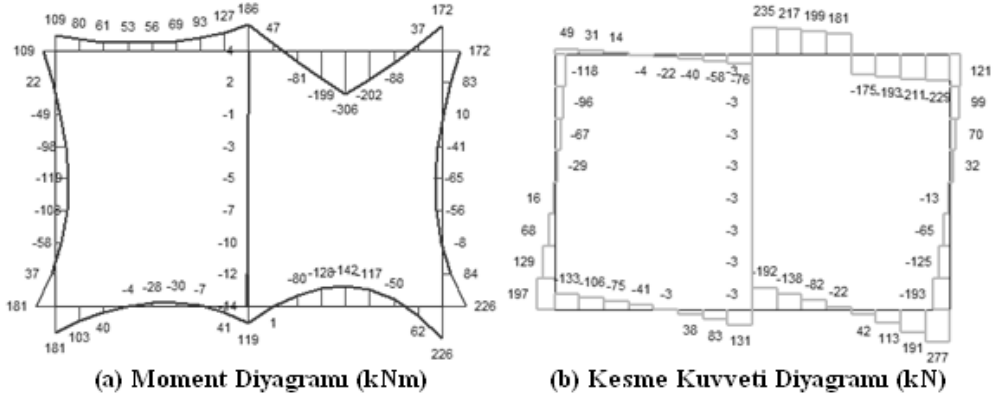


Şekil 2.71. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin tasarımı için 80 bireyden oluşan nesille yapılan optimizasyona göre minimum maliyetteki değişim eğrisi

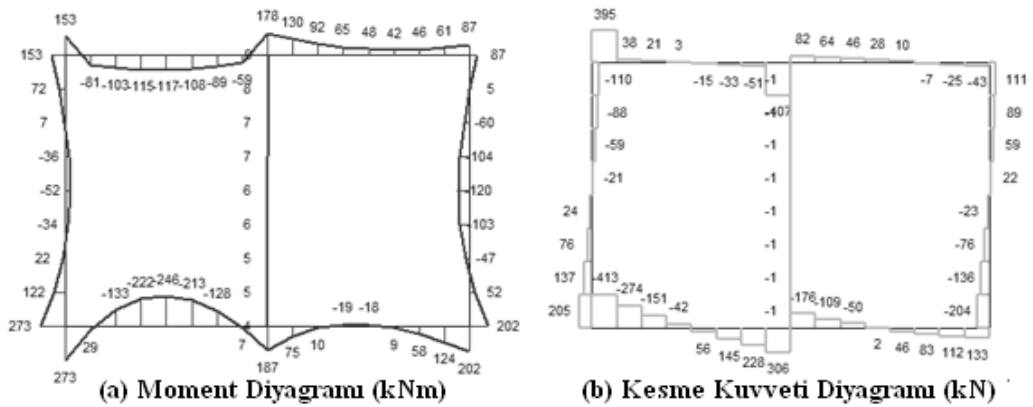
Genetik Algoritmayla belirlenen minimum maliyetli tasarım için (bkz. Şekil 2.71) dikkate alınan yük birleşimlerine göre (AASHTO,2002) gerçekleştirilen yapısal çözümlemeden elde edilen moment ve kesme kuvveti diyagramları aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 2.72-Şekil 2.78).



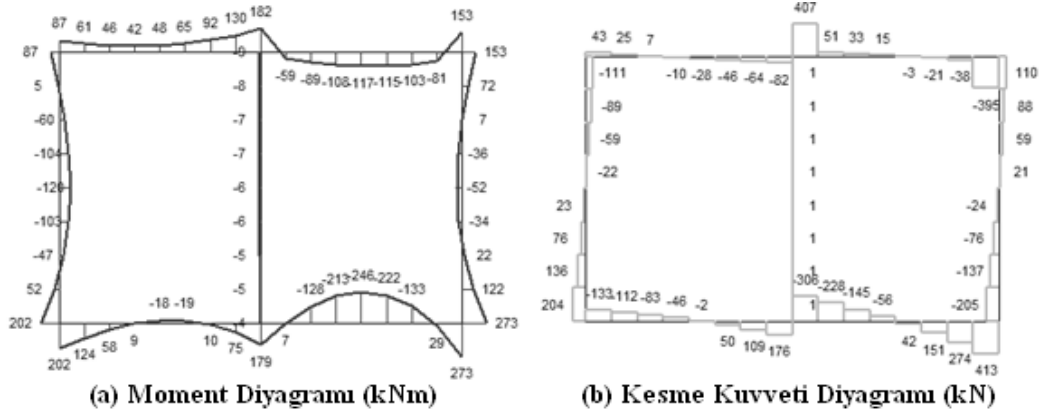
Şekil 2.72. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.84) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



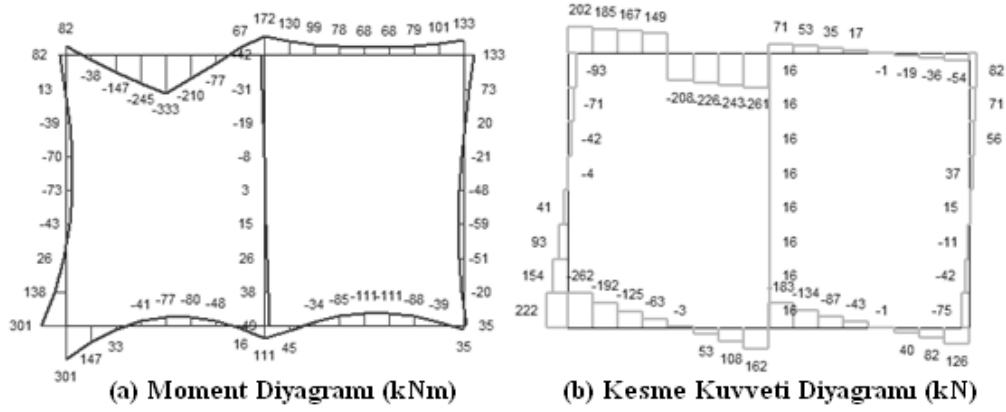
Şekil 2.73. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.85) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



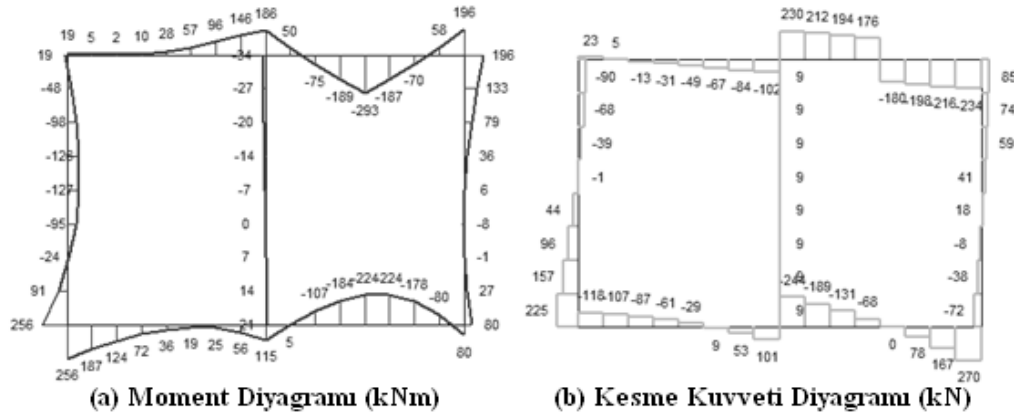
Şekil 2.74. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.86) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



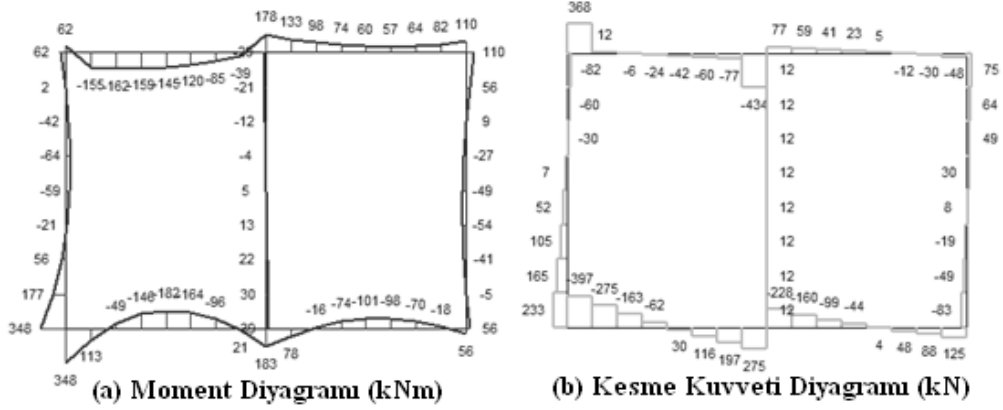
Şekil 2.75. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.87) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.76. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.88) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

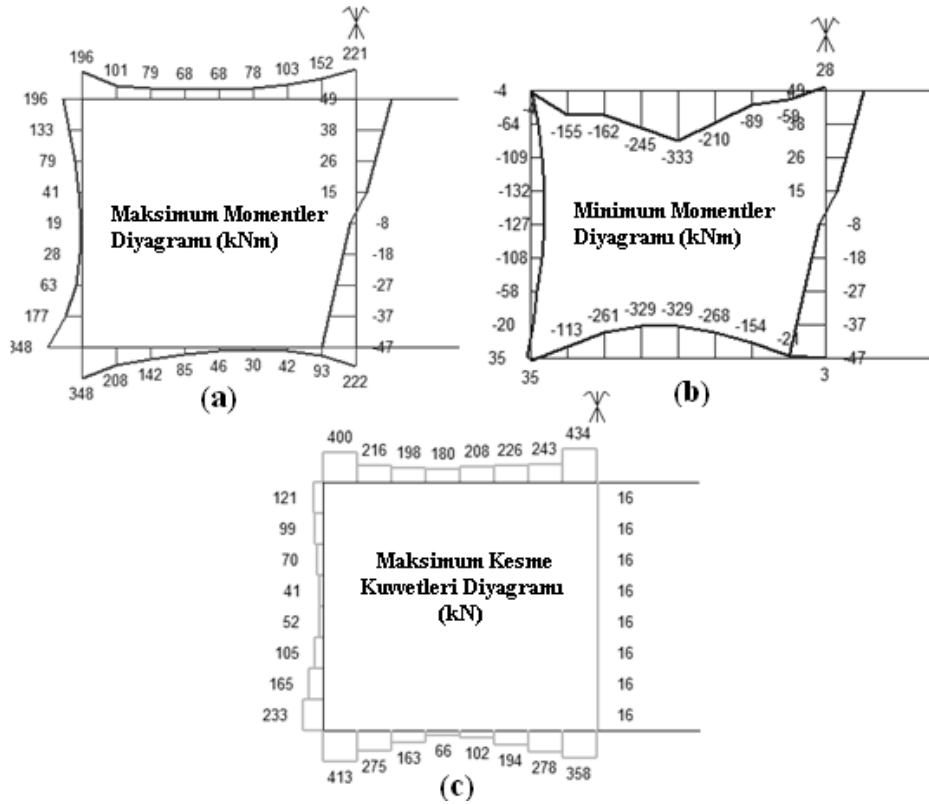


Şekil 2.77. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.89) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları



Şekil 2.78. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum enkesiti için (2.90) bağıntısıyla verilen yük birleşimi altında belirlenen moment (a) ve kesme kuvveti (b) diyagramları

Bir gözlü tünelin çözümlemesinde olduğu gibi bu tünel için de yine yedi farklı yük birleşimi altında gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden elde edilen elverişsiz tasarım moment ve kesme kuvveti diyagramları ise aşağıdaki Şekil 2.79’da verilmektedir.



Şekil 2.79. Genetik Algoritmayla iki gözlü tünelin optimum tasarımı için yük birleşimlerinden (bkz 2.84-2.90 bağıntıları) elde edilen maksimum momentler (a), minimum momentler (b) ve maksimum kesme kuvvetleri (c) diyagramları

İki gözlü tünelin Genetik Algoritmayla elde edilen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Çizelge 2.27’de verilmektedir.

