

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖNGERİLMELİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ÖĞRETME-ÖĞRENME TABANLI OPTİMİZASYON VE
JAYA ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Şadi AKTEPE

**MAYIS 2019
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖNGERİLMELİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ÖĞRETME-ÖĞRENME TABANLI
OPTİMİZASYON VE JAYA ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI**

İnş. Müh. Şadi AKTEPE

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 / 04 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 05 / 2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

Trabzon 2019

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Şadi AKTEPE Tarafından Hazırlanan**

**ÖNGERİLMELİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ÖĞRETME-ÖĞRENME TABANLI
OPTİMİZASYON VE JAYA ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 30 / 04 / 2019 gün ve 1802 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Murat YAYLACI

Üye : Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül DURMUŞ DEMİR

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

“Öngerilmeli Köprü Üstyapısının Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon ve Jaya Algoritmalarıyla Optimum Tasarımı” isimli tez çalışmasını bana öneren ve tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yardımcı olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK'e en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada yardımını ve desteğini esirgemeyen mesai arkadaşım Yapı Ress. Tek. Öğrt. Cemil YAVAŞI'ye teşekkür ediyorum.

Öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anarken, bugünlere gelmem için her türlü fedakarlıkta bulunan Annem Sema AKTEPE ve Babam Ercan AKTEPE'ye müteşekkir olduğumu belirtir, verdiği destek ve gösterdiği sabır ile her zaman yanımda olan eşim Özgül AKTEPE'ye teşekkür ederim.

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Öngerilmeli Köprü Üstyapısının Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon ve Jaya 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 laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/05/2019

Şadi AKTEPE

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. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniği.....	2
1.2.1. Öngerilmeli Betonun Tanımı.....	2
1.2.2. Öngerilmeli Betonun Tarihçesi.....	2
1.2.3. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Üstünlükleri.....	3
1.2.4. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprüler.....	3
1.2.5. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Türkiye’de Köprü Üst Yapılarında Kullanımı.....	4
1.3. Optimizasyon.....	5
1.3.1. Optimizasyon Elemanları.....	6
1.3.2. Optimizasyon Teknikleri.....	6
1.4. Öngerilmeli Beton Köprü Üstyapısı ile İlgili Optimizasyon Alanında Yapılan Bazı Çalışmalar.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	15
2.1. Öngerilmeli Köprü Üstyapı Tasarımı İçin Hesaplamalar.....	15
2.1.1. Kiriş İçin Minimum Boyut Denetimi.....	15

2.1.2.	Minimum Yükseklik Denetimi (Tabliye Dahil).....	16
2.1.3.	Etkili Tabliye Genişliğinin Belirlenmesi.....	16
2.1.4.	Dayanım Azaltma Katsayıları	17
2.1.5.	Yük Düzeltme Katsayılarının Belirlenmesi	18
2.1.6.	Kullanılacak Yük Birleşimlerinin Belirlenmesi	18
2.1.7.	Hareketli (Taşıt) Yük Etkilerinin Belirlenmesi	19
2.1.8.	Sabit Yüklerden Oluşan Kesit Etkileri	28
2.1.9.	Kullanım Sınır Durumu İçin İnceleme	31
2.1.10.	Dayanım Sınır Durumu İçin İnceleme	50
2.2.	Problemin Tanımı.....	53
2.2.1.	Tasarım Değişkenleri	53
2.2.2.	Amaç Fonksiyonu.....	57
2.2.3.	Tasarım Parametreleri	59
2.2.4.	Sınırlayıcılar	60
2.3.	Parametrik Çalışmalar	64
2.3.1.	Sayısal Uygulama – 1	64
2.3.2.	Sayısal Uygulama - 2	70
2.3.3.	Sayısal Uygulama - 3	77
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
4.	KAYNAKLAR.....	87
5.	EKLER	91

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÖNGERİLMELİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ÖĞRETME-ÖĞRENME TABANLI
OPTİMİZASYON VE JAYA ALGORİTMALARIYLA OPTİMUM TASARIMI

Şadi AKTEPE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK
2019, 90 Sayfa, 2 Sayfa Ek

Günümüzde kaynakların giderek daralması sonucunda geleneksel tasarım süreçlerine bir seçenek olarak yapı elemanlarının ve yapıların optimum tasarımları daha çok önem kazanmıştır. Yapay zeka tekniklerindeki ve bilgisayar donanımlarındaki gelişmeler sayesinde birçok alanda optimizasyon çalışmaları gün geçtikçe hızla artmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı da, I kirişli öngerilmeli beton köprü üstyapılarının minimum maliyetle optimum tasarımlarını, emniyetten ödün vermeden TLBO ve Jaya Algoritmalarıyla gerçekleştirmekten ibarettir. Gerçekleştirilen çalışma dört asıl ve bir ek bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde optimizasyon teknikleri ve kullanılan algoritmalara ilişkin genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde I kirişli öngerilmeli beton köprü üstyapılarının tasarımı için amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar için matematiksel ifadeler belirlenmekte, bunlarla farklı popülasyon boyutlarını, köprü açıklıklarıyla genişliklerini içeren üç farklı uygulama üzerinde minimum maliyetle optimum tasarımlar gerçekleştirilmekte ve her iki algoritmayla elde edilen bulgularla algoritmaların başarımları karşılaştırılmaktadır. Üçüncü bölüm çalışmanın bütününden çıkarılabilen sonuç ve önerilere ayrılmıştır. Bu son bölümü kaynaklar listesi, bir ek bölüm ve yazarın özgeçmişi izlemektedir.

Elde edilen bulguların irdelenmesi, I kirişli öngerilmeli beton köprü üstyapılarının minimum maliyetle optimum tasarımlarının TLBO ve Jaya Algoritmalarıyla gerçekleştirilebileceğini ve genel olarak bu problem için söz konusu algoritmalarından Jaya algoritmasının, TLBO algoritmasına göre başarımının daha iyi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: I kiriş, Öngerilmeli Köprü, Optimizasyon, TLBO Algoritması, Jaya Algoritması

Master Thesis

SUMMARY

OPTIMUM DESIGN OF PRESTRESSED BRIDGE SUPERSTRUCTURE WITH TLBO
ALGORITHM AND JAYA ALGORITHM

Şadi AKTEPE

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK
2019, 90 Pages, 2 Pages Appendix

Nowadays, as a result of gradually decrease of the sources, the optimum designs of the construction elements and the structures have gained more importance as an alternative to the traditional design processes. Under the favour of the developments in the artificial intelligence techniques and the computer equipments the optimization studies in numerous fields are increasing in number day by day.

The main purpose of this study consists of realizing the optimum designs of I-beam prestressed concrete bridge superstructures with minimum cost through TLBO and Jaya Algorithm without compromising safety. The present study consists of four main and one insertion section. In the first section the general information related to the optimization techniques and the algorithms used is given. In the second section the mathematical expressions of the objective function, the design variables and the restrictions for the design of I-beam prestressed concrete bridge superstructure are identified, with these expressions the optimum designs on three different implementations which include various population sizes, the bridge spans and the widths are realized with minimum cost, and the algorithm performances are compared with the results obtained with both algorithms. The third section is made up of the consequences and the suggestions get from the whole study. This final part is followed by the appendix and the curriculum vitae of the writer.

By analyzing the acquired findings, it is seen that the optimum designs of I-beam prestressed concrete bridge superstructures with minimum cost could be realized through TLBO and Jaya Algorithms and among the mentioned algorithms for this study Jaya Algorithm performance is much better than TLBO Algorithm.

Key Words: I-beam , Prestressed Bridge, Optimization, TLBO Algorithm, Jaya Algorithm.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti	15
Şekil 2.2.	Öngerilmeli I kirişli köprülerde iç ve dış kirişler	16
Şekil 2.3.	Köprü üstyapısında konsol genişliği (<i>Skon</i>)	17
Şekil 2.4.	Köprü üstyapısında tabliye merkezi ile kiriş merkezi arasındaki mesafe (<i>eg</i>)	22
Şekil 2.5.	Kaldıraç kuralı için yapılan kabul	23
Şekil 2.6.	<i>HL</i> – 93 tasarım kamyonu kamyon yüklemesi.....	24
Şekil 2.7.	<i>HL</i> – 93 tasarım kamyonu tandem yüklemesi.....	25
Şekil 2.8.	101 konumu kamyon yüklemesi25	
Şekil 2.9.	101 konumu tandem yüklemesi.....	26
Şekil 2.10.	101 konumu şerit yüklemesi.....	26
Şekil 2.11.	105 konumu kamyon yüklemesi.....	27
Şekil 2.12.	105 konumu tandem yüklemesi.....	27
Şekil 2.13.	105 konumu şerit yüklemesi.....	28
Şekil 2.14.	Diyafram yükü ile oluşan moment dağılımı.....	31
Şekil 2.15.	İç kirişlerde kompozit kiriş enkesiti	34
Şekil 2.16.	Enkesit merkezlerini gösteren kiriş enkesiti.....	36
Şekil 2.17.	Yorulma I sınır durumu hesabı için 105 konumlu hareketli yük	42
Şekil 2.18.	Dış kiriş kompozit kesiti enkesiti	44
Şekil 2.19.	Sehim hesabı için kritik hareketli(taşıt) yük ($P = 145 kN$)	46
Şekil 2.20.	Kıvrımlı ve düz toronları gösteren boyuna kiriş kesiti.....	48
Şekil 2.21.	Kompozit kesit ve idealleştirilmiş kesit enkesitleri.....	51
Şekil 2.22.	AASHTO öngerilmeli kiriş enkesitleri.....	55
Şekil 2.23.	AASHTO <i>PCI BT 72</i> kirişi için enkesit donatı şeması, açıklıkta ve mesnette örnek toron yerleşim.....	57
Şekil 2.24.	80 bireylik popülasyon boyutuna sahip TLBO ve 160 bireylik popülasyon boyutuna sahip Jaya algoritmasına ilişkin ortalama yakınsama grafikleri	67
Şekil 2.25.	Uygulama - 1 için optimum tasarım değişkenlerine göre iç ve dış kirişlerin açıklıkta ve mesnette enkesit donatı şemaları	68

Şekil 2.26. Uygulama – 1, optimum tasarım değişkenlerine göre açıklıkta köprü üstyapısı enkesiti	68
Şekil 2.27. Uygulama - 2 için TLBO ve Jaya algoritmalarının başarımlarını karşılaştırması	72
Şekil 2.28. Uygulama - 2’de köprü açıklıklarına göre birim maliyetler.....	73
Şekil 2.29. Uygulama - 2’de farklı açıklıklardaki köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyetler.....	73
Şekil 2.30. Uygulama - 2, optimum tasarım parametrelerine göre iç ve dış kirişlerin açıklıkta ve mesnette enkesit donatı şemaları.....	75
Şekil 2.31. Uygulama - 2, optimum tasarım parametrelerine göre açıklıkta köprü üstyapısı enkesiti	76
Şekil 2.32. Uygulama - 3 için TLBO ve Jaya algoritmalarının başarımlarını karşılaştırması	79
Şekil 2.33. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün birim uzunluğu için minimum maliyetler	80
Şekil 2.34. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyetler	80
Şekil 2.35. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün birim genişliği için minimum maliyetler	81

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Dayanım Azaltma Katsayıları	17
Tablo 2.2. Yük Düzeltme Katsayıları	18
Tablo 2.3. Çoklu Bulunma Katsayıları	19
Tablo 2.4. Dinamik Yük Katkı Oranı	20
Tablo 2.5. ASTM A 416/A416 M'ye göre 7 telli aderanslı toronların mekanik özellikleri	32
Tablo 2.6. Uzun süreli sehimlerin hesabı için PCI çarpanları	49
Tablo 2.7. Kullanılan tasarım değişkenleri veri havuzları	54
Tablo 2.8. AASHTO önerilmeli giriş enkesit özellikleri	55
Tablo 2.9. Tasarım değişkeni olarak belirlenen beton sınıflarına ait bazı mekanik özellikler	56
Tablo 2.10. Düşük rölaksasyonlu toronlara ait bazı mekanik özellikler	56
Tablo 2.11. Kullanılacak pozlara ait KGM 2018 yılı birim fiyatları	58
Tablo 2.12. Tasarım parametreleri	60
Tablo 2.13. Uygulama - 1 için belirlenen tasarım parametreleri	65
Tablo 2.14. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 1 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları	65
Tablo 2.15. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 1 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları	66
Tablo 2.16. Uygulama - 1, TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım parametreleri	67
Tablo 2.17. Uygulama - 1 için optimum maliyet detayları	69
Tablo 2.18. Uygulama - 1, Wilcoxon testi sonuçları	69
Tablo 2.19. Uygulama - 2 için belirlenen tasarım parametreleri	70
Tablo 2.20. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 2 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları	71
Tablo 2.21. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 2 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları	71
Tablo 2.22. Uygulama - 2 için TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım değişkenleri	74
Tablo 2.23. Uygulama - 2 için optimum maliyet detayları	76
Tablo 2.24. Uygulama - 2 için Wilcoxon testi sonuçları	76

Tablo 2.25. Uygulama - 3 için belirlenen tasarım parametreleri.....	77
Tablo 2.26. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 3 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları.....	78
Tablo 2.27. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 3 için elde edilen maliyet değerleri, başarımları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları.....	78
Tablo 2.28. Uygulama - 3 için TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım değişkenleri.....	82
Tablo 2.29. Uygulama - 3 için optimum maliyet detayları	82
Tablo 2.30. Uygulama - 3 için Wilcoxon testi sonuçları.....	83



