KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERİN YAPAY ARI KOLONİ, ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI OPTİMİZASYON VE ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Sebahat TEMİZ

ŞUBAT 2022
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERİN YAPAY ARI KOLONİ, ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI OPTİMİZASYON VE ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI

Sebahat TEMİZ
ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 01 /2022
Tezin Savunma Tarihi : 08 / 02 /2022

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK
ORCID : - - -

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

'Betonarme Sürekli Kirişlerin Yapay Arı Koloni, Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Optimizasyon ve Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Yapay Arı Koloni Algoritmalarıyla Optimum Tasarımı' konulu bu tez çalışmasını bana öneren, tez çalışmamı başından, yazım aşamasının sonuna kadar büyük bir titizlikle takip edip, her detayıyla ilgilenip beni yönlendiren, tecrübe ve akademik bilgisiyle bana rehberlik eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK'e tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Burada, öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anarken, benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayıp, her daim beni destekleyen annem Songül TEMİZ ve babam Mustafa TEMİZ'e müteşekkir olduğumu belirtir bu çalışmamın bilimsel gelişmeler için faydalı olmasını gönülden dilerim.

Sebahat TEMİZ

Trabzon,2022

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Betonarme Sürekli Kirişlerin Yapay Arı Koloni, Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Optimizasyon ve Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Yapay Arı Koloni Algoritmalarıyla Optimum Tasarımı" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK'ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarda 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. 08/02/2022

Sebahat TEMİZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ…… III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ…… IV
İÇİNDEKİLER…… V
ÖZET…… VII
SUMMARY…… VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ…… IX
TABLOLAR DİZİNİ…… XI
SEMBOLLER DİZİNİ…… XIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş…..... 1
1.2. Optimizasyon 1
1.3. Çalışmada Kullanılan Algoritmalar..... 2
1.3.1. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) 2
1.3.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO) 6
1.3.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni Algoritması (TLABC) 9
1.3.3.1. Öğretmeye Dayalı İşçi Arı Aşaması…..... 9
1.3.3.2. Öğrenmeye Dayalı Gözcü Arı Aşaması..... 10
1.3.3.3. Genelleştirilmiş Karşıt Kaşif Arı Aşaması..... 11
1.4. Betonarme Yapıların veya Elemanların Optimizasyonu Konusunda Daha Önce Yapılan Çalışmalar……..... 11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR 16
2.1. Amaç Fonksiyonu ve Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu..... 16
2.2. Tasarım Değişkenleri……..…..…..... 18
2.3. Optimum Tasarım Süreci..... 20
2.3.1. Donatı Şablonu Oluşturma..... 21
2.3.2. Yapısal Çözümleme Modülü…..... 24

2.3.3. Üst ve Alt Donatı Modülleri..... 26
2.3.4. Kesme Modülü..... 28
2.3.4.1. Sarılma Bölgesi ve Orta Bölge İçin Tasarım Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesi..... 28
2.3.4.2. Sarılma Bölgesinde ve Orta Bölgede Kesme Kuvveti Kapasitelerinin Belirlenmesi.....28
2.3.4.3. Sarılma Bölgesinde ve Orta Bölgede Etriye Sayılarının Belirlenmesi 29
2.3.4.4. Etriye Uzunluğu ve Ağırlığının Belirlenmesi..... 30
2.3.5. Üst ve Alt Donatı Yerleşim Modülü..... 31
2.3.5.1. Üst Donatı Düzenlemeleri..... 31
2.3.5.2. Alt Donatı Düzenlemeleri..... 37
2.3.6. Gövde Donatısı Modülü..... 43
2.3.7. Sınırlayıcılar..... 43
2.4. Sayısal Uygulamalar..... 48
2.4.1. Bir Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu 48
2.4.2. İki Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu..... 54
2.4.3. Üç Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu..... 62
2.5. Parametrik çalışmalar..... 69
2.5.1. Kiriş Genişliğinin Maliyete Etkisinin İncelenmesi..... 69
2.5.2. Etriye Çapının Maliyete Etkisinin İncelenmesi..... 74
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 78
4. KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERİN YAPAY ARI KOLONİ, ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI OPTİMİZASYON VE ÖĞRETME-ÖĞRENMEYE DAYALI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI

Sebahat TEMİZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK
2022, 83 Sayfa

Yapay zekanın gelişimiyle beraber optimizasyon çalışmaların hız kazanması, yapı elemanlarında, daha ekonomik çözümlerin bulunmasını sağlamıştır. Böylece elimizdeki giderek azalan kaynaklar ile optimum tasarımlar elde etmek kolaylaşmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı da, dikdörtgen kesitli betonarme sürekli kirişlerin maliyet optimizasyonunu Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) Algoritmalarını kullanarak gerçekleştirmekten ibarettir. Gerçekleştirilen çalışma dört asıl bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kullanılan ABC, TLBO ve TLBC algoritmalarıyla ilgili bilgilere ve daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde amaç fonksiyonu, kesme modülü, alt ve üst donatı yerleştirilmeleri, gövde donatısı ve sınırlayıcılar ifade edilmiştir. Bir, iki ve üç açıklıklı betonarme kirişler için optimizasyon çalışması yapılıp algoritmaların başarımları karşılaştırılmıştır ve optimum tasarıma ait kiriş detayı verilmiştir. Daha sonra üç açıklıklı kiriş optimizasyonu için iki ayrı parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Son bölümde kaynaklara yer verilmiştir ve yazarın öz geçmişi ile sonlandırılmıştır.

Elde edilen bulguların irdelenmesi, betonarme sürekli kirişlerin minimum maliyetle optimum tasarımlarının ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarıyla gerçekleştirilebileceğini ve totalde bu problem için bu üç algoritmadan TLABC algoritmasının diğer iki algoritmaya göre başarımının daha iyi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kiriş Optimizasyonu, Optimizasyon, ABC algoritması, TLBO algoritması, TLABC algoritması

Master Thesis

SUMMARY

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE CONTİNUOUS BEAMS WITH ARTIFICIAL BEE COLONY , TEACHING-LEARNING BASED OPTIMIZATION AND TEACHING-LEARNING BASED ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORTHMS

Sebahat TEMİZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK
2022, 83 Pages

With the development of artificial intelligence, the acceleration of optimization studies has enabled more economical solutions to be found in building elements. Thus, it has become easier to obtain optimum designs with the resources we have, which are gradually decreasing.

The main purpose of this study is to perform cost optimization of rectangular reinforced concrete continuous beams using Artificial Bee Colony (ABC), Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) and Teaching-Learning Based Artificial Bee Colony Algorithms (TLABC) consists of. In the first chapter, information about ABC, TLBO and TLBC algorithms and previous studies are given. In the second part, the objective function, shear modulus, placement of top and bottom reinforcement, body reinforcement and constraints are expressed. An optimization study has been made for reinforced concrete beams with one, two and three spans, the performances of the algorithms have been compared, and the beam detail for the optimum design has been given. Then, two separate parametric studies were carried out for three-span beam optimization. In the last section, references are given and the author's biography.

Examination of the obtained findings shows that optimum designs of reinforced concrete continuous beams with minimum cost can be realized with ABC, TLBO and TLABC algorithms, and overall, the performance of TLABC algorithm is better than the other two algorithms among these three algorithms for this problem.

Keywords: Reinforced Concrete Beam Optimization, Optimization, ABC algorithm, TLBO algorithm, TLABC algorithm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) Akış Diyagramı..... 5

Şekil 1.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı optimizasyon algoritması (TLBO) Akış Diyagramı……...…….…… 8

Şekil 2.1. Üç Açıklıklı Betonarme Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri..... 19

Şekil 2.2. İki Açıklıklı Betonarme Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri..... 19

Şekil 2.3. Bir Açıklıklı Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri..... 20

Şekil 2.4. Optimizasyon sürecine ilişkin akış diyagramı…..... 21

Şekil 2.5. Şablonlarda donatıların gruplandırılması……..... 22

Şekil 2.6. Kiriş üzerine etki eden sabit ve hareketli yük değerleri, kirişlere bağlanan alt ve üst kolon uzunluklarını ifade eden parametreler……..……..…… 24

Şekil 2.7. Kirişlerin kesit boyutları ifade eden parametreler..... 25

Şekil 2.8. Kiriş genişliklerini ifade eden parametreler..... 25

Şekil 2.9. Üst Donatı Modülünün Ayrıntısı..... 27

Şekil 2.10. Alt Donatı Modülünün Ayrıntısı..... 27

Şekil 2.11. Etriye de ki kanca boyu gösterimi..... 30

Şekil 2.12. Üç Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi..... 33

Şekil 2.13. İki Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi..... 35

Şekil 2.14. Bir Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi..... 37

Şekil 2.15. Üç Açıklıklı Betonarme Kirişin Alt Donatı Düzenlemesi…….…..... 39

Şekil 2.16. İki Açıklıklı Betonarme Kirişin Alt Donatı Düzenlemesi..... 41

Şekil 2.17. Bir Açıklıklı Betonarme Kirişin Alt Donatı Düzenlemesi…..... 42

Şekil 2.18. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen bir açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri..… 48

Şekil 2.19. Bir açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği……...……..…….. 51

Şekil 2.20. Bir açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı ….…..……..…..... 54

Şekil 2.21. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen iki açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri…..55

Şekil 2.22. İki açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği……... 58

Şekil 2.23. İki açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı 61
Şekil 2.24. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen üç açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri... 62
Şekil 2.25. Üç açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği..... 65
Şekil 2.26. Üç açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı..... 69
Şekil 2.27. 250, 300, 350 ve 400 mm için kirişlerin açıklıktaki donatı oranları..... 71
Şekil 2.28. 250, 300, 350 ve 400 mm için kirişlerin mesnetteki ortalama donatı oranlar..... 71
Şekil 2.29. 250, 300, 350 ve 400 mm için kiriş toplam donatı miktarları..... 72
Şekil 2.30. 250, 300, 350 ve 400 mm için kiriş toplam beton miktarları..... 72
Şekil 2.31. 250, 300, 350 ve 400 mm için kirişlerin maliyetleri..... 73
Şekil 2.32. Etriye çap değişimine göre kullanılan donatıların toplam donatı miktarı İçindeki payları..... 75
Şekil 2.33. Donatı ve beton miktarının etriye çapına göre değişimleri..... 76
Şekil 2.34. Etriye çapına göre maliyetlerin değişimi..... 76

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Öğretmeye dayalı işçi arı aşaması sözde kodu..... 9

Tablo 1.2. Öğrenmeye Dayalı Gözcü Arı Aşaması Sözde Kodu..... 10

Tablo 2.1. Kullanılabilecek beton ve donatı sınıfları için birim maliyetler..... 18

Tablo 2.2. Donatı Şablon Örneği……..……..……..…….. 23

Tablo 2.3. Sayısal uygulama 1'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları……..... 49

Tablo 2.4. Bir açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri……. 49

Tablo 2.5. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla bir açıklıklı kiriş için elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları…..... 50

Tablo 2.6. BC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 1 için Friedman Testi skor ve skor sıralamaları..... 52

Tablo 2.7. Bir Açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen Optimum değerler……..……..……..... 53

Tablo 2.8. Sayısal uygulama 2'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları……..…..... 56

Tablo 2.9. İki açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri……..... 56

Tablo 2.10. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla iki açıklıklı kiriş için elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları ……..... 57

Tablo 2.11. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 2 için Friedman testi skor ve skor sıralamaları…..... 59

Tablo 2.12. İki Açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen Optimum değerler……..……..... 60

Tablo 2.13 Sayısal uygulama 3'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları…..…..……..……..……..63

Tablo 2.14. Üç açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri……..……...63

Tablo 2.15. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla Uygulama - 3 için elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları …..…..... 64

Tablo 2.16. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 3 için Friedman testi skor ve skor sıralamaları…..... 66

Tablo 2.17. Üç Açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen optimum değerler……...……..... 67

Tablo 2.18. 250, 300, 350 ve 400 mm kiriş genişlikleri için elde edilen optimum değerler……..……....70

Tablo 2.19. 250, 300, 350 ve 400 mm kiriş genişlikleri için elde edilen optimum değerler.....74

SEMBOLLER DİZİLİMİ

$A_{s,ust,j}$	Kiriş donatı planındaki j. üst donatının en kesit alanı
$A_{s,alt,i}$	Kiriş donatı planındaki i. alt donatının en kesit alanı,
A_{sw}	Toplam etriye en kesit alanı
A_0	Etriye kolunun en kesit alanı
A_{sl}	Gövde donatısı alanları
ACI-318-08	Amerikan Beton Enstitüsü'nün standartlarına göre yapısal beton için bina kodu tasarımları
b_{wi}	i. açıklıktaki kirişin genişliği
b_x^{kolon}	Kirişin birleştiği kolonun kirişe dik boyutu
C_c	Beton maliyeti
C_s	Çelik maliyeti
C++	Genel amaçlı programlama dili
d	Vektör boyutu, Faydalı yükseklik
d_{na}	Kiriş donatı planındaki en büyük alt donatı numarasını
d_{nu}	Kiriş donatı planındaki en büyük üst donatı numarasını
$d_{ni,gövde}$	Gövde donatısı sayısı
D_{maks}	Maksimum agrega tane boyutu
$DM_{j,i}$	Öğretmen ile öğrenciler arasında öğrenme kapasitesi arasında ortalama fark,
Eurocade 2	Avrupa inşaat/yapısal tasarımı yönetmeliği/standartı
$\{F\}_{DN}$	Düğüm noktalarına etki eden tekil yükler varsa bunlarda oluşan yük vektörü
$\{F\}_{ankastrelik}$	Çubuk üzerindeki yüklemelerden oluşan ankastrelik uç momentlerinin düğüm noktalarına aktarılmasıyla elde edilen yük vektörü
$\{F\}^*$	İndirgenmiş yük vektörü
f_{ywd}	Etriyenin tasarım akma dayanımı
f_{ctd}	Betonun tasarım çekme dayanımı
f_{yd}	Donatının tasarım akma dayanımı
f_{ywd}	Etriye tasarım akma gerilmesi

f(x)	Amaç fonksiyonu
$g_j(x)$	Eşitsizlik kısıtlayıcılarını
$h_{kol,i}$	Kolon genişlikleri
$h_k(x)$	Eşitlik kısıtlayıcılarını
h_{ki}	i. açıklıktaki kirişin yüksekliği
$[K]_S^*$	İndirgenmiş sistem rijitlik matrisi
L_i,	i. açıklıktaki kirişin açıklığı
$L_{alt,i}$	Kenetlenme ve bindirme boylarını da içeren kiriş donatı planındaki i. alt donatının uzunluğu
$L_{,üst,j}$	Kenetlenme ve bindirme boylarını da içeren kiriş donatı planındaki j. üst donatının uzunluğu
$L_{i,gövde}$	Gövde donatısı uzunluğu
$L_{etr,i}$	Etriye uzunluğu
l_b^*	Kenetlenme boyu
l_b	Kancayla birlikte donatı uzunlukları
l_o	Bindirme boyu
l_b^d	Düz kenetlenme
M_r	Taşıma gücü momenti
M_d	Tasarım momentleri
$M_{j,i}$	TLBO algoritmasındaki öğrencilerin ortalaması
Model Cd. (1990)	Beton yapılar için tasarım kodu,
n	Beton hacmi açıklık sayısı, etriye kol sayısını
n_{sar}^{etr}	Tasarım değişkenleri olan ve algoritma tarafından seçilen sarılma bölgesindeki etriye aralıklarına göre hesaplanan etriye sayısı
n_{orta}^{etr}	Tasarım değişkenleri olan ve algoritma tarafından seçilen orta bölgedeki etriye aralıklarına göre hesaplanan etriye sayısı
n_s	Sarılma bölgesindeki etriye sayısı
n_o	Orta bölgedeki etriye sayısı
$Ø_{maks}$	Maksimum boyuna donatı çapı
$Ø$	Donatının çapı
$Q_{i,gövde}$	Gövde donatısı çapı
Q_w	Etriye çapı
r_i	[0, 1] aralığındaki rastgele sayıyı

S	Algoritma tarafından seçilen etriye aralığına
s_s	Sarılma bölgesindeki donatı aralığı
s_o	Orta bölgede etriye aralığı
SN	Popülasyon büyüklüğü
TF	Değiştirilecek ortalamanın değerini etkileyen rasgele bir tamsayı olan öğretme katsayısı
$\{U\}^*$	Sistem için belirlenen düğüm noktası yer değiştirme ve dönmeleri
V_s	Beton hacmi
V_w	Etriyenin karşılayabileceği kesme kuvveti
V_c	Karşılayacağı kesme kuvveti
V_{cr}	Betonun kesmede çatlama dayanımı
V_r	Sarılma bölgesinde ve orta bölgede kesme kuvveti taşıma gücü
$V_{i,j}$	ABC algoritmasının yeni besin kaynağı
W_s	Toplam çelik ağırlığı
W_s	Donatı ağırlığı
W_s^{asal}	Asal donatı ağırlığı
$W_s^{gövde}$	Gövde donatısı ağırlığı
W_s^{etriye}	Etriye ağırlığı
x_i	Tasarım değişkenleri
$X_{j,kbest,i}$	En iyi bireyi
γ_s	Çeliğin birim ağırlığı (7850 kg/m^3)
ρ	Donatı oranı
ρ_b	Dengeli donatı oranını
ρ_{maks}	Maksimum donatı oranı
ρ_{min}	Minimum donatı oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilindiği gibi mühendislikte, yapılacak olan bir iş en kısa sürede, en az maliyetle ve en iyi kalitede tasarlamak amaçlanmaktadır. Bu bağlamda optimizasyon araçları, mühendislere bu amaca ulaşmada destek olmaktadır. Optimizasyon yöntemleriyle tasarımlar, emniyetten taviz vermeden en ekonomik şekilde ve kısa sürede yapılabilmektedir.

Optimizasyon süreçlerini iyileştirmek için birçok çalışma yapılmış ve optimizasyon tekniklerinin problemlere kolay uygulanmasını ve yeterli düzeyde optimum çözümlerin kısa sürede bulunabilmesini sağlamak üzere çeşitli sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar doğadaki canlılardan veya günlük yaşamdaki rutinlerimizden, fizik ya da kimya yasalarından esinlenerek oluşturulmuşlardır. Bu optimizasyon algoritmalarının inşaat mühendisliği alanındaki uygulamaları son yıllarda hızla arttığı ve verimli sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı farklı açıklık sayılarına sahip sürekli kirişlerin Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni Algoritmalarını (TLABC) kullanarak minimum maliyetle optimum tasarımlarını gerçekleştirmektir. Bu amaçla birinci bölümle kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmaları hakkında bilgiler verilmiş ve bu konuda daha önce yapılan çalışmalar sunulmuştur. İkinci bölümde bir, iki ve üç açıklıklı kirişlerin söz konusu algoritmalarla optimum tasarımları gerçekleştirilmiş, kirişler üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Ardından algoritmaların başarımları kıyaslanmıştır. Sonuncu bölüm ise yapılan çalışmalardan çıkarılan sonuç ve önerilere ayrılmıştır.

1.2. Optimizasyon

Optimizasyon, problemdeki verileri en iyi şekilde kullanarak hedeflenen optimum değere ulaşmayı amaçlayan işlemdir. Bunun dışında optimizasyon; yapay zekâ, bilgisayar bilimi, yöneylem araştırması gibi alanlarda kullanılmaktadır. Optimizasyon terimi, bir

problemi kısıtlı zaman zarfında, kabul edilebilir bölgedeki olası çözümlerden amaç fonksiyonunu minimum veya maksimum yapan en iyi değeri elde etmek olarak tanımlanabilir. Birden fazla çözüm olasılığı olan ve elde edilen çözüm kalitesinin net bir ifadeyle yazılabildiği problemlerdir. Bu demektir ki farklı çözümlerin karşılaştırılıp değerlendirilmesi bize optimizasyon problemi olduğunu göstermektedir. (Akay,2009)

Optimizasyon problemi genel bir matematiksel olarak;

$$g_j(x) \leq 0 \qquad j = 1, \dots\dots\dots\dots\dots, m \tag{1.1}$$

$$h_k(x) = 0 \qquad k = 1, \dots\dots\dots\dots\dots, l \tag{1.2}$$

$$X_i^{min} \leq X_i \leq X_i^{max} \tag{1.3}$$

ifadelerini sağlamak koşuluyla,

$$optimize\ f(x) \qquad x = \{x_1, x_2, \dots\dots\dots., x_n\} \tag{1.4}$$

Bu optimizasyon problemi matematiksel ifadesinde; x tasarım değişkenlerini, f(x) amaç fonksiyonunu, $g_j(x)$ eşitsizlik kısıtlayıcılarını ve $h_k(x)$eşitlik kısıtlayıcılarını tanımlamaktadır. Bu matematiksel tanımla "en iyi değeri" veren tasarım değişkenlerinin değerleri elde edilmektedir.

1.3. Çalışmada Kullanılan Algoritmalar

1.3.1. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC)

Arıların yiyecek arama davranışları esas alınarak Karaboğa (2005) tarafından geliştirilen sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmanın esin kaynağı olan bal arılarının, kendi aralarında iş bölümü yaparak ve organize olabilmeleriyle sürü zekasını iyi bir şekilde ortaya koydukları bilinmektedir. Söz konusu bal arıları, içgüdüsel olarak bir düzen içinde yaşamakta ve hayatlarını buna göre devam ettirmektedirler. Kovanda her arı bilinen görevinin dışına çıkmamaktadır. Tereshko (2000) tarafından önerilen yiyecek arama

modelinde; yiyecek kaynakları, görevli işçi arılar ve görevsiz işçi arılar olarak üç bileşen vardır.

Yiyecek kaynakları; arıların bal, nektar ve polen üretmek için gittiği kaynaklardır. Yiyecek kaynağının uygunlu; kovana yakınlığı, çeşidi, nektar kıvamı ve nektarın çıkarılmasındaki kolaylık gibi birçok etkene bağlı olmakta, ancak matematiksel modellerde kaynağın zenginliği tek bir ölçüt olarak dikkate alınabilir.

Görevli işçi arılar; önceden tespit edilen kaynaklardaki nektarların kovana getirilmesiyle sorumludurlar. Aynı zamanda nektar aldıkları kaynağın kalitesi ve yeriyle ilgili bilgiyi kovandaki diğer arılara aktarırlar.

Görevsiz işçi arılar; nektarın toplanacağı kaynağı bulmak için arayışta olan arılardır. İki çeşit görevsiz işçi arı vardır. Bunlar ise rastgele nektar toplanacak kaynak arayışı içerisinde olan kâşif arılar ve kovanda beklemede kalıp görevli işçi arıları gözetleyip onlar tarafından paylaşılan bilgiyle yeni bir kaynağa yönelen gözcü arılardır.

Arıların kovandaki dans alanında yaptıkları dansla bilgi paylaşımı sağlanmaktadır. Dans eden arıya antenleriyle dokunan diğer arı bulunan kaynağın tadı ve kokusuyla ilgili bilgi alır. Kaynağın kovandan uzaklığı, nektarın kıvamı, besinin durumu, kalitedeki göreceli farklılıklar, hava şartları ve günün hangi vaktinin olduğu gibi dansı etkileyen faktörler vardır (Akay 2009).

Bileşik gözleri sayesinde arılar, kendi bulundukları yer ile güneş arasındaki açıyı hesaplayabilmektedirler. Arılar uzaklığa göre enerji tüketimini ayarlayabilmektedirler (Kaya ve Eke 2020).

Kaynağın kovana olan yakınlığına göre dairesel, kuyruk ve titreme adlarıyla bilinen çeşitli danslar mevcuttur. Titreme dansı, nektar miktarı ve getirme yeteneği arasındaki dengeyi sağlamaktadır. Daire dansı, 50-100 metre uzaklıktaki kaynağın yön ve uzaklık bilgisi verilmeden sağlanan dans biçimidir. 100 metreden 10 kilometreye kadar geniş bir alan içerisinde 8 rakamına benzeyen ve yineleme sayısına göre uzaklık bilgisi sunan kuyruk dansı ile güneş ve yiyecek arasındaki açının 45° olduğunu anlatmaktadırlar (Tereshko, 2005).

Gözcü arılar, hangi kaynağı tercih edeceğine, dans alanında bütün zengin kaynaklarla ilgili bilgileri onlara aktaran dansların birkaçını izledikten sonra karar vermektedirler. Gitmeye karar verdiği kaynağı hafızasına alan arı daha sonra bu kaynağa ulaşarak nektar toplamaya başlamaktadır. Böylece söz konusu arı görevli arı haline dönüşmektedir.

Nektarını toplayan görevli işçi arı daha sonra kovana dönerek bu nektarları yiyecek depolayıcılara aktarmaktadır. Nektarını aktaran arı için 3 seçenek ortaya çıkmaktadır:

1) Gittiği kaynağı bırakarak bağımsız işçi olabilir.

2) Gittiği kaynağa dönmeden önce dans eder ve kovandaki diğer arıları aynı kaynağa yönlendirebilir.

3) Diğer arılara herhangi bir yönlendirme yapmadan direkt kaynağa gidebilir (Öztürk 2013).

Arılarda da bulunan, kendi kendine organize olabilme, sürü sisteminin temel özelliğidir (Akay, 2009). Bonabeau (1999) kendi kendine organize olabilmeyi dört özellik ile karakterize etmiştir.

1. Pozitif geri besleme: Elverişli durumların oluşmasını destekleyen davranışsal kurallar sayesinde oluşmaktadır. Pozitif geri beslenmeye örnek olarak arıların yaptıkları danslarla birlikte diğer arıların bir işe yönlendirilmeleri verilebilmektedir.

2. Negatif geri besleme: Sürünün birlikte uyumlu şekilde hareketlerini sağlamak için pozitif geri beslemeyi dengeler nitelikteki kurallar olarak tanımlanabilmektedir. Herhangi bir yiyecek tüketiminde, iş konusunda ve benzeri durumlarda doyuma gitmeyi önlemek için negatif geri besleme mekanizması gerekmektedir.