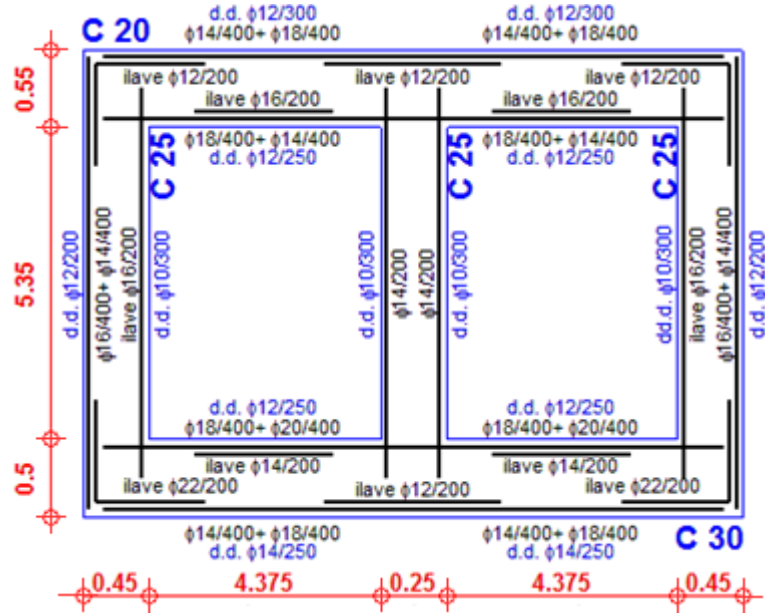
Çizelge 2.27. İki gözlü tünelin tasarım değişkenlerinin, Genetik Algoritmayla elde edilen, optimum değerleri

Değişken Numarası	Değişken Tanımı	Optimum Değer
1	Tavan Döşemesi Kalınlığı	0.55 m
2	Taban Döşemesi Kalınlığı	0.50 m
3	Duvar Kalınlıkları	0.45 m
4	Orta Duvar Kalınlığı	0.25 m
5	Tavan Döşemesi Beton Sınıfı	C20
6	Taban Döşemesi Beton Sınıfı	C30
7	Duvarların Beton Sınıfı	C25
8	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 1	Ø 14 mm
9	Tavan Döşemesinin Üst Donatısı 2	Ø 18 mm
10	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 1	Ø 18 mm
11	Tavan Döşemesinin Alt Donatısı 2	Ø 14 mm
12	Tavan Döşemesinin Alt Ek Donatısı	Ø 16 mm
13	Tavan Döşemesinin Üst Ek Donatısı	Ø 12 mm
14	Duvar Dış Donatısı 1	Ø 16 mm
15	Duvar Dış Donatısı 2	Ø 14 mm
16	Duvar İç Donatısı	Ø 16 mm
17	Taban Döşemesinin Alt İlave	Ø 22 mm
18	Taban Döşemesinin Üst Donatı 1	Ø 18 mm
19	Taban Döşemesinin Üst Donatı 2	Ø 20 mm
20	Taban Döşemesinin Üst İlave	Ø 14 mm
21	Taban Döşemesinin Alt Donatı 1	Ø 14 mm
22	Taban Döşemesinin Alt Donatı 2	Ø 18 mm
23	Tavan döşemesi orta mesnet ek donatısı	Ø 12 mm
24	Taban döşemesi orta mesnet ek donatısı	Ø 12 mm
25	Orta duvar asal donatısı	Ø 14 mm
26	Tavan Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
27	Taban Döşemesinin Kesme Donatısı	Ø 8 mm
28	Asal Donatı Aralıkları	200 mm
29	Tavan Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
30	Taban Döş. Kesme Donatısının Yatay Aralıkları	200 mm
31	Tavan Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	200 mm
32	Taban Döş. Kesme Donatısının Boyuna Doğrultudaki Aralıkları	200 mm

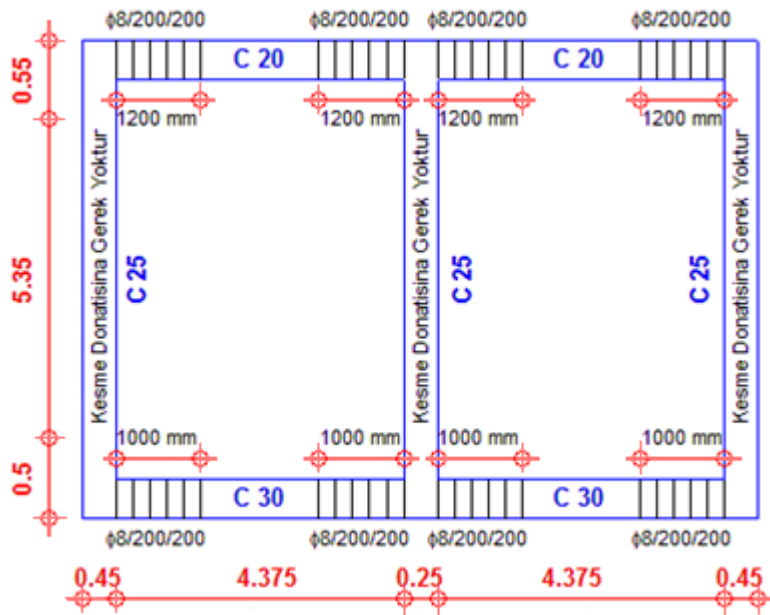
Bu çalışmada geliştirilmiş olan yazılımla, optimum tasarım için; tavan döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1000 mm, taban döşemesinin kesme donatısı yerleştirilen bölge uzunluğu 1200 mm, tavan döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø12/250, alt dağıtma donatısı Ø12/250, taban döşemesinin üst dağıtma donatısı Ø12/250, alt dağıtma

donatısı $\emptyset 14/250$, yan duvarların dış dağıtma donatıları $\emptyset 12/200$, iç dağıtma donatıları $\emptyset 10/300$, orta duvarın dağıtma donatıları ise $\emptyset 10/300$ olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilmeye çalışılan çözümlemeyle belirlenen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aşağıdaki Şekil 2.80 ve Şekil 2.81’de verilmektedir.



Şekil 2.80. İki gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen asal donatıları için optimum enkesit detayı



Şekil 2.81. İki gözlü tünelin Genetik Algoritmayla belirlenen kesme donatıları için optimum enkesit detayı

Gerçekleştirilen çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri aşağıdaki Çizelge 2.28’de verilmektedir.

Çizelge 2.28.Genetik Algoritmayla yapılan çözümlemeden elde edilen optimum enkesitli tünelin birim uzunluğunda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri

Beton	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
Tavan Döşemesi Beton (C 20)	5.44	511.83
Taban Döşemesi Beton (C 30)	4.95	514.80
Duvar Beton (C 25)	4.81	471.87
Orta Duvar Beton (C 25)	1.34	131.08
Toplam		1629.58
Donatı	Miktar (daN/m)	Maliyet (₺/m)
Çap 8 mm	60.21	97.14
Çap 10 mm	21.08	35.46
Çap 12 mm	193.64	312.40
Çap 14 mm	287.36	417.87
Çap 16 mm	145.11	211.02
Çap 18 mm	208.13	302.66
Çap 20 mm	64.13	93.26
Çap 22 mm	97.91	142.38
Çap 24 mm	0.00	0.00
Çap 26 mm	0.00	0.00
Çap 28 mm	0.00	0.00
Çap 30 mm	0.00	0.00
Çap 32 mm	0.00	0.00
Toplam		1612.18
Kalıp	Miktar (m²/m)	Maliyet (₺/m)
	42.95	953.49
İskele	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	46.81	643.67
Kazı	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	68.31	532.13
Dolgu	Miktar (m³/m)	Maliyet (₺/m)
	4.95	21.19
Genel Toplam (₺/m)		5392.24

Bu çalışmanın uygulamasına konu olan bir gözlü tünelin geleneksel yöntemle yapım şirketi tarafından gerçekleştirilmiş olan tasarım enkesitinin birim uzunluğu için maliyeti, Genetik Algoritmayla ve Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen iki gözlü

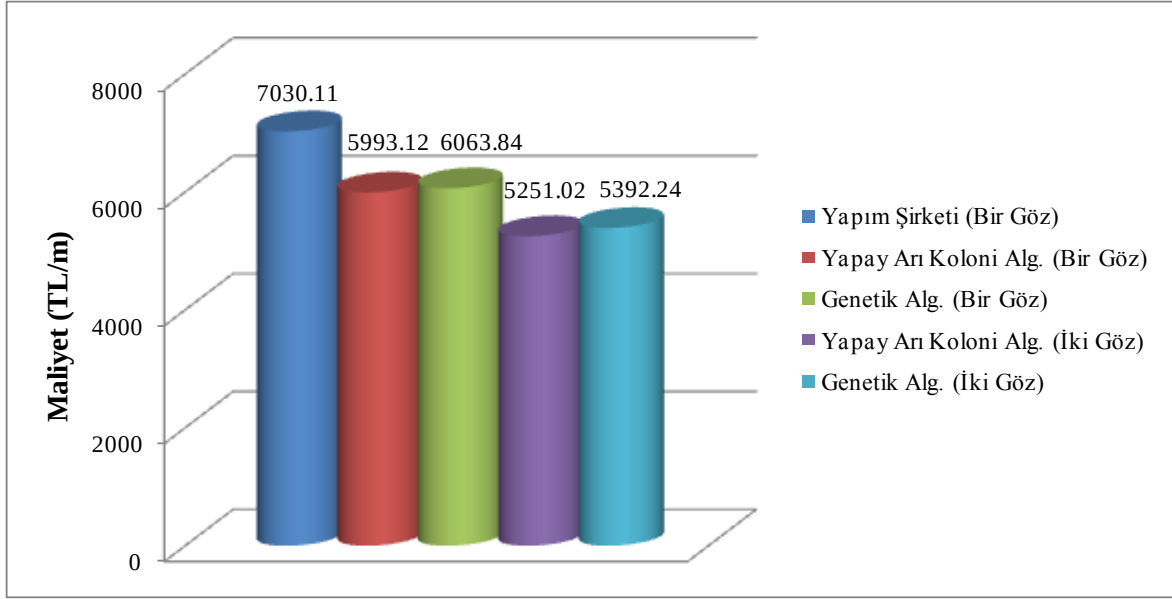
tünelin optimizasyonu sonucunda elde edilen maliyetlerle birlikte Çizelge 2.29’da verilmektedir.

Çizelge 2.29. Bir gözlü tünelin geleneksel ve iki gözlü tünelin optimum tasarımına ilişkin maliyetler

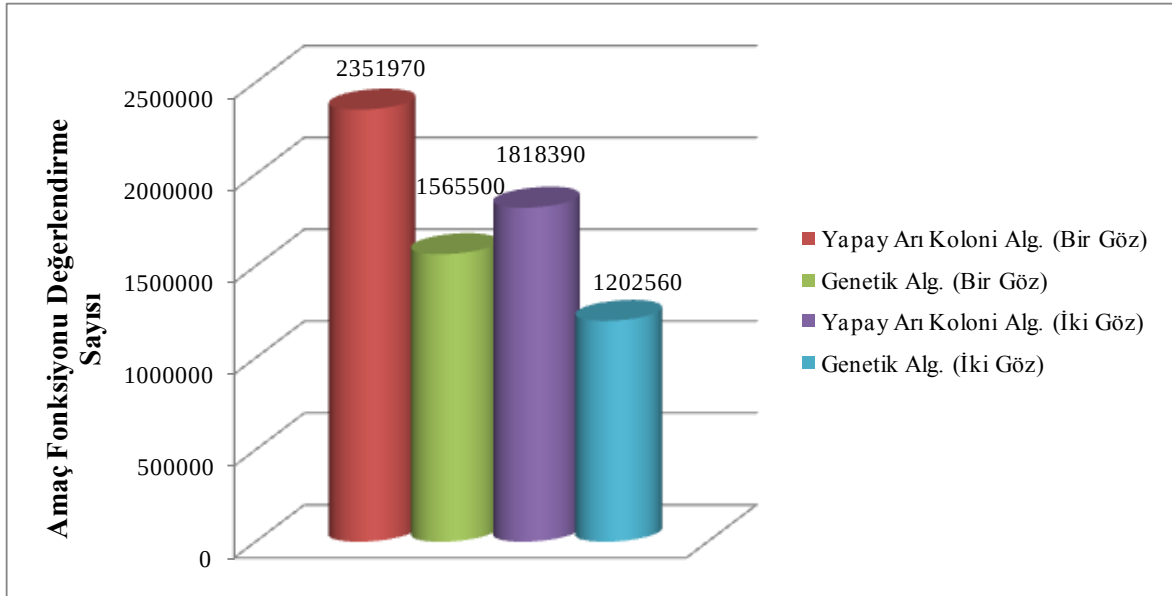
	Şirketin Geleneksel Tasarımı (Bir Gözlü)		Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla Tasarım (İki Gözlü)		Genetik Algoritmayla Tasarım (İki Gözlü)	
1 m için	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet	Miktar	Maliyet
Beton	24.13 m ³	2364.74 ₺	15.07 m ³	1476.12 ₺	16.54 m ³	1629.58 ₺
Donatı	1809.64 daN	2631.56 ₺	1081.55 daN	1642.64 ₺	1077.57 daN	1612.18 ₺
Kalıp	33.60 m ²	745.92 ₺	42.65 m ²	946.83 ₺	42.95 m ²	953.49 ₺
İskele	48.15 m ³	662.06 ₺	46.81 m ³	643.67 ₺	46.81 m ³	643.67 ₺
Kazı	77.48 m ³	603.57 ₺	66.82 m ³	520.57 ₺	68.31 m ³	532.13 ₺
Dolgu	5.2 m ³	22.26 ₺	4.95 m ³	21.19 ₺	4.95 m ³	21.19 ₺
	Toplam	7030.11 ₺	Toplam	5251.02 ₺	Toplam	5392.24 ₺