SEMBOLLER DİZİNİ

A_c	Kiriş enkesit alanı
A_{bryr}	Bariyer enkesit alanı
A_{ps}	Toplam toron enkesit alanı
A_{toron}	Bir toronun enkesit alanı
b_i	Etkili tabliye genişliği (iç kiriş)
b_e	Etkili tabliye genişliği (dış kiriş)
b_{t1}	Kiriş üst başlık genişliği
b_{t2}	Kiriş üst başlık - gövde geçiş kalınlığı
b_w	Kiriş gövde genişliği
b_b	Kiriş alt başlık genişliği
b_{diaf}	Diyafram genişliği
c	Tarafsız eksen derinliği
c_a	Kiriş kesit merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesi
$c_{\bar{u}}$	Kiriş kesit merkezinin kiriş üst lifine olan mesafesi
$c_{\bar{u}c}$	Kompozit kesit merkezinin tabliye üst lifine olan mesafesi
$c_{\bar{u}ck}$	Kompozit kesit merkezinin kiriş üst lifine olan mesafesi
c_{ac}	Kompozit kesit merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesi
c_{psa}	Toronların enkesit merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesi
$C_{\bar{ö}nger}$	Öngerilme donatısının maliyeti
$C_{\bar{ö}ngerişçilik}$	Öngerilme donatısının yerine konulması işçiliği maliyeti
C_{beton}	Betonun maliyeti
$C_{kirisyer}$	Öngerilme kirişlerinin yerleştirilme maliyeti
d_p	Toronların ağırlık merkezinin kompozit kesitin en üst lifine olan uzaklığı
E_{ps}	Öngerme donatısının elastisite modülü
E_c	Betonun elastisite modülü
E_{ci}	Öngerme işleminin başlangıcında betonun elastisite modülü
e_g	Kiriş ile tabliye enkesit merkezleri arasındaki mesafe
e_m	Toronların enkesit merkezinin kiriş kesit merkezine olan mesafe (açıklıkta)
e_{end}	Toronların enkesit merkezinin kiriş kesit merkezine olan mesafe (mesnette)
f_{pu}	Öngerilme donatısının çekme dayanımı

f_{pbt}	Aktarmadan hemen önce öngerilme donatısının gerilme dayanımı
f_{py}	Aktarmadan hemen önce öngerilme donatısının akma dayanımı
f_{pe}	Kullanım aşamasında kayıplardan sonra öngerilme donatısı gerilme dayanımı
f_{pi}	Aktarma aşamasında öngerilme donatısında oluşan gerilme
F_i	Aktarma anında toronlarda oluşan öngerme kuvveti
f_{pf}	Tüm kayıplardan sonra öngerilme donatılarında kalan gerilme
F_f	Tüm kayıplardan sonra öngerme donatılarındaki toplam öngerme kuvveti
f'_{ci}	Öngerilme işleminin başlangıcında betonun gerilme sınırı
f_{ci}	Kayıplardan önceki beton basınç dayanımı
f_{ti}	Aderanslı donatı için aktarma anında betonda izin verilen çekme gerilmesi
f'_c	Betonun basınç dayanımı
f_c	Kullanım aşamasında tüm kayıplardan sonra betonda basınç gerilmesi sınırı
f_t	Kullanım aşamasında tüm kayıplardan sonra betonda çekme gerilmesi sınırı
f_r	Betonun kırılma modülü
h	Kompozit kesitin toplam yüksekliği
h_{t1}	Kiriş üst başlık kalınlığı (üst kısım)
h_{t2}	Kiriş üst başlık kalınlığı (orta kısım)
h_{t3}	Kiriş üst başlık kalınlığı (alt kısım)
h_w	Kiriş gövde yüksekliği
h_{b1}	Kiriş alt başlık kalınlığı (üst kısım)
h_{b2}	Kiriş alt başlık kalınlığı (alt kısım)
$h_{kiriş}$	Kiriş yüksekliği
h_{tab}	Tabliye kalınlığı
h_{kplm}	Kaplama kalınlığı
h_{fdiaf}	Diyafram yüksekliği
h_{top}	Tabliye kalınlığı ve kiriş yüksekliği toplamı
H	Yıllık ortalama bağıl nem
IM	Dinamik yük katkı oranı
I_g	Kiriş atalet momenti
I_c	Kompozit kesitin atalet momenti
KS	Kiriş sayısı

L	Köprü açıklığı
$L_{kivrimli}$	Kıvrımlı toron uzunluğu
m	Çoklu bulunma katsayısı
M_{DK}	Moment dağıtma katsayısı
M_u	Dayanım I sınır durumu için hesaplanan moment
M_n	Eğilme etkisindeki elemanlarda hesaplanan taşıma gücü moment
M_r	Minimum donatı denetiminin sağlanması için hesaplanan tasarım momenti
M_{cr}	Kesitin çatlama moment
N_L	Köprü şerit sayısı
n_c	Modüler oran (tabliye betonu ile kiriş betonunun elastisite modülü oranı)
P_{diaf}	Diyafram yükü
P_f	Minimum öngerme kuvveti
S	Mesnetten mesnete giriş aralığı
S_{kon}	Konsol uzunluğu
T_{toron}	Öngerilmeli toron sayısı
$T_{kivrimli}$	Öngerilmeli kıvrımlı toron sayısı
W	Köprü genişliği
WW_{bryr}	Köprü bariyer genişliği
W_{bryr}	Bariyer ağırlığı
ϕ	Dayanım azaltma katsayısı
γ_c	Beton birim ağırlığı
$\gamma_{bitüm}$	Kaplama birim ağırlığı
γ_s	Toron birim hacim ağırlığı
Δf_{pT}	Toplam öngerilme kayıpları
Δf_{pES}	Ani kayıplar
Δf_{pLT}	Zamanla oluşan kayıplar
$\sigma_{üi}^A$	Açıklık ortasından giriş üst lifinde oluşan gerilme (aktarma aşaması)
σ_{ai}^A	Açıklık ortasından giriş alt lifinde oluşan gerilme (aktarma aşaması)
$\sigma_{üi}^M$	Mesnette giriş üst lifinde oluşan gerilme (aktarma aşaması)
σ_{ai}^M	Mesnette giriş alt lifinde oluşan gerilme (aktarma aşaması)
$\sigma_{üf}^A$	Açıklık ortasında giriş üst lifinde hesaplanan gerilme (tüm kayıplardan sonra)

σ_{af}^A	Açıklık ortasında kiriş alt lifinde hesaplanan gerilme (tüm kayıplardan sonra)
$\sigma_{üf}^{tab}$	Açıklık ortasında tabliye üst lifinde hesaplanan gerilme(tüm kayıplardan sonra)
σ_{max}^F	Öngerilme donatısında yorulmadan dolayı oluşan maksimum gerilme
σ_{min}^F	Öngerilme donatısında yorulmadan dolayı oluşan minimum gerilme
σ_f^F	Yorulma gerilmesinin değişim aralığı (maksimum – minimum farkı)
$\sigma_f^{sınır}$	Yorulma gerilmesinin değişim sınır değeri
Δ_{105}^{Trmg}	Açıklık ortasında kamyon yüklemesi nedeniyle oluşan ani sehim (105 konumu)
$\Delta_{105}^{Lane mg}$	Açıklık ortasında şerit yüklemesi nedeniyle oluşan ani sehim (105 konumu)
Δ_{105}^{LL+IM}	Açıklık ortasında hareketli yüklerden dolayı oluşan ani sehim (105 konumu)
Δ_{long}	Uzun süreli sehimlerin toplamı (yapımda)
Δ_{long}^n	Uzun süreli sehimlerin toplamı (nihai)
$\Delta^{sınır}$	Sınır sehim değeri

Not: Simgeler dizininde yer almayan simgeler metnin içinde geçtikleri yerde açıklanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapıların dikkate alınan yönetmeliğin şartlarını karşılayarak minimum maliyetle tasarımlarını yapmak inşaat mühendisliğinde ulaşılmak istenen önemli bir durumdur. Bu noktada yapı emniyetini sağlama koşuluyla yapı maliyetini en ekonomik şekilde tasarlama optimum tasarım olarak adlandırılmaktadır. Optimum tasarım elde edilebilmesi zor ve araştırma isteyen bir süreçtir. Yapı optimizasyonu uzun yıllardır inşaat mühendisliğinde bir çok yapı türüne uygulanmakla beraber gelişen teknolojinin de yardımıyla ileri bir noktaya gelmiştir. Günümüzde karmaşık bir konu olan yapı optimizasyonunda doğadan ya da insan etkileşimlerinden esinlenerek ortaya çıkan sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Belirli bir engeli aşma amacıyla iki noktayı birbirine bağlayan bayındırlık yapıları olarak adlandırılan köprüler; kullanım amaçlarına, taşıyıcı sistemlerine, yapımında kullanılan malzemelerine göre başta olmak üzere bir çok sınıfa ayrılmaktadır. Yapımında yüksek dayanımlı malzemeler kullanılan öngerilmeli beton köprüler orta ve büyük açıklıkların geçilmesi noktasında ülkemizde ve dünyada sıkça tercih edilen bir köprü türüdür.

Bu çalışmanın amacı öngerilmeli I kirişli köprü üstyapısının maliyet yönünden optimizasyonunu Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon(TLBO) algoritma ve Jaya algoritması ile gerçekleştirmektir. Bu amaçla birinci bölümde öngerilmeli beton yapı tekniği ve öngerilmeli köprüler hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca yapı optimizasyonu tekniği açıklanarak, kullanılacak olan iki algoritma(TLBO ve Jaya) tanıtılmakta, konu hakkında daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. İkinci bölümde köprü üstyapı tasarımı için gerekli matematiksel ifadeler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Sonrasında öngerilmeli köprü üstyapısı ile ilgili optimizasyon problemini tanımlamak üzere; amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri, tasarım parametreleri ve sınırlayıcılar belirlenmektedir. Tüm bu bilgilerle üç farklı sayısal uygulamada TLBO ve Jaya algoritmaları ile öngerilmeli köprü üstyapısı optimizasyonu gerçekleştirilerek, her iki algoritmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Son bölümde çalışmanın bütününden çıkarılabilecek sonuçlardan ve önerilerden bahsedilmektedir.

1.2. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniği

1.2.1. Öngerilmeli Betonun Tanımı

Öngerilme, öngerme çeliğinin belli bir kuvvetle çekilip kilitlenmesi ve bu kuvvetin betona aktarılması olarak ifade edilmektedir. Öngerilme beton dökülmeden önce yapılıyorsa öncekme, beton dökülüp dayanımını kazandıktan sonra yapılıyorsa ard-çekme olarak adlandırılır.[1]

Betonarmenin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan yapı malzemesi ve uygulaması olan öngerilmeli betonun çeşitli tanımları bulunmaktadır. TS:3233: 1979 ‘‘Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları’’ standardında öngerilmeli beton için ‘‘Elemana gelecek yüklerin etkilerinin, çeliğin gerilmesi ile istenilen şekilde dengelendiği betondur.’’ tanımı yapılmıştır.[2] Öngerilmeli beton yüksek dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı, haddelenmiş, yüksek elastik sınırlı çelik donatıların bir arada kullanılmasıyla elde edilen, çeliğe yapay olarak verilen gerilmenin aderans yoluyla betona iletilmesiyle kesitte oluşacak çekme gerilmelerinin yok edilmesi işlemi şeklinde de ifade edilebilir. [3]

1.2.2. Öngerilmeli Betonun Tarihiçesi

İnşaatlarda öngerilmeli betonun ilk uygulandığı alana örnek olarak kemer inşaatı gösterilebilir. Ortaya yerleştiren kilit taşı diğer taşları basınç altında tutarak öngerilme sağlamaktadır. Çeliği öngerme elemanı olarak kullanan ilk mühendis P.H. Jackson’dır. Taş bloklardan kemer kiriş yapmak için 1872’de patent alan Jackson, taşları delip içlerinden çelik çubuk geçirmiş ve çeliği gererek bir bütünlük sağlamaya çalışmıştır.[1]

Günümüzde ifade ettiğimiz şekilde öngerilmeli betonda yüksek dayanımlı beton ve çelik kullanımının gereğini ilk gören ve uygulayan Fransız mühendis Eugene Freyssinet olmuştur. Freyssinet 1928 yılında yaptığı başarılı deneylerden sonraki yıllarda öngerilmeli yapılar projelendirmiş ve ilk büyük eseri Luzancy köprüsünün yapımına 1941 yılında başlamıştır.[1, 4]

Öngerilmeli betonun kullanım alanı zamanla genişleyerek toplam yapı üretiminde payı gittikçe artmıştır. Günümüzde öngerilmeli beton kiriş, döşeme, kolon gibi yapı

elemanlarında, başta köprüler olmak üzere; yüksek binalarda, tünellerde, kazıklarda, silolarda, nükleer enerji santrallerinde, spor salonlarında, stadyumlarda ve daha bir çok yapıda kullanılmaktadır. [5]

1.2.3. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Üstünlükleri

Öngerilmeli betonun betonarmeden farklı davranışının temel sebebinin kullanılan yüksek dayanımlı malzemeler ve uygulanan öngerilme olduğu bilinmektedir. Yüksek dayanımlı çelik ve betonun beraber kullanılması elemanların ağırlıklarının azalmasını ve böylece büyük açıklıkların ekonomik olarak geçilebilmesini sağlamaktadır.[1, 6]

Yüksek dayanımlı betonda elastisite modülü ve çekme dayanımı yüksek olduğundan, çatlama olasılığı azdır. Elemanlar, elastisite modülünün ve eleman rijitliğinin yüksek olması sonucu daha küçük şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme yapar. Kullanılan yüksek dayanımlı betonun sünme ve rötresi daha düşük olduğu gibi, basınç dayanımının yüksekliği elemanın taşıma kapasitesini artırmaktadır.[5]

Öngerilmeli elemanlarda genelde çekme gerilmesine izin verilmediği için iç kuvvetler ve sehimler istenilen düzeyde tutulabilmekte, çatlaklar da denetim altına alınabilmektedir. Kesitlerin basınç etkisinde olması, kesitlerin tamamından yararlanmayı sağlamaktadır. Durum böyle olunca kesitler küçülmekte ve narinleşmektedir. Aynı açıklıklı betonarme kirişin yarı ağırlığında olduklarından hafif, sabit ağırlıkları düşüktür. Yüksek dayanımlı malzemeler sayesinde daha fazla dayanıma daha küçük kesitli elemanlarla ve maliyetle ulaşılmakta, böylece betonarmeye kıyasla daha ekonomik olabilmektedir.[6]

1.2.4. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprüler

Köprüler, vadi, nehir, otoyol veya benzer bir nedenle ayrılmış iki noktayı birleştirmek gibi önemli bir amaç için inşa edilen yapılardır. Köprüler inşa edilecekleri arazi özelliklerine ve diğer bazı etmenlere göre farklı özellikler gösterir. Bu faktörler arasında toplam geçilecek açıklık ve yapının boyutu, yükleme çeşitleri, tek seferde geçilecek maksimum açıklık, fabrikasyon ya da inşaat için kullanılacak teknolojiler, arazinin şekli, köprünün önemi

ve maliyet sayılabilir. Bu faktörler aynı zamanda tasarım türü ve inşaat yönteminin seçimini de belirlerler.[7]

Öngerilmeli beton sürekli kirişlerde büyük tasarruf sağlayabilmektedir. Büyük açıklıklar; daha narin kesitler ve daha düşük donatılarla geçilebilmekte, bunun yanı sıra yerdeğiştirmeler de azalmaktadır. Bu sebepler öngerilmeli beton kirişli köprüleri özellikle karayollarında ve demir yollarında en çok tercih edilen köprü sistemi haline getirmiştir. Öngerilmeli beton kirişlerin ana malzemesi beton, öngerme kablosu ve betonarme donatısıdır. Belli bir açıklığa kadar basit kirişli öncekmeli olarak öngerilmeli beton kiriş imal edip, yerine nakletmek ekonomik olmaktadır. Daha büyük açıklıklarda ise, öncekmeli elamanlar bir araya getirilip yerinde ard-çekme yapılarak sürekli kiriş elde edilebilmektedir.[1]

1.2.5. Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Türkiye’de Köprü Üst Yapılarında Kullanımı

Öngerilmeli beton kirişlerden oluşan bir köprüde ana yapı elemanları; temeller, ayaklar, öngerilmeli beton kirişler ve tabliyedir. Köprü üst yapısını öngerilmeli beton kirişler ve tabliye oluşturmaktadır.

Günümüzde prefabrike kirişler kullanılan betonarme karayolu köprülerinin, Türkiye’de yaygın olarak uygulanan köprü türü olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yapılmakta olan köprülerde, üstyapı sistemi olarak çoğunlukla öngerilmeli betonarme I kirişler kullanılmakta ve bu kirişlerle 30-35 metre açıklıklar geçilebilmektedir. [8, 9]

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanmış olan 2013 yılına ilişkin bilgilere göre, Türkiye’de toplam uzunluğu yaklaşık olarak 335 km olan 6981 adet köprü bulunmaktadır. Karayolları ağında bulunan bu köprülerin 2754 adeti öngerilmeli beton tekniğiyle yapılmıştır. Ülkemizdeki köprülerin adet olarak %39.4’ü, kilometre olarak ise %55,2’si öngerilmeli beton tekniğiyle inşa edilmiş köprülerdir. [10]

1.3. Optimizasyon

Optimizasyon en iyi sonuca ulaşmak için kullanılan güçlü bir araçtır. Belirli sınırlamaları sağlayacak şekilde, bilinmeyen değişkenlerin en uygun değerlerinin bulunmasını içeren herhangi bir problem, optimizasyon problemi olarak ifade edilmektedir.