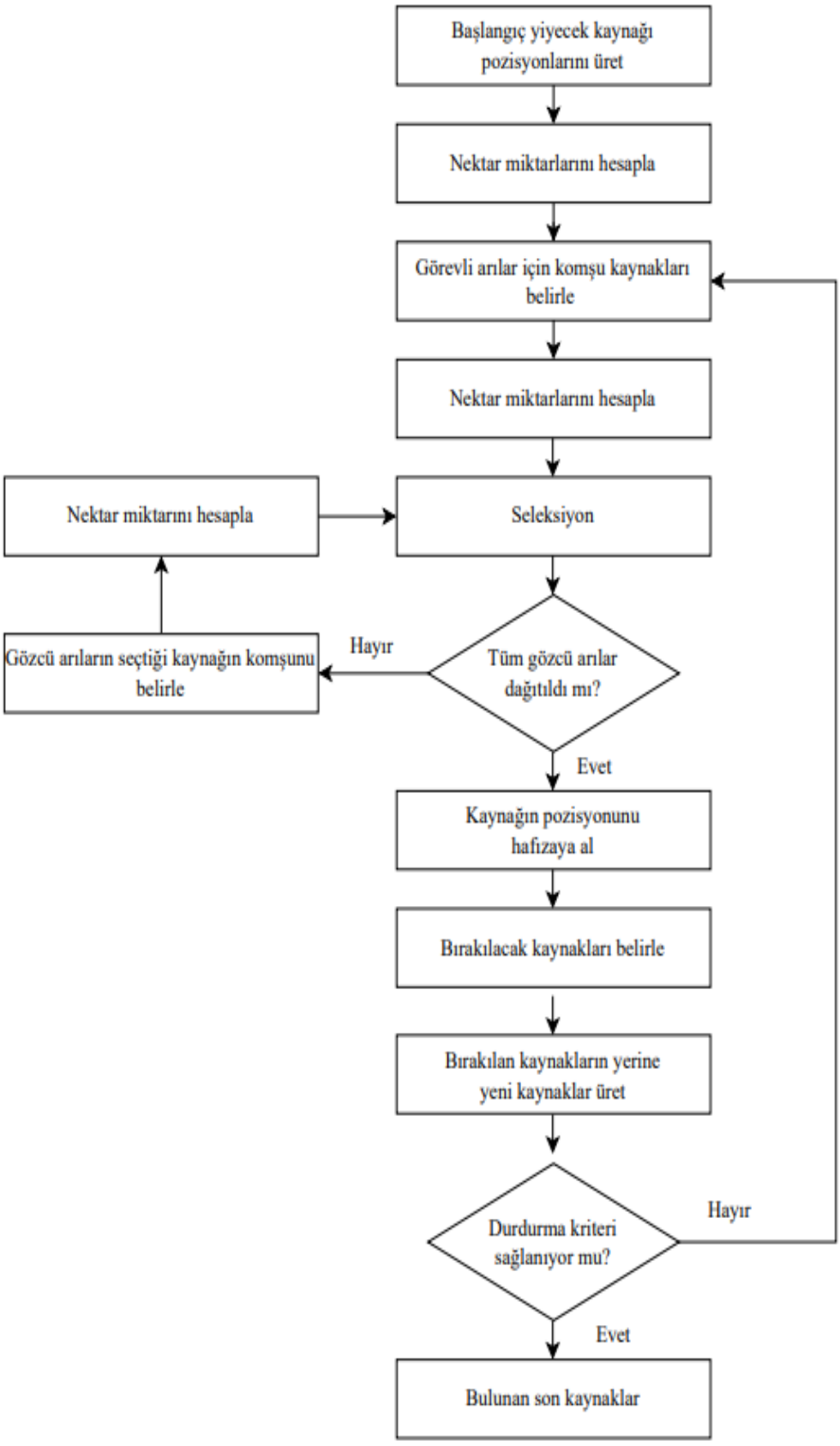
3. Dalgalanmalar: Bireylerin yanlışları, yapılan işi değiştirmeleri yeni çözümlerin bulunmasını sağladığından yaratıcılık ve yenilik açısından bu özellik önem taşımaktadır.

4. Çoklu etkileşimler: Herhangi bir sürüdeki bazı bireylerin arasındaki bilgi alışverişi sürü içerisinde etkileşimi sağlaması olarak tanımlanmaktadır (Waibel, 2006).

Söz konusu özellikleri bünyesinde barındıran Yapay Arı Koloni Algoritmasının,

- Sürü zekâsına dayalı bir algoritma olduğu,
- Esnek ve basit olduğu,
- Oldukça az kontrol parametresine sahip olduğu,
- Gerçek yiyecek arayıcı arıların davranışlarından esinlenilerek oluşturulduğu,
- Sürekli değişkene sahip problemler için geliştirilmiştir ama ayrık problemler içinde kullanılabilir olduğu,
- Kâşif Arılar tarafından gerçekleştirilen global; görevli ve gözcü arılar tarafından gerçekleştirilen yerel araştırma kabiliyetine sahip olduğu ve bu araştırma süreçlerini paralel olarak yürütebildiği söylenebilmektedir. (Karaboğa, 2011).

ABC optimizasyon algoritmasının temel adımlarını gösteren akış diyagramı Şekil 1.1.'da verilmiştir.



Şekil 1.1. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) Akış Diyagramı(Akay 2009)

1.3.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO)

TLBO algoritması sınıftaki öğretmen-öğrenci arasındaki öğretme-öğrenme becerisine dayanan bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma öğretmen (öğretmen aşaması) ve öğrencilerle etkileşim (öğrenci aşaması) olarak iki aşamalı bir sürece dayanmaktadır. Algoritmada popülasyonu oluşturan bir sınıftaki bilgi düzeyi en yüksek birey öğretmen olarak kabul edilmektedir. Öğrenciler, öğretmen tarafından kendilerine aktarılabilen bilgiye sahip olabilmektedirler. Böylece sınıfın bilgi düzeyi artmaktadır. Öğretmenin öğretme kapasitesi ile öğrencilerin öğrenme durumu birbiriyle ilişkilidir. Algoritmanın iki aşamasını oluşturan öğretmen ve öğrenci aşamaları aşağıda açıklanmaktadır.

- Öğretmen aşaması:

Öğretmenlerin öğrencilere bilgi aktardığı, algoritmanın ilk aşamasıdır. Bu aşamada bir öğretmen, kendi öğretme bilgi düzeyine bağlı olarak sınıftaki başarıyı arttırmaya çalışmaktadır. Öğretmen ile öğrenciler arasında öğrenme kapasitesi arasında ortalama fark:

$$DM = r(X_{best} - T_F \cdot M) \tag{1.5}$$

olarak ifade edilir. Burada X_{best} en iyi bireyi, diğer bir deyişle öğretmeni temsil etmekte, T_F, değiştirilecek ortalamanın değerini etkileyen rasgele bir tamsayı olan öğretme katsayısını ve r, [0, 1] aralığındaki rastgele sayıyı, M ise öğrencilerin ortalamasını göstermektedir. Teknik literatürde yapılan deneylerden elde edilen bulguların karşılaştırılmasıyla T_F değerinin 1 ile 2 arasında alınmasının algoritmanın başarımını yükselttiği görülmüştür. Bu nedenle bu katsayının 1 ile 2 arasında alınması önerilmektedir. T_F'nin değeri, $r_2(0,1)$ aralığında rastgele bir sayı olmak üzere;

$$T_F = \text{yuvarla}[1+r_2\{1,2\}] \tag{1.6}$$

ifadesiyle belirlenmektedir.

Ortalama fark değerine göre mevcut çözüm;

$$X' = X + DM \tag{1.7}$$

ifadesiyle güncellenmektedir. Burada X', güncellenen yeni bireyi göstermektedir.

Öğretmen aşamasından sonra, eski ve yeni birey karşılaştırılarak daha uygun olan birey seçilerek diğer aşama olan öğrenci aşamasına geçilmektedir (Rao ve Kalyankar 2011).

- Öğrenci aşaması:

Algoritmanın ikinci aşaması olan bu aşamada öğrenciler bilgilerini arttırmak için diğer öğrencilerle rassal etkileşime girerler. Öğrencinin bilgisi etkileşime girdiği öğrenciden az ise bu öğrenciden yeni bilgiler öğrenir. Öğrenme olgusu aşağıda matematiksel olarak ifade edilmektedir.

P ve Q harfleriyle ifade edilen iki öğrenci seçilirse, P öğrencisinin j tasarım değişkeni;

$$\text{Eğer } X'_{P,i} < X'_{Q,i} \text{ ise } X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i \left(X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}\right), \quad (1.8)$$

$$\text{Eğer } X'_{Q,i} < X'_{P,i} \text{ ise } X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i \left(X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}\right), \quad (1.9)$$

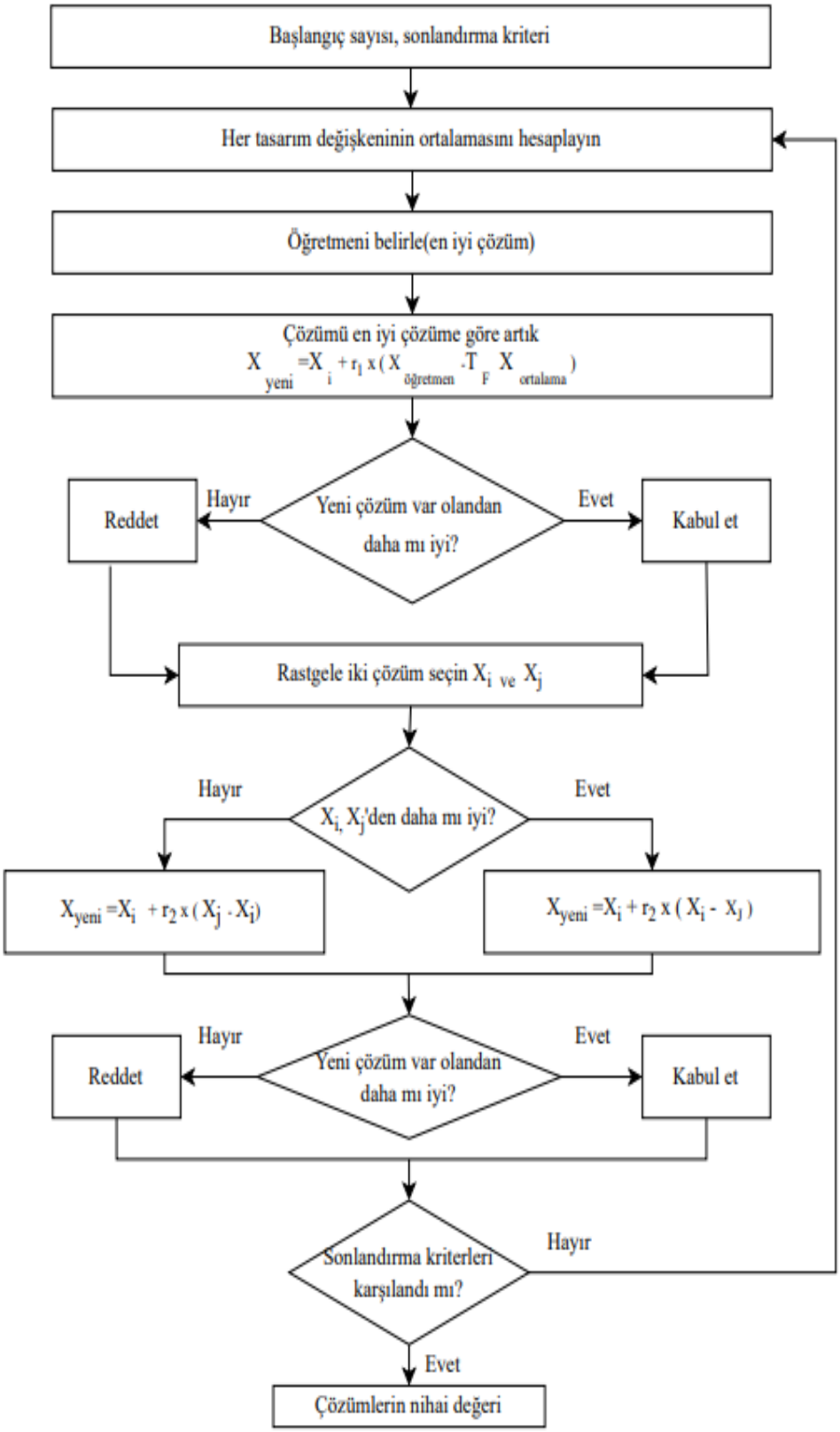
ifadesiyle güncellenir. Tüm tasarım değişkenleri güncellenen $X''_{P,i}$ bireyi, eski bireyden ($X'_{P,i}$) daha uygun bir çözüm ise, eskisiyle değiştirilir.

Denklem (1.4) ve (1.5) minimizasyon problemleri içindir. Maksimizasyon problemleri durumunda, Denklem. (1.6) ve (1.7) kullanılır.

$$\text{Eğer } X'_{Q,i} < X'_{P,i} \text{ ise } X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + ri \left(X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}\right), \quad (1.10)$$

$$\text{Eğer } X'_{P,i} < X'_{Q,i} \text{ ise } X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + ri \left(X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}\right), \quad (1.11)$$

Öğretme ve öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritmasının akış şeması aşağıda verilmiştir:



Şekil 1.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı optimizasyon algoritması (TLBO) Akış Diyagramı

1.3.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni Algoritması (TLABC)

Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) ve Yapay Arı Koloni (ABC) algoritmalarının birleşmesi sonucu Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Kolonisi (TLABC) algoritması oluşmuştur. TLBO algoritması öğretmen-öğrenci olarak iki aşamadan, ABC algoritması ise işçi, gözcü ve kâşif arı olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Melezleme yoluyla bu algoritmaların birleştirilmesiyle, keşif yönü güçlü Yapay Arı Koloni Algoritması ile komşuluk araması güçlü olan Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon algoritmalarından daha güçlü bir algoritma oluşturulması hedeflenmiştir (Chen ve diğ. 2018).

Bu algoritmada; öğretmeye dayalı işçi arı aşaması, öğrenmeye dayalı gözcü arı aşaması ve genelleştirilmiş karşıt kaşif arı aşaması olmak üzere üç melez aşama bulunmaktadır.

1.3.3.1. Öğretmeye Dayalı İşçi Arı Aşaması

Bu aşamada her bir işçi arı konumunu güncellemede TLBO algoritmasında kullanılan öğretme stratejisinden yararlanmaktadır. MATLAB yazılımı biçeminde hazırlanan sözde kod aşağıdaki Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Öğretmeye dayalı işçi arı aşaması sözde kodu

```
1.  if rand(0, 1) < Ps
2.      Rastgele seç jϵ{1…d}, kϵ{1...SN}
3.      v_{i,j}=x_{i,j}+φ_{i,j}×(x_{i,j}−x_{k,j})
4.  else
5.      for j = 1:d
6.      v_{i,j}=x_{i,j}+rand(0,1)×(x_{teacher,j}−T_f×x_{mean,j})
7.      end for
8.  end if
```

P_s olasılığı (0,1) aralığında büyük ise ABC algoritmasının yeni besin kaynağı ($V_{i,j}$) yi elde etmek için çözüm üretilir. Burada SN'nin popülasyon büyüklüğünü, d'nin ise vektör

boyutunu ifade ettiği bir çözüm popülasyonu oluşturulur. $\varphi_{i,j}$ [-1,1] aralığında rastgele bir sayıyı, $X_{i,j}$ ise mevcut besin kaynağını ifade eder.

Eğer Ps (0,1) aralığından büyük değil ise TLBO algoritmasıyla çözüm yapılır. Popülasyondaki en iyi çözüm ($X_{teacher,j}$) öğretmendir. Sınıfın ortalama sonucunu X_{mean} öğretmen yükselterek kendi seviyesine çıkarmaya çalışır. Burada T_f, değiştirilecek ortalamanın değerine karar veren bir öğretmen faktörüdür, rand (0,1) ise [0,1] aralığında rastgele değer alan bir sayıdır. $V_{i,j}$ ve $X_{i,j}$, sırasıyla i. öğrencinin yeni ve mevcut çözümleridir.

1.3.3.2. Öğrenmeye Dayalı Gözcü Arı Aşaması

ABC algoritmasının gözcü arı aşamasında kullanılan seçim mekanizmasıyla belirlenen bireylerin güncellenmesinde TLBO algoritmasının öğrenme stratejisi uygulanarak oluşturulmuş melez bir aşamadır. Bu aşamanın sözde kodu aşağıdaki Tablo 1.2'de görülmektedir.

Tablo 1.2. Öğrenmeye Dayalı Gözcü Arı Aşaması Sözde Kodu

```
1.   if rand(0, 1) < Ps
2.       Rastgele seç j ϵ {1…d}, k ϵ {1...SN}
3.       v_{i,j}=x_{i,j}+φ_{i,j}×(x_{i,j}−x_{k,j})
4.   else
5.       Popülasyondan rastgele x_t, ve x_k seç (t ≠ k)
6.       for j = 1: d
7.           if f(x_t) < f(x_k)
8.               v_{i,j}=x_{i,j}+rand(0,1)×(x_{t,j}−x_{k,j})
9.       else
10.              v_{i,j}=x_{i,j}+rand(0,1)×(x_{k,j}−x_{t,j})
11.          end if
12.      end for
13.  end if
```

Eğer rand(0,1)<Ps koşulu sağlanırsa ABC algoritması yeni çözüm bulma işlemi gerçekleşir.

Yukarıdaki koşul sağlanmadığında, X_t ve X_k (t ≠ k) olmak üzere popülasyondan rastgele seçilen iki öğrencidir ve f uygunluk fonksiyonudur. İlk olarak $f(x_t) < f(x_k)$ şartı sağlanmaya çalışır. Eğer bu koşul sağlanmazsa $f(x_k) < f(x_t)$'nin olduğu şart sağlamaya çalışır. En iyi çözüm $V_{i,j}$ bulunana kadar algoritma koşumu devam eder.

1.3.3.3. Genelleştirilmiş Karşıt Kâşif Arı Aşaması

TLABC'nin bu üçüncü aşaması, yeniden başlama aşamasıdır. Burada herhangi bir belirli bir süre zarfında gerekli verim elde edilemezse bu aşama tükenmiş, bitmiş olarak kabul edilir ve yeni bir herhangi aday ile tekrar çözüme başlanır. Genelleştirilmiş karşıt çözümü:

$$X_{ij}^{GO} = k.\left(max(x_{ij}) + min(x_{ij})\right) - X_{ij} \tag{1.12}$$

$$x_i = \begin{cases} x_i, & if \quad f(x_i) \le f\left(x_i^{GO}\right) \\ x_i^{GO}, & if \quad f(x_i) > f\left(x_i^{GO}\right) \end{cases} \tag{1.13}$$

olarak ifade edilir. Burada x_{ij} tükendikçe herhangi bir besin kaynağı ile değiştirilen besin kaynağını ifade eder. Bu besin kaynağı dizilimi $\boldsymbol{x}_i = (x_{i1}, \cdots, x_{ij}, \cdots, x_{iD})$ şeklinde oluşturulmuştur. k, [0,1] arasında rastgele bir sayıyı, $\max(x_{ij})$ ve $\min(x_{ij})$ ise sırasıyla popülasyondaki tasarım değişkenlerinin maksimum ve minimum değerlerini ifade eder.

1.4. Betonarme Yapıların veya Elemanların Optimizasyonu Konusunda Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Koumousis ve Arsenis (1998), yaptıkları çalışmada genetik algoritma kullanılarak çok katlı binalardaki betonarme elemanların optimum tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kirişler ve diğer betonarme elemanlar için kısıtların oluşturulmasında tasarım uygulama kuralları dikkate alınmıştır. Genetik algoritmanın kontrol parametreleri için deneysel çalışmalar yapılarak, bu çalışmalardan elde edilen bulgular ve bu bulguların irdelenmesiyle varılan sonuçlar sunulmuştur.

Ferreira vd. (2003), betonarme T-kesitli kirişlerin farklı tasarım standartlarında optimum tasarımı üzerinde çalışılmışlardır. Çift ve tek donatılı T kesitlerin donatı alanı ve

konumu optimize edilmiştir. Kısıtların uygulanmasında Eurocode 2 ve Model Code (1990) kullanılmıştır. Çalışmada nihai tasarımda kullanılabilecek optimal donatının analitik olarak belirlenebilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla çalışmanın sonucunda elde edilen ifadelerin seçilen örneklere uygulanmasıyla tasarım çizelgeleri oluşturulmuştur.

Deliktaş vd. (2005), betonarme kiriş optimizasyonu için yaptıkları çalışmalarında, belirli kısıtlamalar uygulanan tek açıklıklı, dikdörtgen kesitli bir betonarme kirişin genetik algoritmayla optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada sadece kesit optimizasyonu gerçekleştirilmiş, bu betonarme kirişin boyutları minimum maliyeti verecek şekilde optimize edilmiştir. Problem ilk olarak analitik çözümle sonuç grafikleri elde edilmiş, daha sonra genetik algoritma kullanılarak optimum boyutlar bulunmuştur. Elde edilen bulgular analitik çözümle karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Govindaraj ve Ramasamy (2005), betonarme sürekli kirişlerin optimimum tasarımı için genetik algoritma kullanmışlardır. Bu çalışmada, sadece kirişin enine kesit boyutlarının değişken olarak kabul edilmiş ve böylece çelik donatının değişken olarak ortadan kaldırılmasıyla optimizasyon probleminin boyutunu önemli ölçüde azaltılmıştır. Çeliğin alanı, kesit boyutları optimize edildikten sonra hesaplanmış ve donatılar yönetmelik koşullarını sağlayacak şekilde detaylandırılmıştır.

Öztürk vd. (2012), Yapay Arı Koloni (ABC) algoritmasını kullanılarak betonarme kirişlerin optimum tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir. Kiriş yüksekliği ve genişliği, çelik donatı alanı optimum tasarım çalışmasında, tasarım değişkeni olarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan tasarım kısıtlamalarının belirlenmesinde ACI-318-08 ve teknik literatürdeki diğer çalışmalar temel alınmıştır. Amaç fonksiyonu, kirişin birim uzunluktaki maliyeti olarak ele alınmış ve birim uzunluk için kesit optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Jahjouh vd. (2013), çalışmalarında yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmayla tek donatılı betonarme sürekli kirişler için optimum kesit boyutları ve donatı detaylarını bularak optimum tasarımı elde etmek amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonu, beton, çelik ve kalıbın toplam maliyeti olarak dikkate alınmıştır. Kısıtların oluşturulmasında Amerikan beton enstitüsü bina standardı (ACI,2018) kullanılmıştır. Kiriş genişliği, kiriş yüksekliği, kirişteki donatı sayısı, çapı ve etriye çapı tasarım değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada betonarme kirişlerin optimum tasarımı için ABC algoritmasının güvenilir ve teknik olduğu yapılan sayısal uygulamalarla gösterilmiştir.

Bekdaş ve Niğdeli (2015), betonarme kirişlerin optimizasyonu için Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritmasını kullanılmışlardır. Bu çalışmada Armoni Arama (HS) ve Yarasa Algoritmaları (BA) da kullanılmış algoritmasından elde edilen bulgular, BA ve HS algoritmalarından elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda TLBO algoritmasının diğerlerinden daha etkin, uygulamasının kolay ve en uygun çözümü bulmada daha güvenilir olduğu belirlenmiştir.

Öztürk (2016) çalışmasında dikdörtgen kesitli betonarme kolonların optimum maliyet tasarımı için Big Bang teorisinden yola çıkılarak geliştirilen Big Bang-Bİg Crunch Optimizasyon Algoritmasını kullanmıştır. Dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için daha önce literatürde yapılan çalışmamalarla, Big Bang-Bİg Crunch Optimizasyon Algoritmasıyla elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır.

Öztürk (2016) bu çalışmasında konsol bir istinat duvarın, Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması ile optimum tasarımını gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmadaki asıl amaç yeni bir algoritma olan Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının istinat duvarlar için minimum maliyeti elde etmektir. İstinat duvarlar için bu algoritmanın yazılımları geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aynı problem daha önce Yapay Arı Koloni ve Guguk Kuşu Algoritmalarıyla optimum tasarımı yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Chutani ve Singh (2017) betonarme kirişlerin optimum tasarımı için yaptıkları çalışmalarında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritmasını kullanılmışlardır. Kısıtların oluşturulmasında Hindistan standardına uyulmuş, kiriş maliyetinin minimum yapılması amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonu beton ve donatı maliyetiyle oluşturulmuştur. Algoritmanın tamamı C++ ile kodlanmış ve bu sayede optimum tasarım değerlerinin bulunması için harcanan zamandan oldukça tasarruf edildiği iddia edilmektedir. Çalışmada iki tasarım uygulaması ele alınmış ve bu uygulamalar üzerinde algoritmanın etkililiği ve verimliliği gösterilmek istenmiştir. Çalışmada maliyet optimizasyonunun, kirişin derinliğinin genişliğine oranıyla doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Öztürk ve Türkeli (2017) bu çalışmada sezgisel bir algoritma olan Guguk Kuşu Algoritmasının, betonarme sürekli kirişler için optimum tasarımını yapmayı amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda üç açıklıklı betonarme sürekli kiriş örneği ele alınarak Guguk Kuşu Algoritması yazılımı geliştirilerek bir optimizasyon problemi haline getirilmiştir. Bu optimizasyon kiriş örneği çözülerek sonuçları değerlendirilmiştir.

Turkeli ve Ozturk (2017) çalışmalarında Yapay Arı Koloni (ABC) algoritması ve Genetik Algoritmayı (GA) kullanarak, kısmen ön gerilmeli beton kirişlerin minimum maliyetle tasarımını elde etmeyi amaçlamışlardır. Yapay arı koloni algoritması ve genetik algoritmanın yazılımları MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı özelliklerde sayısal uygulama örnekleri ele alınmış ve elde edilen bulgular teknik literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Öztürk (2018) jaya algoritması kullanılarak betonarme konsol istinat duvarının minimum maliyet ve minimum ağırlıkla optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında minimum maliyet ve minimum ağırlık ayrı ayrı ve birlikte çok amaçlı olarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu algoritmanın problem üzerindeki başarımı da incelenmiştir.

Bekdaş ve Niğdeli (2019), tablalı kirişlerin optimizasyonunu, metahöristik bir algoritma olan Armoni Arama Algoritmasıyla (HS) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada tabla kalınlığının kirişin optimum çözümüne etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulguların irdelenmesiyle tabla kalınlığının optimum maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı kanısına varılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçların T kesitli kirişler için geçerli olduğu ifade edilmektedir.

Tamrazyan ve Alekseytsev (2019), çalışmalarında uyarlanmış bir Genetik Algoritma ve RBDO (Güvenirliliğe Dayalı Tasarım Optimizasyonu) yaklaşımı göz önünde bulundurularak betonarme kirişlerin optimizasyonu için bir algoritma tasarlanmıştır. Kullanılan algoritma, yapıda meydana gelebilecek olası hasarlar dikkate alınarak yüksek güvenirliğe sahip betonarme dikdörtgen kesitli kirişin en uygun maliyetli tasarımını elde etmeyi sağlamıştır.

Öztürk ve Türkeli (2019), jaya algoritması kullanılarak tabanında anahtar kesit bulunan betonarme istinat duvarını optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak maliyet ve CO2 emisyonunun minimizasyonu ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmada duvar arkasındaki zemin parametreleriyle sürşarj yükünün büyüklüğünün duvarın minimum maliyetine ve CO2 emisyon değerine etkisi incelenmiştir.

Öztürk (2020), bu çalışmasında Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritmaları kullanılarak betonarme kısa konsolların TS 500'e göre optimum tasarımı yapmıştır. Yapılan parametrik çalışmalardan elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonunda algoritmaların başarımları karşılaştırılmıştır.

Raju vd. (2021), bu çalışmalarında GRG (İndirgenmiş Gradyan) yöntemi kullanılarak tek donatılı dikdörtgen betonarme kiriş için maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Burada amaç fonksiyonu, çelik ve beton toplam maliyeti olarak seçilmiştir. Farklı açıklıklara sahip ve basit mesnetli kirişler, düzgün yayılı yükler ve farklı noktalarda tekil yükler etkisinde optimize edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında farklı sayıda açıklığa sahip betonarme sürekli kirişlerde gerekli yönetmelik koşullarını sağlayan minimum maliyetli bir tasarım elde etmek için Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritmalarının ayrı ayrı kullanılması ve bunların söz konusu problem üzerinde başarımlarının test edilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte problemin bazı parametrelerinin değişimlerinin optimum tasarıma ve minimum maliyete olan etkisi incelenmiştir.

2.1. Amaç Fonksiyonu ve Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu bu çalışmamızdaki kirişin maliyetini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu, C_c beton, C_s çelik maliyetini, V_c beton hacmini ve W_s toplam çelik ağırlığını göstermek üzere;

$$f(x) = V_c C_c + W_s C_s \tag{2.1}$$

olarak ifade edilmektedir. Beton hacmi açıklık sayısına (n) göre; L_i, h_{ki} ve b_{wi} sırasıyla i. açıklıktaki kirişin açıklığı, yüksekliği ve genişliği olmak üzere;

$$V_c = \sum_{i=1}^{n} (4.\, h_{ki} \,.\, b_{wi}) \tag{2.2}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Donatı ağırlığı W_s ise; W_s^{asal}, asal donatı ağırlığı, ; $W_s^{gövde}$ gövde donatısı ağırlığı ve ; W_s^{etriye} etriye ağırlığı olmak üzere;

$$W_s = W_s^{asal} + W_s^{gövde} + W_s^{etriye} \tag{2.3}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada asal donatı ağırlığı; $L_{alt,i}$ kenetlenme ve bindirme boylarını da içeren kiriş donatı planındaki i. alt donatının uzunluğunu, $A_{s,alt,i}$ kiriş donatı

planında ki i. alt donatının en kesit alanını, L,üst,j kenetlenme ve bindirme boylarını da içeren kiriş donatı planındaki j. üst donatının uzunluğunu, As,ust,j kiriş donatı planındaki j. üst donatının en kesit alanını, γ_s çeliğin birim ağırlığını (7850 kg/m^3), d_{na} kiriş donatı planındaki en büyük alt donatı numarasının, d_{nu} kiriş donatı planındaki en büyük üst donatı numarasını göstermek üzere;

$$W_s^{asal} = [\sum_{i=1}^{dna}(L_{alt,i}\, A_{s,alt,i}) + \sum_{j=1}^{dnu}(L_{üst,j} + A_{s,üst,j})]\, \gamma_s \quad (2.4)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir.