Şirketin bir gözlü tünel için gerçekleştirdiği geleneksel tasarımla, Genetik Algoritmayla gerçekleştirilen iki gözlü optimum tasarım karşılaştırıldığında, şirket tünelin tüm elemanlarına aynı beton sınıfını (C25) kullandığı halde, optimum tasarım geleneksel tasarımda kullanılan beton sınıfından farklı olarak tavan döşemesi için C20, taban döşemesi için C30 sınıfı betonları önermektedir. Şirketin geleneksel tasarımına göre kullanılan beton hacmi 24.13 m³/m iken bu hacim optimum kesit için 16.54 m³/m’ye düşmektedir. Geleneksel tasarımda kullanılan donatı miktarı 1809.64daN/m’den 1077.57 daN/m’ye, iskele miktarı 48.15 m³/m’den 46.81 m³/m’ye, kazı miktarı 77.48m³/m’den 68.31 m³/m’ye, dolgu miktarı 5.2 m³/m’den 4.95 m³/m’ye düşmektedir. Kalıp miktarı ise 33.60 m²/m’den 42.95 m²/m’ye çıkmaktadır. Bu bulgulara göre geleneksel yöntemle tasarlanan tünelin maliyeti 7030.11 ₺/m iken Genetik Algoritmayla maliyet 5392.24₺/m’ye düşmektedir. Böylece Genetik Algoritmayla gerçekleştirilen iki gözlü tasarım maliyeti geleneksel tasarımla gerçekleştirilenden %23.30 daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır.

Bir ve iki gözlü tüneller için Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla belirlenen optimum maliyetler, geleneksel yöntemle belirlenenlerle birlikte aşağıdaki Şekil 2.82’de verilmektedir. Optimum maliyetlerin belirlenmesinde yakınsamaya kadar değerlendirilen amaç fonksiyonu sayıları ise Şekil 2.83’de verilmektedir.



Şekil 2.82. Bir ve iki gözlü tüneller için Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla belirlenen optimum maliyetler ile şirket tarafından geleneksel yöntemle belirlenen maliyet grafikleri



Şekil 2.83. Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla optimum maliyetlerin belirlenmesinde yakınsamaya kadar değerlendirilen amaç fonksiyonu sayısı grafikleri

Yukarıdaki Şekil 2.82'den Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla yapılan optimum tasarım maliyetlerinin, şirket tarafından geleneksel yöntemle gerçekleştirilen tasarım maliyetinden daha düşük olduğu, iki gözlü olarak tasarımı gerçekleştirilen tünelin

maliyetlerinin de, bir gözlü olarak tasarımı gerçekleştirilen tünelin maliyetlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan aynı şekilden Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla bir ve iki gözlü tüneller için gerçekleştirilen tasarımların, Genetik Algoritmayla gerçekleştirilenlerden daha ekonomik olduğu da görülmektedir. Şekil 2.83'den ise; Genetik Algoritmayla tasarımda değerlendirilen amaç fonksiyonu sayısının, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla tasarımda değerlendirilen amaç fonksiyonu sayısından daha düşük olduğu, diğer bir deyişle bu çalışmanın uygulamasına konu olan tünel için, Genetik Algoritmanın, Yapay Arı Koloni Algoritmasına göre sonuca, göz ardı edilebilecek bir farkla, daha çabuk ulaştığı anlaşılmaktadır.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen enkesitli betonarme tünellerin minimum maliyetle tasarımlarını Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayı kullanarak gerçekleştirmektir.

Bu amaçla çalışmanın birinci bölümünde tüneller sınıflandırılmış ve kaplamaları konusunda bilgiler verilmiş, bunu takiben sığ tünel çeşitleri, bunların yapısal çözümlemelerinde dikkate alınan yük, yük etkileriyle bunların birleşimleri ve yapısal optimizasyona ilişkin bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritma üzerinde durulmuş, Yapay Arı Koloni Algoritması bazı örnek tasarımlar üzerinde denenmiş, dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünellerin tasarımı için amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılara ilişkin matematiksel ifadeler oluşturulmuştur. Bu ifadeler kullanılarak sözkonusu algoritmalarla Trabzon Kalekapı Kavşağı Altgeçit tünelinin minimum maliyetli tasarımı gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular tüneli inşa eden yapım şirketinin kullandığı geleneksel tasarım bulgularıyla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- ✓ Yapay Arı Koloni Algoritması Himmelblau fonksiyonuna uygulanmış ve daha önce teknik literatürdeki araştırmalardan elde edilen optimum sonuç, bu çalışmada amaç fonksiyonun daha düşük değerlendirilme sayısı ile elde edilmiştir. Bu durum Yapay Arı Koloni Algoritmasının başarımının teknik literatürde kullanılan diğer algoritmalarla daha yüksek olduğuna işaret etmektedir.
- ✓ Yapay Arı Koloni Algoritmasının kaynaklı giriş problemine uygulanmasından teknik literatürde kullanılan diğer algoritmalarla daha düşük ağırlıklı tasarımlar elde edilmiştir. Bu bulgu Yapay Arı Koloni Algoritmasının daha etkin olduğunu göstermektedir.
- ✓ Yapay Arı Koloni Algoritmasının tek donatılı betonarme girişlerin optimum tasarımında kullanılmasıyla, elde edilen bulguların diğer araştırmacıların kullandığı algoritmalarla elde edilen bulgularla pratik olarak çakışmaktadır. Bu durum Yapay Arı Koloni Algoritmasının tek donatılı betonarme girişlerin optimum tasarımında başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

- ✓ Yapay Arı Koloni Algoritması bir doğrultuda birleşik eğilme etkisinde betonarme kolonların tasarımına da uygulanmış ve diğer araştırmacıların kullandığı algoritmalarından elde edilen tasarımlara göre daha düşük maliyetli bir tasarım elde edilmiştir. Bu bulgular Yapay Arı Koloni Algoritmasının bir doğrultuda birleşik eğilme etkisindeki kolonlar için de başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.
- ✓ MATLAB programlama dilinde, bir ve iki gözlü dikdörtgen enkesitli tünellerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla optimum tasarımını yapabilen yazılımlar hazırlanmıştır. Bu tür tünellerin optimum tasarımları, yazılıma kazandırılan, OPUS adı verilen, tek bir arayüzle gerçekleştirilebilmektedir. Bu arayüz sayesinde gerçekleştirilen tasarımlara ilişkin moment ve kesme kuvveti diyagramları, asal ve kesme donatısı detayları kolaylıkla çizdirilebildiği gibi kullanılan malzeme miktarlarına ilişkin raporlar da oluşturulabilmektedir.
- ✓ ANOVA ve ANOM testleri, Yapay Arı Koloni Algoritması denetim parametrelerinden MR'nin 0.1 ile 0.9 arasında 0.1 artımlarla 9 farklı değeri kullanılarak elde edilen bulgulara uygulanmıştır. ANOVA testi en az bir MR değerinin bulguları etkilediğini, ANOM testinden ise MR için; 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9 değerlerinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.
- ✓ ANOVA ve ANOM testleri, Yapay Arı Koloni Algoritması denetim parametrelerinden SPP'nin $0.1 \times SN \times D$, $0.5 \times SN \times D$, $SN \times D$, $2 \times SN \times D$ ve $4 \times SN \times D$ ile hesaplanan değerleri kullanılarak elde edilen bulgulara uygulanmıştır. ANOVA testi en az bir SPP değerinin bulguları etkilediğini, ANOM testinden ise SPP için; $0.1 \times SN \times D$, $0.5 \times SN \times D$, $SN \times D$ ve $4 \times SN \times D$ değerlerinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.
- ✓ ANOVA ve ANOM testleri, Yapay Arı Koloni Algoritması denetim parametrelerinden LIMIT'in $0.1 \times SN \times D$, $0.5 \times SN \times D$, $SN \times D$, $2 \times SN \times D$ ve $4 \times SN \times D$ ile hesaplanan değerleri kullanılarak elde edilen bulgulara uygulandığında, ANOVA testi en az bir LIMIT değerinin bulguları etkilediğini, ANOM testinden ise LIMIT değerleri; $SN \times D$ ve $2 \times SN \times D$ değerlerinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.
- ✓ Bir gözlü tünelin tasarımı için, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla 20,40,60,80 ve 100 arıdan oluşan koloniler kullanılarak elde edilen bulgular, 20 arı bulunan koloni dışındaki diğer kolonilerin yakınsama hızlarının hemen hemen örtüştüğünü göstermiştir.

- ✓ Bir gözlü tünelin tasarımı için, Genetik Algoritmayla 20,40,60,80 ve 100 bireyden oluşan nesiller kullanılarak elde edilen bulgular, nesillerin yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğunu, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller için elde edilen ortalama maliyetin ise diğer nesillerden elde edilenlere göre daha düşük olduğunu göstermiştir.
- ✓ Geleneksel yöntemle tasarlanıp inşa edilen bir gözlü tünelin maliyeti 7030.11 ₺/m iken bu maliyet Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla gerçekleştirilen optimizasyonla 5993.12₺/m'ye, Genetik Algoritmayla gerçekleştirilen optimizasyonla ise 6063.84₺/m'ye düşmüştür. Bu bulgular Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla tasarlanan tünel maliyetinin geleneksel yöntemle tasarlanana göre %14.75, Genetik Algoritmayla tasarlanan tünel maliyetinin ise %13.74 daha ekonomik olduğunu göstermiştir.
- ✓ İki gözlü tünelin tasarımı için Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla; 20, 40, 60, 80 ve 100 arıdan oluşan koloniler kullanılarak elde edilen bulgular, 20 arı bulunan koloni dışındaki diğer kolonilerin yakınsama hızlarının pratik olarak aynı olduğunu göstermiştir.
- ✓ İki gözlü tünelin tasarımı için Genetik Algoritmayla; 20, 40, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller kullanılarak elde edilen bulgular, nesillerin yakınsama hızlarının birbirine yakın olduğunu, 60, 80 ve 100 bireyden oluşan nesiller için elde edilen ortalama maliyetin de diğer nesillerden elde edilenlerden daha az olduğunu göstermiştir.
- ✓ Bir gözlü tünelin iki gözlü olarak inşa edilmesi durumunda, Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla maliyet 5251.02₺/m, Genetik Algoritmayla ise 5392.24 ₺/m olarak elde edilmiştir. Bu bulgular Yapay Arı Koloni Algoritmasıyla tasarlanan tünel maliyetinin, geleneksel yöntemle tasarlanan bir gözlü tüneline göre % 25.31, Genetik Algoritmayla tasarlanan tünel maliyetinin ise %23.30 daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır.
- ✓ Tasarımlarda değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının dikkate alınması, Genetik Algoritmanın, Yapay Arı Koloni Algoritmasına göre optimum sonuca daha çabuk ulaştığını göstermiştir.

Özetle bu çalışma, aç-kapa yöntemiyle inşa edilen dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünel optimum tasarımlarının Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla gerçekleştirilebileceğini ve böylece tünel maliyetinin geleneksel yöntemle inşa edilen tünellerinkinden ihmal edilemeyecek kadar düşük olduğunu göstermiştir.

Ancak elde edilen bu sonuçlar, çalışmamıza konu olan tüneller ve kullanılan algoritmalar için geçerlidir. Bu sonuçların genellenebilmesi için benzer çalışmaların daha farklı tüneller üzerinde de yapılması gerekmektedir.