Genel bir optimizasyon probleminin matematiksel ifadesi; D tasarım değişkeni sayısını, m eşitsizlik türü sınırlayıcı sayısını ve n eşitlik türü sınırlayıcı sayısını göstermek üzere,

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_D) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (1.1)$$

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_D) \leq 0 \quad k = 1, \dots, n \quad (1.2)$$

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \quad i = 1, \dots, D \quad (1.3)$$

ifadeleri sağlanmak koşuluyla,

$$\text{optimize } f(x_1, x_2, \dots, x_D) \quad (1.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Bu tanımdan yola çıkarak yapısal optimizasyonda da yapısal problem, farklı amaç fonksiyonları ve sınırlayıcılarla ifade edilmektedir. Yapısal optimizasyon işleyişi karmaşık matematiksel işlemler gerektirdiği için uzun süre akademik düzeyde kalmıştır. Gelişen teknolojiyle beraber bilgisayarların yüksek işlem ve saklama kapasitesinin artmasıyla programlama dilleri daha etkin şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Program dillerinin gelişimi optimizasyon ve yapısal çözümleme yöntemlerindeki ilerlemeleri hızlandırmasıyla günümüzde yapısal tasarımda optimizasyon yöntemleri daha etkili ve daha çok kullanılmaktadır.[11]

1.3.1. Optimizasyon Elemanları

Bir optimizasyon probleminde temel kavramlar tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılar olarak sıralanmaktadır. Optimizasyonda sınırlayıcılara uygun olarak amaç fonksiyonunun minimum ya da maksimum değerinin hesaplanabilmesi için ilk olarak tasarım değişkenlerinin tanımlanması gerekmektedir.

Tasarım değişkenleri ya da karar değişkenleri olarak adlandırılan parametreler amaç fonksiyonunun ve sınırlayıcıların matematiksel ifadelerinde kullanılmaktadır. Yapı sistemlerinde tasarım değişkenlerine; yapı elemanı enkesitlerinin boyutları, kullanılan malzemelerin özellikleri, açıklık mesafeleri örnek olarak verilebilir.

Amaç fonksiyonu yapılmak istenilen optimizasyonu tanımlayan fonksiyondur. Tasarım değişkenleri parametrelerine bağlı olarak en küçük ya da en büyük değeri araştıran amaç fonksiyonu genellikle yapı maliyeti ya da yapı ağırlığı olmaktadır.

Problemin çözüm uzayını sınırlandıran koşullar sınırlayıcılar olarak ifade edilmektedir. Eşitlik ve eşitsizlik türü tüm sınırlayıcıları sağlayan çözümler uygun çözümlerdir. Bu uygun çözümlerden amaç fonksiyonu bakımından en uygun çözüm, optimum çözüm olmaktadır. Yapısal optimizasyon problemlerinde yürürlükteki yönetmelikler ve standartlar dikkate alınarak belirlenen sınırlayıcılara taşıma gücü, gerilme ve boyut denetimleri örnek olarak verilebilmektedir.

1.3.2. Optimizasyon Teknikleri

Optimizasyon tekniklerinin birçoğu başlangıç çözümünden başlayarak belirli bir iterasyona göre yaklaşık çözümlerin aranması işlemini gerçekleştiren sayısal tekniklerdir.[12]

Optimizasyon probleminin çözümü için bir çok algoritma kullanılmaktadır. Genel olarak optimizasyon algoritmaları deterministik(belirleyici) algoritmalar ve stokastik (rastgele) algoritmalar olarak iki gruba ayrılmıştır.

Deterministik optimizasyon algoritmaları rastgele değer üretilmesinin gerekmediği, parametrelerin sabit değerler aldığı matematiksel fonksiyonların çözümünde kullanılan algoritmalardır.[13]

Stokastik optimizasyon algoritmalar bir problemin kabul edilebilir çözümünü ihtimalci bir yolla üretebilen algoritmalar olarak ifade edilmektedir. Kabul edilebilir zamanlarda makul çözümler üretebilen bu algoritmalar sezgisel, meta-sezgisel ve hiper-sezgisel olarak farklı gruplara ayrılmıştır. Bu algoritmalar son yıllarda optimize edilecek modelin çözümü için uygun değerlerin bulunmasında önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır.

Yukarıda belirttiğimiz gibi bir stokastik algoritma yöntemi olan meta-sezgisel algoritmalar arama yöntemlerini rastgele stratejilere dayalı olarak yapan algoritmalarlardır. Meta-sezgisel yöntemlerin sezgisel yöntemlerden temel farkı problemden bağımsız, her problem tipi için çalışabilen yöntemler olmasıdır.[11]

Meta-sezgisel yöntemlerin çoğu doğadan ya da günlük yaşamdan esinlenerek ortaya çıkmıştır. Genetik algoritma, karınca kolonileri algoritması, tabu arama algoritması en bilinenleri olmak üzere, bu tezin çalışma konusu olan köprü üst yapısı optimizasyonu için kullandığımız öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritma(TLBO) ve Jaya algoritması da meta-sezgisel yöntemlerdendir.

1.3.2.1. Öğretim-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması

Öğretim-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon(TLBO) Algoritması, herhangi bir sınıftaki öğretmen ve öğrenci ilişkisinden ve öğrencilerin birbirleriyle olan etkileşiminden esinlenen popülasyon tabanlı meta-sezgisel bir yöntemdir. TLBO algoritmasının diğer algoritmalar gibi probleme özgü ayarlanması gereken bir kontrol parametresi bulunmamakta, bu da uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır. Algoritma sadece popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı olmak üzere iki adet kontrol parametresine ihtiyaç duymaktadır.[14]

Rao ve diğ. [15] tarafından geliştirilen TLBO algoritması öğretmen aşaması ve öğrenci aşaması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Öğretim aşaması öğretmenin öğrencileri eğitmesi, öğrenci aşaması öğrencilerin kendi aralarındaki etkileşimi sonucu gerçekleşen öğrenmeyi temsil etmektedir.

Algoritmada popülasyon sınıfta bulunan öğrenciler ve öğretmenden oluşmaktadır. İlk olarak algoritma popülasyon bireylerini rastgele olarak üretir. Üretilen bireylerden en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olanı öğretmen ($x_{\text{öğretmen}}$) olarak belirlenir. Öğretmen

aşamasında öğretmen olarak seçilen birey, diğer öğrenci bireylerin bilgi seviyesini kendi bilgi seviyesine ulaştırmaya çalışır. Bu süreçte yeni eğitilmiş bireyler ifadesi;

$$x_{yeni,i} = x_{eski,i} + r_i (x_{\text{öğretmen}} - T_f x_{ort}) \quad (1.5)$$

Burada $x_{yeni,i}$ i. yeni eğitilmiş öğrenci bireyi, $x_{eski,i}$ eski öğrenci bireyi, r_i i. birey için rastgele üretilen ve 0 ile 1 arasında değer alan bir sayıyı, T_f 1 ya da 2 değerini rastgele alan bir çarpanı, x_{ort} ise bireylerin bilgi seviyesinin ortalamasını belirtmektedir. Bu aşamada yeni eğitilmiş öğrenci bireyin bilgi seviyesinin eski öğrenci bireyin bilgi seviyesinden yüksek olduğu belirlenirse yeni birey eski bireyin yerini almaktadır.

Öğrenci aşamasında algoritma, popülasyondaki öğrencilerin kendi aralarında olan etkileşimlerinin benzetimi gerçekleşmektedir. Popülasyondan seçilen öğrenci i. eski bir birey ($x_{eski,i}$), yine popülasyon içinden rastgele seçilen farklı bir j. eski bireyle $x_{eski,j}$ etkileşime sokulur. Bu etkileşimin bağıntısı;

$$\text{Eğer } f(x_i) > f(x_j) \rightarrow x_{yeni,i} = x_{eski,i} + r(x_{eski,j} - x_{eski,i}) \quad (1.6)$$

$$\text{Eğer } f(x_j) > f(x_i) \rightarrow x_{yeni,j} = x_{eski,i} + r(x_{eski,i} - x_{eski,j}) \quad (1.7)$$

Etkileşim sonrası önceki aşamaya benzer olarak yeni oluşturulan öğrenci bireyin ($x_{yeni,i}$) bilgi seviyesi etkileşimden önceki bireyin ($x_{eski,i}$) bilgi seviyesinden yüksekse, yeni öğrenci birey önceki bireyin yerini almaktadır.

Optimum çözüme ulaşmak için sınıftaki öğrencilerin bilgi seviyelerinin artması hedeflenen algoritmada öğrenme sürecinde öğretmenin bilgi seviyesi ne kadar yüksekse öğrencilerden elde edilen çözümlerin doğruluk oranı artmaktadır. Öğrencilerden elde edilen sonuçlar optimizasyon problemindeki aday çözümleri ifade etmektedir. [15]

İnşaat mühendisliği alanında TLBO algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarından bazıları şöyledir;

Dede [16], kafes yapıların ayrık optimizasyonu için öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon(TLBO) algoritmasını kullanmıştır. Minimum ağırlık için optimizasyon yapılan çalışmada, beş farklı kafes yapı TLBO algoritması ile optimize edilerek sonuçlar geçmişte yapılan optimizasyon çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. TLBO algoritmasının kafes

yapılarda etkili bir şekilde kullanılabileceğini ve yöntemin başka yapısal tasarım uygulamalarına da uygulanabileceğini belirtmiştir.

Öztürk [17], yapmış olduğu çalışmada betonarme tekil temellerin minimum maliyetle optimum tasarımlarını TLBO, Guguk Kuşu Arama, Yapay Arı Koloni algoritmalarıyla gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulguları çeşitli başarımlar ölçütlerine göre değerlendirmiş, en yüksek başarımları ve en yüksek yakınsama hızını TLBO algoritmasının gösterdiğini belirtmiştir.

Artar [18], çelik uzay kafes sistemin TLBO algoritması ile optimum tasarımını gerçekleştirmiştir. Sonuçları daha önce yapılan üç çalışma ile karşılaştırmıştır.

Değertekin ve Hayalioğlu [19], TLBO algoritmasını uzay kafes yapı örneği üzerinde test etmiştir. Elde edilen sonuçları aynı örneğin daha önce farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Kayabekir vd. [20], statik yükler ve deprem yükleri altında konsol bir istinat duvarının optimizasyonunu TLBO algoritmasını kullanan bir metot geliştirerek yapmışlardır. Çalışmada istinat duvarının birim uzunluğu için toplam maliyetin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. TLBO algoritması ile daha düşük maliyetli istinat duvarı tasarımı elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Topal vd. [21], yapmış oldukları çalışma ile basit mesnetli antisimetrik tabakalı kompozit plakaların frekans optimizasyonu için TLBO algoritması ile bir teknik sunmuşlardır. İdeal tabakalı plakayı bulmak için tabakalarda katmanların lif yönlerini tasarım değişkeni olarak belirlenmiştir. Birinci derece kesme deformasyon teorisi tabakaların doğal frekanslarını hesaplamak için kullanılmıştır. TLBO algoritmasının etkinliğini belirleme adına çeşitli sayısal örnekler sunulan çalışmada, ayrıca ABC algoritması ile de çözümler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. TLBO algoritmasının bu tür problemlerde etkili bir şekilde sonuç verebileceğini belirtmişlerdir.

1.3.2.2. JAYA Algoritması

Sanskritçede zafer anlamına gelen jaya kelimesinden adını alan Jaya (JA) algoritması sürekli en iyi çözüme ulaşmayı deneyen ve kötü sonuçlardan uzaklaşmaya çalışan bir anlayışa dayanmaktadır.

TLBO algoritması gibi Jaya algoritması da Rao[22] tarafından geliştirilmiş olup yine TLBO gibi kendine özgü parametreleri bulunmamaktadır. Tek bir aşamadan oluşan algoritmanın uygulanışı TLBO algoritmasından nispeten daha pratik olup, çalışma şekli oldukça farklıdır.

Herhangi bir i . iterasyonda m tasarım değişkeni sayısını, ($j = 1, 2, \dots, m$), n aday çözüm sayısını ($k = 1, 2, \dots, n$) göstermektedir. Burada n aday çözüm sayısı popülasyondaki en iyi ve en kötü çözüm dışındaki diğer bireylerin sayısını ifade etmektedir. Aday çözümler içerisinde en iyi çözüm $f(x)_{eniye}$, en kötü çözüm ise $f(x)_{enkötü}$ olarak saklanmaktadır.

Algoritmada herhangi bir i . iterasyonda k . aday çözümün j . değişkeninin ifadesi $x_{j,k,i}$ olursa, bu değişken:

$$x_{j,k,i}^{yeni} = x_{j,k,i} + r_{1,j,i} (x_{j,eniye,i} - |x_{j,k,i}|) - r_{2,j,i} (x_{j,enkötü,i} - |x_{j,k,i}|) \quad (1.8)$$

Bu denklemde $x_{j,k,i}^{yeni}$ yenilenen $x_{j,k,i}$ değeri olmak üzere; $x_{j,eniye,i}$ en iyi çözümde j . tasarım değişkeninin değeri, $x_{j,enkötü,i}$ en kötü çözümde j . tasarım değişkeninin değerini göstermektedir. $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ i . iterasyonda j . tasarım değişkeni için $[0,1]$ aralığında rastgele üretilen reel sayılardır. $r_{1,j,i} (x_{j,eniye,i} - |x_{j,k,i}|)$ terimi var olan çözümün en iyi çözüme yaklaşma eğilimini, $r_{2,j,i} (x_{j,enkötü,i} - |x_{j,k,i}|)$ terimi ise var olan çözümün en kötü çözümden uzaklaşma eğilimini belirtmektedir. Eğer $x_{j,k,i}^{yeni}$ daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri verirse eski değerini yerini alarak bir sonraki iterasyon için girdi olarak kullanılmaktadır.[22,23]

Nispeten yeni bir algoritma olan Jaya algoritması ile inşaat mühendisliği alanında yapılan optimizasyon çalışmalarından bazıları şunlardır.

Öztürk ve Dede [23], yapmış oldukları çalışmada payandalı bir betonarme istinat duvarının minimum maliyet için optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada SAP2000 yazılımında hazırlanan duvar modeline algoritmanın kodlandığı MATLAB yazılımı üzerinden dış yükler uygulanarak istenen yapısal çözümler gerçekleştirilmiş, elde edilen kesit etkileri algoritma içerisinde kullanılmıştır. Problemden duvar geometrisi ve duvarın çeşitli bölgelerindeki donatılarla 17 adet tasarım değişkeni belirlenmiş olup kayma, devrilme ve taşıma gücü tahkikleri, betonarme kesit denetimleri, boyut ve donatılara ilişkin 46 adet sınırlayıcı bulunmaktadır. Bir sayısal uygulama üzerinde gerçekleştirilen optimum tasarımdan elde edilen bulguları irdelemişlerdir.

Dede [24], çalışmasında ızgara formlu çelik yapının optimum tasarımı için Jaya algoritmasını kullanmıştır. LRFD-AISC dikkate alınarak tasarımı yapılan yapıda tasarım değişkenleri kesit alanına bağlı olarak belirlenmektedir. Amaç fonksiyonu minimum ağırlık olan çalışmada maksimum gerilme ve maksimum deplasmanlar sınırlayıcı olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile momentler, her elemanın kesme kuvveti ve mafsal deplasmanları hesaplanmıştır. Çalışmada Jaya algoritması ile yapılan optimizasyon geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış, sonuçlara göre Jaya algoritmasının ızgara formlu çelik yapılarda etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirtilmiştir.