Eğer gövde donatısı kullanılmışsa, daha sonra ayrıntılı olarak gövde donatısı modülü bölümünde açıklamalara göre seçilen gövde donatısı çapı($Q_{i,gövde}$), sayısı($d_{ni,gövde}$) ve uzunluğu ($L_{i,gövde}$) dikkate alınarak;

$$W_s^{gövde} = \sum_{i=1}^{n}(\frac{Q_{i,gövde}^2 \pi}{4} d_{ni,gövde}.\, L_{i,gövde})\, \gamma_s \quad (2.5)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Kesme donatısı hesabı ise ileride detaylı bir şekilde açıklanan kesme modülünde yapılmaktadır. bu modülde etriye boyları ($L_{etr,i}$), tasarım değişkenleri olan ve algoritma tarafından seçilen sarılma ve orta bölgedeki etriye aralıklarına göre hesaplanan etriye sayıları n_{sar}^{etr} ve n_{orta}^{etr} belirlenmektedir. Bir parametre olarak seçilmiş etriye çapı (Q_w) de dikkate alınarak toplam etriye ağırlığı;

$$W_s^{etriye} = \sum_{i=1}^{n}[(n_{sar,i}^{etr} + n_{orta,i}^{etr}).\, L_{etr,i}].\frac{Q_w^2 \pi}{4} \gamma_s \quad (2.6)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Maliyet fonksiyonun hesaplanması için kullanılan, tasarım değişkeni olan ve algoritma tarafından seçilen beton ve donatı sınıfına göre, donatı (C_s) ve beton (C_c) birim maliyetleri aşağıdaki Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Kullanılabilecek beton ve donatı sınıfları için birim Maliyetler

Malzeme	**Maliyet**
Çelik (B420C)	4.444,24 ₺/kg
Çelik (B500C)	4.444,24 ₺/kg
Beton (25 MPa)	253,63 ₺
Beton (30 MPa)	262,38 ₺
Beton (35 MPa)	278,63 ₺
Beton (40 MPa)	293,63 ₺
Beton (45 MPa)	299,88 ₺
Beton (50 MPa)	307,38 ₺

Sınırlayıcı ihlallerinin algoritmaya işlenmesi için ceza katsayısı kullanılmış, ceza katsayısı 10^8 olarak alınmıştır. Bu durumda cezalandırılmış amaç fonksiyonu ise;

$$P(x) = f(x) + 10^8 \sum \text{ihlal} \tag{2.7}$$

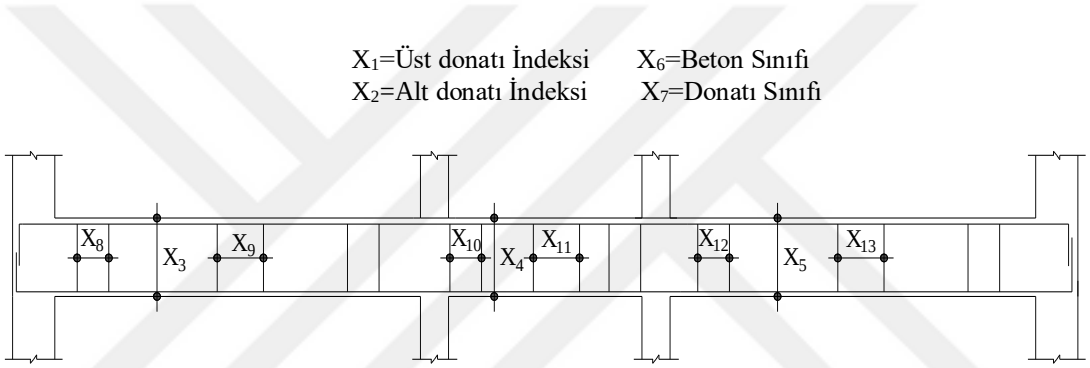
ifadesiyle belirlenmektedir.

2.2. Tasarım Değişkenleri

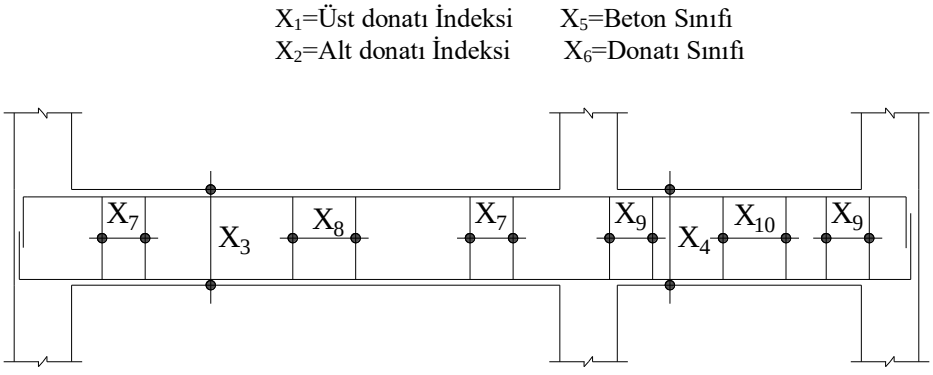
Bu çalışmada kullanılan farklı açıklık sayılarına sahip sürekli kirişler için tasarım değişkenleri üç açıklıklı kiriş için şekil 2.1'de, iki açıklıklı için şekil 2.2'de ve bir açıklıklı kiriş için şekil 2.3'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi üç açıklıklı kirişte toplam 13 tasarım değişkeni bulunmaktadır. İlk iki tasarım değişkeni alt ve üst donatı indeksini, üçüncü, dördüncü ve beşinci tasarım değişkenleri kiriş yüksekliklerini, altıncı ve yedinci tasarım değişkeni beton ve donatı sınıfını, kalan son altı tasarım değişkeni ise her bir kirişin sarılma ve orta bölgelerindeki etriye aralıklarını göstermektedir. Kiriş genişliği ve etriye çapı çözümlerde optimizasyon parametresi olarak, diğer bir deyişle sabit alınmıştır.

İki açıklıklı kirişte toplam 10 tasarım değişkeni bulunmaktadır. İlk iki tasarım değişkeni alt ve üst donatı indeksini, üçüncü ve dördüncü tasarım değişkenleri kiriş yüksekliklerini, beşinci ve altıncı tasarım değişkeni beton ve donatı sınıfını, kalan son dört tasarım değişkeni ise her bir kirişin sarılma ve orta bölgelerindeki etriye aralıklarını göstermektedir.

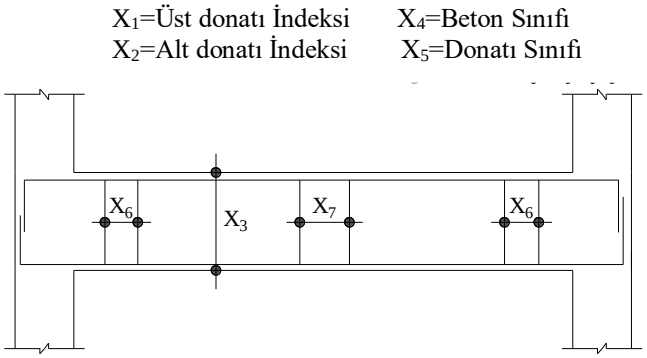
Bir açıklıklı kirişte toplam 7 tasarım değişkeni bulunmaktadır. İlk iki tasarım değişkeni alt ve üst donatı indeksini, üçüncü ve dördüncü tasarım değişkenleri kiriş yüksekliklerini, beşinci ve altıncı tasarım değişkeni beton ve donatı sınıfını, kalan son dört tasarım değişkeni ise her bir kirişin sarılma ve orta bölgelerindeki etriye aralıklarını göstermektedir.



Şekil 2.1. Üç Açıklıklı Betonarme Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri



Şekil 2.2. İki Açıklıklı Betonarme Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri

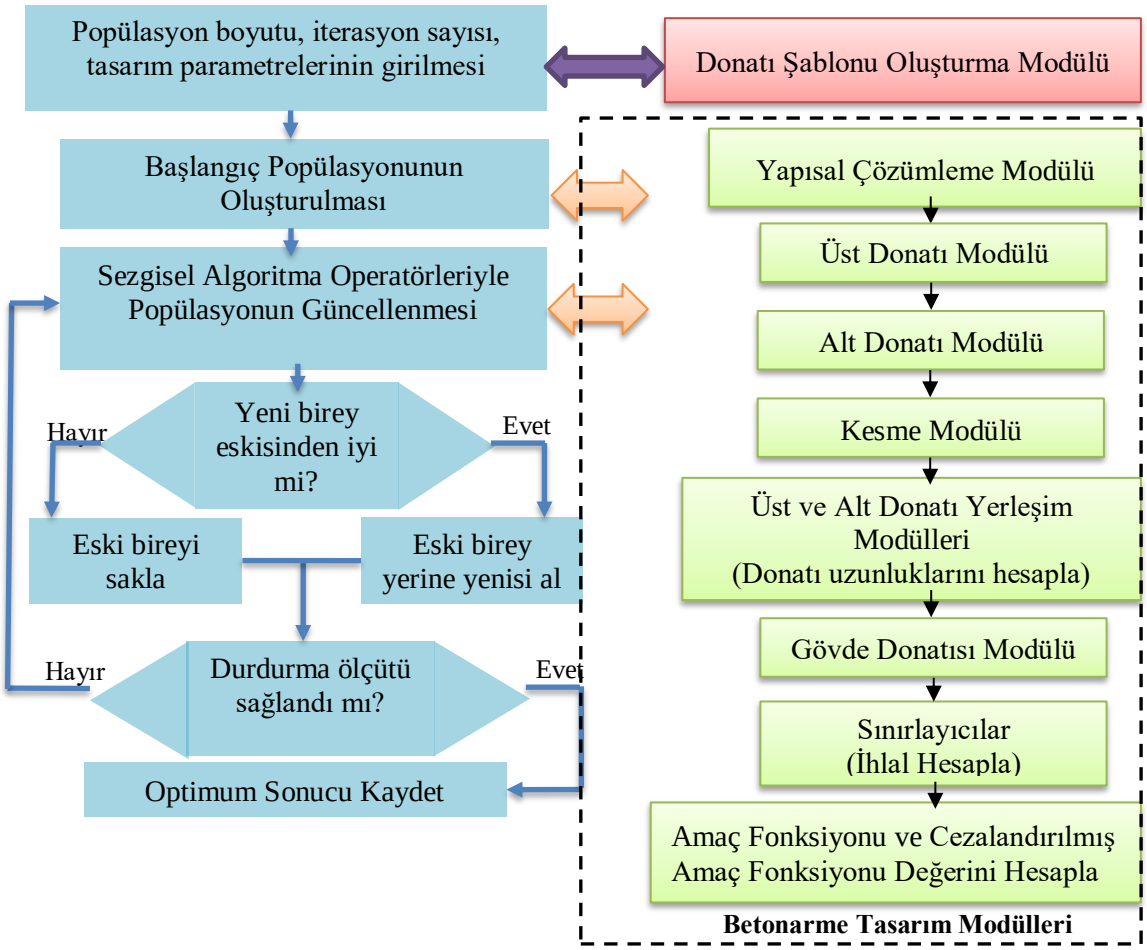


Şekil 2.3. Bir Açıklıklı Kiriş Probleminin Tasarım Değişkenleri

2.3. Optimum Tasarım Süreci

Sezgisel algoritmalar, bir problemi çözmek için doğa olaylarından ya da canlılardan esinlenerek oluşturulmuş algoritmalardır. Bu algoritmalar, problemin kesin çözümüne ulaşmayı garanti etmezken, birçok durumda bu çözüme ulaşabildikleri ya da çok yakın sonuçlar verdikleri bilinmektedir. Sezgisel algoritmaların günümüz mühendislik problemlerinin çözümünde tercih edilmelerinin en önemli nedeni problemlere kolay uygulanabilir olmalarıdır. (Karaboğa,2011).

Bu çalışmada sürekli kirişlerin optimum tasarımı için geliştirilen ve optimizasyon sürecini özetleyen akış diyagramı aşağıdaki Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

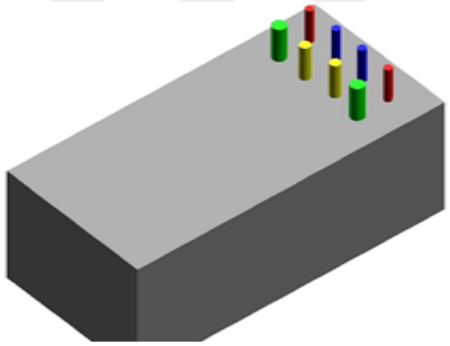


Şekil 2.4. Optimizasyon sürecine ilişkin akış diyagramı

Akış diyagramından görüleceği üzere sol kısım kullanılan sezgisel algoritmanın akış diyagramını içermektedir. Bu kısımda herhangi bir algoritma kullanılabilir. Sağ kısımda ise veri havuzlarını oluşturan, yapısal çözümlemeyi ve betonarme tasarımı gerçekleştiren modüller bulunmaktadır. Optimizasyon sürecine başlanmadan önce donatı şablonu oluşturma modülü çağırılarak donatı şablonları, diğer bir deyişle optimizasyon sürecinde kullanılacak donatı veri havuzu oluşturulmaktadır. Algoritma içinde amaç fonksiyonunun hesaplanması gerektiği durumda yapısal çözümleme ve betonarme tasarım modülleri çağırılmaktadır. Aşağıdaki alt bölümlerde bu modüller sırasıyla açıklanacaktır.

2.3.1.Donatı Şablonu Oluşturma

Çalışmada kullanılan dikdörtgen kesitli kirişte bir ya da iki sıra halinde donatı düzenlemeleri yapılmak suretiyle donatı şablonları oluşturulmaktadır. Donatı şablonlarının oluşturulması için istenen giriş parametreleri, kiriş genişliği, hangi çaplı donatıların kullanılacağı, net beton örtüsü, etriye çapı ve betonda kullanılan en büyük agrega boyutudur. Bu bilgiler kullanılarak girilen kiriş genişliğine sığabilecek donatılar kesite yerleştirilerek verilen donatı çaplarıyla tüm kombinasyonlar oluşturulmaktadır. Donatılar aşağıdaki Şekil 2.5'de görüldüğü gibi dört çap grubuna ayrılmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere N1 ve F1 1. sıradaki kenar donatıların sırasıyla sayı ve çapını, N2 ve F2 1. sıradaki ara donatıların sırasıyla sayı ve çapını, N3 ve F3 2. sıradaki kenar donatıların sırasıyla sayı ve çapını, N4 ve F4 ise 2. sıradaki ara donatıların sırasıyla sayı ve çapını göstermektedir.



Şekil 2.5. Şablonlarda donatıların gruplandırılması

Şablonlarda N1 sadece 2 değerini almaktadır. N2 ve N4 0 ile istenilen bir donatı sayısı arasında değer almakta, N3 ise 0 ya da 2 değerini almaktadır. Donatı çapları isteğe göre ayarlanabildiği gibi bu çalışmada 12 mm ile 24 mm arasında seçilmiştir. Bu bilgileri içeren veri havuzu modül tarafından oluşturulmaktadır. Donatı aralıklarının, D_{maks} maksimum agrega tane boyutunu, $Ø_{maks}$ maksimum boyuna donatı çapını göstermek üzere aşağıdaki koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$\text{donatılar arası mesafe} \leq \begin{cases} 25mm \\ \varnothing_{maks} \\ 4/3\,D_{\max} \end{cases} \tag{2.8}$$

Bu koşul denetlenerek, uygun olmayan donatı düzenleri şablonlardan çıkarılmaktadır. Ayrıca ikinci sıradaki donatı alanının birinci sıradakinden daha az ya da eşit olması denetlenerek sağlanmaktadır. Böylece donatı faydalı yüksekliğinden daha fazla yararlanılmış olmaktadır. Bununla birlikte ilk sıra tamamı ile dolmadan ikinci sıraya geçilerek donatı yerleştirilmesi modül tarafından engellenmiştir.

İndekslenerek bir havuz oluşturulan donatı şablonlarından algoritma, optimizasyon süreci içinde bir tane üst donatı şablonu, bir tanede alt donatı şablonu atamaktadır. Çalışmadaki parametrik çalışmaları gerçekleştirmek üzere, söz konu şablon oluşturma aracı kullanılarak farklı etriye çapı kiriş genişliklerine göre donatı şablonları oluşturularak veri havuzları hazırlamıştır. Bu veri havuzlarından bir şablon örneği özeti aşağıdaki Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Donatı Şablon Örneği

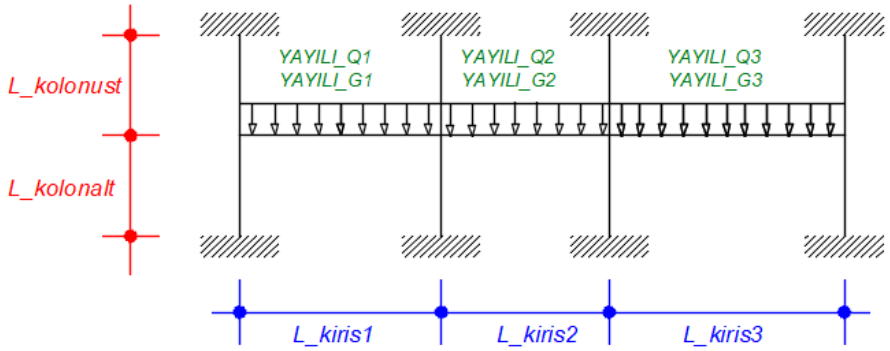
	N1	**F1**	**N2**	**F2**	**N3**	**F3**	**N4**	**F4**	**As**	
1	2	12	0	0	0	0	0	0	226.19467	212000000
2	2	14	0	0	0	0	0	0	307.87608	214000000
3	2	12	1	12	0	0	0	0	339.29201	2121120000
.									.	
.									.	
.									.	
.									.	
.									.	
7128	2	24	2	24	2	22	2	24	3474.60147	224224222224
7129	2	24	2	24	2	24	2	22	3474.60147	224224224222
7130	2	24	2	24	2	24	2	24	3619.11474	224224224224

Bu tabloda verilen şablonlardaki N1, F1, N2, F2, N3, F3, N4, F4 yukarıdaki şekil 2.5'de gösterilen donatı sayı ve çaplarını, As ise donatıların toplam enkesit alanını ifade etmektedir. En son sütundaki sayı ise N1'den F4'e kadar olan sayıların birleşimi ile oluşan her bir indeksin hazırlanan yazılım içinde kullanılan kimlik numarasını ifade etmektedir.

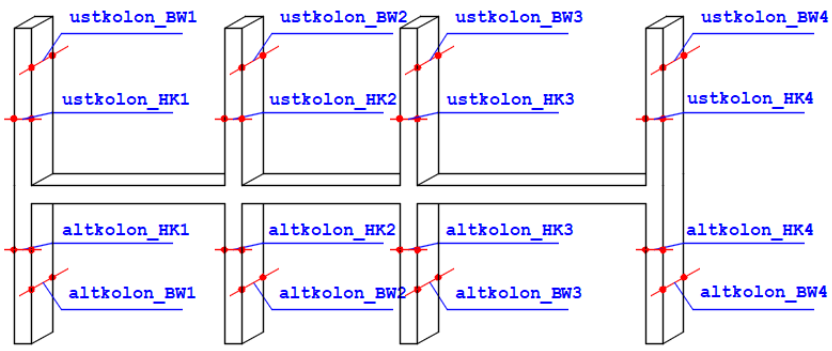
Bu süreçten sonra Şekil 2.4'deki akış diyagramına göre başlangıç popülasyonu oluşturulmakta, başlangıç popülasyonunda oluşturulan bireyler diğer bir deyişle çözüm adayları betonarme tasarım modüllerine gönderilmektedir. Betonarme tasarım modüllerinde ilk adım sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı yapısal çözümleme modülüdür. Bu modülden mesnet ve açıklıktaki mutlak değerce en büyük momentler alınmaktadır. Sonrasında üst ve alt donatı şablon seçim modülleri çalıştırılmaktadır.

2.3.2. Yapısal Çözümleme Modülü

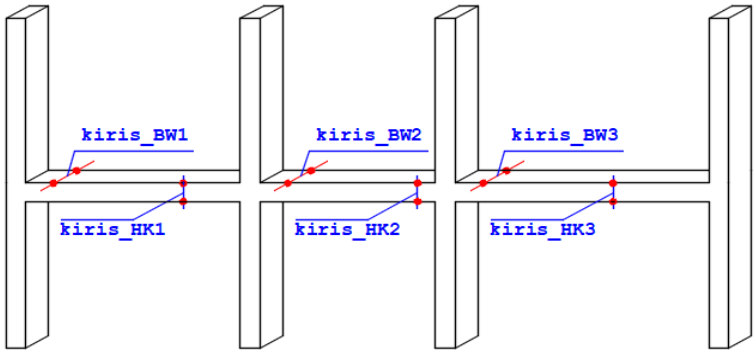
Bu modülde girilen kat çerçevesi bilgilerine göre taşıyıcı sistemin modeli oluşturulmaktadır: Sistemin modelinin oluşturulması için girilen optimizasyon parametreleri; kiriş üzerine etki eden sabit ve hareketli yük değerleri, kirişlere bağlanan alt ve üst kolon uzunlukları ve kesit boyutları ve kiriş genişlikleridir. Bu parametreler aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 2.6. Kiriş üzerine etki eden sabit ve hareketli yük değerleri, kirişlere bağlanan alt ve üst kolon uzunluklarını ifade eden parametreler



Şekil 2.7. Kirişlerin kesit boyutları ifade eden parametreler



Şekil 2.8. Kiriş genişliklerini ifade eden parametreler

Oluşturulan modelde eleman rijitlik matrisleri $[k_i]$ oluşturulmakta ardından genel eksen takımındaki rijitlik matrisleri oluşturularak sistem rijitlik matrisi hazırlanmaktadır. Genel eksen takımındaki i. eleman rijitlik matrisi, T dönüşüm matrisi olmak üzere,

$$[K_i] = [T_i]^{-1}.[k_i].[T_i] \tag{2.9}$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Yazılım tarafından giriş parametrelerine göre atanan düğüm noktası numaralarına göre genel eksen tanımındaki eleman rijitlik matrisleri birleştirilerek sistem rijitlik matrisi $[K]_S$ oluşturulmaktadır. Sistem yük vektörü girilen yük değerlerine göre, $\{F\}_{DN}$ düğüm noktalarına etki eden tekil yükler varsa bunlarda oluşan yük vektörü, $\{F\}_{ankastrelik}$ çubuk üzerindeki yüklemelerden oluşan anakastrelik uç momentlerinin düğüm noktalarına aktarılmasıyla elde edilen yük vektörü olmak üzere:

$$\{F\} = \{F\}_{DN} + \{F\}_{ankastrelik} \quad (2.10)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır. Tutulu serbestlikler mesnetlenme koşullarına göre belirlenmekte ve sistem rijitlik matrisi ile yük vektöründeki ilgili satır ve sütunlar çıkarılarak indirgenmiş sistem rijitlik matrisi ($[K]_S^*$) ve indirgenmiş yük vektörü ($\{F\}^*$) elde edilmektedir. Sistemin çözümü, $\{U\}^*$, sistem için belirlenen düğüm noktası yer değiştirme ve dönmeleri olmak üzere:

$$\{F\}^* = [K]_S^*.\{U\}^* \quad (2.11)$$

ilişkisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sistem için belirlenen düğüm noktası yer değiştirme ve dönmeleri kullanılarak, i inci elemanın MNT değerleri:

$$\{f_i\} = \{f_i\}_{ankastrelik} + [k_i][T_i]\{U\}^* \quad (2.12)$$

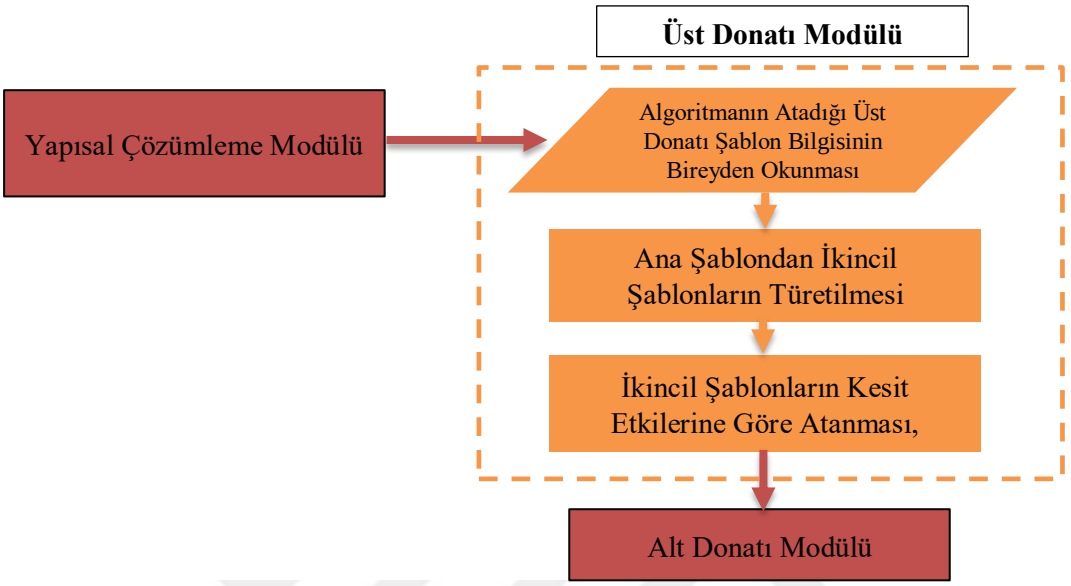
ifadesiyle belirlenmektedir. Böylece tasarımda kullanılacak kesit etkileri diğer tasarım modüllerine aktarılmaktadır.