4. KAYNAKLAR

- AASHTO-HB-17, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, 1028 s.
- Abbass, H., A. ve Teo, J., 2001. A True Annealing Approach to The Marriage in Honey-Bees Optimization Algorithm. The Inaugural Workshop on Artificial Life, Aralık, Adelaide, Avustralya, Bildiriler CD'si: 1-14.
- ACI-318, 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Michigan, ABD, 473 s.
- Afshar, A., Haddad, O., B., Marino, M., A. ve Adams, B., J., 2007. Honey-Bee Mating Optimization (HBMO) Algorithm for Optimal Reservoir Operation, Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 344, 5, 452-462.
- Akay, B., 2009. Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi, Doktora Tezi, E.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Akay, B. ve Karaboga, D., 2009. Parameter Tuning for The Artificial Bee Colony Algorithm, Computational Collective Intelligence. Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems, 5796, 608-619.
- Akay, B. ve Karaboga, D., 2009. Solving Integer Programming Problems by Using Artificial Bee Colony Algorithm, AI*IA 2009: Emergent Perspectives in Artificial Intelligence, 5883, 355-364.
- Akay, B. ve Karaboga, D., 2012. Artificial Bee Colony Algorithm for Large-Scale Problems and Engineering Design Optimization, Journal of Intelligent Manufacturing, 23, 4, 1001-1014.
- Akay, B. ve Karaboga, D., 2012. A Modified Artificial Bee Colony Algorithm for Real-Parameter Optimization, Information Sciences, 192, 120-142.
- Akbas, S., O. ve Yuksel, S., B., 2007. Finite Element Analysis for the Estimation of Vertical Design Loads on Reinforced Concrete Box Culverts, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, Ekim, Antalya, Turkey, Bildiriler Kitabı: 142-151.
- Akın, A., 2010. Optimum Design of Reinforced Concrete Plane Frames Using Harmony Search Algorithm, Doktora Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akın, A. ve Saka, M., P., 2010. Optimum Design of Concrete Cantilever Retaining Walls Using Harmony Search Algorithm. 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eylül, Trabzon, Bildiriler CD'si: 1-16.

- Akın, A. ve Saka, M., P., 2010. Optimum Design of Short RC Columns Subjected to Axial Force and Uniaxial/Biaxial Bending Using Harmony Search Algorithm. 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eylül, Trabzon, Bildiriler CD'si: 1-14.
- Al-Salloum, Y., A. ve Siddiqi, G., H., 1994. Cost-Optimum Design of Reinforced Concrete (RC) Beams, ACI Structural Journal, 91, 6, 647-655.
- Alun, T., 2009. Sprayed Concrete Lined Tunnels : An Introduction, Taylor & Francis, New York, 241 s.
- Anandhakumar, R., Subramanian, S. ve Ganesan, S., 2011. Modified ABC Algorithm for Generator Maintenance Scheduling, International Journal of Computer and Electrical Engineering, 3, 6, 812-819.
- Anastasopoulos, I. ve Gazetas, G., 2009. Analysis of Cut-and-Cover Tunnels Against Large Tectonic Deformation, Bulletin of Earthquake Engineering, 8, 2, 283-307.
- Ayan, K. ve Kılıç, U., 2011. Optimal Güç Akışı Probleminin Çözümü İçin GA, MA ve YAK Algoritmalarının Karşılaştırılması. 6th International Advanced Technologies Symposium, Mayıs, Elazığ, Turkey, Bildiriler Kitabı: 13-18.
- Azeem, M., F. ve Saad, A., M., 2004. Modified Queen Bee Evolution Based Genetic Algorithm For Tuning of Scaling Factors of Fuzzy Knowledge Base Controller. India Annual Conference, Aralık, Kharagpur, Hindistan, IEEE, 299-303.
- Babu, G., L., S. ve Basha, B., M., 2008. Optimum Design of Cantilever Retaining Walls Using Target Reliability Approach, International Journal of Geomechanics, 8, 4, 240-252.
- Back, T. ve Khuri, S., 1994. An Evolutionary Heuristic for The Maximum Independent Set Problem. World Congress on Computational Intelligence, Haziran-Temmuz, Florida, ABD, IEEE, 531-535.
- Bahar, M., A., 1994. Tünellerde Ön Araştırma Zemin İyileştirmesi ve Stabilité Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balling, R., J. ve Yao, X., 1997. Optimization of Reinforced Concrete Frames, Journal of Structural Engineering, 123, 2, 193-202.
- Bao, L. ve Zeng, J., 2009. Comparison and Analysis of The Selection Mechanism in The Artificial Bee Colony Algorithm. Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, Ağustos, Shenyang, China, IEEE, 411-416.
- Baykasoglu, A., Ozbakir, L. ve Tapkan, P., 2007. Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application to Generalized Assignment Problem, Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization, 113-144.

- Benatchba, K., Admane, L. ve Koudil, M., 2005. Using Bees to Solve a Data-Mining Problem Expressed as a Max-Sat One, Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach, 3562, 75-86.
- Beykont, A., Z., 1951. Pratik Tünel Açma, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 463 s.
- Bianco, G., M., 2004. Getting Inspired from Bees to Perform Large Scale Visual Precise Navigation. International Conference on Intelligent Robots and Systems, Eylül-Ekim, Sendai, Japonya, IEEE, 619-624.
- Bickel, J., O., Kuesel, T., R. ve King, E., H., 1996. Tunnel Engineering Handbook, CBS Publishers & Distributors, 2nd Ed., New Delhi, 544 s.
- Biondini, F. ve Frangopol, D., M., 2009. Lifetime Reliability-Based Optimization of Reinforced Concrete Cross-Sections Under Corrosion, Structural Safety, 31, 6, 483-489.
- Bolaji, A., L., Khader, A., T., Albetar, M., A. ve Awadallah, M., Artificial Bee Colony Algorithm for Curriculum-Based Course Timetabling Problem, <http://netmon.cs.usm.my/v3/abstract/107.Abstacts.pdf>, 29 Mart 2011.
- Bowles, J., E., 1988. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill, Singapore, 1023 s.
- Bozkurt, M., 1970. Tüneller Ders Notları, İTÜ Talebe Cemiyeti Yayını, No.5, İstanbul, 463 s.
- BTSICE, 2004. Tunnel Lining Design Guide, Thomas Telford Londra, 184 s.
- Camp, C., V., Pezeshk, S. ve Hansson, H., 2003. Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm, ASCE Journal of Structural Engineering, 129, 1, 105-115.
- Cao, Y., F., Yu, W., Y., Xiao, Y., H., Chen, Y., C. ve Feng, J. C., 2012. Image Segmentation Using Artificial Bee Colony and Fast Fuzzy C-Means Algorithms, Advanced Science Letters, 6, 1, 841-844.
- Carbonell, A., González-Vidoso, F. ve Yepes, V., 2011. Design of Reinforced Concrete Road Vaults by Heuristic Optimization, Advances in Engineering Software, 42, 4, 151-159.
- Carlson, S., E., 1995. A General Method for Handling Constraints in Genetic Algorithms. Second Annual Joint Conference on Information Science, Eylül-Ekim, North Carolina, ABD, Citeseer, 663-667.
- Carlson, S., E. ve Shonkwiler, R., 1998. Annealing a Genetic Algorithm Over Constraints. International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Ekim, California, ABD, IEEE, 3931-3936.

- Carroll, C., W., 1961. The Created Response Surface Technique for Optimizing Nonlinear Restrained Systems, Operations Research, 9, 169–184.
- Ceranic, B., Fryer, C. ve Baines, R., W., 2001. An Application of Simulated Annealing to the Optimum Design of Reinforced Concrete Retaining Structures, Computers & Structures, 79, 17, 1569-1581.
- Chakrabarty, B., K., 1992. Models for Optimal Design of Reinforced Concrete Beams, Computers & Structures, 42, 3, 447-451.
- Chen, G., Liu, G., Wang, J. ve Li, R., 2012. Identification of Water Quality Model Parameters using Artificial Bee Colony Algorithm, Numerical Algebra, Control and Optimization, 2, 1, 157-165.
- Choi, C., K. ve Kwak, H., G., 1990. Optimum RC Member Design with Predetermined Discrete Sections, Journal of Structural Engineering, 116, 10, 2634-2655.
- Chong, C., S., Low, M., Y., H., Sivakumar, A., I. ve Gay, K., L., 2006. A Bee Colony Optimization Algorithm to Job Shop Scheduling. Winter Simulation Conference, Aralık, California, ABD, IEEE, 1954-1961.
- Chou, T., 1977. Optimum Reinforced Concrete T-Beam Sections, Journal of the Structural Division, 103, 8, 1605-1617.
- Coello, C., A., C., 2000. Use of a Self-Adaptive Penalty Approach for Engineering Optimization Problems, Computers in Industry, 41, 2, 113-127.
- Coello, C., A., C., 2002. Theoretical and Numerical Constraint-Handling Techniques Used with Evolutionary Algorithms: a Survey of The State of The Art, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191, 11-12, 1245-1287.
- Coello, C., A., C., Christiansen, A., D. ve Hernandez, F., S., 1997. A Simple Genetic Algorithm for the Design of Reinforced Concrete Beams, Engineering with Computers, 13, 4, 185-196.
- Coit, D., W. ve Smith, A., E., 1996. Penalty Guided Genetic Search for Reliability Design Optimization, Computers & Industrial Engineering, 30, 4, 895-904.
- Coit, D., W., Smith, A., E. ve Tate, D., M., 1996. Adaptive Penalty Methods for Genetic Optimization of Constrained Combinatorial Problems, INFORMS Journal on Computing, 8, 173-182.
- Courant, R., 1943. Variational Methods for The Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations, Bull. Am. Math. Soc., 49, 1-23.
- Crossley, W., A. ve Williams, E., A., 1997. A Study of Adaptive Penalty Functions for Constrained Genetic Algorithm-Based Optimization. 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Ocak, Nevada, ABD,

- Çakan, A., G., 2000. Analysis of Tunnel Advance in Soft Ground Using Finite Element Method, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Das, B., M., 2010. Principles of Foundation Engineering, CL Engineering, 7th Ed., Stanford, ABD, 816 s.
- DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 159 s.
- Deb, K., 1991. Optimal Design of a Welded Beam Via Genetic Algorithms, AIAA Journal, 29, 11, 2013-2015.
- Deb, K., 2000. An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 186, 2-4, 311-338.
- Dede, T., 2003. Değer Kodlaması Kullanarak Kafes Sistemlerin Genetik Algoritma ile Minimum Ağırlıklı Boyutlandırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü Trabzon.
- Ding, Y., Xiao, S., Chan, S. ve Woodhead, R., 2008. Seismic Design of the Cut and Cover Tunnel of the Canada Line Rapid Transit. The 14th World conference on Earthquake Engineering, Ekim, Beijing, China, Bildiriler CD'si: 1-8.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. ve Maniezzo, V., 1991. Positive Feedback as a Search Strategy, Politecnico di Milano, Milano, İtalya, 110 s.
- Drias, H., Sadeg, S. ve Yahi, S., 2005. Cooperative Bees Swarm for Solving The Maximum Weighted Satisfiability Problem, Computational Intelligence and Bioinspired Systems, 3512, 417-448.
- Eiben, Á., E., Van Der Hauw, J., K. ve Van Hemert, J., I., 1998. Graph Coloring with Adaptive Evolutionary Algorithms, Journal of Heuristics, 4, 1, 25-46.
- Eurocode-2, 2005. Design of Concrete Structures, European Committee for Standardization, Brussels, 214 s.
- Everard, N., J., 1993. Schaum's Outline of Theory and Problems of Reinforced Concrete Design, McGraw-Hill, New York, ABD, s.
- Fadaee, M., J. ve Grierson, D., E., 1998. Design Optimization of 3D Reinforced Concrete Structures Having Shear Walls, Engineering with Computers, 14, 2, 139-145.
- Faluyi, F. ve Arum, C., 2012. Design Optimization of Plate Girder Using Generalized Reduced Gradient and Constrained Artificial Bee Colony Algorithms, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2, 7, 304-312.

- Fathian, M., Amiri, B. ve Maroosi, A., 2007. Application of Honey-Bee Mating Optimization Algorithm on Clustering, Applied Mathematics and Computation, 190, 2, 1502-1513.
- Fedghouche, F. ve Tiliouine, B., 2012. Minimum Cost Design of Reinforced Concrete T-Beams at Ultimate Loads Using Eurocode2, Engineering Structures, 42, 43-50.
- Fiacco, A., V. ve McCormick, G., P., 1966. Extensions of SUMT for Nonlinear Programming: Equality Constraints and Extrapolation, Management Science, 12, 11, 816-828.
- Fister, I., Fister, I. ve Brest, J., 2012. A Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Graph 3-Coloring, Swarm and Evolutionary Computation, 7269, 66-74.
- Fragiadakis, M. ve Papadrakakis, M., 2008. Performance Based Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37, 6, 825-844.
- Gallagher, R., H. ve Zienkiewicz, O., C., 1973. Optimum Structural Design: Theory and Applications, Wiley, London, 358 s.
- Geem, Z., W., Kim, J., H. ve Loganathan, G., V., 2001. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, Simulation, 76, 2, 60-68.
- Geem, Z., W., Lee, K., S. ve Tseng, C., L., 2005. Harmony Search for Structural Design. 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Haziran, Washington, ABD, ACM Digital Library, 651-652.
- Gen, M. ve Cheng, R., 1996. A Survey of Penalty Techniques in Genetic Algorithms. International Conference on Evolutionary Computation, Mayıs, Nagoya, Japonya, IEEE, 804-809.
- Gen, M. ve Cheng, R., 1997. Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, 432 s.
- Gerard, G., 1956. Minimum Weight Analysis of Compression Structures, New York University Press, New York, 216 s.
- Gerhardt, E. ve Gomes, H., M., 2012. Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Engineering Optimization Problems. 3rd International Conference on Engineering Optimization, Temmuz, Rio de Janeiro, Brazil, 1-11.
- Glover, F., 1989. Tabu Search-Part I, ORSA Journal on computing, 1, 3, 190-206.
- Goldberg, D., E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, California, ABD, 412 s.