1.4. Öngerilmeli Beton Köprü Üstyapısı ile İlgili Optimizasyon Alanında Yapılan Bazı Çalışmalar

Öngerilmeli beton köprü üstyapısında optimizasyon alanında araştırmacıların yapmış olduğu birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Jones [25], minimum maliyetle öngerilmeli beton kirişlerin tasarımı için geliştirdiği programda belirlediği kiriş kesiti ve bu kiriş için düzenlenmiş donatı planına göre beton dayanımını, toronların sayısını ve yerleşimini optimize etmeyi amaçlamıştır. Sınırlayıcı olarak taşıma gücü momenti, çatlama momenti ve sehim hesapları denetimi belirlenmiştir. Bu yöntemi uygulamaya geçirme amacıyla yazılan bir bilgisayar programını açıklamak için kutu kesitli kirişlerden oluşan bir otoyol köprüsü tasarımı yapılmıştır.

Yu vd. [26], yayınladıkları makalede genelleştirilmiş geometrik programlamanın kutu kesitli öngerilmeli köprü kirişlerine uygulanmasını ele almışlardır. Maliyet olarak beton, kalıp ve öngerilme donatıları hesaplanmıştır. Programın sınırlayıcıları sehim, kesme kuvveti ve geometrik kriterlerle belirlenmiştir. Öngerme kuvveti, kiriş yüksekliği gibi tasarım değişkenlerinin maliyet üzerine etkileri basit bir örnekleme test edilmiştir.

Lounis ve Cohn [27], köprü sistemlerinin optimum tasarımını standartlaştırma amacıyla yapmış oldukları çalışmada köprü sisteminin bütün olarak optimizasyonunun, köprü elemanlarının ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilecek sonuçlardan daha uygun olacağı örneklerle sunmuşlardır. Köprü bileşenleri, köprü boy ve enkesiti, kirişler ve tabliye dikkate alınarak üç farklı çalışma ortaya konulmuş olup, taşıma gücü ve emniyet gerilmeleri sınırlayıcı olarak dikkate alınmıştır.

Oktar [28], yüksek lisans tezinde öngerilmeli beton kirişlerin lineer olmayan programlamayla optimum tasarımı üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmasında I, T ve

dikdörtgen kesitli basit ve iki açıklıklı kirişleri incelemiştir. Amaç fonksiyonu kirişlerin maliyeti ve ağırlığı olarak belirlenmiştir. Problem çözümünü matematiksel programlama teknikleri ile gerçekleştirmiştir. Tasarım parametreleri için duyarlık analizi yapmış ve sayısal örnekler vermiştir.

Lin ve Frangopol [29], AASHTO yönetmeliğine göre hazırladıkları çalışmada betonarme kirişlerin optimizasyonunu sunmuşlardır. Sunmuş oldukları iki optimizasyondan birincisinde yük ve dayanım katsayıları kullanılırken ikincisinde tamamen güvenilirlik yaklaşımı baz alınmıştır. Bu çözümlerde tasarım parametreleri ve tasarım değişkenleri tanımlanmış, sınırlayıcılar AASHTO yönetmeliğine göre belirlenmiştir. Her iki optimizasyonda doğrusal olmayan programlama kullanılmıştır.

Çağatay [30], prizmatik ve prizmatik olmayan öngerilmeli beton kirişlerin optimum tasarımı için üç farklı bilgisayar programı geliştirmiştir. İlk iki programında ağ araştırma yöntemini ve gradyan izdüşümü yöntemini, üçüncü programda Magnell'in grafik yöntemini kullanarak minimum kuvvet tasarımı uygulamıştır. Ayrıca bilgisayar programları ile optimum tasarımı yapılmış beş adet I kesitli öngerilmeli kirişin eğilme altındaki davranışlarını incelemiştir.

Nohutçu [31], basit mesnetli kompozit otoyol köprü kirişlerinin analizinde ve projelendirilmesinde kullanılmak üzere bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Geliştirdiği program ile otoyol köprü üstyapılarında kullanılan 4 kiriş çeşidinin kesit çözümlerini yapmış ve projelendirmiştir.

Aparicio vd. [32], bilgisayar destekli öngerilmeli beton otoyol köprülerinin tasarım sistemini çalışmışlardır. Bu sistemle öngerme donatısı, betonarme donatısı gibi malzemelerin maliyetlerinin hesaplandığı ifade edilmiştir. Sistemin önemli görülen teknik gereklilikleri göz önünde bulundurarak kısa zamanda belirli bir köprü'nün ekonomik tahminini ve doğru tasarımını yaptığını belirtmişlerdir.

Çağatay vd. [33], öngerilmeli beton kirişlerin eğilme etkisinde optimizasyonu ile ilgili bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Programda öngerilme kuvveti, öngerme donatılarının yerleşimi ve kesit boyutları ile ilgili optimum değerler bulunabilmektedir. Optimizasyonda eğilme gerilmeleri, paspayı, geometri denetimleri, nihai moment denetimlerini kapsayan 28 adet sınırlayıcı bulunmaktadır. Amaç fonksiyonu beton, öngerme donatısı ve kalıp işçiliği maliyetlerinden oluşmaktadır. Yaygın kullanılan idealize I kesitli kiriş yerine, 8 geometrik değişkenli genel I kesitli kirişler kullanılan çalışmada; biri literatürde bulunan ve diğerleri de literatürde bulunan o çalışmaya uyarlanan toplam 4 farklı sayısal uygulama

çözümlemiştir. Minimum maliyet ve minimum boyutlandırma alanları ile ilgili sonuçlar kıyaslanmıştır.

Wagdy vd. [34], öngerilmeli beton kirişli bir köprünün ayrıntılı tasarımını çalışmışlardır. Çalışmada üstyapı sürekli hareketli yük etkisinde olan iki basit açıklığı içerirken altyapı çoklu kolonlardan oluşmaktadır. Çalışmada köprü bileşenlerinin tasarım basamaklarını ifade eden detaylandırılmış ve ilgili teknik özelliklere kolay ulaşımı sağlayan akış şemaları hazırlanmıştır.

Sirca ve Adeli [35], öngerilmeli I kirişli köprü üst yapısının maliyet optimizasyonunu yeni bir yöntemle gerçekleştirmişlerdir. Maliyet optimizasyonu öngerilmeli beton, tabliye betonu, öngerilme donatısı, tabliye donatısı ve kalıp imalatlarını kapsamaktadır. Problem karışık tamsayı-ayrık doğrusal olmayan programlama olarak formüle edilmiş olup çözümünde Adeli ve Park tarafından geliştirilen sinir ağı modeli kullanılmıştır.

Du ve Au [36], Çin, Hong Kong ve AASTHO LRFD yönetmeliklerini kullanarak öngerilmeli beton köprü kirişlerinin güvenilirlik endeksi ve öngerilme hesap gereksinimlerinin kıyaslamasını yapmışlardır. Çalışmada açıklığı 25 m ile 40 m arasında değişkenlik gösteren tipik ard-çekimli beton kirişlerin belirtilen üç yönetmeliğe göre deterministik yapısal çözümlemesi sunulmaktadır.

Aydın [37], doktora tezi çalışmasında öngerilmeli beton bitişik I kirişli kısa ve orta açıklıklı köprü üstyapılarının optimum tasarımını genetik algoritma ile gerçekleştirmiştir. Tasarım değişkenleri köprü enkesitindeki kiriş sayısı, kiriş enkesit boyutları ve öngerilme donatıları olarak belirlenmiştir. Çalışmada eğilme emniyet gerilmeleri, taşıma gücü, kayma emniyet gerilmeleri, kesme taşıma gücü, sehim, süneklik sınırları gibi sınırlayıcılar dikkate alınmıştır. Üç farklı sayısal uygulamaya yer verilen çalışmada amaç fonksiyonu maliyet bakımından öngerme donatısı ve beton olarak seçilmiştir.

Sarsık [38], yüksek lisans tezi çalışmasında köprü üstyapısına uygun 9 farklı öngerilmeli prefabrike I kesitli köprü kirişinin değişen açıklıklarda hesabını yapmış ve bu tip kirişlerin hangi açıklıklarda etkin olarak kullanılacağını belirlemiştir. Çalışmada ayrıntısı verilen sayısal uygulamaya göre 9 tip kirişe ilişkin sonuçlar tablolarla sunulmuş, kirişlerin öngerme donatısı miktarına bağlı olarak eğilme kapasitelerinin ve öngerme kayıplarının değişimi diyagramlarla ifade edilmiştir.

Rana vd. [39], 20 m ile 50 m arasındaki orta açıklıklı ardgermeli I kirişli köprü üstyapılarının optimizasyonunu AASHTO LRFD(2002) yönetmeliğini dikkate alarak yapmışlardır. Evrimsel işlem algoritması ile yapılan çalışmada ölçüt olarak köprünün

açıklığı, tabliye kalınlığı, öngerme donatı miktarları ve donatıların kirişlerdeki yerleşim planları gibi tasarım değişkenleri oluşturulmuştur. Maliyet yönünden hazırlanan bu optimizasyonu mevcut bir projeye uygulayıp, daha düşük maliyetli tasarımını sunmuşlardır.

Hernandez vd. [40], öngerilmeli beton kirişlerin optimum tasarımlarını yapan bir program(VTOP) geliştirmişlerdir. Tasarımcılara kolaylık sağlama amacı ile grafik ara yüzü ile geliştirilen programla ilgili kiriş ve tabliye tasarımlarını ve analizlerini çeşitli bir çok örneklerle sunmuşlardır.

Ahsan vd. [41], çalışmalarında ardçekim yöntemiyle üretilen öngerilmeli beton I kirişli köprülerin optimizasyonunu yapmışlardır. Maliyet bakımından yapılan çalışmada, sınırlayıcılar AASHTO yönetmeliğine göre belirlenmiştir. Çalışmada evrimsel işlem algoritması kullanılmış olup, optimizasyonun uygulanan bir köprü projesinde maliyet açısından %35 civarında tasarruf sağladığını belirtmişlerdir.

Aydın ve Ayvaz [42], öngerilmeli beton köprülerin toplam maliyetinin optimizasyonunu çalışmışlardır. Çalışmanın amacı çok açıklıklı köprülerin optimum açıklık sayısını ve optimum kesit özelliklerini belirlemektir. Köprü üstyapısı önçekimli öngerilmeli I kirişlerden, altyapısı tekli kolon ayaklarından oluşmaktadır. AASHTO yönetmeliği dikkate alınan çalışmada tasarım değişkenleri açıklık sayısı, öngerilmeli kirişlerin kesit boyutlandırmaları ve öngerilme donatısının alanı olarak belirlenmiştir. Maliyet bakımından yapılan optimizasyon hibrit genetik algoritma ile gerçekleştirilmiş olup, algoritmanın öngerilmeli beton köprülerin maliyet optimizasyonunda etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

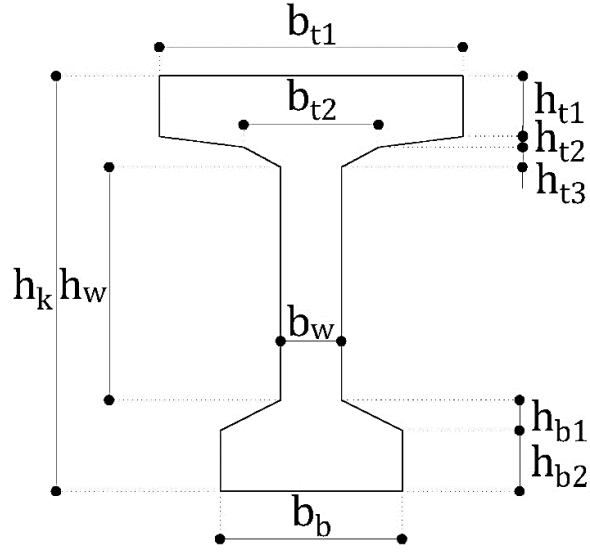
Quaranta vd. [43], öngerilmeli beton kirişlerin özel diferansiyel evrim tabanlı teknikle maliyet optimizasyonunu çalışmışlardır. Optimum tasarım Avrupa yapı yönetmeliğine uygun sınırlayıcılarla yapılmıştır. Tasarım değişkenleri öngerilme donatısı miktarı ve kesit şeklinden oluşmaktadır. Çalışmada sunulan yaklaşımın uygulandığı sayısal örnekler verilmiştir.

Türkeli [44], doktora tezinde kısmen öngerilmeli beton kirişlerin Yapay Arı Koloni algoritması ve Genetik algoritmayla maliyet bakımından optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. I ve T kesitli kirişler için üç problemde Yapay Arı Algoritması ve Genetik Algoritma ile amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar belirlenerek, maliyet yönünden optimum tasarımlarını yapmış ve elde edilen bulguları, geleneksel yöntemlerle elde edilenlerle karşılaştırmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR

2.1. Öngerilmeli Köprü Üstyapı Tasarımı İçin Hesaplamalar

Bu bölümde öngerilmeli köprü üstyapı tasarımı için hesaplamalar AASHTO LFRD[45] yönetmeliği kapsamında yapılacaktır. Köprü üstyapısında bulunan kirişlerde iç ve dış kirişlerin hesaplarının ayrı ayrı yapılması gerekmektedir. Öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti

2.1.1. Kiriş İçin Minimum Boyut Denetimi

Öngerilmeli köprü kirişlerinin AASHTO LFRD[45] yönetmeliğine göre sağlaması gereken koşullar şu şekildedir;

$$\text{Üst başlık kalınlığı } (h_{t1} + h_{t2} + h_{t3}) \geq 50 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$\text{Gövde genişliği } (b_w) \geq 125 \text{ mm} \quad (2.2)$$

$$\text{Alt başlık kalınlığı } (h_{b1} + h_{b2}) \geq 125 \text{ mm} \quad (2.3)$$

2.1.2. Minimum Yükseklik Denetimi (Tabliye Dahil)

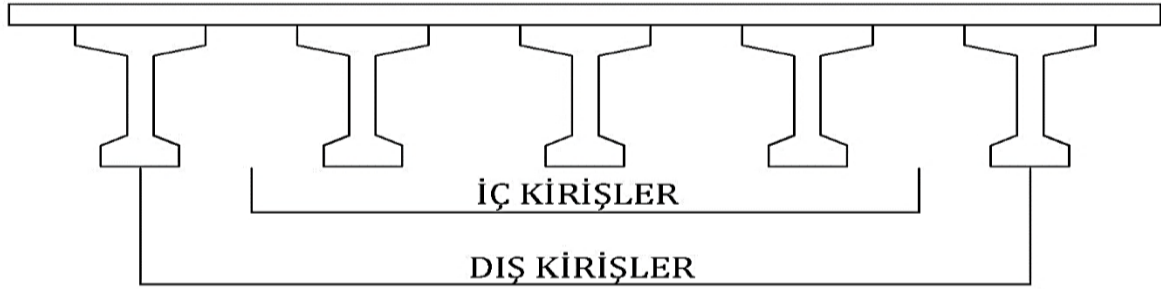
Basit(tek) açıklıklı öngerilmeli I kirişler için tabliye kalınlığı dahil minimum yüksekliği;

$$h_{min} = 0,045 \cdot L \quad (2.4)$$

olması gerekmektedir. Burada L köprü açıklığıdır.