2.3.3. Üst ve Alt Donatı Modülleri

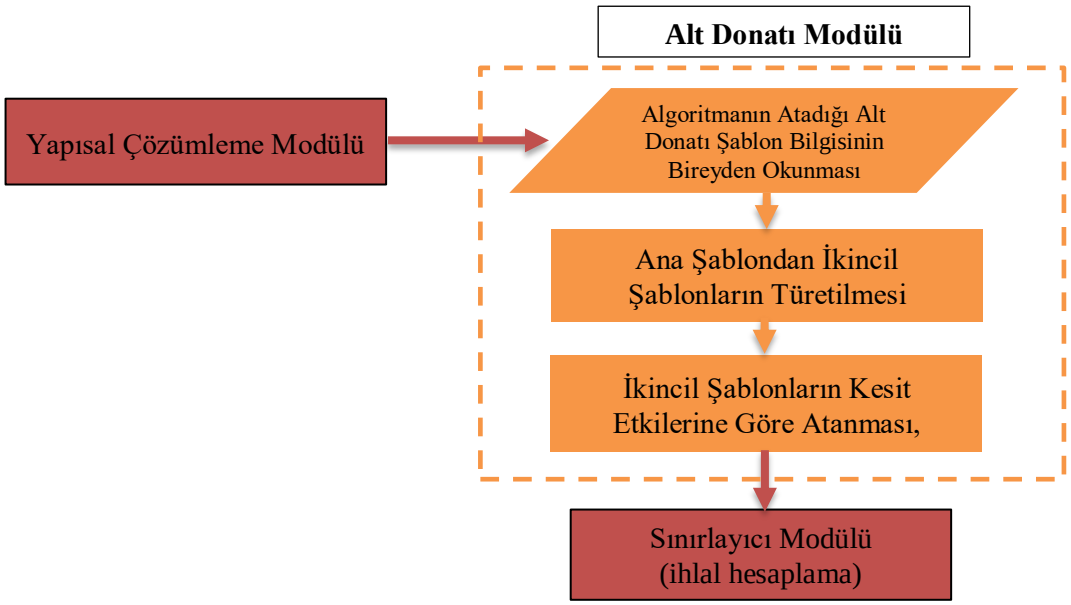
Ayrıntılı süreci Şekil 2.9'da verilen üst donatı şablonu modülünde algoritma tarafından üst donatıya ilişkin tasarım değişkeni olarak atanan donatı şablonunun ikincil şablonları türetilmektedir. İkincil şablon türetme işleminde ana şablondan donatı eksiltilerek ikincil şablonlar üretilmektedir. Üretilen ikincil şablonların kirişlerin giriş verilerine (kiriş boyutları, net beton örtüsü, etriye çapı) göre mesnetlerde taşıma güçleri belirlenmekte ve tasarım mesnet momentini karşılayabilen en az donatı alanına sahip ikincil donatı şablonları her bir mesnet bölgesine ayrı ayrı atanmaktadır. Kiriş açıklığındaki üst donatının seçiminde ise en büyük mesnet donatısının dörtte birinin kiriş boyunca devam etmesi gerekliliği dikkate alınarak bu bölgedeki üst donatı için ikincil şablon atanmaktadır.

Alt donatı modülünde de benzer işlemler yapılmaktadır. Alt donatı modülünün ayrıntılı süreci şekil 2.10'de verilmektedir. Algoritma tarafından seçilen alt ana donatı şablonunda benzer yöntemle ikincil donatı şablonları üretilmektedir. Üretilen ikincil

şablonlardan, sonlu elemanlar modülünden okunan tasarım açıklık momentini karşılayabilen en az donatı alanına sahip ikincil şablonlar her bir kirişin açıklığına ayrı ayrı atanmaktadır.



Şekil 2.9. Üst Donatı Modülünün Ayrıntısı



Şekil 2.10. Alt Donatı Modülünün Ayrıntısı

Burada üst ve alt donatılar için birer ana şablondan alt şablonların türetilmesi ve bunlar içinden atama yapılmasının nedeninin; donatıların sürekliliğinin sağlanabilmesi, uygulamada tam olarak kullanılabilir detayların oluşturulabilmesi ve gerçekte koyulması mümkün olmayan bir uygulamanın yapılmasının önlenmesi olduğu belirtilmelidir

2.3.4. Kesme Modülü

Kesme modülünde sırasıyla:

- Sarılma bölgesi ve orta bölge için tasarım kesme kuvvetlerinin belirlenmesi,
- Sarılma bölgesinde ve orta bölgede kesme kuvveti taşıma gücünün belirlenmesi,
- Sarılma bölgesinde ve orta bölgede etriye sayılarının belirlenmesi,
- Etriye uzunluğu ve toplam etriye ağırlığının belirlenmesi.

adımları izlenmektedir. Bunlar aşağıdaki başlıklar altında incelenmektedir.

2.3.4.1. Sarılma Bölgesi ve Orta Bölge İçin Tasarım Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Bilindiği gibi, kirişlerde mesnete yakın bölgelerde asal basınç gerilmelerinin kemerlenme etkisi göstermesi sonucu eğik çekme gerilmeleri bu bölgelerde oluşmamaktadır. Bunun sonucunda sarılma bölgesindeki tasarım kesme kuvveti, kirişe mesnetlenen kolon yüzeyinden faydalı yükseklik kadar mesafede hesaplanan kuvvet olarak ele alınmaktadır. Orta bölgedeki tasarım kesme kuvveti ise kolon yüzünden itibaren kiriş yüksekliğinin iki katı uzaklıktaki kesme kuvveti dikkate alınmaktadır. Kesme modülü, yapısal çözümleme modülünden mesnetteki kesme kuvveti değerlerini okuyarak bunlardan sağ ve sol mesnetler için sarılma bölgesinde ve orta bölgede dikkate alınması gereken tasarım kesme kuvvetlerini hesaplamaktadır.

2.3.4.2. Sarılma Bölgesinde ve Orta Bölgede Kesme Kuvveti Taşıma Gücünün Belirlenmesi

Kirişin sarılma bölgesinde ve orta bölgede kesme kuvveti taşıma gücünün hesaplanması amacıyla bu aşamada, toplam etriye en kesit alanı (A_{sw}); ϕ_w^2 etriye çapını, A_0 etriye kolunun en kesit alanını, n etriye kol sayısını göstermek üzere:

$$A_{sw} = n.A_0 = n\frac{\pi\phi_w^2}{4} \tag{2.13}$$

bağıntısıyla, sarılma bölgesinde ya da orta bölgede tasarım değişkenlerinden olan ve algoritma tarafından seçilen etriye aralığına (s) göre, etriyenin karşılayabileceği kesme kuvveti (V_w), d faydalı yüksekliği, f_{ywd} etriyenin tasarım akma dayanımını göstermek üzere:

$$V_w = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot d}{s} \tag{2.14}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Betonun karşılayacağı kesme kuvveti (V_c) ise; f_{ctd} betonun tasarım çekme dayanımı, b_w kiriş genişliği olmak ve betonun kesmede çatlama dayanımı,

$$V_{cr} = 0{,}65 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \tag{2.15}$$

ifadesiyle hesaplanmak üzere,

$$V_c = 0{,}80 \cdot V_{cr} \tag{2.16}$$

şeklinde belirlenmektedir. Buradan kirişin algoritma tarafından seçilen etriye aralıkları için sarılma bölgesinde ve orta bölgede kesme kuvveti taşıma gücü:

$$V_r = V_c + V_w \tag{2.17}$$

olarak belirlenmektedir.

2.3.4.3. Sarılma Bölgesinde ve Orta Bölgede Etriye Sayılarının Belirlenmesi

Kirişlere etki eden kesme kuvvetinin betonun kesme dayanımına katkısı ve kesme donatısı (etriye) ile karşılandığı bilinmektedir. Etriyeler kirişin kesme dayanımını artırmak suretiyle ani ve gevrek bir kırılma türü olan kesme kırılmalarını oluşmasını engellemektedir. Bununla birlikte etriyelerin etkin olarak kullanılabilmeleri için TS500(2000) ve TBDY(2018) deki koşullara uygun olarak

yerleştirilmeleri gerekmektedir. Yönetmeliklere göre sarılma bölgesinde etriyeler daha sık yerleştirilirken, orta bölgede daha seyrek aralıklarla yerleştirilebilmektedir.

Sarılma bölgesinin ve orta bölgenin uzunlukları dikkate alınarak, sarılma bölgesindeki etriye sayısı (n_s); h_k kiriş yüksekliği, s_s sarılma bölgesindeki donatı aralığı olmak üzere,

$$n_s = \text{YukarıYuvarla}\left(\frac{2h_k}{s_s}\right) + 1 \tag{2.18}$$

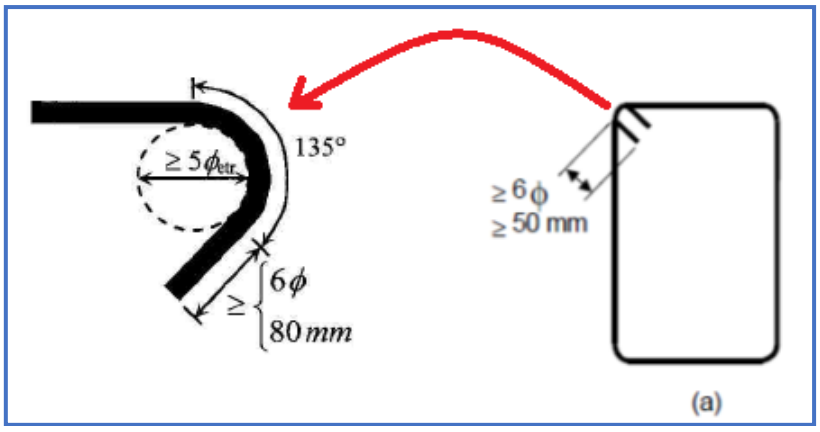
ifadesiyle, orta bölgedeki etriye sayısı (n_o) ise; L_{net} serbest kiriş açıklığı, s_o orta bölgede etriye aralığı olmak üzere;

$$n_o = \text{YukarıYuvarla}\left(\frac{L_{net}-4h_k}{s_o}\right) - 1 \tag{2.19}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

2.3.4.4. Etriye Uzunluğu ve Toplam Etriye Ağırlığının Belirlenmesi

Dikdörtgen kesitte kullanılan kanca ile kenetlenen iki kollu etriye ve kanca detayı aşağıdaki Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Etriye de ki kanca boyu gösterimi

Bu şekil dikkate alınarak her bir etriyenin uzunluğu (L_{etr}); c_{net} net beton örtüsünü göstermek üzere:

$$L_{etr} = 2.[(b_w - 2c_{net} - \phi_{etr}) + (h_k - 2c_{net} - \phi_{etr})] + \frac{\pi.(5.\phi_{etr})}{360} 135 + \max\left(\frac{6.\phi_{etr}}{50\ mm}\right) \quad (2.20)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Her bir kirişe yerleştirilen etriyenin ağırlığı; i kiriş numarasını göstermek üzere:

$$W_{etr}(i) = \sum \text{kirişteki etriye sayısı}.\, L_{etr}\,.\, A_{sw}.\, \gamma_{çelik} \quad (2.21)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Buradan toplam etriye ağırlığı W_s^{etriye}; n açıklık sayısı olmak üzere:

$$W_s^{etriye} = \sum_{i=1}^{n} W_{etr}(i) \quad (2.22)$$

şeklinde belirlenmektedir.

2.3.5. Üst ve Alt Donatı Yerleşim Modülü

Üst ve alt donatı yerleşim modülü, üst ve alt asal donatıların uzunlukların hesaplanmasını ve böylece kullanılan asal donatıların toplam ağırlığının bulunmasını sağlamaktadır. Donatı yerleşimleri, seçilen donatı şablonları dikkate alınarak türetilen ikincil şablonların bu yerleşim modülü içinde varolan donatı düzenleriyle eşleştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Eşleştirilen düzenler sayesinde donatıların uzunlukları ve böylece maliyet optimizasyonu için amaç fonksiyonunda kullanılmak üzere ağırlıkları belirlenebilmektedir. Bu eşleştirme seçim işleminde üst ve alt donatılar için dikkate alınan donatı düzenleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmektedir.

2.3.5.1. Üst Donatı Düzenlemeleri

Üst ve alt donatı yerleşim modülünün üst donatılarla ilgili kısmında, üst donatıların detayları oluşturularak, bu detaylara göre donatı uzunlukları belirlenmektedir. Modülün bu kısmında, yönetmeliklerden de bilindiği gibi temel kenetlenme boyu, tasarım değişkenleri olan betonun tasarım çekme dayanımı, donatının tasarım akma dayanımı ve donatının çapına göre:

$$l_b^* = 0{,}12 \cdot \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \emptyset \geq 20\emptyset \tag{2.23}$$

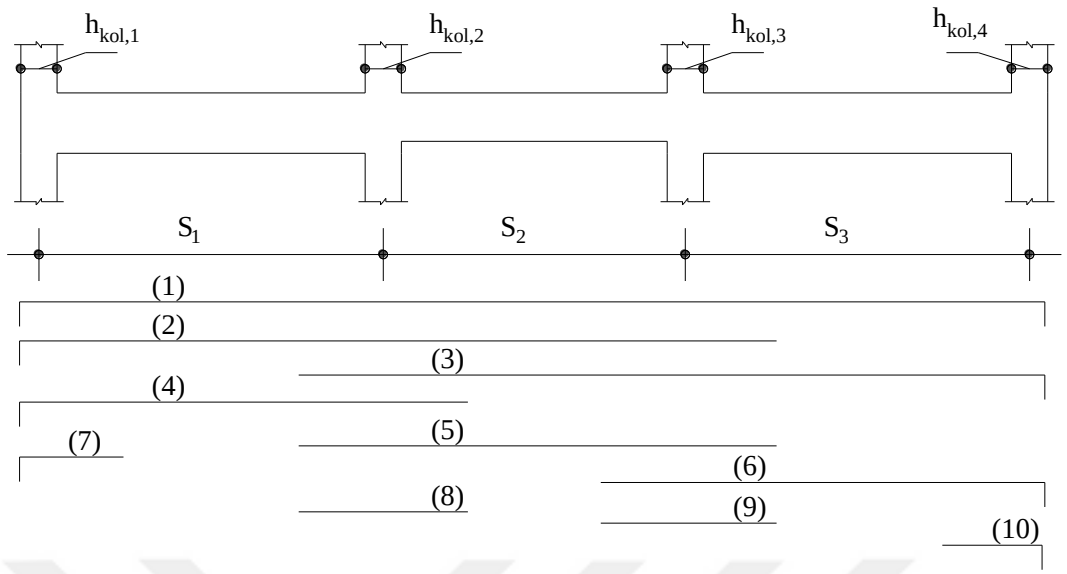
ifadesiyle hesaplanmaktadır. 90 derece kanca yapılan uç kısımlarda üst donatılar konum I'de olduğundan, konum I'e göre, kancayla birlikte donatı uzunlukları:

$$l_b = 1{,}05 \cdot l_b^* + 12\emptyset \tag{2.24}$$

olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca uzunluğu 12 m'yi aşan donatılarda her 12 m için bir bindirme boyu da eklenmektedir. Bindirme boyu; aynı kesitte eklenen donatının toplam donatıya oranıyla ilgili $\alpha_1$katsayısı 1.5 olarak kabul edilerek, konum I için:

$$l_o = 1{,}4 \cdot \alpha_1 \cdot l_b^* \tag{2.25}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Modülde kirişlerin mesnet bölgelerinde ve açıklık ortasında üst donatı olarak seçilen ikincil indeks atamaları dikkate alınarak komşu kontrol noktalarında devam eden ve etmeyen donatılar tek tek araştırılmaktadır. Buna göre donatıların uzunlukları, aşağıda numaralandırılmış donatı düzenlerinden hangisine uyuyorsa, bu donatının boy fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır. Üç açıklıklı kirişte Şekil 2.12'den de görüldüğü gibi 10 farklı donatı detayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.12. Üç Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi

Bu 10 donatının uzunluğu aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla verilmektedir. Açıklıklar S_i, kolon genişlikleri $h_{kol,i}$ ile gösterilmek ve yukarıdaki Şekil 2.12'de görülmek üzere, birinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,1} = \sum_{i=1}^{3} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,4}}{2} + 2 \cdot l_b + l_0 \tag{2.26}$$

ifadesiyle, ikinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,2} = \sum_{i=1}^{2} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} + \frac{h_{kol,3}}{2} + \frac{S_3 - \sum_{i=3}^{4}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \tag{2.27}$$

ifadesiyle, üçüncü donatı uzunluğu:

$$L_{üst,3} = \sum_{i=2}^{3} S_i - \frac{h_{kol,4}}{2} + \frac{h_{kol,2}}{2} + \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \tag{2.28}$$

ifadesiyle, dördüncü donatının uzunluğu:

$$L_{üst,4} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} + \frac{h_{kol,2}}{2} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.29)$$

ifadesiyle, beşinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,5} = S_2 + \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right) + \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + \frac{S_3 - \sum_{i=3}^{4}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_0 \quad (2.30)$$

ifadesiyle, altıncı donatının uzunluğu:

$$L_{üst,6} = S_3 - \frac{h_{kol,4}}{2} + \frac{h_{kol,3}}{2} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.31)$$

ifadesiyle, yedinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,7} = \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.32)$$

ifadesiyle, sekizinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,8} = h_{kol,2} + \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_0 \quad (2.33)$$

ifadesiyle, dokuzuncu donatının uzunluğu:

$$L_{üst,9} = h_{kol,3} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + \frac{S_3 - \sum_{i=3}^{4}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_0 \quad (2.34)$$

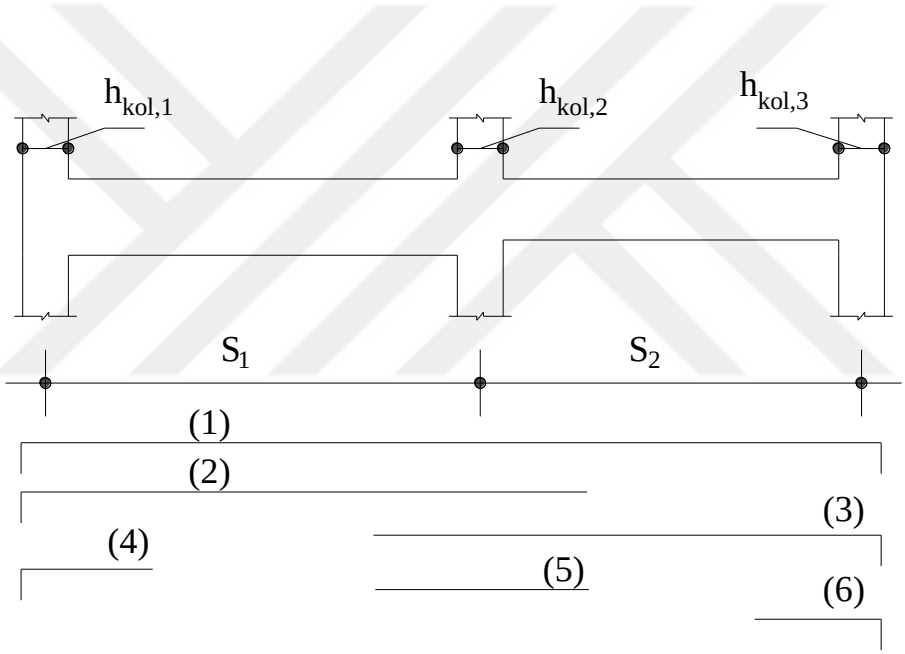
ifadesiyle, onuncu donatının uzunluğu:

$$L_{üst,10} = \frac{S_3 - \sum_{i=3}^{4}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.35)$$

İfadesiyle hesaplanmaktadır. Burada kenetlenme ve bindirme boylarının her bir donatının çapı dikkate alınarak ayrı ayrı hesaplandığı, bindirme boyunun (l_0) gerektiği durumlarda eklendiği belirtilmelidir. Donatı düzeni içinde verilen 10 farklı donatıdan, yerleştirilmesi modül tarafından uygun görülenler dikkate alınarak, toplam üst donatı ağırlığı;

$$W_s^{ust} = \gamma_s \sum_{j=1}^{10} L_{üst,j} \cdot A_{s,üst,j} \tag{2.36}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. İki açıklıklı kirişte Şekil 2.13'den de görüldüğü gibi 6 farklı donatı detayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.13. İki Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi

Bu 6 donatının uzunluğu aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla verilmektedir. Birinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,1} = \sum_{i=1}^{2} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,3}}{2} + 2 \cdot l_b + l_0 \tag{2.37}$$

ifadesiyle, ikinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,2} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} + \frac{h_{kol,2}}{2} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.38)$$

ifadesiyle, üçüncü donatı uzunluğu:

$$L_{üst,3} = S_2 - \frac{h_{kol,3}}{2} + \frac{h_{kol,2}}{2} + \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.39)$$

ifadesiyle, dördüncü donatının uzunluğu:

$$L_{üst,4} = \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.40)$$

ifadesiyle, beşinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,5} = h_{kol,2} + \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_0 \quad (2.41)$$

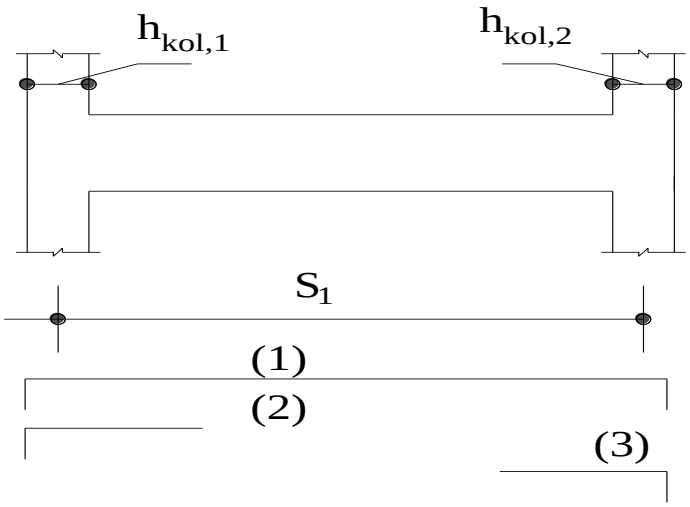
ifadesiyle, altıncı donatının uzunluğu:

$$L_{üst,6} = \frac{S_2 - \sum_{i=2}^{3}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \quad (2.42)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Donatı düzeni içinde verilen 6 farklı donatıdan, yerleştirilmesi modül tarafından uygun görülenler dikkate alınarak, toplam üst donatı ağırlığı;

$$W_s^{ust} = \gamma_s \sum_{j=1}^{6} L_{üst,j} \cdot A_{s,üst,j} \quad (2.43)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bir açıklıklı kirişte Şekil 2.14'den de görüldüğü gibi 6 farklı donatı detayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.14. Bir Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi

Bu 6 donatının uzunluğu aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla verilmektedir. Birinci donatının uzunluğu:

$$L_{üst,1} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + 2 \cdot l_b + l_0 \tag{2.44}$$

ifadesiyle, ikinci ve üçüncü donatının uzunluğu:

$$L_{üst,2} = L_3 = \frac{S_1 - \sum_{i=1}^{2}\left(\frac{h_{kol,i}}{2}\right)}{4} + l_b + l_0 \tag{2.45}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Donatı düzeni içinde verilen 3 farklı donatıdan, yerleştirilmesi modül tarafından uygun görülenler dikkate alınarak, toplam üst donatı ağırlığı;

$$W_s^{ust} = \gamma_s \sum_{j=1}^{3} L_{üst,j} \cdot A_{s,üst,j} \tag{2.46}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

2.3.5.2. Alt Donatı Düzenlemeleri

Üst ve alt donatı yerleşim modülünün alt donatılarla ilgili kısmında, alt donatı detayları oluşturulmakta ve bu detaylara göre donatı uzunlukları belirlenmektedir. 90 derece kanca yapılan uç kısımlarda alt donatılar konum II'de olduğundan, konum II'ye göre, kancayla birlikte donatı uzunlukları:

$$l_b^k = 0{,}75 \cdot l_b^* + 12\emptyset \tag{2.47}$$

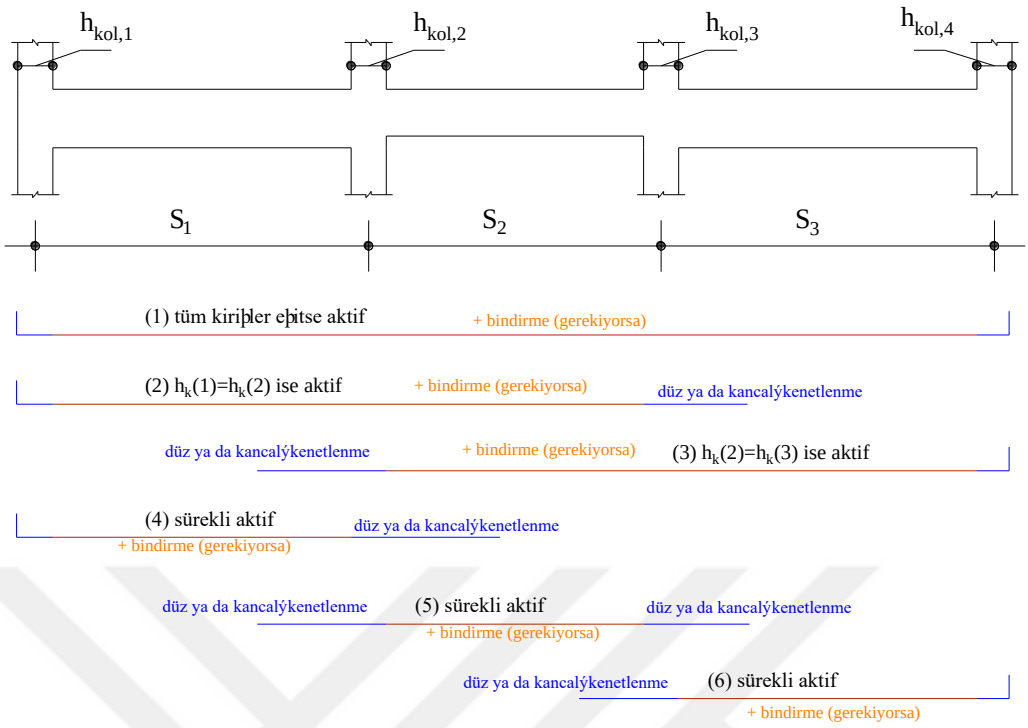
olarak hesaplanmaktadır. Düz kenetlenmede ise,

$$l_b^d \geq \begin{cases} l_b^* \\ 50\emptyset \end{cases} \tag{2.48}$$

koşulu uygulanmaktadır. Ayrıca uzunluğu 12 m'yi aşan donatılarda he 12 m için bir bindirme boyu da eklenmektedir. Bindirme boyu; aynı kesitte eklenen donatının toplam donatıya oranıyla ilgili $\alpha_1$katsayısı 1.5 olarak kabul edilerek, konum II için:

$$l_o = 1{,}0 \cdot \alpha_1 \cdot l_b^* \tag{2.49}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Modülde kirişlerin açıklık ortasında alt donatısı olarak seçilen ikincil indeks atamaları dikkate alınarak, komşu açıklıklarda devam eden donatılar ve devam etmeyen donatılar tek tek araştırılmaktadır. Buna göre donatıların uzunlukları, aşağıda numaralandırılmış donatı düzenlerinden hangisine uyuyorsa, bu donatının boy fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır. Üç açıklıklı kirişte Şekil 2.15'den de görüldüğü gibi 6 farklı donatı detayı kullanılabilmektedir. Ancak kiriş yüksekliklerinin eşit ya da farklı olma durumlarına göre bazı donatılar aktif olmakta ya da olmamaktadır. Ayrıca kiriş yüksekliklerinin farklı olması durumunda derinliği fazla olan kirişte kancalı kenetlenme, derinliği az olan kirişte ise düz kenetlenme kullanılmaktadır. Kullanıldığında, bazı donatılar



Şekil 2.15. Üç Açıklıklı Betonarme Kirişin Alt Donatı Düzenlemesi

Bu 6 donatının uzunluğu aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla verilmektedir. Açıklıklar S_i, kolon genişlikleri $h_{kol,i}$ ile gösterilmek ve yukarıdaki Şekil 2.12'de görülmek üzere, birinci donatının uzunluğu:

$$L_{alt,1} = \sum_{i=1}^{3} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,4}}{2} + 2 \cdot l_b^k + l_0 \tag{2.50}$$

ifadesiyle, ikinci donatının uzunluğu:

$$L_{alt,2} = \sum_{i=1}^{2} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,3}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.51}$$

ifadesiyle, üçüncü donatı uzunluğu:

$$L_{alt,3} = \sum_{i=2}^{3} S_i - \frac{h_{kol,4}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.52}$$

ifadesiyle, dördüncü donatının uzunluğu:

$$L_{alt,4} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.53}$$

ifadesiyle, beşinci donatının uzunluğu:

$$L_{alt,5} = S_2 - \frac{h_{kol,2}}{2} - \frac{h_{kol,3}}{2} + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.54}$$