- Govindaraj, V. ve Ramasamy, J., V., 2005. Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Continuous Beams Using Genetic Algorithms, Computers & Structures, 84, 1, 34-48.
- Govindaraj, V. ve Ramasamy, J., V., 2007. Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithms, Engineering Optimization, 39, 4, 471-494.
- Gözde, H. ve Taplamacıoğlu, M., C., 2011. Comparative Performance Analysis of Artificial Bee Colony Algorithm for Automatic Voltage Regulator (AVR) System, Journal of the Franklin Institute, 348, 8, 1927-1946.
- Gürsoy, Ş., 2006. Betonarme İstinat Duvarlarının, Zemin Etkileşimini De Dikkate Almak Suretiyle, Deprem Yüklerine Göre Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Haddad, O., B., Afshar, A. ve Marino, M. A., 2006. Honey-Bees Mating Optimization (Hbmo) Algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization, Water Resources Management, 20, 5, 661-680.
- Hadj-Alouane, A., B. ve Bean, J., C., 1997. A Genetic Algorithm for The Multiple-Choice Integer Program, Operations Research, 45, 1, 92-101.
- Hagan, M., T., Demuth, H. B. ve Beale, M. H., 1995. Neural Network Design, PWS Pub. Co., Boston, ABD., 736 s.
- Hanbay, K., Talu, M., F. ve Karci, A., 2012. Segmentation of Color Texture Images With Artificial Bee Colony Algorithm and Wavelet Transform. 20th Signal Processing and Communications Applications Conference, Nisan, Muğla, Türkiye, IEEE, 1-4.
- Hashash, Y., M., A., Hook, J. J., Schmidt, B. ve I-Chiang Yao, J., 2001. Seismic Design and Analysis of Underground Structures, Tunnelling and Underground Space Technology, 16, 4, 247-293.
- Haug Jr, E., J. ve Kirmser, P., 1967. Minimum Weight Design of Beams With Inequality Constraints on Stress And Deflection, Journal of Applied Mechanics, 34, 999-1004.
- He, S., Prempan, E. ve Wu, Q., 2004. An Improved Particle Swarm Optimizer for Mechanical Design Optimization Problems, Engineering Optimization, 36, 5, 585-605.
- Hemamalini, S. ve Simon, S., P., 2008. Economic Load Dispatch with Value-Point Effect Using Artificial Bee Colony Algorithm. XXXII National Systems Conference, Aralık, India, Bildiriler Kitabı: 525-530.

- Himmelblau, D., M., Clark, B. ve Eichberg, M., 1972. Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, New York, ABD, 498 s.
- Hinterding, R., Gielewski, H. ve Peachey, T., C., 1995. The Nature of Mutation in Genetic Algorithms. Sixth International Conference on Genetic Algorithms, Temmuz, Pittsburgh, ABD, M. Kaufman, 65-72.
- Homaifar, A., Qi, C., X. ve Lai, S., H., 1994. Constrained Optimization Via Genetic Algorithms, Simulation, 62, 4, 242-253.
- Hu, X. ve Eberhart, R., 2002. Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization. Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Temmuz, Florida, ABD, Citeseer, 203-206.
- Joines, J., A. ve Houck, C., R., 1994. On The Use of Non-Stationary Penalty Functions to Solve Nonlinear Constrained Optimization Problems with GA's. World Congress on Computational Intelligence, Haziran-Temmuz, Florida, ABD, IEEE, 579-584.
- Jung, S., H., 2003. Queen-Bee Evolution for Genetic Algorithms, Electronics Letters, 39, 6, 575-576.
- Kadioğlu, T., Vural, R. ve Yildirim, T., 2010. Artificial Bee Colony Based Butterworth Filter Optimization. National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, Aralık, Bursa, Türkiye, IEEE, 425-428.
- Kang, F., Li, J. ve Xu, Q., 2009. Structural Inverse Analysis by Hybrid Simplex Artificial Bee Colony Algorithms, Computers & Structures, 87, 13-14, 861-870.
- Karaboğa, D., 2005. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 10 s.
- Karaboğa, D., 2011. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Yayın Dağıtım, 2. Baskı, İstanbul, 231 s.
- Karaboga, D. ve Akay, B., 2009. Artificial Bee Colony (ABC), Harmony Search and Bees Algorithms on Numerical Optimization, 5th International Virtual Conference on Innovative Production Machines and Systems, Haziran-Temmuz, Cardiff, UK, Bildiriler CD'si: 1-6.
- Karaboga, D. ve Akay, B., 2009. A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm, Applied Mathematics and Computation, 214, 1, 108-132.
- Karaboğa, D. ve Akay, B., 2011. A modified Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Constrained Optimization Problems, Applied Soft Computing, 11, 3, 3021-3031.
- Karaboga, D., Akay, B. ve Ozturk, C., 2007. Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Training Feed-Forward Neural Networks, Modeling decisions for artificial intelligence, 318-329.

- Karaboğa, D. ve Baştürk, B., 2007. Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing Lecture Notes in Computer Science, 4529, 789-798.
- Karaboga, D. ve Ozturk, C., 2011. A Novel Clustering Approach: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, Applied Soft Computing, 11, 1, 652-657.
- Karaboga, N., 2009. A New Design Method Based on Artificial Bee Colony Algorithm for Digital IIR Filters, Journal of the Franklin Institute, 346, 4, 328-348.
- Karacı, A., 2004. Imitation of Bee Reproduction as a Crossover Operator in Genetic Algorithms, PRICAI 2004: Trends in Artificial Intelligence Lecture Notes in Computer Science, 3157, 1015-1016.
- Karihaloo, B., L., 1979. Optimal Design of Multi-Purpose Tie-Beams, Journal of Optimization Theory and Applications, 27, 3, 427-438.
- Kaveh, A. ve Abadi, A., S., M., 2011. Harmony Search Based Algorithms for The Optimum Cost Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls, International Journal of Civil Engineering, 9, 1, 1-8.
- Kaya, H., 1983. Patlayıcı Maddelerin Tanımlanması ve Tünellerde Patlayıcı Maddelerin Optimumda Kullanılması. Tünelcilik Semineri, Ocak, Ankara, Bildiriler Kitabı: 85-142.
- Kazarlis, S. ve Petridis, V., 1998. Varying Fitness Functions in Genetic Algorithms: Studying the Rate of Increase of The Dynamic Penalty Terms. 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Eylül, Amsterdam, Hollanda, Springer, 211-220.
- Kennedy, J. ve Eberhart, R., 1995. Particle Swarm Optimization. International Conference on Neural Networks, Kasım-Aralık, Perth, Avusturalya, IEEE, 1942-1948.
- Kim, K. ve Yoo, C., H., 2005. Design Loading on Deeply Buried Box Culverts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, 20-27.
- Kırbaş, T., 1995. Tünel Açma İşlemleri, Karşılaşılan Sorunlar ve Uygulanan Çözüm Yolları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D. ve Vecchi, M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 4598, 671-680.
- Kirsch, U., 1983. Multilevel Optimal Design of Reinforced Concrete Structures, Engineering Optimization, 6, 4, 207-212.
- Kirzhner, F. ve Rosenhouse, G., 2000. Numerical Analysis of Tunnel Dynamic Response to Earth Motions, Tunnelling and Underground Space Technology, 15, 3, 249-258.

- Kisi, O., Ozkan, C. ve Akay, B., 2012. Modeling Discharge–Sediment Relationship Using Neural Networks with Artificial Bee Colony Algorithm, Journal of Hydrology, 428-429, 94-103.
- Koudil, M., Benatchba, K., Tarabet, A. ve Sahraoui, E., B., 2007. Using Artificial Bees to Solve Partitioning and Scheduling Problems in Codesign, Applied Mathematics and Computation, 186, 2, 1710-1722.
- Kovari, K. ve Tisa, A., 1982. Computational Models for Cuts and Cover Tunnels Based on Field Measurements. 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Mayıs-Haziran, Edmonton, Kanada, AA Balkema, 3-15.
- Kovari, K. ve Tisa, A., 1998. Computational Model and Charts for Cut-and-Cover Tunnels. International Association for Bridge and Structural Engineering Colloquium Tunnel Structures, Haziran, Stockholm, Sweden, Bildiriler CD'si: 3-18.
- Kovari, K. ve Tisa, A., 1998. Computational Model and Charts for Cut-and-Cover Tunnels. International Association for Bridge and Structural Engineering Colloquium Tunnel Structures Haziran, Stockholm, Sweden,
- Koziel, S. ve Michalewicz, Z., 1999. Evolutionary Algorithms, Homomorphous Mappings, and Constrained Parameter Optimization, Evolutionary Computation, 7, 1, 19-44.
- Krishnamoorthy, C., 1973. Linear Program for Optimal Design of Reinforced Concrete Frames, Proceedings of IABSE, 33, 1, 119-141.
- Küçüksille, E., U. ve Tokmak, M., 2011. Automatic Course Scheduling by Using Artificial Bee Colony Algorithm, Journal of Natural and Applied Sciences, 15, 3, 203-210.
- Kuri Morales, A. ve Quezada, C., V., 1998. A Universal Eclectic Genetic Algorithm for Constraint Optimization. 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Eylül, Aachen, Almanya, Bildiriler Kitabı: 518-522.
- Kwak, H., G. ve Kim, J., 2008. Optimum Design of Reinforced Concrete Plane Frames Based on Predetermined Section Database, Computer-Aided Design, 40, 3, 396-408.
- Kwak, H., G. ve Kim, J., 2009. An Integrated Genetic Algorithm Complemented with Direct Search for Optimum Design of RC Frames, Computer Aided Design, 41, 7, 490-500.
- Le Riche, R., Knopf-Lenoir, C. ve Haftka, R., T., 1995. A Segregated Genetic Algorithm for Constrained Structural Optimization. Sixth International Conference on Genetic Algorithms, Temmuz, Pittsburgh, ABD, Citeseer, 558-565.
- Lee, C. ve Ahn, J., 2003. Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, ASCE Journal of Structural Engineering, 129, 6, 762-774.

- Lee, K., S. ve Geem, Z., W., 2005. A New Meta-Heuristic Algorithm for Continuous Engineering Optimization: Harmony Search Theory and Practice, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 194, 36-38, 3902-3933.
- Lepš, M. ve Šejnoha, M., 2003. New Approach to Optimization of Reinforced Concrete Beams, Computers & Structures, 81, 18, 1957-1966.
- Lin, K., Y. ve Frangopol, D., M., 1996. Reliability-Based Optimum Design of Reinforced Concrete Girders, Structural Safety, 18, 2, 239-258.
- Liu, X., Duan, Z., Wang, J. ve Yin, S., 2011. Fuzzy Modeling for Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Voltage Security Margin, Power System Technology, 12, 1-21.
- Livesley, R., K., 1956. The Automatic Design of Structural Frames, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 9, 3, 257-278.
- Lucic, P. ve Teodorovic, D., 2001. Bee System: Modeling Combinatorial Optimization Transportation Engineering Problems by Swarm Intelligence. IV. Triennial Symposium on Transportation Analysis, Haziran, Sao Miguel, Azores Islands, Bildiriler Kitabı: 441-445.
- Luh, G., C. ve Chueh, C., H., 2004. Multi-Objective Optimal Design of Truss Structure with Immune Algorithm, Computers & Structures, 82, 11, 829-844.
- Majid, K., I., 1974. Optimum Design of Structures, Wiley, New York, 264 s.
- Marković, G. Z., Teodorović, D., B. ve Aćimović-Raspopović, V., S., 2007. Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks Based on The Bee Colony Optimization, AI Communications, 20, 4, 273-285.
- Martí, J., V. ve González-Vidoso, F., 2010. Design of Prestressed Concrete Precast Pedestrian Bridges by Heuristic Optimization, Advances in Engineering Software, 41, 7-8, 916-922.
- MATLAB, 2008. The Language of Technical Computing, MathWorks, Massachusetts, ABD.
- Mezura-Montes, E. ve Velez-Koeppel, R., E., 2010. Elitist Artificial Bee Colony for Constrained Real-Parameter Optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Temmuz, Barcelona, İspanya, IEEE, 2068-2075.
- Michalewicz, Z., 1995. Genetic Algorithms, Numerical Optimization, and Constraints. Sixth International Conference on Genetic Algorithms, Temmuz, Pittsburgh, ABD, Morgan-Kaufmann, 151-158.
- Michalewicz, Z. ve Attia, N., 1994. Evolutionary Optimization of Constrained Problems. Third Annual Conference on Evolutionary Programming, Şubat, California, ABD, Citeseer, 98-108.