2.1.3. Etkili Tabliye Genişliğinin Belirlenmesi

Etkili tabliye genişliği hesabı iç ve dış kirişlerde farklı şekillerde yapılmaktadır. İç ve dış kirişler aşağıdaki köprü enkesitinde şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Öngerilmeli I kirişli köprülerde iç ve dış kirişler

İç kirişlerde etkili tabliye genişliği (b_i), ortalama kiriş aralığı olarak tanımlanmak üzere;

$$b_i \leq S = (W - 2 \cdot S_{kon}) / (KS - 1) \quad (2.5)$$

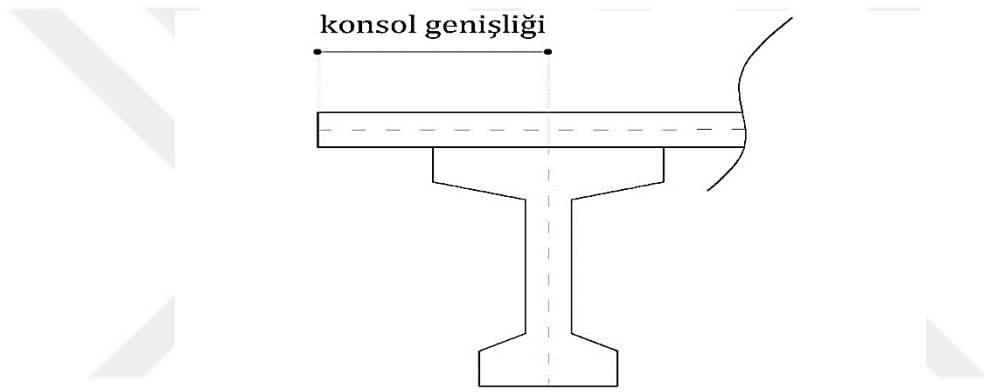
şeklinde hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda S ortalama kiriş aralığını, W köprü genişliğini, S_{kon} konsol uzunluğunu ve KS kiriş sayısını göstermektedir.

Dış kirişlerde etkili tabliye genişliği (b_e);

$$b_e^* \leq S_{kon} \quad (2.6)$$

$$b_e = 1/2 \cdot b_i + b_e^* \quad (2.7)$$

ifadeleriyle hesaplanmaktadır.



Şekil 2.3. Köprü üstyapısında konsol genişliği (S_{kon})

2.1.4. Dayanım Azaltma Katsayıları

Bu çalışmada kullanılacak olan öngerilmeli elemanlar için dayanım azaltma katsayıları (ϕ) AASHTO LRFD yönetmeliğine göre şu şekilde tanımlanmaktadır.

Tablo 2.1. Dayanım Azaltma Katsayıları

Dayanım Sınır Durumu	ϕ
Eğilme ve Çekme	1,00
Kesme ve burulma	0,90
Ankraj bölgesinde basınç	0,80
Diğer sınır durumlar	1,00

2.1.5. Yük Düzeltme Katsayılarının Belirlenmesi

AASHTO LRFD yönetmeliğinde kullanılan yük düzeltme katsayısı(η_i), süneklikle ilgili olan bir katsayı(η_D), elamanın ihtiyaç fazlası olup olmaması ile ilgili bir katsayı(η_R) ve köprünün kullanım önemine göre belirlenen katsayının(η_I) çarpımından oluşmaktadır. Dayanım, kullanım ve yorulma sınır durumlarında bu çalışmaya konu olan uygulamalarda kullanılan yük düzeltme katsayıları Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Yük Düzeltme Katsayıları

	Dayanım	Kullanım	Yorulma
η_D	1,0	1,0	1,0
η_R	1,0	1,0	1,0
η_I	1,0	Uygulanmaz	Uygulanmaz
$\eta_i = \eta_D \cdot \eta_R \cdot \eta_I$	1,0	1,0	1,0

2.1.6. Kullanılacak Yük Birleşimlerinin Belirlenmesi

AASHTO LRFD’ye göre;

Dayanım I sınır durumunda $\eta_i = 1$ olmak üzere;

$$U = \eta_i [1,25 \cdot DC + 1,50 \cdot DW + 1,75 (LL + IM)] \quad (2.8)$$

Yorulma I sınır durumunda $\eta_i = 1$ olmak üzere;

$$U = \eta_i [1,50 (LL + IM)] \quad (2.9)$$

Kullanım III sınır durumunda $\eta_i = 1$ olmak üzere;

$$U = \eta_i [1,00 (DC + DW) + 0,80(LL + IM)] \quad (2.10)$$

yük birleşimleri uygulanacaktır.[45]

Burada *DC* kiriş, tabliye gibi yapısal elemanların sabit yüklerinden, *DW* ise bitüm kaplama gibi tabliye üstü tabakaların sabit yüklerinden meydana gelen eğilme momentlerini göstermektedir. *LL* hareketli(taşıt) yükünden *IM* ise dinamik yük etkisini ifade etmektedir.

2.1.7. Hareketli (Taşıt) Yük Etkilerinin Belirlenmesi

2.1.7.1. Şerit Sayısının Belirlenmesi

Köprülerde şerit sayısı(N_L) aşağıdaki bağıntıyla belirlenmektedir.

$$N_L = INT((W - 2 \cdot WW_{bryr})/3600) \quad (2.11)$$

W köprü genişliğini(mm), WW_{bryr} bariyer genişliğini(mm) göstermek üzere, çıkan sonucun tamsayı kısmı şerit sayısını ifade etmektedir.

2.1.7.2. Çoklu Bulunma Katsayıları

Şerit sayısına göre çoklu bulunma katsayısı (m) aşağıdaki tabloya göre seçilmektedir.

Tablo 2.3. Çoklu Bulunma Katsayıları

Yüklü şerit sayısı	m
1	1,20
2	1,00
3	0,85
>3	0,65

2.1.7.3. Dinamik Yük Katkı Oranı

Dinamik yük katkı oranı (IM) yorulma ve diğer bileşenlerde kamyon yüküne $(1 + IM/100)$ formülüyle uygulanmaktadır.

Tablo 2.4. Dinamik Yük Katkı Oranı

Bileşen	IM
Yorulma	15
Diğer	33

2.1.7.4. Moment Dağıtma Katsayılarının Belirlenmesi

Kirişte ve tabliyede kullanılan betonun basınç dayanımları (f'_c) kullanılarak söz konusu betona ilişkin elastisite modülleri;

$$E_c = 0,043 \cdot K_1 \cdot \gamma_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.12)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada K_1 agrega korelasyon katsayısını ifade etmektedir. Eğer agregaya ilişkin bu katsayının belirlenmesinde kullanılacak deney verisi yoksa, söz konusu katsayı 1 alınmaktadır. γ_c betonun birim hacim ağırlığıdır.

Bu durumda yukarıdaki elastisite modülü bağıntısı;

$$E_c = 4800 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.13)$$

halini almaktadır. Elastisite modüllerinden faydalanarak kiriş betonu ile tabliye betonu arasındaki modüler oran;

$$n_{c'} = \frac{E_c^{kiriş}}{E_c^{tabliye}} \quad (2.14)$$

olarak belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra iç ve dış kirişlerde moment dağıtma katsayılarının ayrı ayrı belirlenmesine geçilmektedir.

2.1.7.4.1. İç Kirişlerde Moment Dağıtma Katsayılarının Belirlenmesi

İç kirişlerde bir şeritli yükleme durumunda moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{Si}) :

$$M_{DK}^{Si} = 0,06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{S}{L}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{K_g}{L \cdot h_{tab}^3}\right)^{0,1} \quad (2.15)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Bağtıda S kiriş aralığını, L köprü açıklığını, h_{tab} tabliye kalınlığını ifade etmektedir.

KS kiriş sayısını belirtmek üzere (2.15) bağıntısının uygulanabilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir;

$$S \rightarrow (1100 \text{ mm} \leq S \leq 4900 \text{ mm}) \quad (2.16)$$

$$h_{tab} \rightarrow (110 \text{ mm} \leq h_{tab} \leq 300 \text{ mm}) \quad (2.17)$$

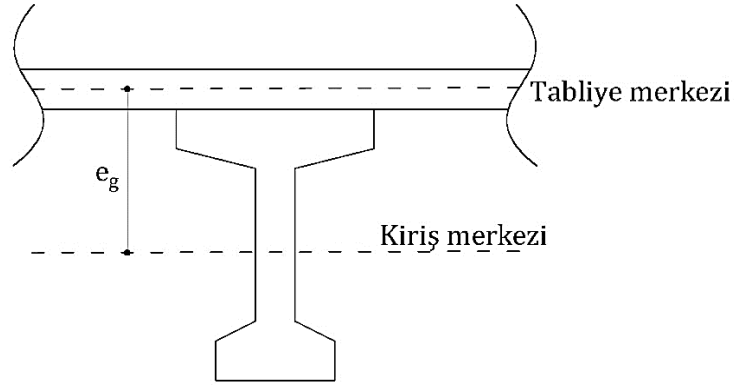
$$L \rightarrow (6000 \text{ mm} \leq L \leq 73000 \text{ mm}) \quad (2.18)$$

$$KS \rightarrow (KS \geq 4) \quad (2.19)$$

Bağıntıdaki K_g ise boyuna rijitlik katsayısı olmak üzere;

$$K_g = n_c (I_g + A \cdot e_g^2) \quad (2.20)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Burada n_c modüler oranı, I_g kiriş atalet momentini (mm^4), A_c kiriş enkesit alanını (mm^2), e_g ise kiriş ile tabliye enkesit merkezleri arasındaki mesafeyi (mm) göstermektedir.



Şekil 2.4. Köprü üstyapısında tabliye merkezi ile kiriş merkezi arasındaki mesafe (e_g)

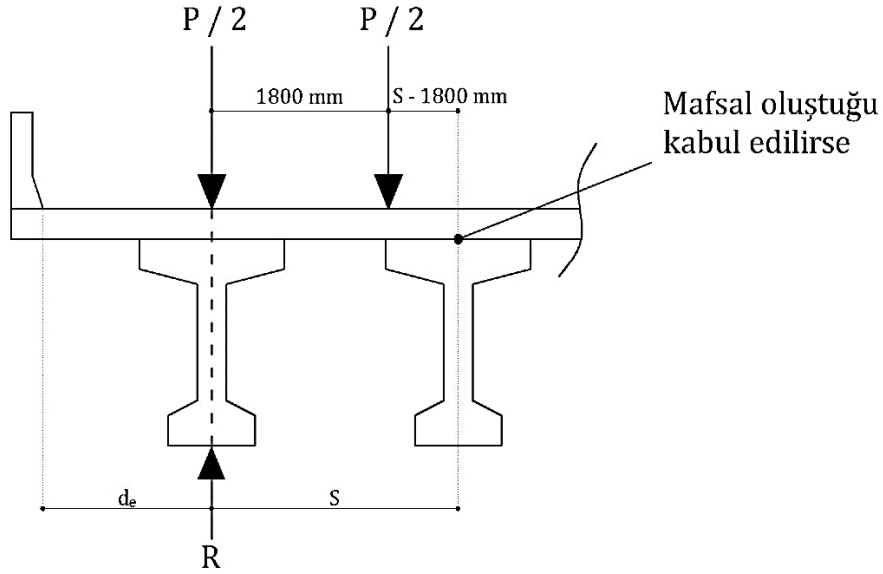
İç kirişlerde iki ya da daha çok şeritli yükleme durumunda moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{mi}) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$M_{DK}^{mi} = 0,075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{S}{L}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{Kg}{L \cdot h_{tab}^3}\right)^{0,1} \quad (2.21)$$

Bir şeritli yükleme için hesaplanan moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{Si}) ile iki ya da daha çok şeritli yükleme durumunda moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{mi}) karşılaştırılmakta, büyük olan katsayının etkili olduğu düşünülerek hesaplarda bu katsayı dikkate alınmaktadır.

2.1.7.4.2. Dış Kirişlerde Moment Dağıtma Katsayılarının Belirlenmesi

Dış kirişlerde bir şeritli yükleme için moment dağıtma katsayısı hesaplanırken kaldırma kuralı kullanılmaktadır.[45]



Şekil 2.5. Kaldıraç kuralı için yapılan kabul

Bu kurala göre mafsal olduğu kabul edilen noktaya göre moment dengesi yazılırsa;

$$R = \frac{P}{2} \left[\frac{(S-1800)+S}{S} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{(S-1800)+S}{S} \right] \cdot P \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu ifadeden yararlanılarak tek şeritli yükleme için moment ifadesi;

$$M_{DK}^{se} = \frac{1}{2} \left[\frac{(S-1800)+S}{S} \right] \quad (2.23)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu ifadeye çoklu bulunma katsayısı(m) göre $m = 1,20$ uygulanarak dış kirişlerde bir şeritli yükleme için moment dağıtma katsayısı hesaplanır;

$$M_{DK}^{se} = 1,20 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{(S-1800)+S}{S} \right] \quad (2.24)$$

Dış kirişlerde iki ya da daha çok şeritli yükleme için moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{me}), iç kirişlerde iki ya da daha çok şeritli yükleme için hesaplanan moment dağıtma katsayısının (M_{DK}^{mi}) e katsayısıyla çarpımı ile hesaplanır,

$$(M_{DK}^{me}) = e \cdot (M_{DK}^{mi}) \quad (2.25)$$

Burada e katsayısı;

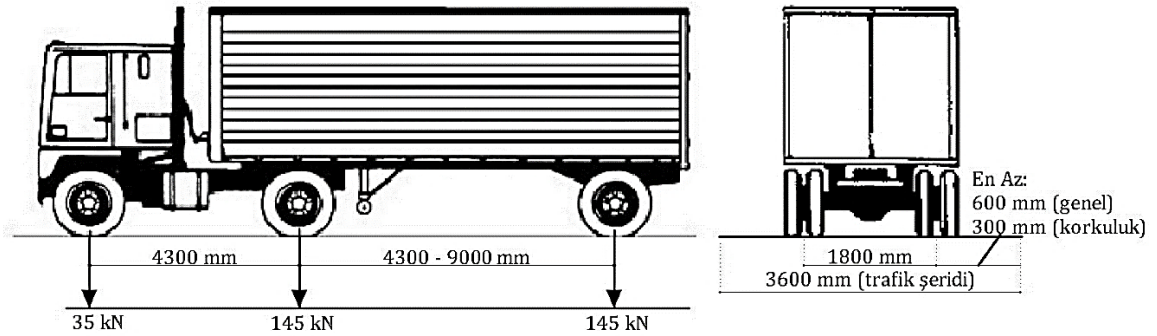
$$e = 0,77 + \frac{d_e}{2800} \geq 1 \quad (2.26)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada d_e Şekil 2.5'te görülen dış kirişten korkuluk iç kenarına olan mesafedir.

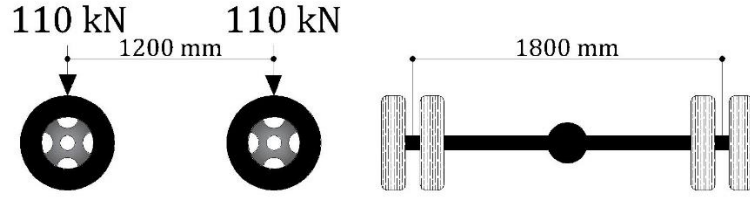
Dış kirişler için de bir şeritli yükleme için hesaplanan moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{se}) ile iki ya da daha çok şeritli yükleme için hesaplanan moment dağıtma katsayısı (M_{DK}^{me}) karşılaştırılmakta, büyük olan katsayının etkili olduğu düşünülerek hesaplarda bu katsayı dikkate alınmaktadır.

2.1.7.5. Hareketli Yük Nedeniyle Oluşan Momentlerin Hesabı

AASHTO LRFD yönetmeliğinde köprü şeritlerinde $HL - 93$ tasarım kamyonu hareketli(taşıt) yük olarak kullanılmaktadır. Kamyon yükü(Şekil 2.6.), tandem yükü(Şekil 2.7.) ve şerit yükü(şiddeti $9,30 \text{ kN/m}$ olan düzgün yayılı yük) olarak ayrı ayrı yapılan hesaplamalarla araç yükü belirlenmektedir.