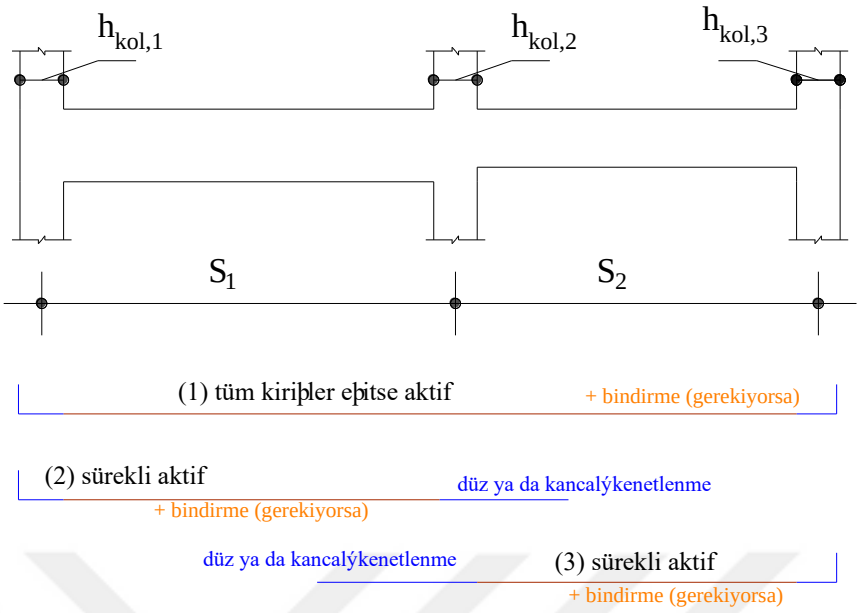
ifadesiyle, altıncı donatının uzunluğu:

$$L_{alt,6} = S_3 - \frac{h_{kol,4}}{2} - \frac{h_{kol,3}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.55}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada kenetlenme ve bindirme boylarının her bir donatının çapı dikkate alınarak ayrı ayrı hesaplandığı, bindirme boyunun (l_0) gerektiği durumlarda eklendiği belirtilmelidir. Donatı düzeni içinde verilen 6 farklı donatıdan, yerleştirilmesi modül tarafından uygun görülenler dikkate alınarak, toplam alt donatı ağırlığı;

$$W_s^{alt} = \gamma_s \sum_{i=1}^{6} L_{alt,i} \cdot A_{s,alt,j} \tag{2.56}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. İki açıklıklı kirişte Şekil 2.16'dan da görüldüğü gibi 6 farklı donatı detayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.16. İki Açıklıklı Betonarme Kirişin Alt Donatı Düzenlemesi

Bu 3 donatının uzunluğu aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla verilmektedir. Birinci donatının uzunluğu:

$$L_{alt,1} = \sum_{i=1}^{2} S_i - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,3}}{2} + 2 \cdot l_b^k + l_0 \tag{2.57}$$

ifadesiyle, ikinci donatının uzunluğu:

$$L_{alt,2} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.58}$$

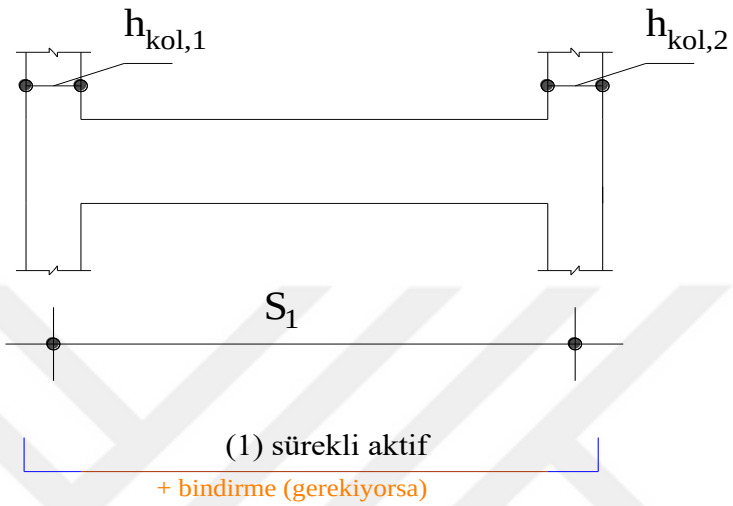
ifadesiyle, üçüncü donatı uzunluğu:

$$L_{alt,3} = S_2 - \frac{h_{kol,3}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + l_b^k + \begin{Bmatrix} l_b^d \\ \text{ya da} \\ l_b^k \end{Bmatrix} + l_0 \tag{2.59}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Donatı düzeni içinde verilen 3 farklı donatıdan, yerleştirilmesi modül tarafından uygun görülenler dikkate alınarak, toplam alt donatı ağırlığı;

$$W_s^{alt} = \gamma_s \sum_{i=1}^{3} L_{alt,i} \cdot A_{s,alt,j} \quad (2.60)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bir açıklıklı kirişte Şekil 2.17'den de görüldüğü gibi tek donatı detayı kullanılabilmektedir.



Şekil 2.17. Bir Açıklıklı Betonarme Kirişin Üst Donatı Düzenlemesi

Bu donatının uzunluğu:

$$L_{alt,1} = S_1 - \frac{h_{kol,1}}{2} - \frac{h_{kol,2}}{2} + 2 \cdot l_b^k + l_0 \quad (2.61)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu durumda toplam alt donatı ağırlığı;

$$W_s^{alt} = \gamma_s \left(L_{alt,1} \cdot A_{s,alt,1} \right) \quad (2.62)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Böylece hesaplanan alt ve üst donatı ağırlıklarından toplam asal donatı ağırlığı:

$$W_s^{asal} = W_s^{alt} + W_s^{üst} \quad (2.63)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

2.3.6. Gövde Donatısı Modülü

Gövde donatısı modülünde; kiriş yüksekliği 60cm'yi aşması durumunda ya da kiriş yüksekliği, kiriş açıklığının dörtte birinden büyük olması durumunda kirişe gövde donatısı yerleştirilmektedir. Modülde her bir kiriş için ayrı ayrı işlem yapılmaktadır. Yönetmelikler uyarınca söz konusu kirişe gövde donatısı yerleştirmeye karar verildiğinde TS500 (2000)'de bulunan;

$$A_{sl} = 0{,}001 \cdot b_w \cdot d \tag{2.64}$$

ve TBDY(2018)'de bulunan toplam boyuna gövde donatısı alanını, sağ veya sol mesnet kesitlerinde üst ve alt boyuna donatı alanları toplamının en büyüğünün %30'undan daha az olmayacağı koşuluna göre sağ ve sol mesnet kesitlerindeki boyuna donatılar $\left(A_{s,mesnet}^{sağ}, A_{s,mesnet}^{sol}\right)$ okunarak,

$$A_{sl} = 0{,}30 \cdot \text{maks}\left(A_{s,mesnet}^{sağ}, A_{s,mesnet}^{sol}\right) \tag{2.65}$$

bağıntılarından hesaplanan gövde donatısı alanlarının (A_{sl}) en büyüğü dikkate alınmaktadır. Bu alana göre kiriş yüksekliğinin 60 ile 90 cm arasında olması durumunda karşılıklı yüzlere birer, 90 ile 120 cm arasında olması durumunda ise ikişer donatı yerleştirilmektedir. Kiriş yüksekliğine göre belirlenen donatı sayısı ve yukarıdaki bağıntılara göre belirlenen gövde donatısı alanı kullanılarak, bu alanı sağlayan en küçük gövde donatısı çapı $\left(\emptyset_{govde}\right)$ seçilmektedir. Donatı çapı yönetmelik gereği 12 mm'den büyük olması da sağlanmaktadır. Her bir açıklık için (gövde donatısı gerekli açıklıklarda) gövde donatısı uzunluğu $\left(L_{i,govde}\right)$ kiriş serbest açıklığına eşit alınmaktadır.

2.3.7. Sınırlayıcılar

Optimizasyon sürecinde, tasarımların dayanım ve dayanıklılık bakımından gerekli sınır durumları ve yönetmelik koşullarını sağlaması için minimum maliyetli tasarım aranırken, çeşitli sınırlayıcılar tanımlanarak bunları sağlayıp sağlamadığı denetlenmelidir. Daha önce de belirtildiği gibi sınırlayıcıların amaç fonksiyonuna işlenmesinde sabit ceza

katsayısı kullanılmıştır. Sınırlayıcılar normalize edilerek mertebe olarak önem derecelerinin benzer olması sağlanmıştır. Bu bölümde çalışmada dikkate alınan yönetmelik koşullarının denetlenmesini sağlayan sınırlayıcılar özetlenmektedir. Bilindiği gibi yönetmeliklerimizde kiriş gövde genişliğinin, kiriş yüksekliği ile kirişin birleştiği kolonun veya perdenin kirişe dik genişliğinin toplamını geçmemesi gerekmektedir. Bu koşulun denetlenmesi için, her bir kiriş kolon birleşiminde: b_w kiriş genişliğini, h_k kiriş yüksekliğini, b_x^{kolon} ise kirişin birleştiği kolonun kirişe dik boyutu olmak üzere:

$$g_1(x) = \frac{b_w}{h_k + b_x^{kolon}} - 1 \leq 0 \tag{2.66}$$

koşulu kullanılmaktadır. Açıklık sayısı N olmak üzere toplam 2N adet denetim yapılmaktadır. Kiriş yükseklikleri yönetmelik gereği:

$$h_k \leq \begin{cases} 3.5 \cdot b_w \\ l_n/4 \end{cases} \tag{2.67}$$

koşullarını sağlamalıdır. Kiriş derinliğinin, kiriş genişliğinin üç buçuk katından küçük olması koşulu veri üst sınırıyla kontrol edilebilse de veri hazırlanırken bu kuralın dikkate alınmama ihtimaline karşı hatalı tasarıma yol açmamak üzere bu koşul da denetlenmektedir. Bu koşul her açıklıkta

$$g_2(x) = \frac{h_k}{3.5 \cdot b_w} - 1 - 1 \leq 0 \tag{2.68}$$

ifadesiyle denetlenmektedir. Açıklık sayısı N olmak üzere toplam N adet denetim yapılmaktadır.

Kiriş yüksekliğinin, açıklığın dörtte birinde büyük olmaması durumunda gövde donatısı gerekmektedir. Bu koşul gövde donatısı hesaplama modülü içerisinde denetlenmekte, eğer bu koşul sağlanamıyorsa gerekli miktarda gövde donatısı hesaplanarak yerleştirilmektedir. Ayrıca kiriş gövde yüksekliğinin 600 mm'yi aşması durumunda yine gövde donatısı hesaplama modülü işleyerek gerekli gövde donatısı yerleştirilmekte, hesaplanan gövde donatısı miktarı da amaç fonksiyonuna eklenmektedir.

Problemde sehim hesabı gerektirmeyen kiriş yüksekliklerinin seçilmesi tercih edilmiştir. Bunun için:

$$h_k \geq \begin{cases} l/12 & \textit{kenar açıklıkta} \\ l/15 & \textit{iç açıklıkta} \end{cases} \tag{2.69}$$

denetimi yapılmalıdır. Bu denetim açıklığın kenar ya da içte olmasına göre:

$$g_3(x) = \frac{l/12 \text{ ya da } l/15}{h_k} - 1 \leq 0 \tag{2.70}$$

sınırlayıcısıyla her bir açıklıkta denetlenmektedir. Açıklık sayısı N olmak üzere toplam N adet denetim yapılmaktadır.

Kesitlerde minimum ve maksimum donatı oranı denetimleri, minimum donatı oranı:

$$\rho_{min} = 0.80 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \tag{2.71}$$

maksimum donatı oranı:

$$\rho_{maks} = \begin{cases} 0.85\rho_b \\ 0.02 \end{cases} \tag{2.72}$$

ve ρ_b dengeli donatı oranını göstermek üzere, açıklık ve mesnet kesitlerinde;

$$g_4(x) = \frac{\rho_{min}}{\rho} - 1 \leq 0 \tag{2.73}$$

$$g_5(x) = \frac{\rho}{\rho_{maks}} - 1 \leq 0 \tag{2.74}$$

sınırlayıcılarıyla denetlenmektedir. Açıklık sayısı N olmak üzere dördüncü ve beşinci sınırlayıcılar için toplam 6N adet denetim yapılmaktadır.

Deprem yönetmeliği gereği, mesnetlerdeki alt donatı aynı mesnetteki üst donatının deprem tasarım sınıfı (DTS) 1, 1a, 2 veya 2a olan yapılarda %50'sinden, diğer yapılarda ise %30'undan daha az alamamaktadır. Buna göre bu koşul, giriş parametresi olarak girilen

deprem tasarım sınıfı (DTS) bilgisi dikkate alınarak, As: mesnet^üst mesnetteki üst donatı alanını, As;menet_alt ise mesnetteki alt donatı alanını göstermek üzere:

$$g_6(x) = \frac{(0.3 \text{ ya da } 0.5)A^{\text{üst}}_{\text{smesnet}}}{A^{\text{alt}}_{\text{smesnet}}} - 1 \leq 0 \qquad (2.75)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Bu sınırlayıcı için açıklık sayısı N olmak üzere toplam N+1 adet denetim yapılmaktadır. En büyük mesnet üst donatısının dörtte biri tüm kiriş boyunca sürekli olarak devam ettirilmesi kuralı üst donatı modülünde denetlenerek bu koşulu sağlayan ve en az donatı gerektiren donatı şablonu seçilmektedir.

Algoritma tarafından seçilen şablon numarasına göre oluşturulan ikincil şablonların karşılayabileceği momentler, tasarım momentlerini karşılamazsa en yüksek donatı alanlı şablon atanarak iterasyonun devamlılığı sağlanmaktadır. Durum böyle olunca üst ve alt donatı modülleri tarafından yerleştirilen donatıların karşılayacağı taşıma gücü momentleri, tasarım momentinden büyük olmayabilmektedir. Bu nedenle moment kapasitelerinin yeterli olup olmadığının sınırlayıcılarla denetlenmesi gerekmektedir. Taşıma gücü momentlerinin (Mr), tasarım momentlerinden (Md) büyük olması durumu her bir mesnette:

$$g_7(x) = \frac{M_{d(i)}}{M_{r(i)}} - 1 \leq 0 \qquad i = 1..2 \text{ (mesnet no)} \qquad (2.76)$$

sınırlayıcısıyla, her bir açıklıkta ise:

$$g_8(x) = \frac{M_{d(i)}}{M_{r(i)}} - 1 \leq 0 \qquad i = 1. \text{ (açıklık no)} \qquad (2.77)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Yedi nolu sınırlayıcısı için her bir mesnette denetim yapıldığından, N açıklık sayısı olmak üzere toplam 2N adet, sekizinci sınırlayıcı için her bir açıklıkta denetim yapıldığından N adet kontrol yapılmaktadır. Eğer açıklıkta pozitif moment oluşmuyorsa kirişin açıklık üstünde bulunan donatılara göre hesaplanmış olan taşıma gücü momenti dikkate alınarak denetim yapılmaktadır. Böylece açıklıkta ters işaretli moment oluşması durumunda hatalı çözüm yapılmasının önüne geçilmiştir.

Etriyelerin:

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq 0{,}3\,\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}}\,b_w \tag{2.78}$$

koşulunu sağlaması gerekmektedir. Her bir kiriş için hem sarılma hem de orta bölgede

$$g_9(x) = 0{,}3\,\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}}\,b_w\,\frac{s}{A_{sw}} - 1 \leq 0 \tag{2.79}$$

sınırlayıcısı kullanılarak denetim yapılmaktadır. Hem sarılma hem de orta bölgede denetim yapıldığından, bu sınırlayıcıyla 2N adet kontrol gerçekleştirilmektedir.

Etriye aralık denetimi için sarılma bölgelerinde:

$$g_{10}(x) = \frac{s_k}{min\begin{pmatrix} \frac{h_k}{4} \\ 8\emptyset_{min} \\ 150\ mm \end{pmatrix}} - 1 \leq 0 \tag{2.80}$$

Koşulu, orta bölgede ise, s_o orta bölgedeki etriye aralığını, d faydalı yüksekliği göstermek üzere:

$$V_d \leq 3V_{cr} \quad \Longrightarrow \quad g_{11}(x) = \frac{s_o}{min\begin{pmatrix} \frac{d}{2} \\ 350 \end{pmatrix}} - 1 \leq 0 \tag{2.81}$$

ya da

$$V_d > 3V_{cr} \quad \Longrightarrow \quad g_{11}(x) = \frac{s_o}{min\begin{pmatrix} \frac{d}{4} \\ 350 \end{pmatrix}} - 1 \leq 0 \tag{2.82}$$

koşulları kullanılmaktadır.

Kirişin kesme kuvveti taşıma gücünün, sarılma ve orta bölgedeki tasarım kesme kuvvetlerinden büyük olmasının sağlanması için:

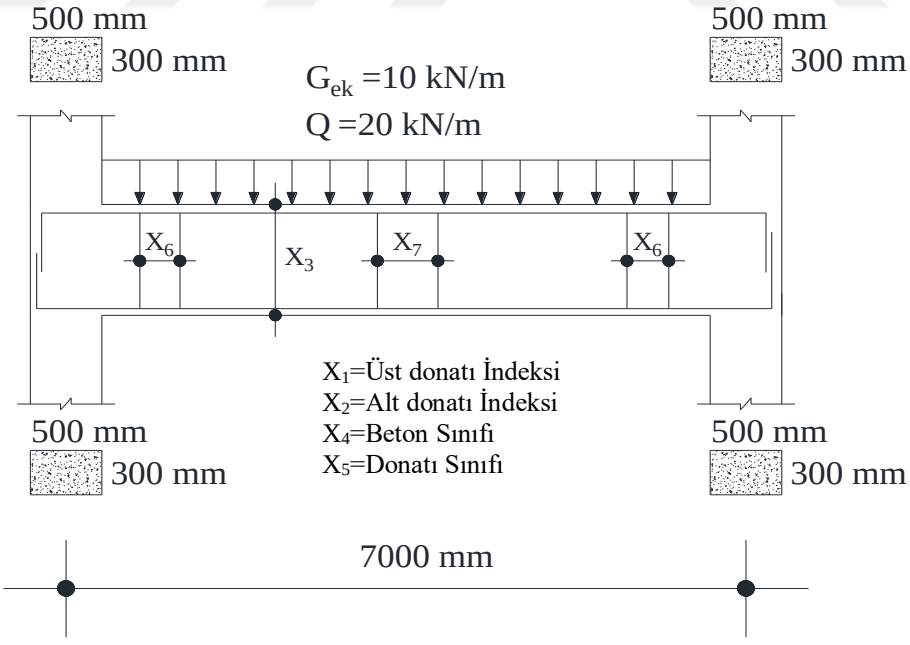
$$g_{12} = \frac{V_d}{V_r} - 1 \leq 0 \tag{2.83}$$

koşulu her bir kirişin sarılma ve orta bölgesinde denetlenmektedir. Bu durumda N açıklık sayısı için 2N adet denetim yapılmaktadır. Farklı açıklık sayıları için denetim sayısı değiştiğinden üç açıklıklı kiriş için 61, iki açıklıklı kiriş için 41 ve bir açıklıklı kiriş için 22 sınırlayıcı kontrolü gerçekleştirilmektedir.

2.4. Sayısal Uygulamalar

2.4.1.Bir Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu

Bir açıklıklı betonarme kirişin optimum tasarımında kullanılan tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Bu sayısal uygulamada, yükleme durumu şekilde verilen bir açıklıklı kirişin minimum maliyetle optimum tasarımını gerçekleştirmek üzere ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları kullanılmış, bu algoritmalardan elde edilen optimum çözümler sunularak algoritmaların başarımlarının karşılaştırılması için çeşitli istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.18. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen bir açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri

Bir açıklıklı betonarme kiriş problemi için belirlenen tasarım değişkenlerinin üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları Tablo 2.3'te, problemin şekil üzerinde gösterilmeyen tasarım parametreleri ise Tablo 2.4'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Sayısal uygulama 1'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları

Sembol	Tanım	Alt limit	Üst limit	Artım	Alabileceği değer sayısı
X_1	Üst donatı İndeksi	1	7130	1	7130
X_2	Alt donatı İndeksi	1	7130	1	7130
X_3	Birinci açıklıkta kiriş yüksekliği	250	1050	50	17
X_4	Beton sınıfı	C25, C30, C35, C40, C45, C50			6
X_5	Donatı sınıfı	B420C, B500C			2
X_6	Birinci kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_7	Birinci kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31

Tablo 2.4. Bir açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri

Tasarım Parametresi	**Değeri**	**Birimi**
Beton birim ağırlığı	25	kN/m^3
Kat yükseklikleri	3000	mm
Etriye çapı	8	mm
Deprem tasarım sınıfı	1a	-
En büyük agrega çapı	16	mm
Kiriş genişliği	250	mm
Net beton örtüsü	25	mm

Optimum tasarımda kullanılan algoritmalar maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı ile sonlandırılmıştır. Tek açıklıklı betonarme kiriş optimizasyonu için maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı (AFDS) tasarım değişkeni sayısının 1000, 5000 ve 10000 katı kadar (1000D, 5000D ve 10000D) alınarak, farklı sonlandırma

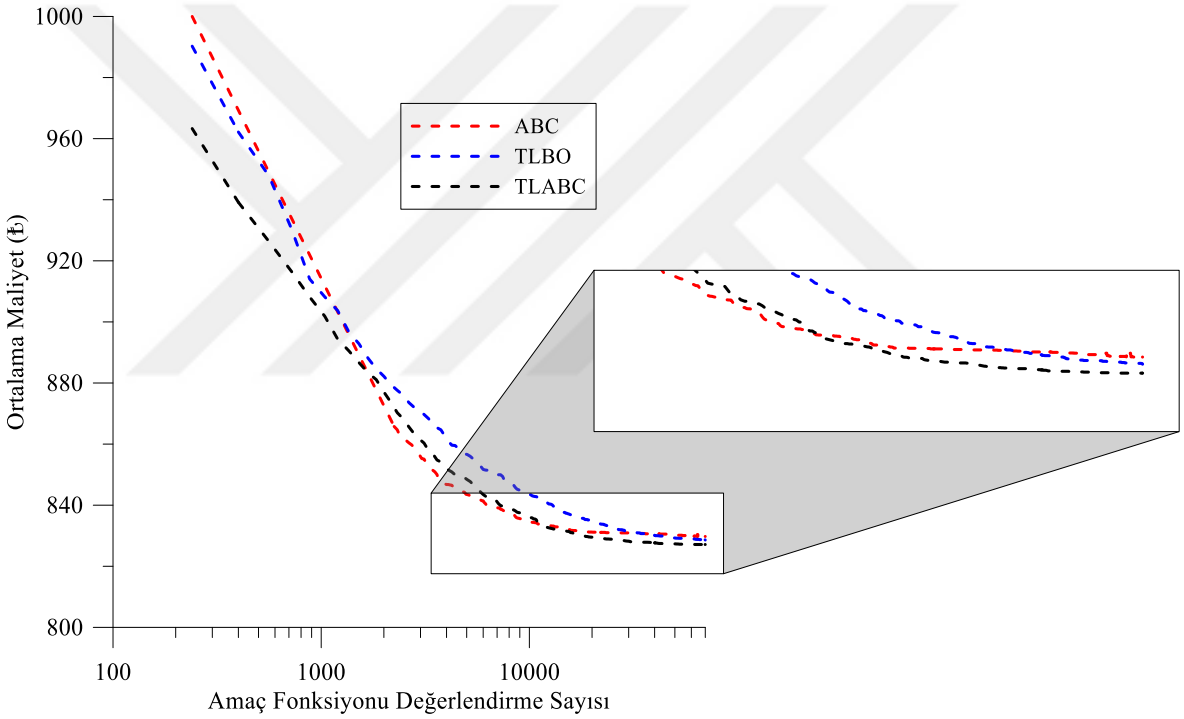
kriterlerinde algoritmaların davranışları incelenmiştir. Kullanılan üç farklı algoritmanın (ABC, TLBO ve TLABC) her biri ve her bir AFDS için 51'er koşum gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların koşumlarından elde edilen en iyi, ortalama ve en kötü maliyet değerleri ile, başarım oranları Tablo 2.5'de verilmektedir. Başarım oranı, algoritmaların yapılan koşumlarda hangi oranda elde edilen minimum maliyete ulaşıldığını ifade etmektedir.

Tablo 2.5. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla bir açıklıklı kiriş için farklı AFDS'lerde elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları

Maksimum AFDS*	**İstatistik Veri**	**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000 D	En iyi maliyet (₺)	828.55	828.56	828.55
	Ortalama maliyet (₺)	838.42	838.42	839.69
	Ortanca maliyet (₺)	838.79	838.79	839.01
	En kötü maliyet (₺)	853.41	853.41	853.02
	Maliyetlerin std sapması (₺)	5.52	5.52	5.68
	Başarım oranı	-	-	-
5000 D	En iyi maliyet (₺)	827.14	827.14	827.14
	Ortalama maliyet (₺)	830.76	830.36	828.17
	Ortanca maliyet (₺)	829.02	829.02	828.56
	En kötü maliyet (₺)	836.04	844.98	831.35
	Maliyetlerin std sapması (₺)	3.47	3.63	1.10
	Başarım oranı	23.5%	% 31.4	% 47.1
10000 D	En iyi maliyet (₺)	827.14	827.14	827.14
	Ortalama maliyet (₺)	829.77	828.60	827.14
	Ortanca maliyet (₺)	829.02	827.14	827.14
	En kötü maliyet (₺)	836.04	838.75	827.14
	Maliyetlerin std sapması (₺)	3.00	2.60	0.00
	Başarım oranı	% 33.3	% 62.7	% 100.0
*AFDS: Amaç Fonksiyonu Değerlendirme Sayısı				

ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarından elde edilen maliyetlerin istatistiksel verileri incelendiğinde, maksimum AFDS'nin 1000D olduğu durumda algoritmaların hiçbirinin elde edilen en iyi maliyet değerine ulaşamadığı görülmektedir. AFDS'nin 5000D olduğu durumda tüm algoritmaların en iyi maliyet değerine ulaşabildiği, yapılan koşumlardan elde edilen ortalama maliyetin ve maliyetin standart sapmasının en düşük olduğu algoritmanın TLABC algoritması olduğu, bununla birlikte başarım oranının en

büyük olduğu algoritma da TLABC algoritması olduğu anlaşılmaktadır. Maksimum AFDS'nin 10000D olduğu durumda da tüm algoritmaların en iyi maliyet değerine ulaşabildiği, yapılan koşumlardan elde edilen ortalama maliyetin ve maliyetin standart sapmasının en düşük olduğu algoritmanın TLABC algoritması olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda TLABC algoritmasının başarımı %100 çıktığı görülmektedir. Bu durum yeterli fırsatın verilmesi durumunda TLABC algoritmasının performansının diğer algoritmaların üzerine çıktığı, bu problem için diğer algoritmalara göre optimum değeri bulmada daha etkin olduğu kanısına varılabilmektedir. Algoritmalar için maksimum AFDS'nin 10000D olduğu duruma göre çizilen ortalama yakınsama grafiği Şekil 2.15'de verilmektedir.