- Michalewicz, Z. ve Nazhiyath, G., 1995. Genocop III: A Co-Evolutionary Algorithm for Numerical Optimization Problems with Nonlinear Constraints. International Conference on Evolutionary Computation, Kasım-Aralık, Perth, Avustralya, IEEE, 647-651.
- Michalewicz, Z. ve Schoenauer, M., 1996. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems, Evolutionary Computation, 4, 1, 1-32.
- Miyamoto, A., Nakamura, H. ve Kruszka, L., 2004. Application of The Improved Immune Algorithm to Structural Design Support System, Journal of Structural Engineering, 130, 1, 108-119.
- Morley, G., D. ve Grover, W., D., 2001. Tabu Search Optimization of Optical Ring Transport Networks. Global Telecommunications Conference, Kasım, San Antonio, ABD, IEEE, 2160-2164.
- Nam, S., H., Song, H., W., Byun, K., J. ve Maekawa, K., 2006. Seismic Analysis of Underground Reinforced Concrete Structures Considering Elasto-Plastic Interface Element with Thickness, Engineering Structures, 28, 8, 1122-1131.
- Narasimhan, H., 2009. Parallel Artificial Bee Colony (PABC) Algorithm. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, Aralık 2009, Coimbatore, India, IEEE, 306-311.
- Nishiyama, S., Muroya, K., Haya, H., Tanamura, S. ve Nishimura, A., 1999. Seismic Design of Cut and Cover Tunnel Based on Damage Analyses and Experimental Studies, Quarterly Report of RTRI, 40, 3, 158-164.
- Norman, B., A. ve Smith, A., E., 1997. Random Keys Genetic Algorithm with Adaptive Penalty Function for Optimization of Constrained Facility Layout Problems. International Conference on Evolutionary Computation, Nisan, Indiana, ABD, IEEE, 407-411.
- Olsen, A., L., 1994. Penalty Functions and The Knapsack Problem. World Congress on Computational Intelligence, Haziran-Temmuz, Florida, ABD, IEEE, 554-558.
- Omkar, S., N., Senthilnath, J., Khandelwal, R., Naik, G. N. ve Gopalakrishnan, S., 2011. Artificial Bee Colony (Abc) for Multi-Objective Design Optimization of Composite Structures, Applied Soft Computing, 11, 1, 489-499.
- Önalp, A., 1982. İnşaat Mühendisliğinde Geoteknik Bilgisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayını, No. 187, Trabzon, 1225 s.
- Öztürk, A., Çobanlı, S., Duman, S., Tosun, S. ve Döşoğlu, K., 2011. Yapay Arı Kolonisi Algoritması İle Elektrik Güç Sistemi Optimal Yakıt Maliyetinin Belirlenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium, Mayıs, Elazığ-Türkiye, Bildiriler Kitabı: 311-316.

- Öztürk, H., T., 2007. Tüneller ve Tasarım İlkeleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, H., T. ve Durmuş, A., 2008. Tünellere Toplu Bir Bakış Ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı, 96, 11-17.
- Öztürk, H., T. ve Durmuş, A., 2009. Dikdörtgen Kesitli Sığ Tünellerin Deprem Davranışlarına Pratik Bir Yaklaşım. Sakarya International Earthquake Symposium, Ekim, Sakarya, Türkiye, Bildiriler CD'si: 1-12.
- Özyön, S., Yaşar, C., Özcan, G. ve Temurtaş, H., 2011. Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) Yaklaşımı. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Ekim, Elazığ, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 222-228.
- Pacurib, J., A., Seno, G., M., M. ve Yusiong, J., P., T., 2009. Solving Sudoku Puzzles Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Aralık, Kaohsiung, Taiwan, IEEE, 885-888.
- Pan, Q., K., Tasgetiren, M., F., Suganthan, P., N. ve Chua, T., J., 2011. A Discrete Artificial Bee Colony Algorithm for The Lot-Streaming Flow Shop Scheduling Problem, Information Sciences, 181, 12, 2455-2468.
- Parsopoulos, K., E. ve Vrahatis, M., N., 2002. Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems, Intelligent Technologies–Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies, 76, 214-220.
- Pei, Y. ve Xia, Y., 2012. Design of Reinforced Cantilever Retaining Walls using Heuristic Optimization Algorithms, Procedia Earth and Planetary Science, 5, 32-36.
- Penzien, J., 2000. Seismically Induced Racking of Tunnel Linings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29, 5, 683-691.
- Pequignot, C., A., 1963. Tunnels and Tunnelling, Hutchinson Scientific and Technical, Londra, 555 s.
- Perea, C., Alcala, J., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F. ve Hospitaler, A., 2008. Design of Reinforced Concrete Bridge Frames by Heuristic Optimization, Advances in Engineering Software, 39, 8, 676-688.
- Pham, D., T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. ve Zaidi, M., 2006. The Bees Algorithm–A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. Conference on Intelligent Production Machines and Systems, Haziran, Cardiff, İngiltere, Elsevier, 454-461.

- Plumey, S., Muttoni, A., Vulliet, L. ve Labiouse, V., 2006. Considerations on The Design of Cut and Cover Tunnels. Symposium International ELU/ULS, Ağustos, Marne-la-Vallée, France, Bildiriler CD'si: 1-7.
- Power, M., S., Rosidi, D. ve Kaneshiro, J., 1996. Screening, Evaluation and Retrofit Design of Tunnels, National Center for Earthquake Engineering Research, 3, Buffalo, New York, 4 s.
- Power, M., S., Rosidi, D. ve Kaneshiro, J., Y., 1998. Seismic Vulnerability of Tunnels and Underground Structures Revisited, North American Tunneling '98, Newport Beach, California, AA Balkema Publishers, 243-250.
- Prakash, A., Agarwala, S., K. ve Singh, K., K., 1988. Optimum Design of Reinforced Concrete Sections, Computers & Structures, 30, 4, 1009-1011.
- Qian, K. ve Su, G., S., 2011. Application of Artificial Bee Colony Algorithm to Optimization of Channel Section, Advances in Science and Technology of Water Resources, 31, 3, 57-60.
- Qin, L., D., Jiang, Q., Y., Zou, Z., Y. ve Cao, Y., J., 2004. A Queen-Bee Evolution Based on Genetic Algorithm for Economic Power Dispatch. 39th International Universities Power Engineering Conference, Eylül, Bristol, UK, IEEE, 453-456.
- Quan, H. ve Shi, X., 2008. On The Analysis of Performance of The Improved Artificial Bee Colony Algorithm. Fourth International Conference on Natural Computation, Ekim, Jinan, China, IEEE, 654-658.
- Ragsdell, K., M. ve Phillips, D., T., 1976. Optimal Design of a Class of Welded Structures Using Geometric Programming, ASME Journal of Engineering for Industries, 98, 3, 1021-1025.
- Rajeev, S. ve Krishnamoorthy, C., 1998. Genetic Algorithm–Based Methodology for Design Optimization of Reinforced Concrete Frames, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13, 1, 63-74.
- Rao, S., S., 2009. Engineering Optimization: Theory and Practice, John Wiley & Sons, Kanada, 840 s.
- Rasheed, K., 1998. An Adaptive Penalty Approach for Constrained Genetic-Algorithm Optimization. Third Annual Genetic Programming Conference, Temmuz, Wisconsin, ABD, Citeseer, 584-590.
- Ray, T. ve Liew, K., M., 2003. Society and Civilization: An Optimization Algorithm Based on the Simulation of Social Behavior, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 7, 4, 386-396.

- Richardson, J., T., Palmer, M., R., Liepins, G., E. ve Hilliard, M., 1989. Some Guidelines for Genetic Algorithms with Penalty Functions. Third International Conference on Genetic Algorithms, Haziran, Virginia, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 191-197.
- Runarsson, T., P. ve Yao, X., 2000. Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 4, 3, 284-294.
- Saka, M., P., 1982. Optimizasyon Teknikleri Ders Notları, Elazığ Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi, Yayın No: 56, Elazığ, 135 s.
- Saka, M., P., 2007. Optimum Design of Steel Frames Using Stochastic Search Techniques Based on Natural Phenomena: A Review, Civil engineering computations: tools and techniques, 105-147.
- Saouma, V. ve Murad, R. S., 1984. Partially Prestressed Concrete Beam Optimization, Journal of Structural Engineering, 110, 3, 589-604.
- Sarıbaş, A. ve Erbatur, F., 1996. Optimization and Sensitivity of Retaining Structures, Journal of Geotechnical Engineering, 122, 649-656.
- Sato, T. ve Hagiwara, M., 1997. Bee System: Finding Solution by a Concentrated Search. International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Ekim, Florida, ABD, IEEE, 3954-3959.
- Saveur, J. ve Grantz, W., 1997. Structural Design of Immersed Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 12, 2, 93-109.
- Sharma, S. ve Judd, W., R., 1991. Underground Opening Damage from Earthquakes, Engineering Geology, 30, 3, 263-276.
- Smith, A., E. ve Tate, D., M., 1993. Genetic Optimization Using a Penalty Function. 5th International Conference on Genetic Algorithms, Temmuz, Illinois, ABD, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 499-505.
- Sonmez, M., 2011. Artificial Bee Colony Algorithm for Optimization of Truss Structures, Applied Soft Computing, 11, 2, 2406-2418.
- Srinivas, M. ve Patnaik, L. M., 1994. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 24, 4, 656-667.
- St John, C., M. ve Zahrah, T., F., 1987. Aseismic Design of Underground Structures, Tunnelling and Underground Space Technology, 2, 2, 165-197.
- Tahooneh, A. ve Ziarati, K., 2011. Using Artificial Bee Colony to Solve Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem, Advances in Swarm Intelligence, 6728, 293-302.

- Tang, A., P., Feng, R., C., Zhou, X., Y., Wang, L., F. ve Yau, W., M., 2008. Seismic Response Characteristics of Shallow Buried Utility Tunnel Systems. The 14th World conference on Earthquake Engineering, Ekim, Beijing, China, Bildiriler CD'si: 1-10.
- Taşlıca, A., H., 1983. Tünel Açma Yöntemleri. Tünelcilik Semineri, Ocak, Ankara, Bildiriler Kitabı: 266-311.
- Teodorović, D. ve Dell'Orco, M., Bee Colony Optimization—A Cooperative Learning Approach To Complex Transportation Problems, <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID161.pdf>, 12 Aralık 2005.
- Teodorovic, D., A., 2003. Transport Modeling by Multi-Agent Systems: A Swarm Intelligence Approach, Transportation Planning and Technology, 26, 4, 289-312.
- Tereshko, V., 2000. Reaction-Diffusion Model of a Honeybee Colony's Foraging Behaviour, Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI Lecture Notes in Computer Science, 1917, 807-816.
- Thangiah, S., R., 1995. An Adaptive Clustering Method Using a Geometric Shape for Vehicle Routing Problems with Time Windows. 6th International Conference on Genetic Algorithms, Temmuz, Pittsburgh, ABD, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 536-545.
- Togan, V. ve Daloglu, A., T., 2006. Optimization of 3D Trusses with Adaptive Approach in Genetic Algorithms, Engineering Structures, 28, 7, 1019-1027.
- TS-500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 75 s.
- TS-11747, 1995. Püskürtme Beton (Shotcrete) Yapım, Uygulama ve Bakım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 34 s.
- URL-1, <http://www.tenbusch.com/tunnel/>, Tunneling and Pipe Jacking Systems. 25 Aralık 2012.
- URL-2, <http://www.beksa.com.tr/celiktel1.pdf>, Dramix Çelik Tel Donatılı Püskürtme Beton. 4 Ekim 2006.
- URL-3, <http://www.beksa.com.tr/KATALOGLAR/TÜNEL.pdf>, Tünel Kaplamalarında Çelik Tel Donatılı Püskürtme Beton. 4 Ekim 2006.
- Vanderwalle, M., 2005. Tunneling is an Art, NV Bekaert SA, Belçika, 400 s.
- Venkataraman, P., 2002. Applied Optimization with MATLAB Programming, Wiley-Interscience Publication, ABD, 391 s.
- Venkayya, V., B., 1971. Design of Optimum Structures, Computers & Structures, 1, 1, 265-309.