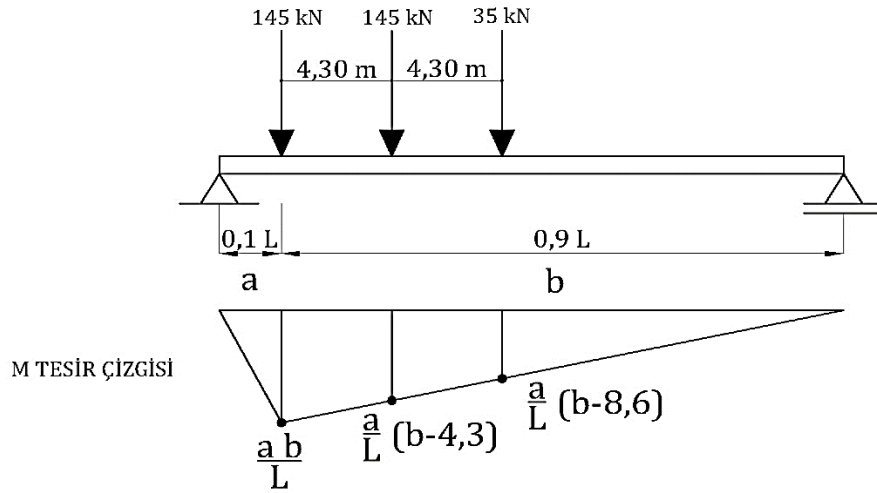
Şekil 2.6. $HL - 93$ tasarım kamyonu kamyon yüklemesi



Şekil 2.7. *HL – 93* tasarım kamyonu tandem yüklemesi

Hareketli yükler etkisinde oluşan momentler köprü açıklığı boyunca çeşitli noktalarda hesaplanmaktadır. Bu teze konu olan uygulamalarda yapısal çözümlemesi yapılan kiriş boyunca 11 noktada hesap yapılacak olup, sistem simetrik olacağından açıklık ortasına kadar olan değerler çizelge halinde sunulacaktır. Aşağıda 2 noktada (101 ve 105 konumları) yükleme durumları örnek olarak gösterilmektedir.

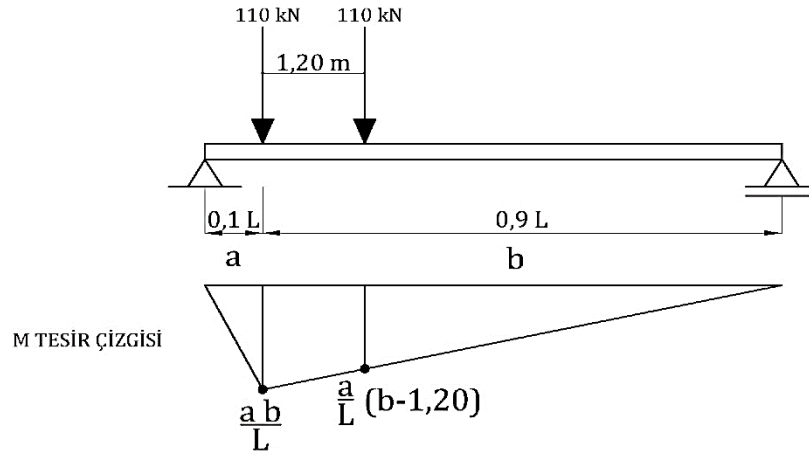
101 konumu kamyon yüklemesi: $a = 0,1 \cdot L$ $b = 0,90 \cdot L$



Şekil 2.8. 101 konumu kamyon yüklemesi

$$M_{101}^{Tr} = 145 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) + 145 \cdot \frac{a}{L} \cdot (b - 4,30) + 35 \cdot \frac{a}{L} \cdot (b - 8,60) \quad (2.27)$$

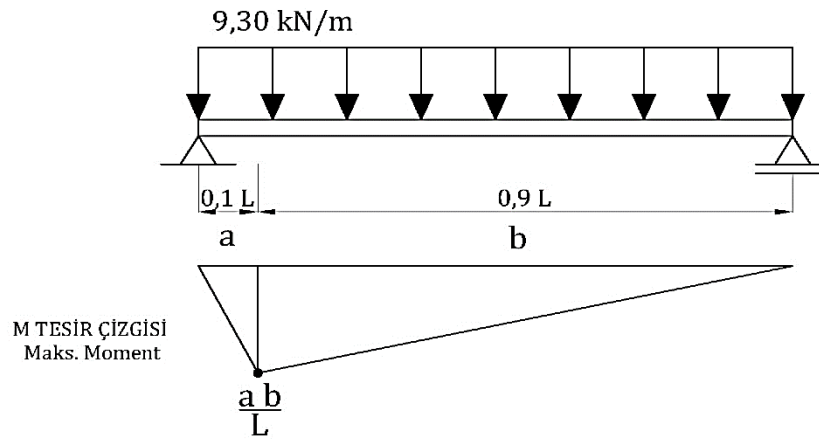
101 konumu tandem yüklemesi: $a = 0,1 \cdot L$ $b = 0,9 \cdot L$



Şekil 2.9. 101 konumu tandem yüklemesi

$$M_{101}^{Ta} = 110 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) + 110 \cdot \frac{a}{L} \cdot (b - 1,20) \quad (2.28)$$

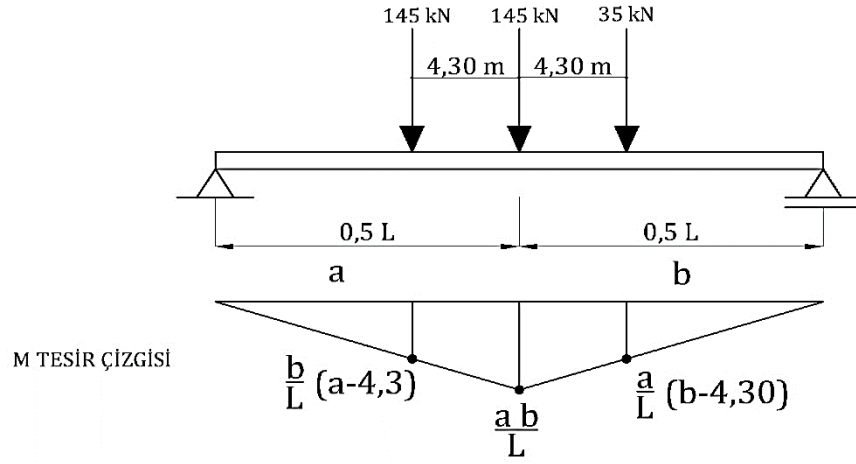
101 konumu şerit yüklemesi: $a = 0,1 \cdot L$ $b = 0,9 \cdot L$



Şekil 2.10. 101 konumu şerit yüklemesi

$$M_{101}^{Lane} = \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) \cdot L \cdot \frac{1}{2} \cdot 9,30 \quad (2.29)$$

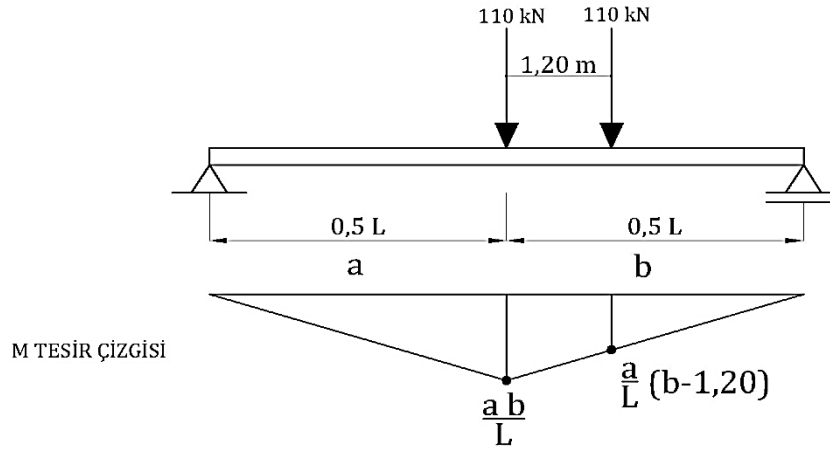
105 konumu kamyon yüklemesi: $a = 0,5 \cdot L$ $b = 0,5 \cdot L$



Şekil 2.11. 105 konumu kamyon yüklemesi

$$M_{105}^{Tr} = 145 \cdot \frac{b}{L} \cdot (a - 4,30) + 145 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) + 35 \cdot \frac{a}{L} \cdot (b - 4,30) \quad (2.30)$$

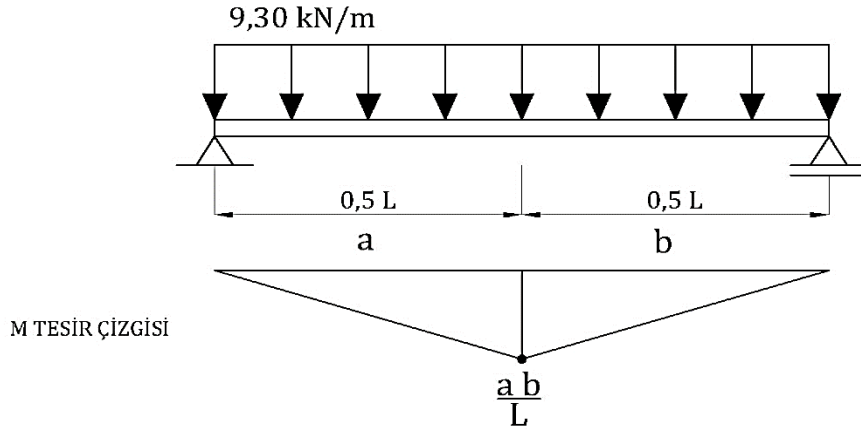
105 konumu tandem yüklemesi: $a = 0,5 \cdot L$ $b = 0,5 \cdot L$



Şekil 2.12. 105 konumu tandem yüklemesi

$$M_{105}^{Ta} = 110 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) + 110 \cdot \frac{a}{L} \cdot (b - 1,20) \quad (2.31)$$

105 konumu şerit yüklemesi: $a = 0,5 \cdot L$ $b = 0,5 \cdot L$



Şekil 2.13. 105 konumu şerit yüklemesi

$$M_{105}^{Lane} = \left(\frac{a \cdot b}{L}\right) \cdot L \cdot \frac{1}{2} \cdot 9,30 \quad (2.32)$$

2.1.8. Sabit Yüklerden Oluşan Kesit Etkileri

2.1.8.1. İç Kirişlerde Sabit Yüklerden Oluşan Kesit Etkileri

Beton birim ağırlığı γ_c olmak üzere iç kirişlerde sabit yükler DC yapısal elemanların sabit yükleri, DW tabliye üstü kaplama imalatlarının sabit yükleri olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

DC simgesiyle ifade edilen yapısal elemanların sabit yüklerinden, tabliye ağırlığı (W_{slab});

$$W_{slab} = h_{tab} \cdot S \cdot \gamma_c \quad (2.33)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. h_{tab} tabliye kalınlığını, S kiriş aralığını göstermektedir.

Kiriş ağırlığı (W_{beam});

$$W_{beam} = A_c \cdot \gamma_c \quad (2.34)$$

şeklinde hesaplanırken, A_c kiriş enkesit alanını ifade etmektedir.

Diyafram(P_{diaf}) varsa diyafram bulunan noktada tekil yük olarak dikkate alınmak üzere;

$$P_{diaf} = b_{diaf} \cdot h_{fdiaf} \cdot (S - b_w) \cdot \gamma_c \quad (2.35)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada b_{diaf} diyafram kalınlığını, h_{fdiaf} diyafram yüksekliğini, b_w kiriş gövde genişliğini, S kiriş aralığını göstermektedir.

DW simgesiyle ifade edilen tabliye üstü elemanların sabit yüklerinden bitüm kaplama ağırlığı;

$$W_{bit} = h_{kplm} \cdot S \cdot \gamma_{bitüm} \quad (2.36)$$

şeklinde belirlenmektedir. h_{kplm} kaplama kalınlığını, $\gamma_{bitüm}$ kaplama malzemesinin birim ağırlığını ifade etmektedir.

2.1.8.2. Dış Kirişlerde Sabit Yüklerden Oluşan Kesit Etkileri

Dış kirişlerde sabit yükler olarak $DC1$ yapısal elemanların sabit yüklerini, $DC2$ yapıyla kompozit çalışan sabit yükleri, DW tabliye üstü kaplama elemanlarının sabit yükleri olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Yapısal elemanların sabit yüklerinden biri olan tabliye ağırlığı (W_{stab}) ;

$$W_{stab} = h_{tab} \cdot S/2 \cdot \gamma_c \quad (2.37)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada h_{tab} tabliye kalınlığını, S kiriş aralığını göstermektedir.

Konsol kısım ağırlığı (W_{cntlvr}) ;

$$W_{cntlvr} = h_{fkon} \cdot S_{kon} \cdot \gamma_c \quad (2.38)$$

şeklinde hesaplanırken, bu bağtıda h_{fkon} konsolda tabliye kalınlığını, S_{kon} konsolun kiriş mesnet ortasına kadar olan uzunluğunu ifade etmektedir.

Kiriş ağırlığı (W_{beam}) ;

$$W_{beam} = A_c \cdot \gamma_c \quad (2.39)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Burada A_c kiriş enkesit alanını ifade etmektedir.

Kirişlerin burulmasını önleyen ve kirişleri eksenine dik doğrultuda kesen betonarme diyaframların kullanılması durumunda, diyafram(P_{diaf}) bulunan noktada tekil yük olarak dikkate alınmak üzere;

$$P_{diaf} = 1/2 \cdot b_{diaf} \cdot h_{fdiaf} \cdot (S - b_w) \cdot \gamma_c \quad (2.40)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada b_{diaf} diyafram kalınlığını, h_{fdiaf} diyafram yüksekliğini, b_w kiriş gövde genişliğini göstermektedir.

Yapıyla kompozit çalışan sabit yük($DC2$) olarak dikkate alınan bariyer ağırlığı,

$$W_{bryr} = A_{bryr} \cdot \gamma_c \quad (2.41)$$

ifadesiyle hesaplanır. A_{bryr} bariyer enkesit alanını göstermektedir.

Tabliye üstü elemanların sabit yüklerinden(DW) olan bitüm kaplama ağırlığı

$$W_{bit} = h_{kplm} \cdot (S/2 + S_{kon} - WW_{bryr}) \cdot \gamma_{bitüm} \quad (2.42)$$

şeklinde belirlenmektedir. h_{kplm} kaplama kalınlığını, S_{kon} konsol uzunluğunu, WW_{bryr} bariyer genişliğini ifade etmektedir.

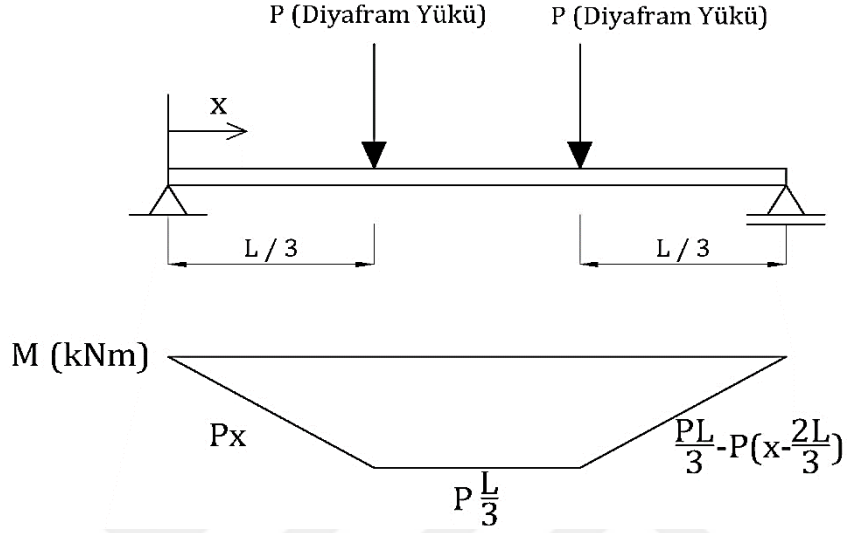
İç kiriş ve dış kiriş için yukarıda belirtilen hesaplamalarla elde edilen yüklemelerin moment dağılımının belirlenmesi için aşığıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$\xi = \frac{x}{L}$ ve ω yayılı yük olmak üzere;

$$M_x = \frac{\omega}{2} \cdot x \cdot (L - x) = 0,5 \cdot \omega \cdot L^2 \cdot (\xi - \xi^2) \quad (2.43)$$

olarak ifade edilmektedir.