Şekil 2.19. Bir açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği

Şekil 2.19'de görüldüğü üzere ABC algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha hızlı yakınsadığı, ilerleyen amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarında ortalama maliyet değerlerinin birbirine yaklaştığı, ancak Tablo 2.5'den görüldüğü gibi en düşük ortalama maliyete TLABC algoritmasının ulaştığı görülmektedir. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının başarımlarını sıralamak üzere, algoritmalardan elde edilen optimum bulgulara nonparametrik bir istatistiksel test olan Friedman testi (Derrac vd., 2011; García

vd., 2010; Trawinski vd., 2012) uygulanmıştır. Bu problem için elde edilen test skorları ve bu skorlara göre yapılan başarım sıralaması Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 1 için Friedman testi skor ve skor sıralamaları

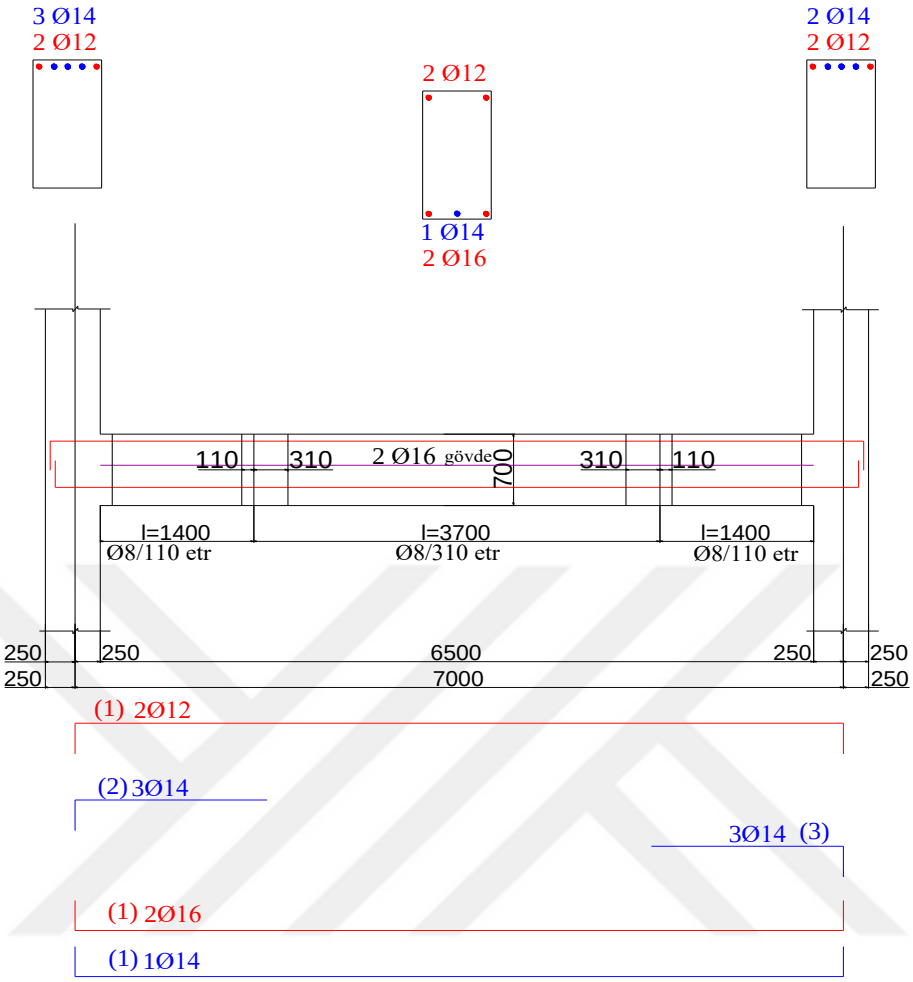
Maksimum AFDS		**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000D	Skor	1.9314	1.9314	2.1373
	Sıralama	1	1	2
5000D	Skor	2.2745	2.1275	1.598
	Sıralama	3	2	1
10000D	Skor	2.4804	2.0392	1.4804
	Sıralama	3	2	1
Ortalama Skor		2.2288	1.8497	1.5360
Ortalamaya Göre Sıralama		3	2	1

Tablo 2.6'daki skor ve sıralamalar incelendiğinde maksimum AFDS'nin 1000D olduğu durumda ABC e TLBO algoritmaları TLABC algoritmasından daha iyi skor ve sıralamaya sahip olduğu, ancak maksimum AFDS'nin 5000D ve 10000D olduğu durumlarda TLABC algoritmasının ilk sıraya yükseldiği görülmektedir. Bu durum TLABC algoritmasının amaç fonksiyonu değerlendirme sayısının ya da iterasyonun çok kısıtlı tutulması durumunda beklenen başarımı göstermediği, yeterli fırsatın verilmesi durumunda ise başarımının diğer algoritmaları geride bıraktığı görülmektedir. Ortalama skorlara göre bir sıralama yapıldığında da en iyi başarıma sahip algoritmanın TLABC algoritması olduğu görülmektedir. TLABC algoritmasının ardından sırasıyla TLBO ve ABC algoritmaları gelmektedir. Bir açıklıklı kiriş optimizasyonunda, en yüksek başarım oranına sahip TLABC algoritmasından elde edilen optimum çözüm için belirlenen, optimum tasarım değişkenleri Tablo 2.7'de verilmektedir.

Tablo 2.7. Bir Açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen optimum değerler

Tanım	**Optimum Değer**
Kiriş yüksekliği	700 mm
Beton Sınıfı	C25
Donatı Sınıfı	B500C
Açıklıktaki çekme donatısı alanı	402.12 mm^2
Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0.0034
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	688.01 mm^2
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	688.01 mm^2
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0.0042
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0.0042
Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110
Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/310
Gövde donatısı	2Φ16
Gövde donatısı alanı (varsa)	201.06 mm^2
Kullanılan toplam donatı ağırlığı	113.71 kg
Kullanılan beton hacmi	1,27 m^3
Donatı maliyeti	505.34 ₺
Beton maliyeti	321.79 ₺
Toplam maliyet	827.14 ₺

Tablo 2.7'de yer alan optimum değerlere göre bir açıklıklı kiriş detayı şekil 2.20'da gösterilmektedir.

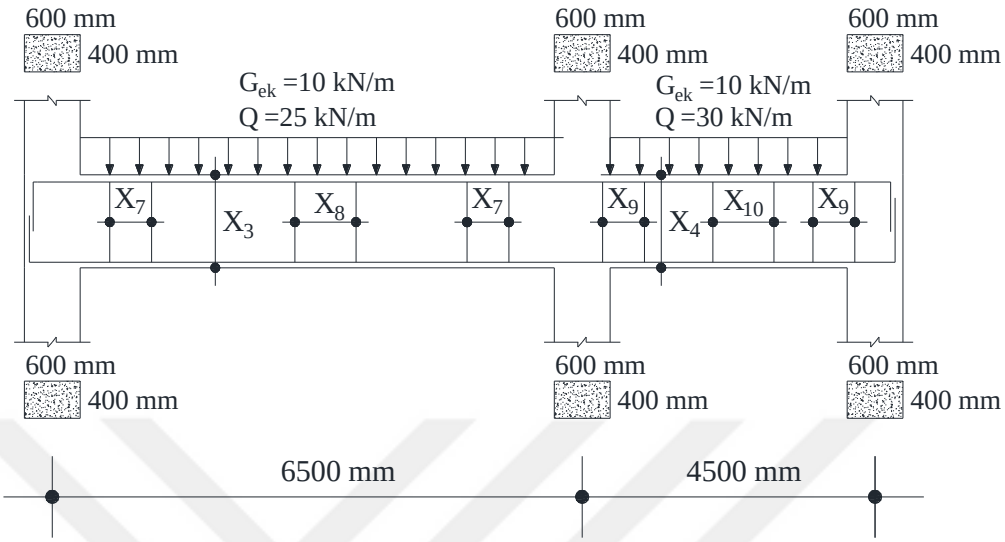


Şekil 2.20. Bir açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı

2.4.2.İki Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu

İki açıklıklı betonarme kirişin optimum tasarımında kullanılan tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Bu sayısal uygulamada, yükleme durumu şekilde verilen iki açıklıklı kirişin minimum maliyetle optimum tasarımını gerçekleştirmek üzere ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları kullanılmış, bu algoritmalardan elde edilen optimum çözümler sunularak algoritmaların başarımlarının karşılaştırılması için çeşitli istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.

X_1=Üst donatı İndeksi X_5=Beton Sınıfı
X_2=Alt donatı İndeksi X_6=Donatı Sınıfı



Şekil 2.21. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen iki açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri

İki açıklıklı betonarme sürekli kiriş problemi için üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları Tablo 2.8'de, problemin şekil üzerinde gösterilmeyen tasarım parametreleri ise Tablo 2.9'de verilmektedir.

Tablo 2.8. Sayısal uygulama 2'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları

Sembol	Tanım	Alt limit	Üst limit	Artım	Alabileceği değer sayısı
X_1	Üst donatı İndeksi	1	11656	1	11656
X_2	Alt Donatı İndeksi	1	11656	1	11656
X_3	Birinci açıklıkta kiriş yüksekliği	300	1050	50	16
X_4	İkinci açıklıkta kiriş yüksekliği	300	1050	50	16
X_5	Beton Sınıfı	C25, C30, C35, C40, C45, C50			6
X_6	Donatı Sınıfı	B420C, B500C			2
X_7	Birinci kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_8	Birinci kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31
X_9	İkinci kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_{10}	İkinci kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31

Tablo 2.9. İki açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri

Tasarım Parametresi	**Değeri**	**Birimi**
Beton birim ağırlığı	25	kN/m^3
Kat yükseklikleri	3000	mm
Etriye çapı	8	mm
Deprem tasarım sınıfı	1a	-
En büyük agrega çapı	16	mm
Kiriş genişliği	300	mm
Net beton örtüsü	25	mm

Optimum tasarımda kullanılan algoritmalar maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı ile sonlandırılmıştır. İki açıklıklı betonarme kiriş optimizasyonu için maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı (AFDS) tasarım değişkeni sayısının 1000, 5000 ve 10000 katı kadar (1000D, 5000D ve 10000D) alınarak, farklı sonlandırma

kriterlerinde algoritmaların davranışları incelenmiştir. Kullanılan üç farklı algoritmanın (ABC, TLBO ve TLABC) her biri ve her bir AFDS için 51'er koşum gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların koşumlarından elde edilen en iyi, ortalama ve en kötü maliyet değerleri ile, başarım oranları Tablo 2.10'da verilmektedir.

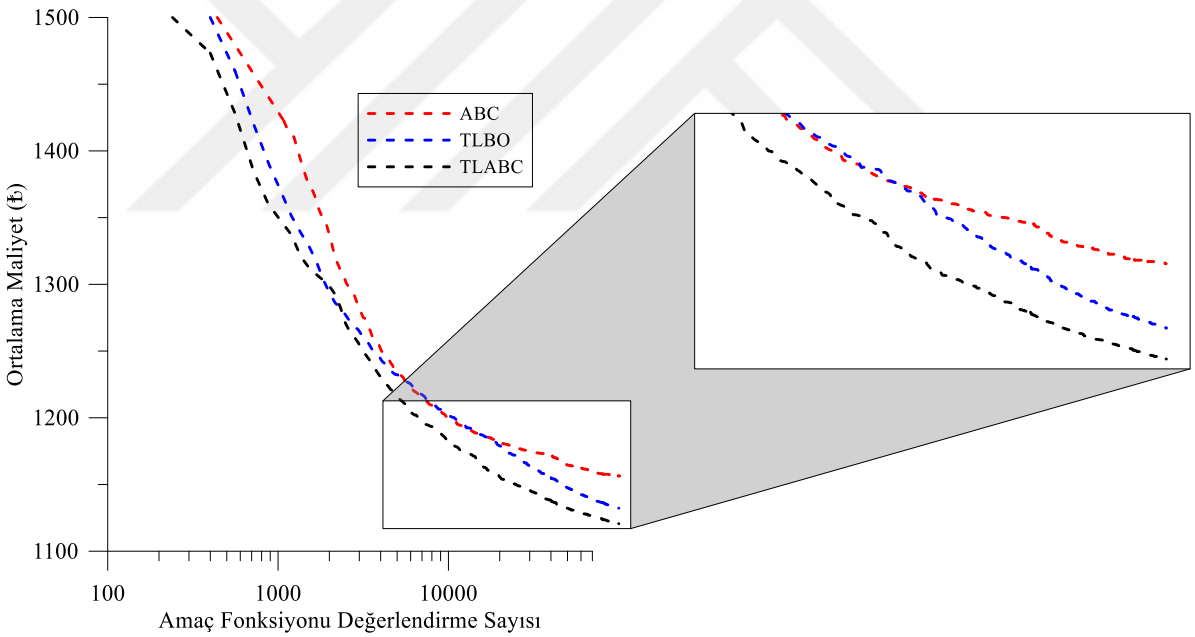
Tablo 2.10. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla bir açıklıklı kiriş için farklı AFDS'lerde elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları

Maksimum AFDS*	**İstatistik Veri**	**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000 D	En iyi maliyet (₺)	1157.69	1146.90	1138.02
	Ortalama maliyet (₺)	1206.96	1203.76	1180.92
	Ortanca maliyet (₺)	1208.98	1207.65	1178.60
	En kötü maliyet (₺)	1241.12	1234.35	1217.18
	Maliyetlerin std sapması (₺)	17.92	19.39	16.48
	Başarım oranı	-	-	-
5000 D	En iyi maliyet (₺)	1133.38	1120.81	1116.74
	Ortalama maliyet (₺)	1174.45	1143.21	1131.38
	Ortanca maliyet (₺)	1177.00	1138.28	1128.88
	En kötü maliyet (₺)	1210.12	1187.93	1175.23
	Maliyetlerin std sapması (₺)	17.91	16.94	10.26
	Başarım oranı	-	-	2.0%
10000 D	En iyi maliyet (₺)	1125.25	1116.74	1116.74
	Ortalama maliyet (₺)	1156.42	1132.28	1120.60
	Ortanca maliyet (₺)	1153.26	1125.25	1118.96
	En kötü maliyet (₺)	1185.86	1176.74	1153.59
	Maliyetlerin std sapması (₺)	17.62	17.10	6.15
	Başarım oranı	-	3.9%	41.2%

*AFDS: Amaç Fonksiyonu Değerlendirme Sayısı

ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarından elde edilen maliyetlerin istatistiksel verileri incelendiğinde, maksimum AFDS'nin 1000D olduğu durumda algoritmaların hiçbirinin elde edilen en iyi maliyet değerine ulaşamadığı görülmektedir. AFDS'nin 5000D olduğu durumda sadece TLABC algoritmasının elde edilebilen en iyi maliyet değerine

(1116,74₺) ulaşabildiği, yapılan koşumlardan elde edilen ortalama maliyetin ve maliyetin standart sapmasının en düşük olduğu algoritmanın TLABC algoritması olduğu, bununla birlikte başarım oranının en büyük olduğu algoritma da TLABC algoritması olduğu anlaşılmaktadır. Maksimum AFDS'nin 10000D olduğu durumda da TLBO ve TLABC algoritmalarının elde edilebilen en iyi maliyet değerine ulaşabildiği, yapılan koşumlardan elde edilen ortalama maliyetin ve maliyetin standart sapmasının en düşük olduğu algoritmanın TLABC algoritması olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda TLABC algoritması en yüksek başarıma sahip algoritma olduğu ve başarımının %41,2 çıktığı görülmektedir. Bu durum TLABC algoritmasının, bu problem için diğer algoritmalara göre optimum değeri bulmada daha etkin olduğu kanısına varılabilmektedir. Algoritmalar için maksimum AFDS'nin 10000D olduğu duruma göre çizilen ortalama yakınsama grafiği Şekil 2.22'de verilmektedir.



Şekil 2.22. İki açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği

Şekil 2.22'de görüldüğü üzere TLABC algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha hızlı yakınsadığı, ilerleyen amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarında ortalama maliyet değerlerinin birbirinden uzaklaştığı, grafikten ve Tablo 2.10'dan da görüldüğü gibi en düşük ortalama maliyete TLABC algoritmasının ulaştığı görülmektedir. Bu problem için elde edilen Friedman test skorları ve bu skorlara göre yapılan başarım sıralaması Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 2 için Friedman testi skor ve skor sıralamaları

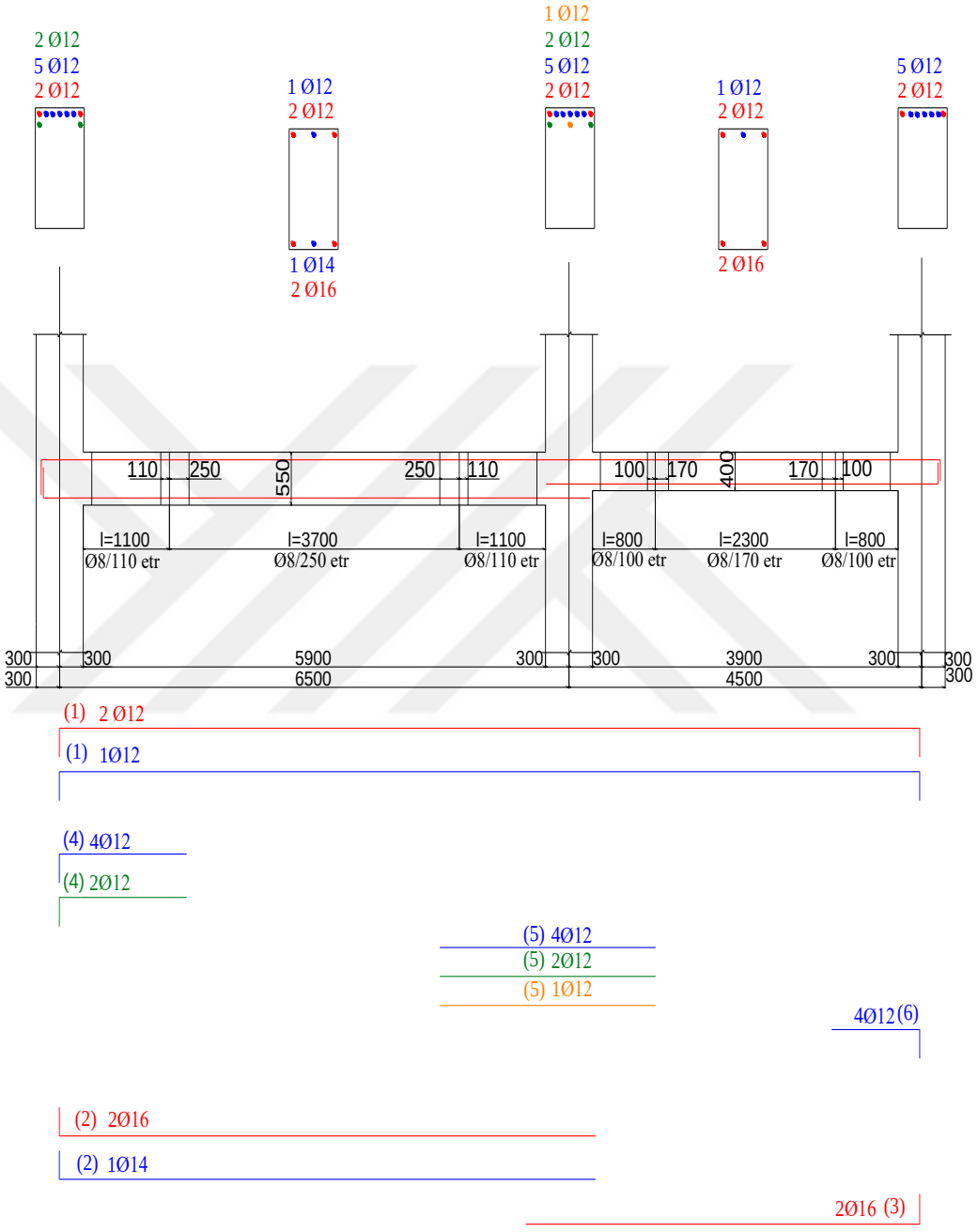
Maksimum AFDS		**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000D	Skor	2.3922	2.2549	1.3529
	Sıralama	3	2	1
5000D	Skor	2.8431	1.9608	1.1961
	Sıralama	3	2	1
10000D	Skor	2.8529	2.0000	1.1471
	Sıralama	3	2	1
Ortalama Skor		2.6961	2.0359	1.1160
Ortalamaya Göre Sıralama		3	2	1

Tablo 2.11'deki skor ve sıralamalar incelendiğinde maksimum AFDS'nin 1000D olduğu durumda TLABC algoritmasının en iyi skora sahip olduğu, bu algoritmayı sırasıyla TLBO ve ABC algoritmalarının takip ettiği, benzer şekilde maksimum AFDS'nin 5000D ve 10000D olduğu durumlarda da TLABC algoritmasının ilk sırada olduğu ve algoritma sıralamasının değişmediği görülmektedir. Ortalama skorlara göre bir sıralama yapıldığında da en iyi başarıma sahip algoritmanın TLABC algoritması olduğu görülmektedir. TLABC algoritmasının ardından sırasıyla TLBO ve ABC algoritmaları gelmektedir. İki açıklıklı kiriş optimizasyonunda, en yüksek başarım oranına sahip TLABC algoritmasından elde edilen optimum çözüm için belirlenen, optimum tasarım değişkenleri Tablo 2.12'de verilmektedir.

Tablo 2.12. İki açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen optimum değerler

Değişken Tanımı	**Optimum Değer**
1. Kirişin yüksekliği	550 mm
2. Kirişin yüksekliği	400 mm
Beton Sınıfı	C25
Donatı Sınıfı	B500C
1. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı alanı	427.26 mm^2
1. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0,0036
2. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı alanı	452.39 mm2
2. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0,0037
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	1017,88 mm^2
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	1130,97 mm^2
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0067
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0075
2. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	1130,97 mm^2
2. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	791,68 mm^2
2. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0108
2. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0073
1.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110
1. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/250
2.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110
2. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/170
1. kirişin Gövde donatısı (varsa)	–
1. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	–
2. kirişin Gövde donatısı (varsa)	–
2. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	–
Kullanılan toplam donatı ağırlığı (ton)	154.38 kg
Kullanılan beton hacmi	1,70 m^3
Donatı maliyeti	686,08 ₺
Beton maliyeti	430,66 ₺
Toplam maliyet	1116,74 ₺

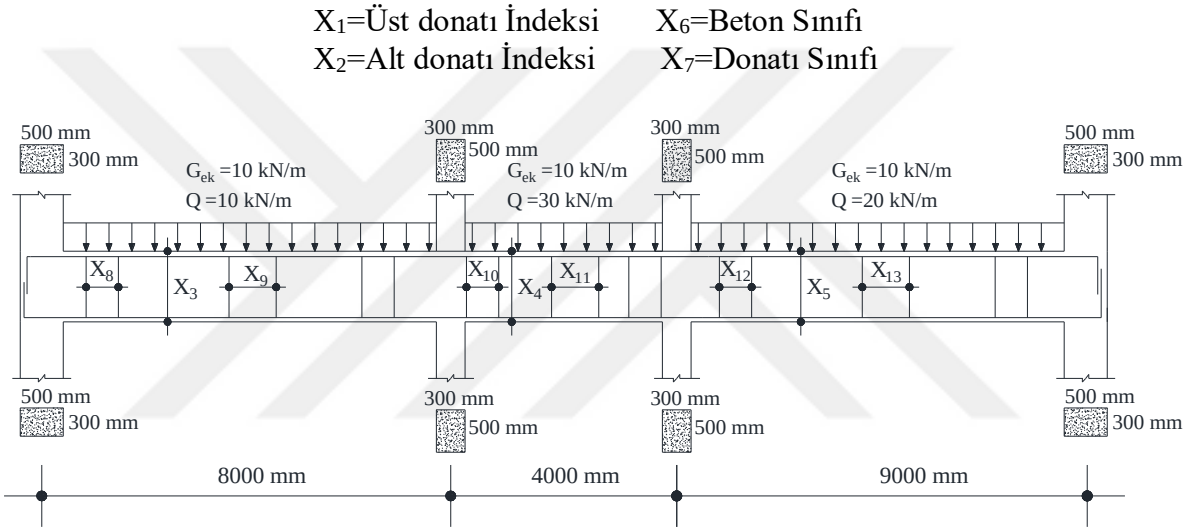
Tablo 2.12'de yer alan optimum değerlere göre çizilen bir açıklıklı kiriş detayı şekil 2.23'da gösterilmektedir.



Şekil 2.23. İki açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı

2.4.3.Üç Açıklıklı Betonarme Kiriş Optimizasyonu

Üç açıklıklı betonarme kirişin optimum tasarımında kullanılan tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri Şekil 2.24'de gösterilmiştir. Bu sayısal uygulamada, yükleme durumu şekilde verilen üç açıklıklı kirişin minimum maliyetle optimum tasarımını gerçekleştirmek üzere ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları kullanılmış, bu algoritmalardan elde edilen optimum çözümler sunularak algoritmaların başarımlarının karşılaştırılması için çeşitli istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.24. Sayısal uygulamada optimum tasarımı gerçekleştirilen üç açıklıklı betonarme kirişin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım parametreleri

Üç açıklıklı betonarme sürekli kiriş problemi için üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları Tablo 2.13'de, problemin şekil üzerinde gösterilmeyen tasarım parametreleri ise Tablo 2.14'de verilmektedir.

Tablo 2.13. Sayısal uygulama 3'e ilişkin tasarım değişkenleri, üst ve alt sınırları, artımları ve alabilecekleri değer sayıları

Sembol	Tanım	Alt limit	Üst limit	Artım	Alabileceği değer sayısı
X_1	Üst donatı İndeksi	1	7130	1	7130
X_2	Alt Donatı İndeksi	1	7130	1	7130
X_3	Birinci açıklıkta kiriş yüksekliği	250	1050	50	17
X_4	İkinci açıklıkta kiriş yüksekliği	250	1050	50	17
X_5	Üçüncü açıklıkta kiriş yüksekliği	250	1050	50	17
X_6	Beton Sınıfı	C25, C30, C35, C40, C45, C50			6
X_7	Donatı Sınıfı	B420C, B500C			2
X_8	Birinci kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_9	Birinci kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31
X_{10}	İkinci kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_{11}	İkinci kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31
X_{12}	Üçüncü kiriş sarılma bölgesi etriye aralığı	50	350	10	31
X_{13}	Üçüncü kiriş orta bölge etriye aralığı	50	350	10	31

Tablo 2.14. Üç açıklıklı kiriş uygulamasına ilişkin tasarım parametreleri

Tasarım Parametresi	**Değeri**	**Birimi**
Beton birim ağırlığı	25	kN/m^3
Kat yükseklikleri	3000	mm
Etriye çapı	8	mm
Deprem tasarım sınıfı	1a	-
En büyük agrega çapı	16	mm
Kiriş genişliği	250	mm
Net beton örtüsü	25	mm

Optimum tasarımda kullanılan algoritmalar maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı ile sonlandırılmıştır. Üç açıklıklı betonarme kiriş optimizasyonu için maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı (AFDS) tasarım değişkeni sayısının 1000, 5000 ve 10000 katı kadar (1000D, 5000D ve 10000D) alınarak, farklı sonlandırma

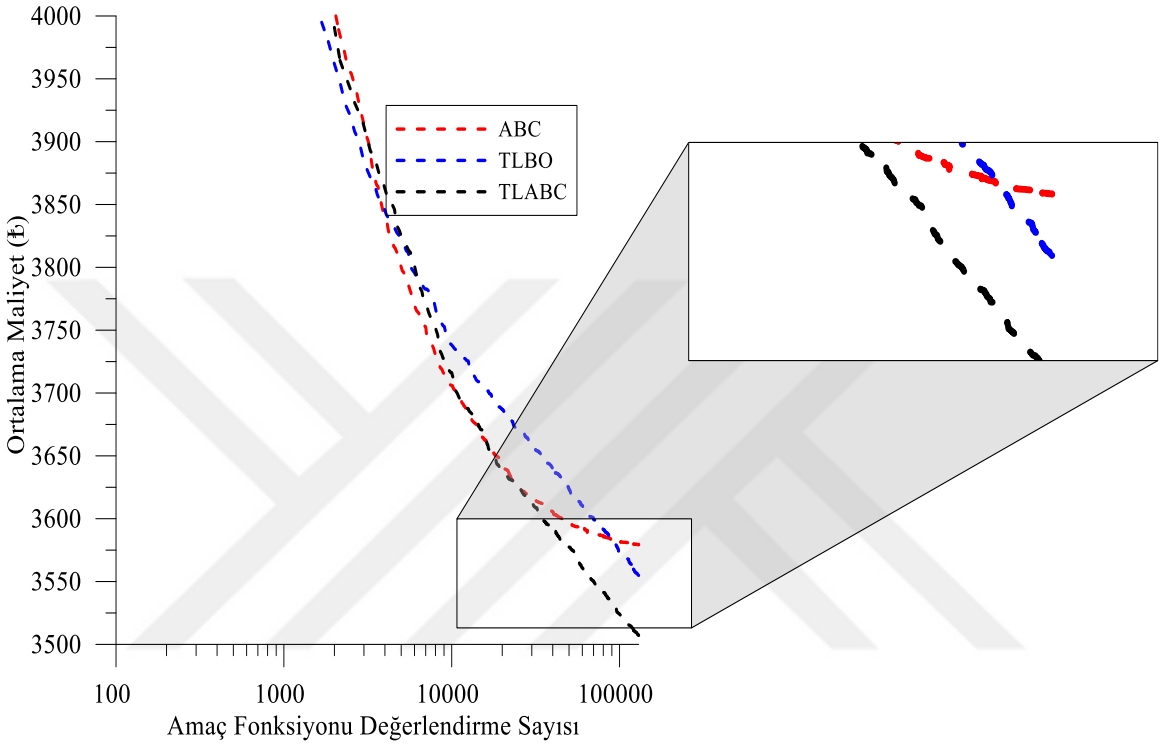
kriterlerinde algoritmaların davranışları incelenmiştir. Kullanılan üç farklı algoritmanın (ABC, TLBO ve TLABC) her biri ve her bir AFDS için 51'er koşum gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların koşumlarından elde edilen en iyi, ortalama ve en kötü maliyet değerleri ile, başarım oranları Tablo 2.15'de verilmektedir.