- Wang, J., N., 2001. Seismic Design of Tunnels, Transactions on the Built Environment, 57, 589-598.
- Wang, M., W., Iai, S. ve Tobita, T., 2005. Effective Stress Analysis of Underground RC Structures During Earthquakes, Kyoto Daigaku Bōsai Kenkyūjo nenpō, 48, 371-381.
- Wedde, H., Farooq, M. ve Zhang, Y., 2004. Beehive: an Efficient Fault-Tolerant Routing Algorithm Inspired by Honey Bee Behavior, Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, 3172, 83-94.
- West, G. ve O'Reilly, P., 1978. Methods of Treating the Ground, Tunnels & Tunnelling International, 10, 7, 25-29.
- Yang, X., S., 2005. Engineering Optimizations via Nature-Inspired Virtual Bee Algorithms, Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach, 3562, 317-323.
- YKTŞ, 1973. Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 79 s.
- Yüksel Proje A.Ş., 2007. Trabzon Sahil Geçişi Tünel-Havaalanı Kavşağı Arası Etüd, Proje ve Mühendislik Hizmetleri Kalekapısı Kavşağı Altgeçit Köprüsü, Ankara, 97 s.
- Yoo, K., S., Lee, S., D. ve Lee, C., I., 2000. Behavior of The Arch-Shaped Slender Lining During Backfill in The Cut and Cover Tunnel. GeoEng 2000, Kasım, Melbourne, Australia, Bildiriler CD'si: 1-6.
- Yubin, W. ve Rushan, L., 2008. Numerical Simulation Analysis on Earthquake Damage of Underground Structure Based on Fiber Model. The 14th World conference on Earthquake Engineering, Ekim, Beijing, China, Bildiriler CD'si: 1-8.
- Zhang, C., Ouyang, D. ve Ning, J., 2010. An Artificial Bee Colony Approach for Clustering, Expert Systems with Applications, 37, 7, 4761-4767.
- Zhang, J., Yuan, X., Xu, J. ve Sun, R., 2008. Transferring Coefficient of Soil Layer Strain to Subway Structure During Earthquakes. The 14th World conference on Earthquake Engineering, Ekim, Beijing, China, Bildiriler CD'si: 1-8.
- Zhao, H., Pei, Z., Jiang, J., Guan, R., Wang, C. ve Shi, X., 2010. A Hybrid Swarm Intelligent Method Based on Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony, Advances in Swarm Intelligence, 6145, 558-565.
- Zielinski, K., Peters, D. ve Laur, R., 2005. Stopping Criteria for Single-Objective Optimization. Third International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems, Aralık, Singapur, Citeseer, 1-6.

- Zielinski, Z., A., Long, W. ve Troitsky, M., S., 1995. Designing Reinforced Concrete Short-Tied Columns Using The Optimization Technique, ACI Structural Journal, 92, 5, 619-626.
- Zhu, G. ve Kwong, S., 2010. Gbest-Guided Artificial Bee Colony Algorithm for Numerical Function Optimization, Applied Mathematics and Computation, 217, 7, 3166-3173.

5. EKLER

Ek 1. ANOVA Testinde Kullanılan F Dağılımına İlişkin Çizelgeler

Ek Çizelge 1. Anlamlılık düzeyi 0.05 olan F dağılımı

SD	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123
4	7.7086	9.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	6.9988
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799

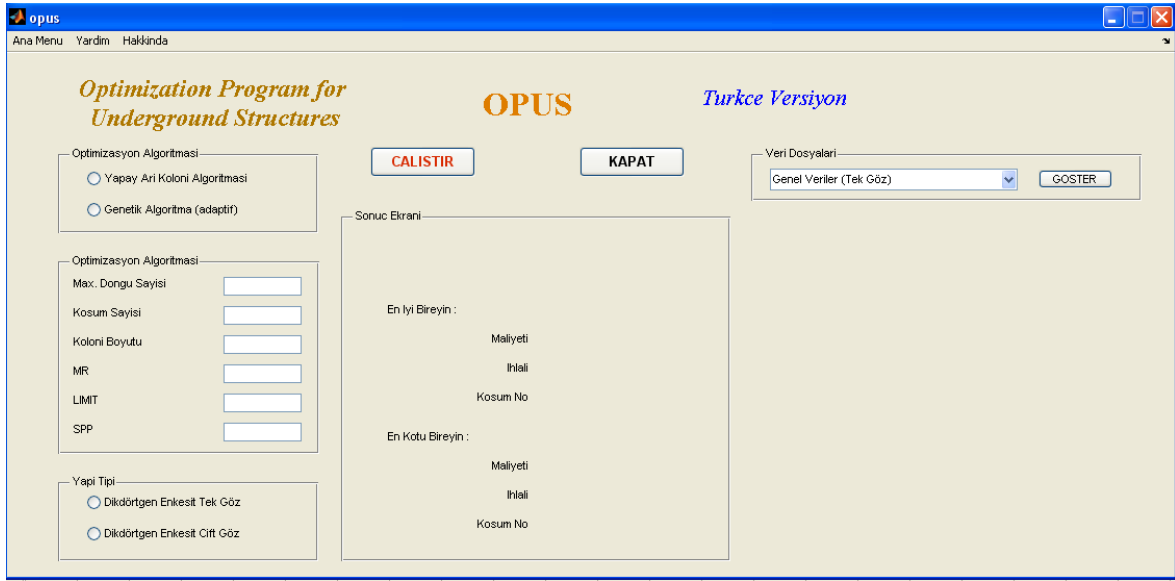
Ek 1.'in devamı

Çizelgenin devamı

SD	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.31
2	19.396	19.413	19.429	19.446	19.454	19.462	19.471	19.479	19.487	19.496
3	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0684	2.0107	1.9604
18	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

Ek 2. Sığ Tünellerin Optimum Tasarımı İçin Hazırlanan OPUS Arayüzünün Kullanım Bilgileri

Bu çalışmada sığ tünellerin maliyet bakımından optimum tasarımı için OPUS adı verilen bir arayüz hazırlanmıştır. Bununla Yapay Arı Koloni yada Genetik Algoritmayla optimum tasarımları gerçekleştirebilmektedir. Bu arayüzün görünümü aşağıdaki Ek Şekil 1’de verilmektedir.



Ek Şekil 1. Hazırlanan OPUS arayüzünün görünümü

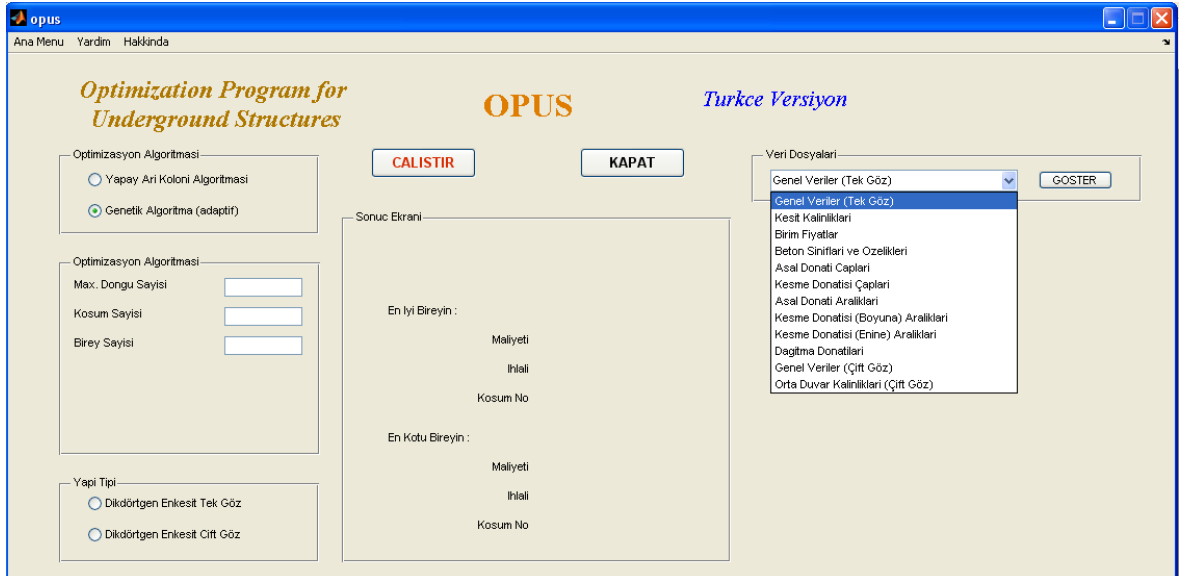
Bu şekilden görüldüğü gibi optimizasyonda kullanılacak algoritma arayüzdeki “Optimizasyon Algoritması” başlığından tünelin bir yada iki gözlü olması durumu ise “Yapı Tipi” başlığından seçilmektedir. Optimizasyon algoritmalarından, Yapay Arı Koloni Algoritması seçildiğinde, “Optimizasyon Algoritması Parametreleri” başlığında gözükten maksimum döngü sayısının, kuşum sayısının, Koloni Boyutunun, MR, LIMIT ve SPP denetim parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. Optimizasyon algoritmalarından Genetik Algoritmanın seçilmesi durumunda ise “Optimizasyon Algoritması Parametreleri” başlığına sadece maksimum döngü sayısı, kuşum sayısı ve birey sayısı gözüktüğünden bunların değerlerinin girilmesi gerekmektedir.

Burada bu arayüzde kullanılan Genetik Algoritma uyarlanabilen bir algoritma olduğundan mutasyon ve çaprazlama oranları gibi parametrelerin girilmesine gerek olmadığı belirtilmelidir.

Ek 2.'in devamı

Probleme ilişkin genel verilerle tasarım değişkenlerinin alabileceği değerlerin tanım kümelerine “Veri Dosyaları” başlığındaki txt uzantılı dosyalardan ulaşılmaktadır (Ek Şekil 2.). Buradan ulaşılabilen dosyalar aşağıdaki sıradadır.

- ✓ Genel Veriler (Tek Göz)
- ✓ Kesit Kalınlıkları
- ✓ Birim Fiyatlar
- ✓ Beton Sınıfları ve Özellikleri
- ✓ Asal Donatı Çapları
- ✓ Kesme Donatısı Çapları
- ✓ Asal Donatı Aralıkları
- ✓ Kesme Donatısı (Boyuna) Aralıkları
- ✓ Kesme Donatısı (Enine) Aralıkları
- ✓ Dağıtma Donatıları
- ✓ Genel Veriler (Çift Göz)
- ✓ Orta Duvar Kalınlıkları (Çift Göz)



Ek Şekil 2. Hazırlanan OPUS arayüzündeki veri dosyaları

Ek 2.'in devamı

Seçilen tünel tipi bir gözlü ise probleme ilişkin genel veriler “Genel Veriler (Tek Göz)” adlı dosyadan çağırılmaktadır. Bu dosyadaki veriler aşağıdaki sıradadır.