Diyaframların açıklığın 1/3'üne ve 2/3 üne yerleştirildiği düşünülürse, diyafram için moment ve kesme kuvveti dağılımı ise aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.14. Diyafram yükü ile oluşan moment dağılımı

2.1.9. Kullanım Sınır Durumu İçin İnceleme

2.1.9.1. Öngerilmeli Toronlar İçin Gerilme Sınırları

Öngerilme beton elemanlara öngerilmenin verilmesinde kullanılan öngerme kablosuyla ilgili çeşitli standartlar bulunmaktadır. Bu konuda KGM Teknik şartnamesinde[46] kullanılacak toronların mekanik ve karakteristik özelliklerinin Amerikan (ASTM) standartları ile uyumlu olması gerektiği ifade edilmektedir. Amerikan (ASTM) standartlarının 7 telli toronlara ilişkin mekanik özellikleri gösteren çizelge aşağıda gösterilmektedir.[47]

Tablo 2.5. ASTM A 416/A416 M'ye göre 7 telli aderanslı toronların mekanik özellikleri

Tanım	Çap (inç)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Enkesit Alanı (mm ²)	Kütle (g/m)
1/4	0,250	6,40	1725	23,2	182
5/16	0,313	7,90	1725	37,4	294
3/8	0,375	9,53	1860	54,8	432
7/16	0,438	11,11	1860	74,2	582
1/2	0,500	12,70	1860	98,7	775
0,52	0,520	13,20	1860	107,7	844
0,56	0,563	14,29	1860	123,9	970
0,6	0,600	15,24	1860	140,0	1102
0,7	0,700	17,78	1860	189,7	1487

Tablo 2.5'te çekme dayanımı 1860 MPa olan toronlar düşük rölaksasyonlu olarak adlandırılmaktadır. Düşük rölaksasyonlu öngerilme donatısının çekme dayanımı f_{pu} ile gösterilirse, aktarmadan hemen önce öngerilme donatısının gerilme sınırı $f_{pbt} = 0,75 \cdot f_{pu}$ olmakta, akma dayanımı (f_{py}) ise $f_{py} = 0,90 \cdot f_{pu}$ şeklinde belirlenmektedir. Kullanım aşamasında tüm kayıplardan sonraki gerilme sınırı (f_{pe}) ise $0,80 \cdot f_{py}$ olmaktadır.

2.1.9.2. Beton İçin Gerilme Sınırları

Betonun 28 günlük karakteristik basınç dayanımı f'_c olmak üzere, öngerilme işleminin başlangıcında betonun gerilme sınırı,

$$f'_{ci} = 0,75 \cdot f'_c \quad (2.44)$$

bağıntısıyla, tam öngerilmeli elemanlarda kayıplardan önceki beton basınç dayanım sınırı,

$$f_{ci} = 0,60 \cdot f'_{ci} \quad (2.45)$$

ifadesiyle belirlenmektedir.

Aderanslı donatı için aktarma anında betonda izin verilen çekme gerilmesi,

$$f_{ti} = 0,63 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.46)$$

şeklinde belirlenmektedir.

Kullanım aşamasında tüm kayıplardan sonra betonun basınç gerilmesi sınırı,

$$f_c = 0,45 \cdot f'_c \quad (2.47)$$

şeklinde hesaplanırken, çekme gerilmesi sınırı ise,

$$f_t = 0,50 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.48)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Betonun 28 günlük elastisite modülü,

$$E_c = 4800 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (2.49)$$

şeklinde belirlenirken, bu değer öngerme işleminin başlangıcında,

$$E_{ci} = 4800 \cdot \sqrt{f'_{ci}} \quad (2.50)$$

olmaktadır.

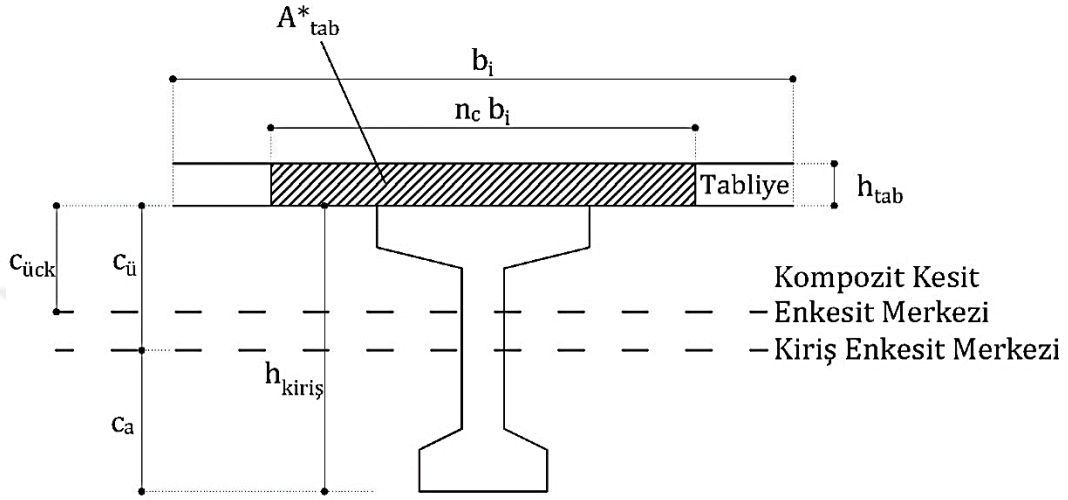
2.1.9.3. Toronlar İçin Öntasarım

Toronlar için öntasarım da iç ve dış kiriş için ayrı ayrı yapılmaktadır. Toronlar için öntasarım yapılmadan önce kompozit kesit özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kompozit kesit özelliklerinin belirlenmesi için kiriş betonundan farklı betonla üretilen kısımların modüler oranla çarpılarak kiriş betonuna göre eşdeğer genişliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu dönüşümde tabliye betonu ve kiriş betonunun elastisite modüllerinden faydalanılarak kullanılan modüler oran (n_c)

$$n_c = \frac{E_c^{tabliye}}{E_c^{kiriş}} \quad (2.51)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 2.15. İç kirişlerde kompozit kiriş enkesiti

İç kirişlerde Şekil 2.15'te görüldüğü gibi c_a kiriş kesit merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesini, $c_ü$ kiriş kesit merkezinin kiriş üst lifine olan mesafesini, b_i iç kiriş etkili tabliye genişliğini, h_{tab} tabliye kalınlığını ifade etmektedir.

Kompozit kesitin kesit özelliklerinin hesabı Şekil 2.15'in yardımıyla A_c kiriş enkesit alanını, I_g kiriş atalet momentini göstermek üzere kompozit kesit merkezinin tabliye üst lifine olan mesafesi $c_{ück}$,

$$A_{tab}^* = n_c \cdot b_i \cdot h_{tab} \quad (2.52)$$

bağıntısıyla hesaplanan tabliye dönüştürülmüş enkesit alanını göstermek üzere

$$c_{ück} = \frac{A_{tab}^* \cdot \left(\frac{h_{tab}}{2}\right) + A_c \cdot (c_ü + h_{tab})}{A_{tab}^* + A_c} \quad (2.53)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Kompozit kesit merkezinin kiriş üst lifine olan mesafesi $c_{\text{ück}}$, kompozit kesit merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesi ise c_{ac} olmak üzere kompozit kesitin atalet momenti,

$$I_c = \frac{(n_c \cdot b_i) \cdot (h_{tab})^3}{12} + A_{tab}^* \cdot \left(c_{\text{üc}} - \frac{h_{tab}}{2} \right)^2 + I_c + A_c \cdot (c_{ac} - c_a)^2 \quad (2.54)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Tabliye üst lifine göre kompozit kesitin mukavemet momenti,

$$S_{\text{üc}} = I_c / c_{\text{üc}} \quad (2.55)$$

ifadesiyle, kiriş üst lifine göre kompozit kesitin mukavemet momenti,

$$S_{\text{ück}} = I_c / c_{\text{ück}} \quad (2.56)$$

ifadesiyle olmak üzere, kiriş alt lifine göre kompozit kesitin mukavemet momenti ise,

$$S_{ac} = I_c / c_{ac} \quad (2.57)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Aynı işlemler (2.7) bağıntısında hesaplanan dış kirişlerde etkili tabliye genişliği (b_e) dikkate alınarak dış kirişler için de gerçekleştirilmelidir.

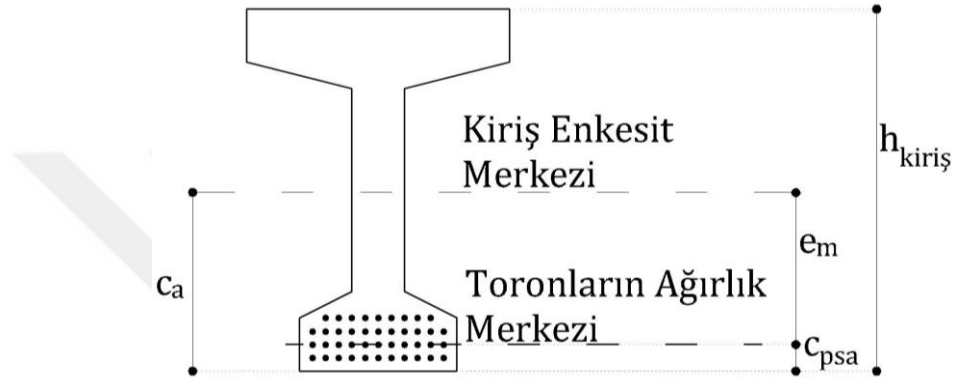
Kullanılacak yük birleşimlerinde bahsettiğimiz son kullanım koşullarında (kullanım III sınır durumu için) açıklık kesitinin en alt lifindeki gerilmenin kullanım aşamasında tüm kayıplardan sonra betonda izin verilen çekme gerilmesini (f_t) aşmaması gerekmektedir.

Kayıplardan sonra betonda izin verilen çekme gerilmesine, kiriş alt lifinde oluşan söz konusu gerilme eşitlenerek toronlara verilmesi gereken minimum öngerme kuvveti P_f hesaplanabilecektir. Bu aşamadan sonra yapılacak işlemler de iç ve dış kirişler için ayrı ayrı yapılması gerekmektedir.

Kiriş alt lifinde oluşacak gerilme (σ_a),

$$\sigma_a = -\frac{P_f}{A_c} - \frac{P_f \cdot e_m}{S_a} + \frac{M_g + M_s}{S_a} + \frac{M_a + M_L}{S_{ac}} \leq f_t \quad (2.58)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Burada M_g kiriş özağırlığından oluşan momenti, M_s tabliye, diyafram, konsol gibi beton elemanlardan oluşan momenti, M_a bitüm kaplama, bariyer gibi sonradan ilave edilen sabit yüklerden oluşan momenti, M_L kullanım III sınır durumu için 0,80 ile çarpılarak darbe katsayısıyla arttırılmış hareketli yükü, e_m ise Şekil 2.16'da görüldüğü gibi kiriş kesit merkeziyle toronların merkezi arasındaki dışmerkezliği(kabule göre) ifade etmektedir.



Şekil 2.16. Enkesit merkezlerini gösteren kiriş enkesiti

Burada toronların merkezinin kiriş alt lifine olan uzaklığı, toronların sayısı belli olmadığından dolayı bilinmemektedir. Dolayısıyla burada bir kabul yapılması gerekmektedir.[48] Yapılacak kabul c_{psa} toronların ağırlık merkezinin kiriş alt lifine olan mesafesini, $h_{kiriş}$ kiriş yüksekliğini göstermek üzere,

$$c_{psa} = 0,1 \cdot h_{kiriş} \quad (2.59)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Yukarıda ifade edilen (bağıntı 2.58) kiriş alt lifinde oluşan gerilme bağıntısından minimum öngerme kuvveti (P_f) çekilirse,

$$P_f \geq \frac{\frac{M_g + M_s}{S_a} + \frac{M_a + M_L}{S_{ac}} - f_t}{\frac{1}{A_c} + \frac{e_m}{S_a}} \quad (2.60)$$

ifadesi elde edilmektedir. Kayıpların hesaplanması için henüz yeterli veri olmadığından öngerilme kayıpları için de bir kabulün yapılması gerekmektedir. Burada tüm kayıplardan sonra toronlardan kalan gerilme için f_{pu} toron çekme dayanımı olmak üzere $0,60 \cdot f_{pu}$ kabulü yapılmaktadır. Elde edilen P_f öngerme kuvveti için gerekli toplam toron enkesit alanı,

$$A_{ps} \geq \frac{P_f}{0,60 \cdot f_{pu}} \quad (2.61)$$

olarak elde edilir. Bu kabulde birlikte kesite yerleştirilen öngerme donatısıyla kesit yeterli eğilme dayanımına sahip olmaktadır. Collins ve Mitchell[49] tarafından önerilen bağıntıya bu kabul uygulanırsa,

$$\phi M_n = \phi(0,95 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps} + f_y \cdot A_s) \cdot (0,90 \cdot h) \geq M_u \quad (2.62)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kesit tam öngermeli olduğu için, diğer bir deyişle geleneksel betonarme donatısı bulunmadığından dolayı $A_s = 0$ 'dır. Burada h kompozit kesitin toplam yüksekliğini, ϕ dayanım azaltma katsayısı Tablo 1'de bahsedildiği üzere eğilmede 1 olarak alınmaktadır. M_u (2.62) bağıntısında ifade edildiği şekilde dayanım I sınır durumuna göre hesaplanan tasarım momenti olmak üzere,

$$A_{ps} = \frac{M_u}{\phi (0,95 \cdot f_{pu}) \cdot (0,90 \cdot h)} \quad (2.63)$$

olmaktadır. Her iki taraftan elde edilen toplam toron enkesit alanından (A_{ps}) büyük olanı kullanılarak gerekli toron sayısı belirlenmelidir. Gerekli toron sayısı bir toronun enkesit alanı A_{toron} olmak üzere,

$$\text{Gerekli toron sayısı} \geq \frac{A_{ps}}{A_{toron}} \quad (2.64)$$

olarak belirlenir. Gerekli toron sayısının belirlenmesinin ardından bu toronların kesite yerleşiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ekte gösterilen AASHTO kirişleri(EK - 1) için hazırlanmış toron şablonları kullanılacaktır.

2.1.9.4. Öngerilme Kayıplarının Belirlenmesi

Öngerilme kayıplarını ani kayıplar ve zamanla oluşan kayıplar olarak iki ayrı grupta incelemek gerekmektedir. Ani kayıplar(Δf_{pES}) ankraj oturması, sürtünme, betonun ani elastik kısılmasından meydana gelen kayıplardan oluşmaktadır. Zamanla oluşan kayıplar(Δf_{pLT}) ise öngerilme donatısının gevşemesi, betondaki sünme ve rötre gibi nedenlerle meydana gelen kayıplardır.