Tablo 2.15. ABC, TLBO ve TLABC algoritmasıyla üç açıklıklı kiriş için elde edilen maliyet değerleri, başarım oranları

Maksimum AFDS*	**İstatistik Veri**	**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000 D	En iyi maliyet (₺)	3588.28	3612.18	3605.37
	Ortalama maliyet (₺)	3682.70	3735.22	3682.60
	Ortanca maliyet (₺)	3683.84	3742.90	3682.24
	En kötü maliyet (₺)	3759.03	3824.29	3754.88
	Maliyetlerin std sapması (₺)	35.64	45.48	38.63
	Başarım oranı	-	-	-
5000 D	En iyi maliyet (₺)	3501.92	3523.82	3492.34
	Ortalama maliyet (₺)	3585.39	3612.98	3556.05
	Ortanca maliyet (₺)	3589.73	3614.41	3552.62
	En kötü maliyet (₺)	3635.80	3716.54	3625.37
	Maliyetlerin std sapması (₺)	27.25	42.81	31.16
	Başarım oranı	-	-	-
10000 D	En iyi maliyet (₺)	3526.32	3467.99	3451.21
	Ortalama maliyet (₺)	3579.20	3554.89	3507.27
	Ortanca maliyet (₺)	3577.87	3546.53	3506.58
	En kötü maliyet (₺)	3651.13	3657.22	3587.17
	Maliyetlerin std sapması (₺)	32.61	48.70	32.64
	Başarım oranı	-	-	2.0%
*AFDS: Amaç Fonksiyonu Değerlendirme Sayısı				

Daha önceki uygulamalarda olduğu gibi üç açıklıklı betonarme kiriş optimizasyonu için de ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarından elde edilen maliyetlerin istatistiksel verileri incelendiğinde, maksimum AFDS'nin 1000Dve 5000D olduğu durumda algoritmaların hiçbirinin elde edilen en iyi maliyet değerine ulaşamadığı görülmektedir. Bu durumlarda en küçük ortalama maliyete TLABC algoritmasıyla ulaşılmıştır. Maksimum AFDS'nin 10000D olduğu durumda en iyi maliyet değerine (3451.21₺) TLABC algoritmasıyla ulaşıldığı, yapılan koşumlardan elde edilen ortalama maliyetin en düşük

olduğu algoritmanın TLABC algoritması olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum TLABC algoritmasının, bu problem için diğer algoritmalara göre optimum değeri bulmada daha etkin olduğu kanısına varılabilmektedir. Algoritmalar için maksimum AFDS'nin 10000D olduğu duruma göre çizilen ortalama yakınsama grafiği Şekil 2.25'de verilmektedir.



Şekil 2.25. Üç açıklıklı kiriş optimizasyonu çalışmasında ortalama yakınsama grafiği

Şekil 2.25'de görüldüğü üzere TLABC algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha hızlı yakınsadığı, ilerleyen amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarında ortalama maliyet değerlerinin birbirinden uzaklaştığı, grafikten ve Tablo 2.15'den de görüldüğü gibi en düşük ortalama maliyete TLABC algoritmasının ulaştığı görülmektedir. Bu problem için elde edilen Friedman test skorları ve bu skorlara göre yapılan başarım sıralaması Tablo 2.16'da verilmektedir.

Tablo 2.16. ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarının sayısal uygulama 3 için Friedman testi skor ve skor sıralamaları

Maksimum AFDS		**ABC**	**TLBO**	**TLABC**
1000D	Skor	1.7059	2.6275	1.6667
	Sıralama	2	3	1
5000D	Skor	2.0588	2.5686	1.3725
	Sıralama	2	3	1
10000D	Skor	2.5686	2.0784	1.3529
	Sıralama	3	2	1
Ortalama Skor		2.1111	2.5458	1.2320
Ortalamaya Göre Sıralama		2	3	1

Tablo 2.16'daki skor ve sıralamalar incelendiğinde maksimum AFDS'nin 1000D olduğu durumda TLABC algoritmasının en iyi skora sahip olduğu, bu algoritmayı sırasıyla ABC ve TLBO algoritmalarının takip ettiği, benzer şekilde maksimum AFDS'nin 5000D olduğu durumda da TLABC algoritmasının ilk sırada olduğu ve algoritma sıralamasının değişmediği görülmektedir. Maksimum AFDS'nin 10000D olduğu durumda TLABC algoritmasının en iyi skora sahip olduğu, bu algoritmayı sırasıyla TLBO ve ABC algoritmalarının takip ettiği anlaşılmaktadır. Ortalama skorlara göre bir sıralama yapıldığında da en iyi başarıma sahip algoritmanın TLABC algoritması olduğu görülmektedir. TLABC algoritmasının ardından sırasıyla ABC ve TLBO algoritmaları gelmektedir.

Üç açıklıklı kiriş optimizasyonunda, en yüksek başarım oranına sahip TLABC algoritmasından elde edilen optimum çözüm için belirlenen, optimum tasarım değişkenleri Tablo 2.17'de verilmektedir.

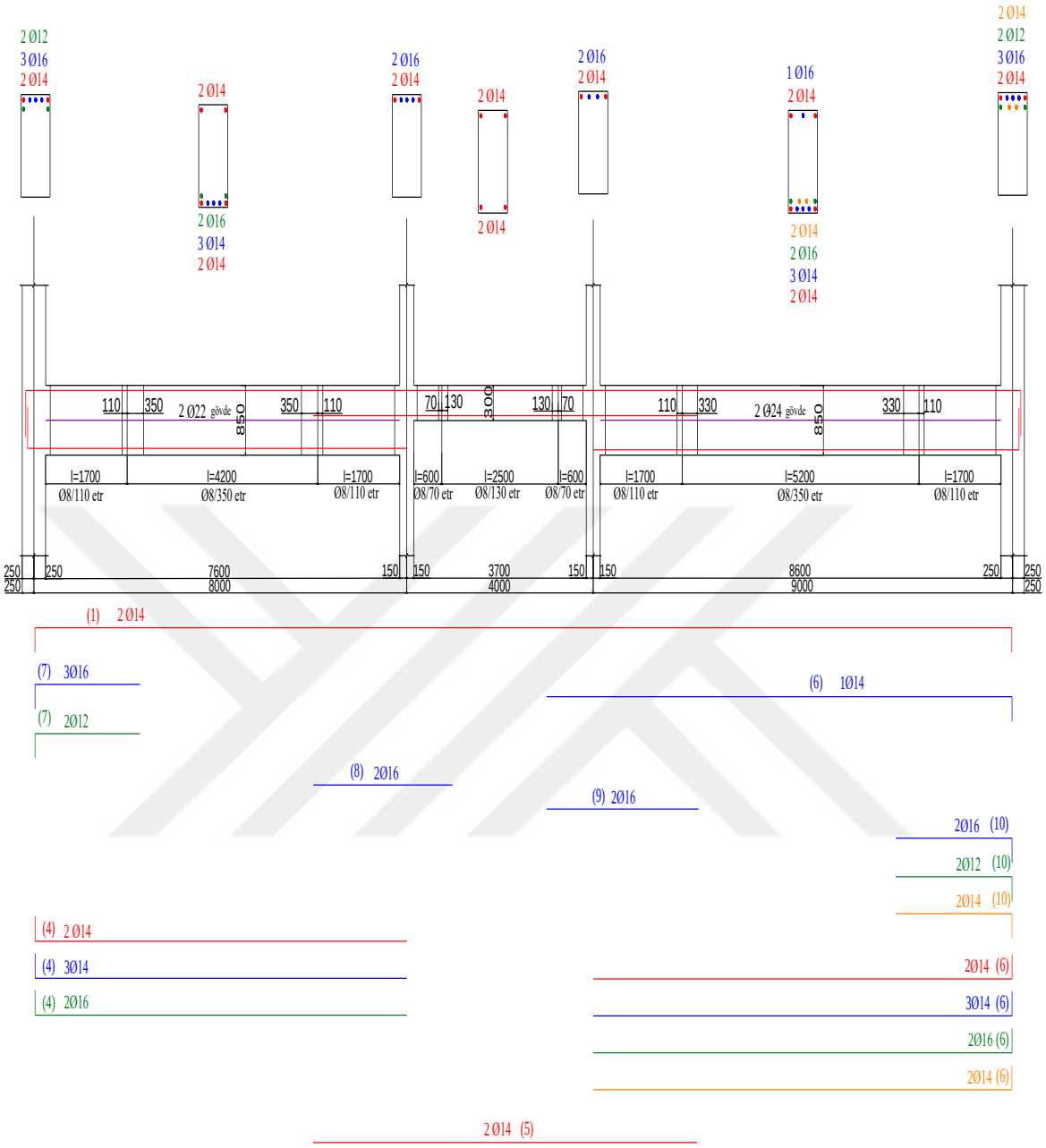
Tablo 2.17. Üç açıklıklı kiriş optimizasyonu tasarım değişkenleri için elde edilen optimum değerler

Değişken Tanımı	**Optimum Değer**
1. Kirişin yüksekliği	850 mm
2. Kirişin yüksekliği	300 mm
3. Kirişin Yüksekliği	850 mm
Beton Sınıfı	C30
Donatı Sınıfı	B500C
1. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı alanı	339,29 mm^2
1. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0,0059
2. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı alanı	427,26 mm2
2. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0,0047
3. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı alanı	226,19 mm2
3. kirişin Açıklıktaki çekme donatısı oranı	0,0075
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	1137,26 mm^2
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	710,00 mm^2
1. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0057
1. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0035
2. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	710,00 mm^2
2. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	911,06 mm^2
2. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0109
2. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0141
3. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı alanı	911,06 mm^2
3. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı alanı	1445,13 mm^2
3. kirişin sol Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0045
3. kirişin sağ Mesnetteki çekme donatısı oranı	0,0073
1.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110
1. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/350
2.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/70
2. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/130
3.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110
3. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/330
1. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ22

Tablo 2.17’nin devamı

1. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	380,13 mm^2
2. kirişin Gövde donatısı (varsa)	–
2. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	–
3. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ24
3. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	452,39 mm^2
Kullanılan toplam donatı ağırlığı	539,30 kg
Kullanılan beton hacmi	4,02 m^3
Donatı maliyeti	2396,77 ₺
Beton maliyeti	1054,44 ₺
Toplam maliyet	3451,21 ₺

Tablo 2.17'da yer alan optimum değerlere göre çizilen bir açıklıklı kiriş detayı şekil 2.26'da gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Üç açıklıklı kiriş optimizasyonu için elde edilen optimum değerlerle çizilen kiriş detayı

2.5.Parametrik çalışmalar

2.5.1. Kiriş Genişliğinin Maliyete Etkisinin İncelenmesi

Burada daha önce optimum tasarımı gerçekleştirilen üç açıklıklı sürekli kiriş üzerinde, tasarım parametresi olarak dikkate alınan, kiriş genişliği değiştirilerek kirişin optimum

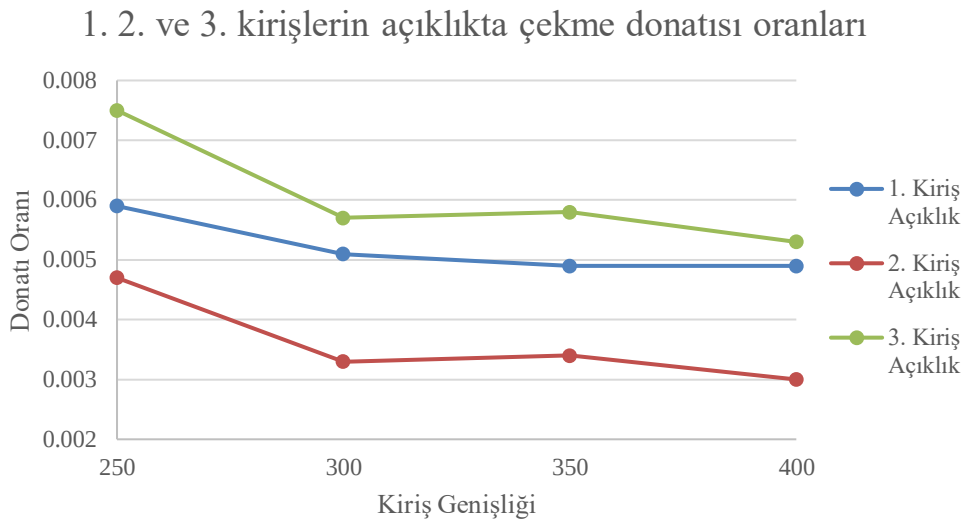
tasarımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada diğer tüm tasarım parametreleri üç açıklıklı kiriş uygulamasındaki gibi alınarak kiriş genişliği 250, 300, 350 ve 400 mm olarak değiştirilmek suretiyle, aynı yükleme koşulları altında 4 farklı problem oluşturulmuştur. Problemlerde kiriş genişlikleri değiştirildiğinden bu kiriş genişliklerinin her biri için donatı şablonları oluşturularak birer veri havuzu oluşturulmuştur. Bu durumda 250 mm genişliğindeki kiriş için veri havuzunda 7130 adet şablon bulunurken, 300 mm genişliğindeki kiriş için 11656 adet, 350 mm genişliğindeki kiriş için 16664 adet ve 400 mm genişliğindeki kiriş için 20974 adet şablon bulunmaktadır. Bu çalışma önceki çalışmalarda başarımı en yüksek olan TLABC algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma ile dört farklı durum için elde edilen optimum tasarıma ilişkin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım verileri aşağıdaki Tablo 2.18'de verilmektedir.

Tablo 2.18. 250, 300, 350 ve 400 mm kiriş genişlikleri için elde edilen optimum değerler

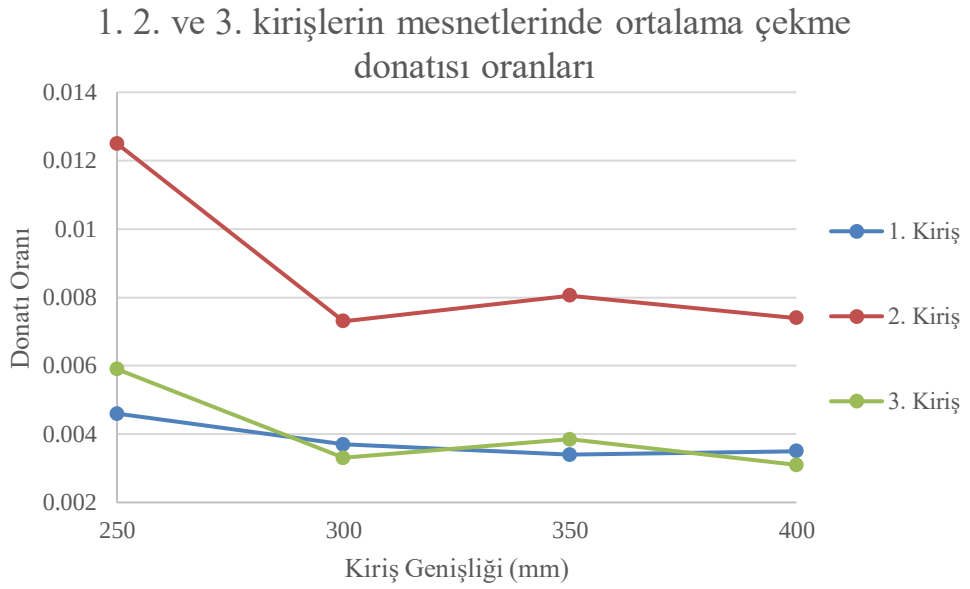
Değişken Tanımı	**Kiriş Genişlikleri**			
	250 mm	**300 mm**	**350 mm**	**400 mm**
1. Kirişin yüksekliği	850 mm	850 mm	800 mm	750 mm
2. Kirişin yüksekliği	300 mm	350 mm	300 mm	300 mm
3. Kirişin Yüksekliği	850 mm	950 mm	850 mm	850 mm
Beton Sınıfı	C30	C25	C25	C25
Donatı Sınıfı	B500C	B500C	B500C	B500C
1.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110	Φ8/110	Φ8/110	Φ8/110
1. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/350	Φ8/340	Φ8/300	Φ8/280
2.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/70	Φ8/80	Φ8/70	Φ8/60
2. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/130	Φ8/140	Φ8/130	Φ8/110
3.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110	Φ8/100	Φ8/100	Φ8/100
3. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/330	Φ8/320	Φ8/300	Φ8/260
1. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ22	2Φ22	2Φ22	2Φ24
1. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	380,13 mm^2	380,13 mm^2	380,13 mm^2	452,39 mm^2
2. kirişin Gövde donatısı (varsa)	-	-	-	-
2. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	-	-	-	-
3. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ24	4Φ16	2Φ24	2Φ24
3. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	452,39 mm^2	201,06 mm^2	452,39 mm^2	452,39 mm^2
Kullanılan toplam donatı ağırlığı (ton)	539,30 kg	531,69 kg	564,28 kg	588,32 kg
Kullanılan beton hacmi (m3)	4,02 m^3	5,16 m^3	5,48 m^3	6,1 m^3
Donatı maliyeti (₺)	2396,77 ₺	2362,94 ₺	2507,78 ₺	2614,64 ₺
Beton maliyeti (₺)	1054,44 ₺	1308,73 ₺	1390,37 ₺	1547,14 ₺
Toplam maliyet (₺)	3451,21 ₺	3671,67 ₺	3898,15 ₺	4161,78 ₺

Kiriş genişliği arttıkça birinci, ikinci ve üçüncü kirişteki açıklık donatılarının değişimi şekil 2.27'te verilmektedir. Birinci, ikinci ve üçüncü kirişlerin mesnetlerdeki ortalama çekme donatısı oranları şekil 2.28'de verilmektedir. Şekil 2.29'te artan kiriş genişlikleri ile

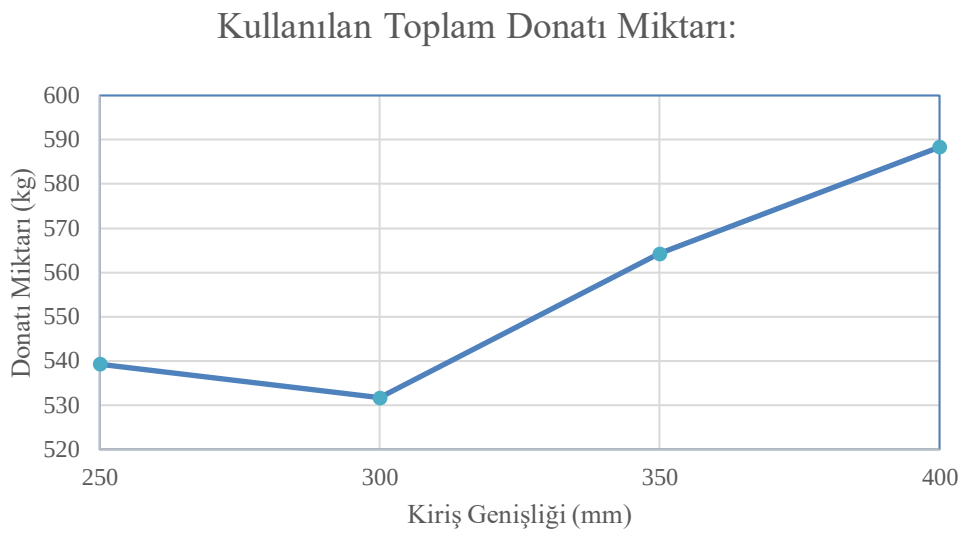
toplam donatı miktarının değişimi, Şekil 2.30'da ise kiriş genişliklerinin değişimi ile beton miktarının değişimi verilmektedir.



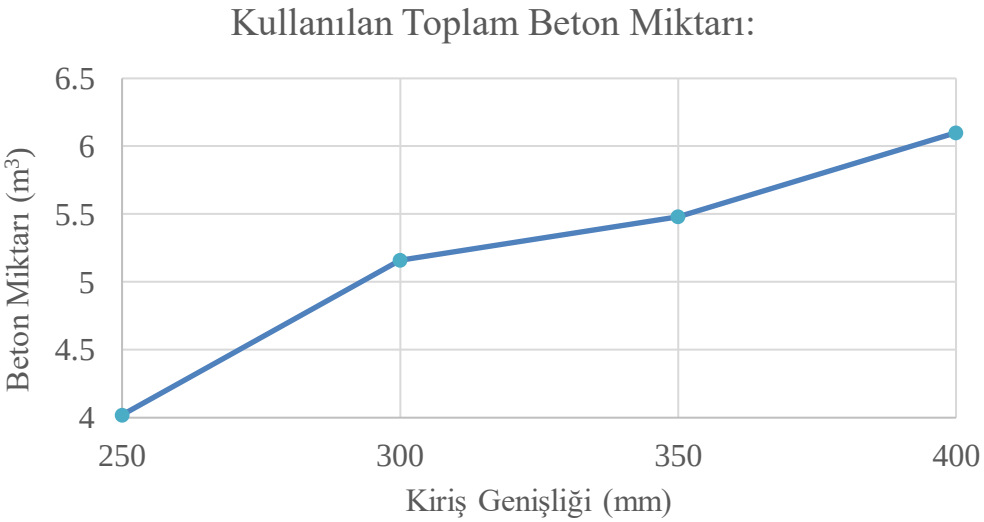
Şekil 2.27. 250, 300, 350 ve 400 mm için kirişlerin açıklıktaki donatı oranları



Şekil 2.28. 250, 300, 350 ve 400 mm için kirişlerin mesnetteki ortalama donatı oranları



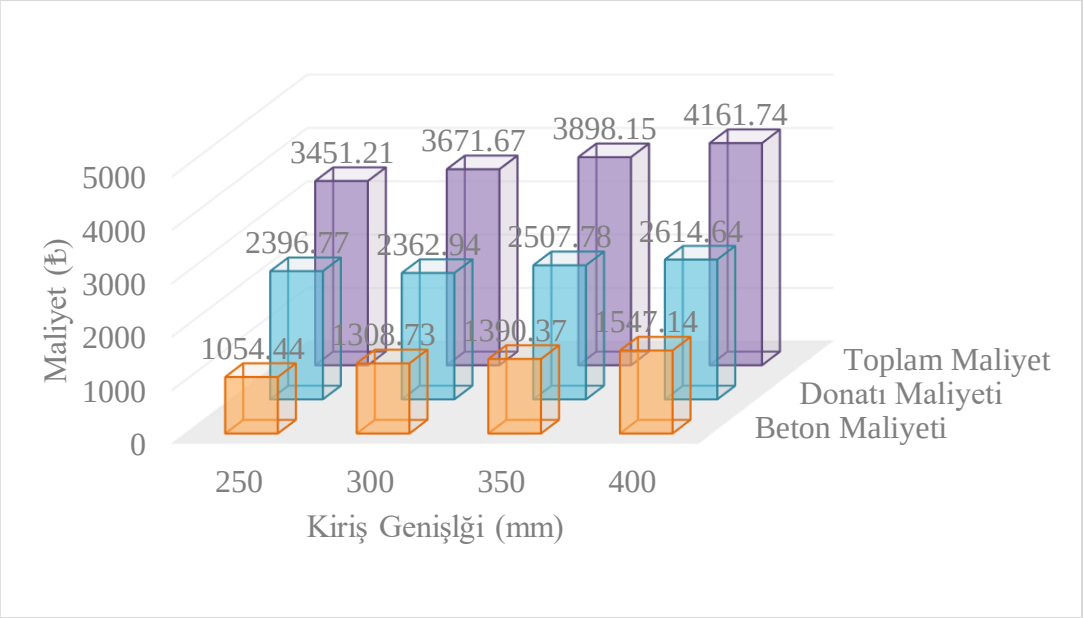
Şekil 2.29. 250, 300, 350 ve 400 mm için kiriş toplam donatı miktarları



Şekil 2.30. 250, 300, 350 ve 400 mm için kiriş toplam beton miktarları

Şekil 2.27'de verilen grafiğe göre kiriş genişliği arttıkça açıklıklarda bulunan asal çekme donatı oranlarının azaldığı görülmektedir. Şekil 2.28'de görüldüğü üzere kiriş genişliğinin artmasıyla mesnetlerdeki ortalama donatı oranının 250 mm genişliğindeki kirişe göre, kiriş genişliği arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.29'daki toplam donatı miktarının değişimi ile ilgili grafikte, kullanılan donatı miktarının en düşük kirişin 300 mm genişliğe sahip olması durumunda elde edildiği, genişliğin 350 mm ve 400 mm 'ye çıkarılmasıyla kullanılan donatı miktarının giderek arttığı görülmektedir. Asal ortalama donatı oranlarının azalmasına rağmen kullanılan donatı miktarlarının artması kiriş en

kesitlerinde, genişlik arttıkça meydana gelen artışa atfedilebilmektedir. Şekil 2.30'da beton miktarının kiriş genişliği ile değişimine gösteren grafik incelendiğinde beton miktarında olan artıştan da, kiriş en kesitlerinde artış meydana geldiği anlaşılabilmektedir. Her ne kadar, özellikle birinci açıklıktaki kiriş için, kiriş yükseklikleri artan genişlikle azaldığı Tablo 2.18'den görülse de, en kesit alanı olarak dikkate alındığında meydana gelen artış kullanılan beton hacmini artırmaktadır. Farklı kiriş genişliklerinde kirişin toplam maliyetinin değişimi Şekil 2.31'de verilmektedir.



Şekil 2.31. Kiriş genişliğinin 250, 300, 350 ve 400 mm olması durumları için maliyetler

Bu grafik incelendiğinde kiriş genişliğinin artması, kirişin hacminde artışa, dolayısıyla da beton hacminin ve donatı miktarının da büyümesine neden olmaktadır. Bu durum da beraberinde maliyette artışa neden olmaktadır. Böylece yapılan çalışmadan, kiriş genişliğini seçilebilecek en küçük boyutta tasarlamanın, kiriş maliyeti düşüreceği kanısına varılmaktadır. Bununla birlikte burada, bu kanının farklı yükleme durumlarına sahip kirişler için de genellenebilmesi için, çok daha fazla farklı yükleme etkisinde, farklı açıklık değerlerine ve sayılarına sahip kirişler üzerinde çalışmanın tekrarlanması gerektiği de belirtilmelidir.