9.00	→	Yatay serbest açıklık (m)
5.35	→	Düşey serbest açıklık (m)
8	→	Duvarda kullanılan sonlu eleman sayısı
14	→	Tavanda kullanılan sonlu eleman sayısı
0.50	→	Tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığı (m)
50	→	Paspayı (mm)
7850	→	Donatı birim ağırlığı (kg/m^3)
365	→	Asal donatı tasarım dayanımı (MPa)
365	→	Kesme donatısı tasarım dayanımı (MPa)
156	→	Hareketli Taşıt Yüğü (kN)
11.40	→	Hareketli Yayılı Yüğü (kN/m)
0.50	→	Sukunet durumunda yatay zemin basınç katsayısı
0.0552	→	Dinamik zemin basınç katsayısı
19	→	Zeminin birim ağırlığı (kN/m^3)
25	→	Betonun birim ağırlığı (kN/m^3)
20000	→	Zeminin yatak katsayısı (kN/m^3)

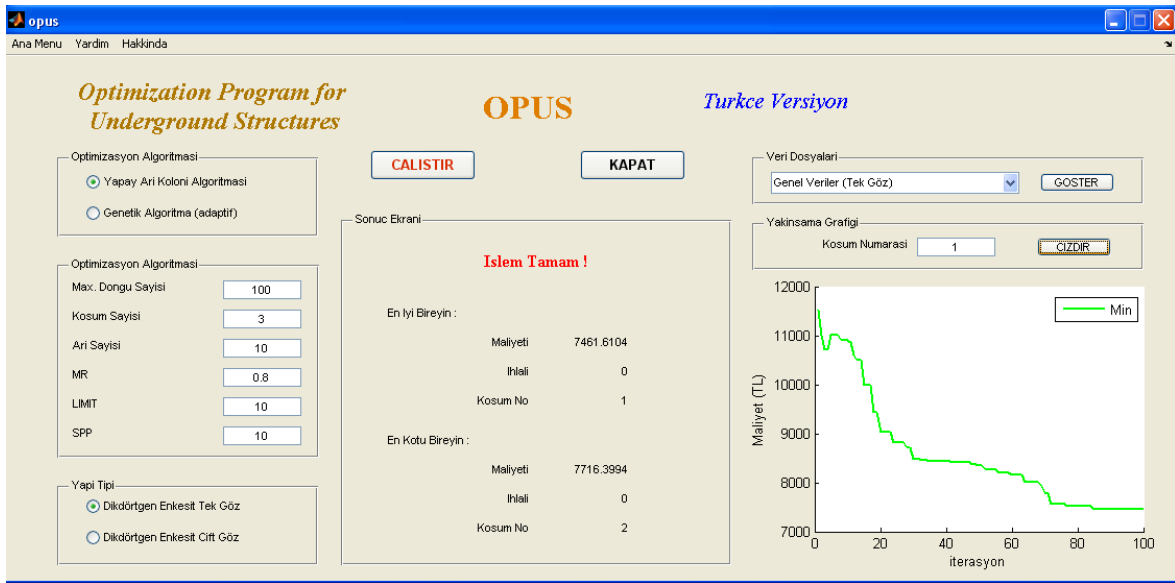
“Kesit Kalınlıkları” adlı dosyada, duvarlarla, tavan ve taban döşeme kalınlıklarının (m) alabileceği değerlerden oluşan tanım kümesi bulunmaktadır. “Birim Fiyatlar” dosyasında sırasıyla; Ø8- Ø12mm çaplı donatıların (₺/daN), Ø14- Ø50 mm çaplı donatıların (₺/daN), kalıbın (₺/m^2), kazının (₺/m^3), iskelenin (₺/m^3) ve dolgunun (₺/daN) birim fiyatları bulunmaktadır. “Beton Sınıfları ve Özellikleri” dosyasında tasarımda kullanılabilecek beton sınıfları ve bunlara ilişkin tasarım basınç dayanımları (MPa), tasarım çekme dayanımları (MPa), elastisite modülleri (kPa) ve birim fiyatı (₺/m^3) verilmektedir. “Asal Donatı Çapları” dosyasında asal ve ek donatı çaplarına (mm), “Kesme Donatısı Çapları” dosyasında ise kesme donatısı çaplarına (mm) ilişkin tanım kümesi bulunmaktadır. “Asal Donatı Aralıkları” dosyasında asal ve ek donatı aralıklarına (mm) ilişkin tanım kümesi, “Kesme Donatısı (Boyuna) Aralıkları” dosyasında kesme donatısının tünel boyuna doğrultusundaki aralıklarına (mm) ilişkin tanım kümesi, “Kesme Donatısı

Ek 2.'in devamı

(Enine) Aralıkları” dosyasında ise kesme donatısının tünel enine doğrultusundaki aralıklarına (mm) ilişkin tanım kümesi bulunmaktadır. “Dağıtma Donatıları” dosyasında dağıtma donatılarının aralık(mm), çap (mm) ve enkesit alanlarına (mm²) ilişkin tanım kümesi bulunmaktadır.

Seçilen tünel tipi iki gözlü ise probleme ilişkin genel veriler “Genel Veriler (Çift Göz)” adlı dosyadan çağırılmaktadır. Bu dosyadaki verilerin sırası tek gözlü tünel dosyasındakiyle aynıdır. “Orta Duvar Kalınlıkları (Çift Göz)” dosyasında tünelin iki göz olarak tasarlanması durumunda orta duvar kalınlığının (m) alabileceği değerlerden oluşan tanım kümesi bulunmaktadır.

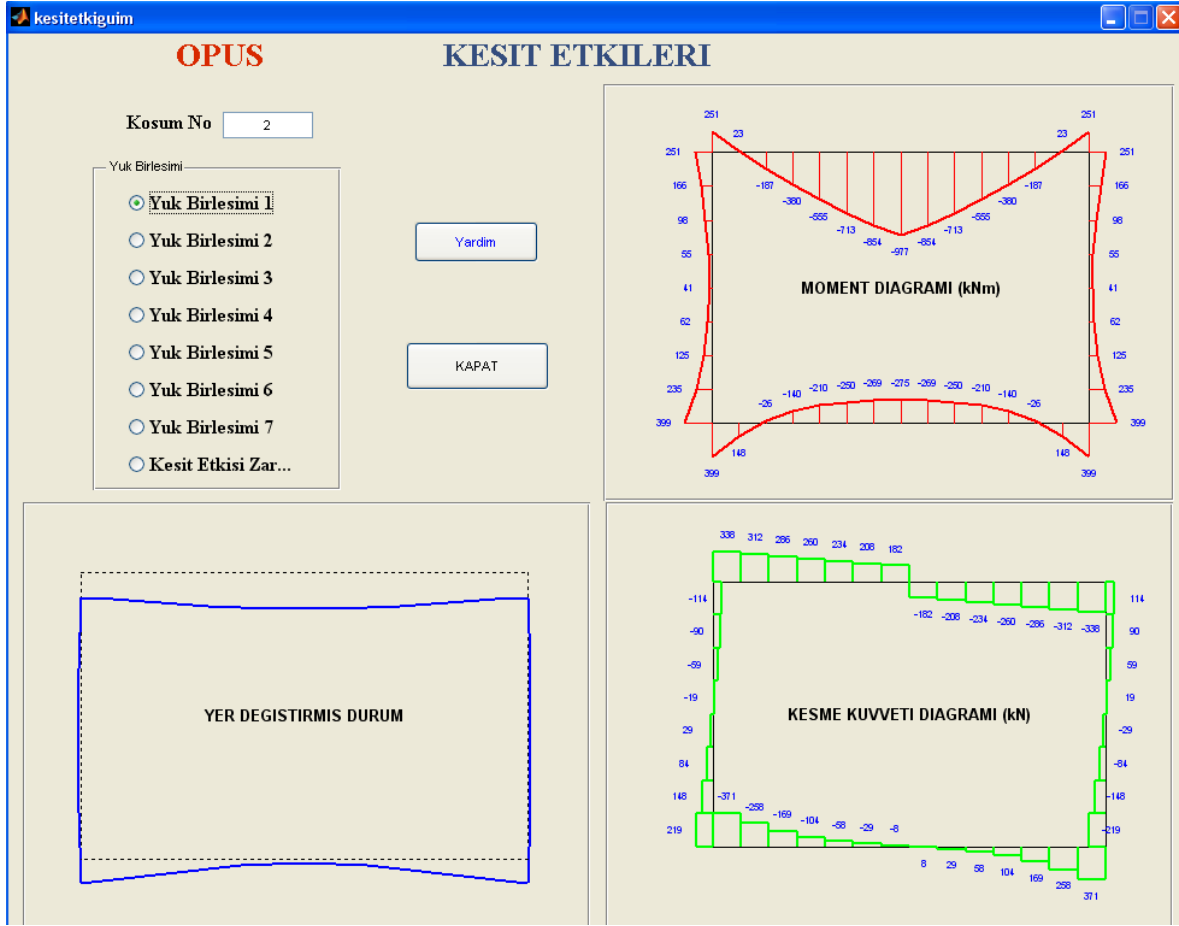
Programın koşumu için “Çalıştır” butonuna basılır. Koşumlara ilişkin yakınsama grafiklerinin çizimi “Yakınsama Grafiği” bölümüne, çizdirilmesi istenen grafiğe ilişkin koşum numarasının girilmesiyle yapılmaktadır (Ek Şekil 3).



Ek Şekil 3. Hazırlanan OPUS arayüzünde 1 numaralı koşum için çizdirilen bir yakınsama grafiğinin görünümü

Koşumlardan elde edilen optimum maliyetli tasarımlarda, dikkate alınan yük birleşimleri altında (AASHTO,2002), yapısal çözümlemeden elde edilen kesit etkileri diagramları “Ana Menü”de gözüken “Kesit Etkileri” penceresinden çizdirilmektedir. (Ek Şekil 4)

Ek 2.'in devamı



Ek Şekil 4. Hazırlanan OPUS arayüzündeki kesit etkileri penceresi

Bu menüde koşul numarası girilince istenen yük birleşimi de seçilerek, moment diyagramı, kesme kuvveti diyagramı ve tünelin dönüşümü çizdirilebilmektedir.

Burada 1'den 7'ye kadar numaralandırılan yük birleşimlerinin, 2.84-2.90 bağıntılarında verilen yük birleşimlerini gösterdiği belirtilmelidir.

Gerçekleştirilen koşumlardan elde edilen optimum maliyetli tasarımlarda kullanılan malzeme miktarları ve bunların maliyetleri "Ana Menü"deki "Metraj" penceresinden hesaplanmakta (Ek Şekil 5), donatı detayları da aynı menüdeki "Donatı Detayı" penceresinden çizdirilmektedir (Ek Şekil 6).

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Tahsin ÖZTÜRK 1983 yılında Trabzon’da doğdu. İlk öğrenimini 1989-1994 yılları arasında bu ildeki İskenderpaşa ilkokulunda, orta ve lise öğrenimini ise 1994–2001 yılları arasında Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. Yüksek öğrenimine 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başlayarak, bu bölümü her dönem yüksek onur derecesi almak suretiyle 2004-2005 Eğitim-Öğretim yılı Haziran döneminde Fakülte ve Bölüm üçüncüsü olarak 3.74 not ortalamasıyla tamamladı. Girdiği muafiyet sınavında İngilizceden muaf olduğundan mezun olduğu yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi boyunca TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen Yurt İçi Yüksek Lisans bursunu almaya hak kazandı. Kasım 2005’te mezun olduğu üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2007 yılında yüksek lisans öğreniminden mezun olup aynı yıl doktora öğrenimine başladı. Yine Doktora öğrenimi boyunca TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen Yurt İçi Doktora bursunu almaya hak kazandı. Evli ve bir çocuk babası olan Hasan Tahsin ÖZTÜRK İngilizce bilmektedir.

SCI/SCIE kapsamındaki dergilerde yayınlanmış makaleleri ve diğer yayınları:

1. Durmuş A., **Öztürk, H.,T.**, Durmuş A.,“A Reliable Approach for Determining Concrete Strength in Structures by Using Cores”, Computers and Concrete, 11(6), (baskıda), 2013.
2. **Ozturk, H.,T.**, Durmus Ah., 2013. Optimum Cost Design of RC Columns Using Artificial Bee Colony Algorithm, Structural Engineering and Mechanics, 45, 5, 639-650.
3. **Ozturk, H.,T.**, Durmus Ay., Durmuş Ah., 2012. Optimum Design of a Reinforced Concrete Beam using Artificial Bee Colony Algorithm, Computers and Concrete, 10, 3, 295-306.
4. **Öztürk, H., T.**, Durmus, A., 2011. Deprem Bölgelerinde İnşa Edilecek Dairesel Kesitli Betonarme Tünel Kaplamalarının Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, İstanbul.

5. **Öztürk, H., T.,** Durmus, A., 2009. Dikdörtgen Kesitli Sığ Tünellerin Deprem Davranışlarına Pratik Bir Yaklaşım, Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu, 1-2 Ekim 2009, Sakarya, 663-674.
6. **Öztürk, H.,T.,** Durmuş A., 2009. Tünel İnşaatlarında Karşılaşılabilen Bazı Sorunlar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı, 102, 14-17.
7. **Öztürk, H., T.,** Durmus, A., 2008. Tünel Kaplamalarının Tasarımına Zemin Yatak Katsayısı Etkisinin İrdelenmesi, Çukurova Üniversitesi MMF 30. Yıl Sempozyumu, 16-17 Ekim 2008, Adana, 356-360.
8. **Öztürk, H., T.,** Arslan, M. E., Durmus, A., 2008. Discussion of Some Methods Used in the Design of Tunnel linings, 8th Interntional Congress on Advances in Civil Engineering, 15-17 September, Famagusta, North Cyprus.3, 395-402.
9. **Öztürk, H., T.,** Durmuş A., 2008. Tünellerin Tasarımında Zemin Yatak Katsayısı Değişimi Etkisinin Önemi, Yapı Dünyası Dergisi, 152-153, 14-18.
10. **Öztürk, H., T.,** Durmuş A., 2008. Tünellere Toplu Bir Bakış Ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı, 96, 11-17.
11. Durmus, A., **Öztürk, H., T.,** Arslan, M. E., 2008. Tüneller ve Tünel Kaplamalarının Tasarımı, Yapı Dünyası Dergisi, 142-143, 7-16.
12. Durmus, A., **Öztürk, H., T.,** Arslan, M. E., 2007. Tünel Kaplamalarının Tasarımına İlişkin Bir Yaklaşım, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, 24-26 Ekim, Isparta-Antalya, 617-629.