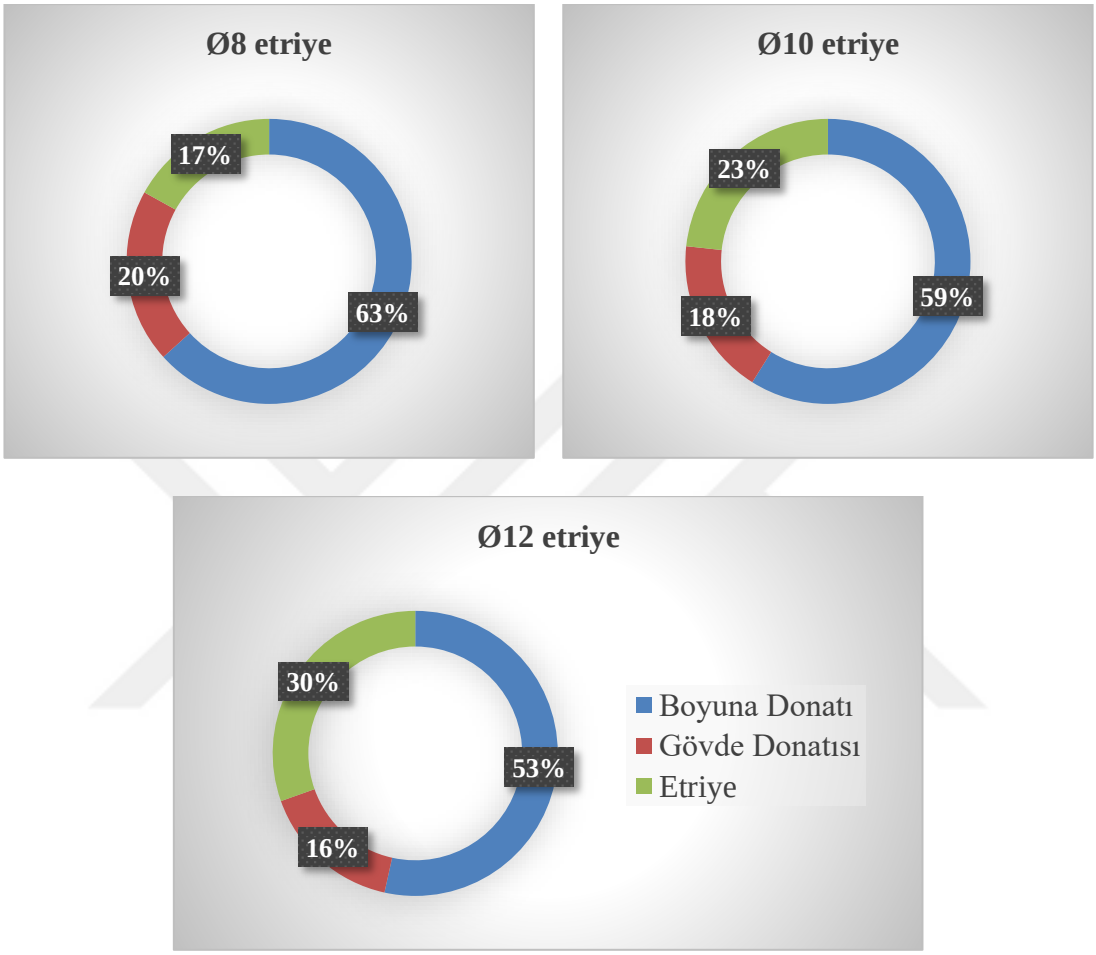
2.5.2. Etriye Çapının Maliyete Etkisinin İncelenmesi

Bu parametrik çalışmada daha önce optimum tasarımı gerçekleştirilen üç açıklıklı sürekli kiriş üzerinde, tasarım parametresi olarak dikkate alınan, etriye çapı değiştirilerek kirişin optimum tasarımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada diğer tüm tasarım parametreleri üç açıklıklı kiriş uygulamasındaki gibi alınarak kiriş genişliği 250 mm olmak üzere, etriye çapı 8, 10 ve 12 mm alınarak, aynı yükleme koşulları altında 3 farklı problem oluşturulmuştur. Problemlerde etriye çapları değiştirildiğinden bu etriye çaplarının her biri için donatı şablonları oluşturularak birer veri havuzu oluşturulmuştur. Bu durumda etriye çapının 8 mm olduğu durumda veri havuzunda 7130 adet şablon bulunurken, 10 mm olduğu durumda 6661 adet, 12 mm olduğu durumda ise 6343 adet şablon bulunmaktadır. Bu çalışma önceki çalışmalarda başarımı en yüksek olan TLABC algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma ile üç farklı durum için elde edilen optimum tasarıma ilişkin tasarım değişkenleri ve bazı tasarım verileri aşağıdaki Tablo 2.19'de verilmektedir.

Tablo 2.19. Etriye çapının 8, 10 ve 12 mm olması durumunda elde edilen optimum değerler

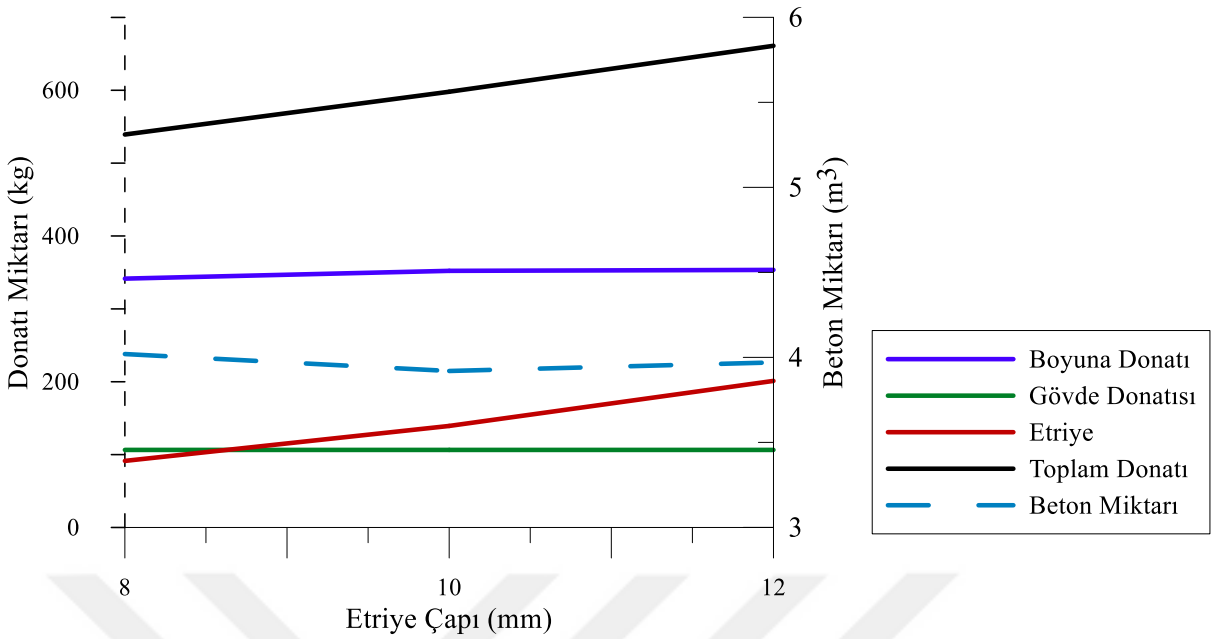
Değişken Tanımı	**Etriye Çapı**		
	8 mm	**10 mm**	**12 mm**
1. Kirişin yüksekliği	850 mm	800 mm	800 mm
2. Kirişin yüksekliği	300 mm	300 mm	350 mm
3. Kirişin Yüksekliği	850 mm	850 mm	850 mm
Beton Sınıfı	C30	C30	C30
Donatı Sınıfı	B500C	B500C	B500C
1.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110	Φ10/110	Φ12/110
1. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/350	Φ10/340	Φ12/340
2.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/70	Φ10/70	Φ12/80
2. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/130	Φ10/120	Φ12/150
3.kirişin Sarılma bölgesinde etriye aralığı	Φ8/110	Φ10/110	Φ12/110
3. kirişin Orta bölgede etriye aralığı	Φ8/330	Φ10/350	Φ12/350
1. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ22	2Φ22	2Φ22
1. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	380,13 mm^2	380,13 mm^2	380,13 mm^2
2. kirişin Gövde donatısı (varsa)	-	–	–
2. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	-	–	–
3. kirişin Gövde donatısı (varsa)	2Φ24	2Φ24	2Φ24
3. kirişin Gövde donatısı alanı (varsa)	452,39 mm^2	452,39 mm^2	452,39 mm^2
Kullanılan Boyuna Donatı Miktarı	341,41 kg	352,25 kg	353,49 kg
Kullanılan Gövde Donatı Miktarı	106,44 kg	106,44 kg	106,44 kg
Kullanılan Etriye Miktarı	91,45 kg	139,35 kg	201,20 kg
Kullanılan toplam donatı ağırlığı (ton)	539,30 kg	598,05 kg	661,13 kg
Kullanılan beton hacmi (m3)	4,02 m^3	3,92 m^3	3,97 m^3
Donatı maliyeti (₺)	2396,77 ₺	2657,86 ₺	2938,19 ₺
Beton maliyeti (₺)	1054,44 ₺	1027,38 ₺	1040,50 ₺
Toplam maliyet (₺)	3451,21 ₺	3685,25 ₺	3978,70 ₺

Elde edilen bu optimum çözümlere göre kullanılan farklı etriye çaplarında, üç açıklıklı sürekli kirişte kullanılan gövde donatısı, boyuna donatı ve etriye miktarlarının, kullanılan toplam donatı miktarlarına oranları aşağıdaki Şekil 2.32'da verilmektedir.



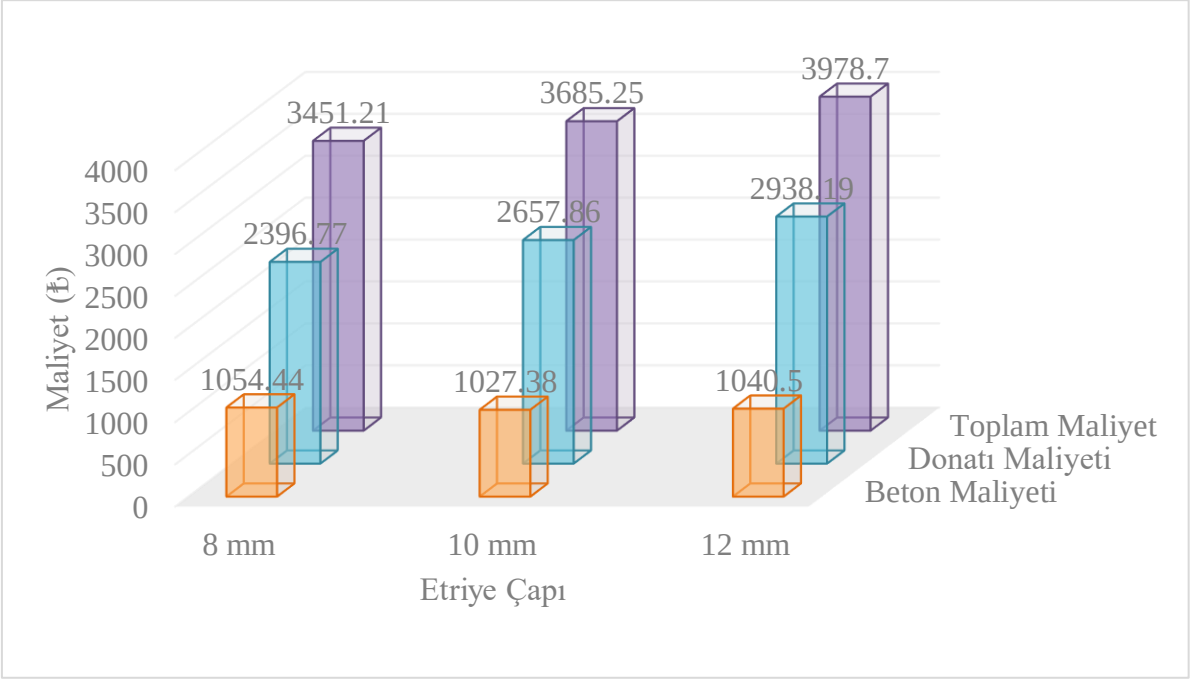
Şekil 2.32. Etriye çap değişimine göre kullanılan donatıların toplam donatı miktarı içindeki payları

Bu şekle göre etriye çaplarını sırasıyla 8, 10 ve 12 mm'ye çıkarıldığında, kirişlerde kullanılan gövde donatı ve boyuna donatı miktarlarında, toplam kullanılan donatı içinde payları azalırken, etriye miktarının toplam kullanılan donatı içinde payının artığı anlaşılmaktadır. Şekil 2.33'de donatı ve beton miktarının etriye çapına göre değişimleri verilmektedir.



Şekil 2.33. Donatı ve beton miktarının etriye çapına göre değişimleri

Bu şekle göre etriye çapındaki artışın, üç açıklıklı kirişte kullanılan toplam donatı miktarında artışa, beton miktarında ise hafif azalmaya neden olduğu görülmektedir. Artan etriye çapına göre maliyet değişimi ise Şekil 2.34'da verilmektedir.



Şekil 2.34. Etriye çapına göre maliyetlerin değişimi

Yukarıda verilen şekil incelendiğinde daha büyük çaplı etriye kullanıldığında kirişlerde kullanılan toplam betonun maliyetinde artışın küçük düzeyde olduğu, bununla birlikte maliyet artışının esas nedeninin kullanılan donatı maliyetindeki artış olduğu anlaşılmaktadır. Bu artış nedeniyle kirişin toplam maliyetinin de daha büyük çaplı etriye kullanıldığında arttığı görülmektedir. Böylece yapılan çalışmadan, bu problem için etriye çapının seçilebilecek en küçük çapta seçmenin, kullanılacak etriye maliyetini ve dolayısıyla da kiriş maliyetini düşüreceği kanısına varılmaktadır. Bununla birlikte burada, bu kanının farklı yükleme durumlarına sahip kirişler için de genellenebilmesi için, çok daha fazla farklı yükleme etkisinde, farklı açıklık değerlerine ve sayılarına sahip kirişler üzerinde çalışmanın tekrarlanması gerektiği de belirtilmelidir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı farklı açıklık sayılarına sahip sürekli kirişlerin Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni Algoritmalarını (TLABC) kullanarak minimum maliyetle optimum tasarımlarını gerçekleştirmekti.

Bu amaçla birinci bölümle kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmaları hakkında bilgiler verilmiş ve bu konuda daha önce yapılan çalışmalar sunulmuştur.

İkinci bölümde bir, iki ve üç açıklıklı kirişlerin söz konusu algoritmalarla optimum tasarımları gerçekleştirilmiş ve algoritmaların başarımları bu problemlerden elde edilen bulguların irdelenmesiyle karşılaştırılmıştır. Ardından kirişler üzerinde, başarımı en yüksek olan algoritma ile bazı parametrik çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmanın bütününden elde edilebilecek sonuç ve öneriler aşağıda sıralanmaktadır;

Çalışmada kullanılan ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları MATLAB program dilinde bir, iki ve üç açıklıklı kirişlerden oluşan sayısal uygulamaların optimum tasarımları için kodlanarak, bağımsız koşumlar gerçekleştirilmiştir. Koşumlar Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi DOKAP bilgisayar laboratuvarında yapılmıştır.

Sayısal uygulama 1'de bir açıklıklı betonarme kiriş optimizasyonu için ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları için maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısının (AFDS) 1000D, 5000D ve 10000D olduğu koşumları yapılmıştır. Bu koşumlardan elde edilen verilere göre AFDS'nin 1000D durumu için hiçbir algoritma en iyi maliyet değerine ulaşamamıştır. AFDS'nin 5000D ve 10000D durumları için tüm algoritmalar en iyi maliyet değerine ulaşmıştır. AFDS'nin 5000D olduğu durumda TLABC algoritması ortalama maliyet ve standart sapma da en düşük, başarım oranında en yüksek algoritma olduğu görülmüştür. AFDS'nin 10000D'deki durumda ortalama maliyet ve standart sapmada en düşük, başarım oranında en yüksek algoritma TLABC algoritması olmuştur. Hatta başarım oranının %100'e ulaştığı görülmüştür. AFDS'nin 10000D olduğu duruma göre bu üç algoritmanın yakınsama hızları karşılaştırılmış ve ABC algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha hızlı yakınsadığı görülmüştür. Bu üç algoritma için AFDS'nin 1000D, 5000D ve 10000D koşumları için Friedman testi uygulanmıştır. AFDS'nin 5000D ve 10000D olduğu durumda TLABC algoritması en iyi skoru elde ederken, AFDS'nin

1000D olduğu durumda en iyi skoru ABC ve TLBO algoritmaları elde etmiştir. Ortalama skor verilerine göre en iyi başarımı gösteren TLABC algoritması olurken onu sırası ile TLBO ve ABC algoritmaları takip etmiştir. Bulunan optimum değerlere göre tek açıklıklı optimum kiriş detayı çizilmiştir.

Sayısal uygulama 2'de iki açıklıklı betonarme kiriş optimum tasarımı için ABC, TLBO ve TLABC algoritma yazılımları geliştirilmiştir. Bu algoritmalardan elde edilen verilere göre maksimum AFDS'nin 1000D, 5000D ve 10000D olduğu koşumlar incelenmiştir. Burada AFDS'nin 1000D olduğu durumda en iyi maliyete ulaşabilen algoritma olmadığı görülmüştür. AFDS'nin 5000D olduğu durumda sadece TLABC algoritması en iyi maliyete ulaşabilmiştir. Ortalama maliyet ve standart sapmanın en düşük, başarım oranının en yüksek olduğu algoritmada TLABC algoritması olmuştur. AFDS'nin 10000D olduğu durumda ise en iyi maliyete TLBO ve TLABC algoritmalarının ulaştığı anlaşılmaktadır. TLABC algoritmasının ortalama maliyet ve standart sapmada yine en düşük değere ulaştığı, başarım oranının ise en yüksek algoritma olduğu görülmektedir. Maksimum AFDS'nin 10000D olduğu durumda yakınsama hızı en yüksek algoritma, TLABC algoritması olmuştur. Maksimum AFDS'nin 1000D, 5000D ve 10000D olduğu koşumlar için algoritmalara Friedman testi uygulanmıştır. Bütün durumlar için en iyi skora TLABC algoritması ulaşmıştır. Elde edilen optimum değerlere göre iki açıklıklı optimum kiriş detayı elde edilmiştir.

Sayısal uygulama 3 için üç açıklıklı betonarme optimum kiriş tasarımı ABC, TLBO ve TLABC sezgisel algoritmaları kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maksimum AFDS'nin 1000D ve 5000D olduğu durumda en iyi maliyet değerine ulaşabilen algoritma olmadığı görülmektedir. AFDS'nin 10000d olduğu durumda sadece TLABC algoritması en iyi maliyet değerine ulaşabilmiştir. Ortalama maliyetinde yine TLABC algoritmasıyla en düşük değere ulaştığı görülmüştür. TLABC algoritması bu problem için en etkili algoritma olduğu anlaşılmaktadır. Yakınsama hızları karşılaştırılan ABC, TLBO ve TLABC algoritmaları için en hızlı TLABC algoritması yakınsamaktadır. Yine bu algoritmalara uygulanan Friedman testinde AFDS'nin 1000D, 5000D ve 10000D olduğu durumlarda en iyi skora sahip olan algoritma TLABC algoritması olmuştur. Ortalama skora göre TLABC en iyi skoru elde ederken sırasıyla onu ABC ve TLBO algoritmaları izlemiştir. Elde edilen optimum değerlere göre üç açıklıklı optimum kiriş detayı elde edilmiştir.

Parametrik çalışma-1 de üç açıklıklı betonarme sürekli kirişte, etriye çapı 8 mm sabit tutulup kiriş genişliği 250, 300, 350 ve 400 mm için dört farklı durum içeren çalışma yapılmıştır. Bu kiriş genişlikleri için elde edilen optimum değerler ile kirişlerin birinci, ikinci ve üçüncü açıklıktaki çekme donatısı oranları, mesnetlerdeki ortalama çekme donatısı oranları, kullanılan toplam donatı ve beton miktarlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Açıklıktaki çekme ve mesnetlerdeki ortalama çekme donatısı oranlarında kiriş genişlikleri arttıkça donatı oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Kullanılan donatı ve beton miktarlarının kiriş genişlikleri arttıkça arttığı görülmüştür. Toplam maliyet artışının kiriş genişliğinin artışı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Parametrik çalışma-2 için üç açıklıklı betonarme sürekli kirişte kiriş genişliği 250 mm sabit tutulup etriye çapları 8, 10 ve 12 mm için üç farklı durumdaki parametrik çalışması yapılmıştır. Üç açıklıkta bulunan boyuna donatı, gövde donatısı ve etriye oranları için etriye çap değişimine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Etriye çapındaki artışın, kiriş içerisindeki boyuna ve gövde donatılarının, toplam donatı içindeki payında azalmaya, etriyenin toplam donatı içindeki payında ise artışa neden olduğu görülmüştür. Daha sonra donatı ve beton miktarının etriye çapına göre değişimleri incelenmiştir. Burada gövde donatısında değişim olmazken boyuna donatıda çok az bir artış olmuştur. Etriye artışı fazla olurken beton miktarında çok azda olsa bir düşüş görülmüştür. Sonuç olarak kirişte etriye çapı artışıyla meydana gelen donatı artışı, toplam maliyetin de artmasına neden olmuştur.

Özetle bu çalışma bir, iki ve üç açıklıklı betonarme sürekli kirişlerin minimum maliyetle optimum tasarımlarında kullanılan Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritmalarından, en yüksek başarıma sahip olan algoritmanın TLABC algoritması olduğunu göstermiştir. Ancak daha fazla algoritmanın problem üzerine uygulanması, ve özellikle üç açıklıklı kiriş probleminde maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısının standartların üzerinde yükseltilerek algoritmaların daha ileri aşamada başarımlarının izlenmesi sonuçların genellenebilmesi için gerekli olmaktadır. Bu husus çalışmalarımızın devamını sağlayacaktır.

4. KAYNAKLAR

Akay, B., 2009. Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Kolonisi (Artıficıal Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi, Doktora Tezi, E.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Bonabeau, E., M. Dorıgo ve G. Theraulaz, 1999. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Oxford University Press, Ny,92.

Chen, X. ve Xu, B., 2018. Teaching-learning-based artificial bee colony (Vol. 10941 LNCS), Springer International Publishing, 166-178.

Chutani, S., ve Jagbir S.,2017. Design optimization of reinforced concrete beams, Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 98,4, 429-435.

Deliktaş, B., Türker, H. T., Coşkun, H., Bikçe, M. ve Özdemir E., 2005. Genetik Algoritma Parametrelerinin Betonarme Kiriş Tasarımı Üzerine Etkisi, Deprem Sempozyumu, Mart, Kocaeli, Bildiriler Kitabı:1524-1531.

Derrac, J., García, S., Molina, D. ve Herrera, F., 2011, A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. Swarm and Evolutionary Computation, 1,1, 3-18.

Ferreira, C.C., Barros, M. H. F. M. ve Barros, A. F. M., 2003. Optimal design of reinforced concrete T-sections in bending, Eng. Struct., 25, 951-964.

García, S., Fernández, A., Luengo, J. ve Herrera, F., 2010, Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power, Information sciences, 180,10, 2044-2064.

Gebrail, B. ve Niğdeli, S. M., 2015. Optimum design of reinforced concrete beams using teaching-learning-based optimization, 3rd International Conference on Optimization Techniques in Engineering.

Gebrail, B. ve Niğdeli, S. M.,2019. The effect of the consideration of slab dimensions on optimum design of reinforced concrete beams, European Journal of Engineering and Natural Sciences, 3.2, 81-85.

Govindaraj, V. ve Ramasamy, J.V., 2005. Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms, Comput. Struct., 84, 34-48.

Jahjouh, M. M., Arafa M. H. ve Alqedra M. A., 2013. Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous beams, Structural and MultidisciplinaryOptimization ,47,6,963-979.

Karaboğa, D., 2005. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerıcal Optımızatıon, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 10 s.

Karaboğa, D., 2011. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Yayın Dağıtım, 2. Baskı, İstanbul, 231 s.

Kaya, B. ve Eke, İ., 2020.Yapay Arı Kolonisi Algoritması İle Yapılan Geliştirmeler ve Sonuçları, Verimlilik Dergisi, 4,1,104 s.

Koumousis, V. K. ve Arsenis, S. J., 1998. Genetic Algorithms in Optimal Detailed Design of Reinforced Concrete Members, Comput-Aided Civ. Inf., 13 ,43-52.

Öztürk, H. T. ve Türkeli, E., 2019. Tabanında anahtar kesiti bulunan betonarme istinat duvarlarının jaya algoritmasıyla optimum tasarımı, Politeknik Dergisi, 22,2 ,283-291.

Öztürk, H. T., 2016. Optimum Cost Design of RC Columns using Big Bang-Big Crunch Optimization Algorithm, 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul.

Öztürk, H. T ve Türkeli, E., 2017. Betonarme Sürekli Kirişlerin Guguk Kuşu Arama Algoritmasıyla Optimum Tasarımı, II. İnternatianol Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt.

Öztürk, H. T., 2020. Betonarme Kısa Konsolların TS 500'e Göre Optimum Tasarımında ABC, TLBO ve TLABC Algoritmalarının Başarımı, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 25,1,361-378.

Öztürk, H. T., Durmuş, A. ve Durmuş, A., 2012. Optimum design of a reinforced concrete beam using artificial bee colony algorithm, Computers & Concrete 10,3,295-306.

Öztürk, H. T.,2013. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Betonarme Sığ Tünellerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Öztürk, H. T.,2016. İstinat Duvarlarının Öğrenme ve Öğretme Tabanlı Algoritmayla Optimum Tasarımı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, 16 ,813-822.

Öztürk, H. T.,2018. Betonarme Konsol İstinat Duvarlarının Minimum Maliyet ve Ağırlıkla Optimum Tasarımı, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6,4, 1258-1268.

Raju, P. M., Manasa, A. ve Rohini G., 2021. Cost optimization of a rectangular singly reinforced concrete beam by Generalized Reduced Gradient method, *IOP* Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1025. No. 1. IOP Publishing.

Rao, R. V. ve V. D. Kalyankar. 2011.Parameters optimization of advanced machining processes using TLBO algorithm, *EPPM, Singapore* ,20 ,21-31.

Tamrazyan, A. ve Alekseytsev, A., 2019. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergenc loss of supports, *E3S Web of Conferences*. Vol. 97. EDP Sciences,

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.

Tereshko, V. ve Loengarov, A.,2005. Collective Decision-Making in Honeybee Foraging Dynamics, Computing and Information Systems Journal ,9,3.

Trawiński, B., Smętek, M., Telec, Z. ve Lasota, T., 2012, Nonparametric statistical analysis for multiple comparison of machine learning regression algorithms, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 22,4, 867-881.

Türkeli, E. ve Öztürk, H. T., 2017.Optimum design of partially prestressed concrete beams using Genetic Algorithms, Structural Engineering and Mechanics, 64,5 ,579-58.

Waıbel, M., 2006. Divison of Labour and Colony Efficiency in Social Insects, Proceedings of the Royal Society B., 273, 1815-1823.

ÖZGEÇMİŞ

Sebahat TEMİZ, İlk ve orta öğrenimini 2001-2009, lise öğrenimini ise 2009-2013 yılları arasında Rize'de tamamladı. 2013-2017 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. İngilizce bilmektedir.