Toplam öngerilme kayıpları,

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} \quad (2.65)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.1.9.4.1. Ani Kayıplar

Aktarma döneminde öngerilme kuvvetinin uyguladığı basınç kuvveti ile dayanımını tam kazanmamış betonda oluşan elastik kısılma, öngerilme donatılarında gerilme kayıplarına sebep olmaktadır.

Betonun elastik kısılmasından meydana gelen kayıp,

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} \cdot f_{cgp} \quad (2.66)$$

şeklinde ifade edilirken, bu bağıntıda E_{ps} öngerme donatısının elastisite modülü, E_{ci} transfer aşamasının hemen sonrasında betonun elastisite modülü ve f_{cgp} hemen aktarım sonrasında toronların ağırlık merkezinde F_i öngerme kuvveti ve açıklıktaki öngerme kuvveti ve açıklıktaki M_{dg} momenti nedeniyle betonda oluşan gerilmedir.

Betonda oluşan bu gerilmenin (f_{cgp}) tahmin edilmesi için, hemen aktarmadan sonra toronlardaki öngerilmenin(f_{pi}) aktarımdan hemen önceki öngerilmenin(f_{pbt}) %90'ı olduğu kabul edilmektedir. Bu kabul yardımıyla hesaplanan elastik kayıp (Δf_{pES}) için, kabul edilen f_{pi} değerinin doğrulanması gerekmektedir. AASHTO LRFD'ye göre bu iteratif süreci

kullanılmayarak hesabı basitleştirmek için aşağıda verilen bağıntıyla elastik kayıp tahmin edilebilmektedir.[45]

$$\Delta f_{pES} = \frac{A_{ps} \cdot f_{pi} \cdot (I_g + e_m^2 \cdot A_c) - e_m \cdot M_g \cdot A_c}{A_{ps} \cdot (I_g + e_m^2 \cdot A_c) + \frac{A_c \cdot I_g \cdot E_{ci}}{E_{ps}}} \quad (2.67)$$

Burada A_{ps} öngerilmeli toron enkesit alanını, A_c kiriş enkesit alanını, e_m açıklıkta toronların ortalama dış merkezliğini, I_g kiriş atalet momentini, M_g kirişin kendi ağırlığı etkisinde açıklık ortasındaki eğilme momentini ifade etmektedir.

2.1.9.4.2. Zamana Bağlı Kayıpların Yaklaşık Olarak Tahmini

Betonun rötre ve sünmesi, öngerilme donatısının rölaksasyonu nedeniyle oluşan uzun süreli öngerilme kayıpları aşağıdaki bağıntıyla tahmin edilebilmektedir.[45]

$$\Delta f_{pLT} = 10,0 \cdot \frac{f_{pi} \cdot A_{ps}}{A_g} \cdot \gamma_h \cdot \gamma_{st} + 83 \cdot \gamma_h \cdot \gamma_{st} + \Delta f_{pR} \quad (2.68)$$

Burada,

$$\gamma_h = 1,7 - 0,01 \cdot H \quad (2.69)$$

$$\gamma_{st} = \frac{35}{(7 + f'_{ci})} \quad (2.70)$$

formülleri uygulanmaktadır. H yıllık ortalama bağıl nem oranını, γ_h ortamın bağıl nemi için düzeltme faktörünü, γ_{st} beton elemanına öngerilme anında belirtilen beton dayanımı için düzeltme faktörünü, f'_{ci} öngerilme işleminin başlangıcında betonun gerilme sınırını ifade etmektedir. Δf_{pR} rölaksasyon kaybı tahmini olmak üzere bu çalışmada kullanılan düşük rölaksasyonlu toronlar için 17 MPa olarak alınmaktadır.

2.1.9.5. Aktarma Aşamasında Kirişteki Gerilmelerin Hesabı

Kayıp hesapları yapıldıktan sonra aktarma aşamasında toronlardaki gerilme (f_{pi}), aktarmadan hemen önce öngerilme donatısının gerilmesi (f_{pbt}) ile ani kayıpların (Δf_{pES}) farkı ile bulunabilmektedir.

Aktarma anında toronlardaki öngerme kuvveti (F_i) ise A_{ps} toplam toron enkesit alanı olmak üzere,

$$F_i = f_{pi} \cdot A_{ps} \quad (2.71)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Toronların dış merkezliliği açıklıkta ve mesnette farklı olmaktadır. Daha önce açıklıkta toron dış merkezliliği e_m olarak ifade edilmişti. Mesnette ise bazı toronlar kesitin üstüne alınarak farklı bir boyuna profille kesite yerleştirilmektedir. Bunun amacı mesnette gerilme kısıtlarını sağlayabilmektir. Mesnette kaç adet toronun kesitin üstüne alınacağı eğer bir optimizasyon algoritması kullanılmıyorsa, deneme yanılma yöntemi ve mühendislik önsezisiyle belirlenebilir. Mesnette donatılar kesitin üstüne alındıktan sonra toronların dış merkezliği bu duruma göre yeniden hesaplanmalıdır. Bu şekilde mesnette hesaplanan toron dışmerkezliği e_{end} olarak kabul edilmek üzere kesitin alt ve üst lifinde açıklık ve mesnette oluşan gerilmelerin hesabı yapılabilmektedir.

Açıklık ortasında kiriş kesitinin üst lifinde hesaplanan gerilme,

$$\sigma_{\text{ül}}^A = - \frac{F_i}{A_c} + \frac{F_i \cdot e_m}{S_{\text{ü}}} - \frac{M_g}{S_{\text{ü}}} \quad (2.72)$$

olurken, açıklıkta kiriş kesitinin alt lifinde hesaplanan gerilme ise,

$$\sigma_{\text{al}}^A = - \frac{F_i}{A_c} - \frac{F_i \cdot e_m}{S_a} + \frac{M_g}{S_a} \quad (2.73)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Mesnet kesitinde ise kirişin kendi ağırlığından oluşan moment (M_g) sıfır olduğundan dolayı burada kiriş üst ve alt lifindeki gerilmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\ddot{u}i}^M = -\frac{F_i}{A_c} + \frac{F_i \cdot e_{end}}{S_{\ddot{u}}} \quad (2.74)$$

$$\sigma_{\ddot{a}i}^M = -\frac{F_i}{A_c} - \frac{F_i \cdot e_{end}}{S_a} \quad (2.75)$$

Burada çıkan sonuçlar negatif ise basınç gerilmesini göstermektedir. Elde edilen gerilmeler betonun basınç gerilmesi sınırı(f_c) veya betonun çekme gerilmesi sınırı(f_t) ile karşılaştırılmalı gerilme sınırları sağlanmıyorsa kiriş tipi ya da toron sayısı değiştirilerek işlemler tekrarlanmalıdır.

2.1.9.6. Tüm Kayıplardan Sonra Kirişteki Gerilmelerin Hesabı

Tüm kayıplardan sonra toronlarda kalan gerilme(f_{pf}), aktarmadan hemen önce öngerilme donatısının gerilmesi(f_{pbt}) ile toplam kayıpların(Δf_{pT}) farkı olarak belirlenir.

Buradan tüm kayıplardan sonra toronlardaki öngerme kuvveti,

$$F_f = f_{pf} \cdot A_{ps} \quad (2.76)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Buradan açıklık ortasında kirişin üst lifinde hesaplanan gerilme,

$$\sigma_{\ddot{u}f}^A = -\frac{F_f}{A_c} + \frac{F_f \cdot e_m}{S_{\ddot{u}}} - \frac{M_g + M_s}{S_{\ddot{u}}} - \frac{M_a + M_L}{S_{\ddot{u}ck}} \quad (2.77)$$

şeklinde hesaplanırken, kiriş alt lifindeki gerilme,

$$\sigma_{\ddot{a}f}^A = -\frac{F_f}{A_c} - \frac{F_f \cdot e_m}{S_a} + \frac{M_g + M_s}{S_a} + \frac{M_a + M_L}{S_{ac}} \quad (2.78)$$

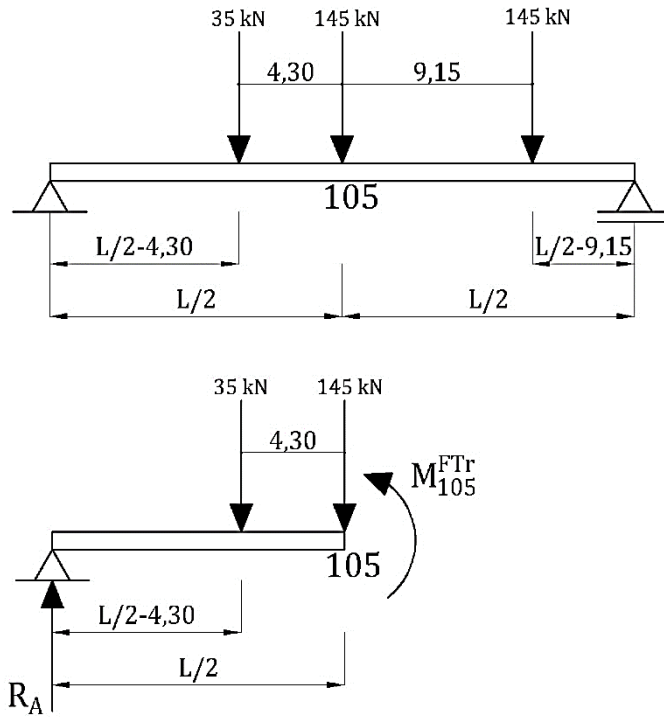
ifadesiyle belirlenmektedir. Tabliyenin üstünde oluşan gerilme ise,

$$\sigma_{\ddot{u}f}^{tab} = -\frac{M_a + M_L}{S_{\ddot{u}c}} \quad (2.79)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Elde edilen gerilmeler aktarma aşamasında olduğu gibi kayıplardan sonra betonun basınç gerilmesi sınırı(f_c) veya betonun çekme gerilmesi sınırı(f_t) ile karşılaştırılmalı gerilme sınırları sağlanmıyorsa kiriş tipi ya da toron sayısı değiştirilerek işlemler tekrarlanmalıdır.

2.1.9.7. Yorulma Sınır Durumunun Denetlenmesi

AASHTO LRFD'ye göre açıklıkta yorulma I sınır durumu için (2.9) bağıntısında bahsedildiği gibi yorulmadan dolayı oluşan eğilme momentini hesaplayabilmek için kullanılan hareketli yükler nedeniyle oluşan momentin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.17. Yorulma I sınır durumu hesabı için 105 konumlu hareketli yük

Şekil 17'ye göre,

$$R_A = \frac{145 \cdot \left(\frac{L}{2} - 9,15\right) + 145 \cdot \left(\frac{L}{2}\right) + 35 \cdot \left(\frac{L}{2} + 4,30\right)}{L} \quad (2.80)$$

$$M_{105}^{FTT} = R_A \cdot \left(\frac{L}{2}\right) - 35 \cdot (4,30) \quad (2.81)$$

hesapları yapılabilmektedir. Daha kritik olan dış kiriş için hesapta moment dağılım katsayısında (M_{DK}^{me}) kullanılan çoklu bulunma katsayısı (m) burada kullanılmamaktadır.

Dinamik yük katkı oranı (IM) yorulma için Tablo 2.4'ten %15 olarak alınmak üzere, dış kirişler için yorulmada hareketli yüklerden oluşan eğilme momenti,

$$M_f^e = 1,50 \cdot \frac{M_{DK}^{me}}{1,20} \cdot M_{105}^{FTT} \cdot 1,15 \quad (2.82)$$

şeklinde elde edilmektedir. Kesit, sabit yük ve hareketli yorulma yükü altında basınç etkisindeyse yorulmanın incelenmesine gerek bulunmamaktadır. Bu bağlamda kesitin alt lifinde çekme gerilmesi çıkması daha olası olmakla beraber, kesit alt lifinin denetlenmesinde yarar bulunmaktadır. Kesit alt lifindeki gerilme,

$$\sigma_a^F = -\frac{F_f}{A_c} - \frac{F_f \cdot e_m}{S_a} + \frac{M_{DC1}}{S_a} + \frac{M_{DC2} + M_{DW} + M_f^e}{S_{ac}} \quad (2.83)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada F_f tüm kayıplardan sonra toronlardaki öngerme kuvvetini, M_{DC1} , M_{DC2} , M_{DW} ise sabit yüklerden dolayı dikkate alınan momentleri göstermektedir. σ_a^F çekme etkisinde ise yorulma incelenmelidir.

Betonda yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmesinin sınırı,

$$\sigma_a^F \leq 0,25 \cdot \sqrt{f_c'} \quad (2.84)$$

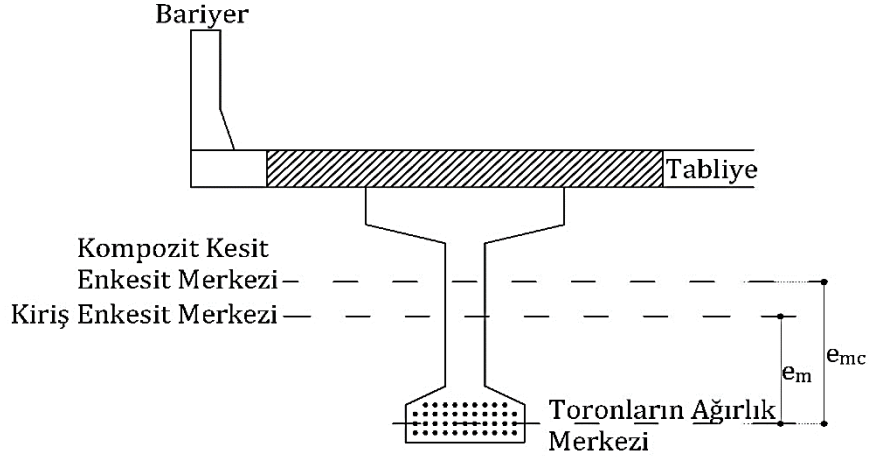
olmak üzere, öngerme donatılarının merkezinde sabit yükler ve öngerilme kuvveti nedeniyle betonda meydana gelen gerilme,

$$\sigma_{TM}^{DL+PS} = -\frac{F_f}{A_c} - \frac{F_f \cdot e_m^2}{I_g} + \frac{M_{DC1} \cdot e_m}{I_g} + \frac{(M_{DC2} + M_{DW}) \cdot e_{mc}}{I_c} \quad (2.85)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Hareketli yorulma yükü nedeniyle öngerme donatılarının merkezinde oluşan gerilme ise,

$$\sigma_{TM}^F = \frac{M_f \cdot e_{mc}}{I_c} \quad (2.86)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.



Şekil 2.18. Dış kiriş kompozit kesiti enkesiti

Öngerme donatısında oluşan maksimum gerilme, E_{ps} öngerme donatısının elastisite modülünü, E_c kiriş betonunun elastisite modülünü göstermek üzere,

$$\sigma_{max}^F = \frac{E_{ps}}{E_c} \cdot (\sigma_{TM}^{DL+PS} + \sigma_{TM}^F) \quad (2.87)$$

şeklinde, minimum gerilme ise;

$$\sigma_{min}^F = \frac{E_{ps}}{E_c} \cdot (\sigma_{TM}^{DL+PS} + 0) \quad (2.88)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Yorulma gerilmesinin değişim aralığı ise,

$$\sigma_f^F = |\sigma_{max}^F - \sigma_{min}^F| \quad (2.89)$$

olarak elde edilmektedir. Bu gerilme değişim değerinin büyüklüğünün belirli bir sınırdaki ($\sigma_f^{sınır}$) olması elemanın yorulma nedeniyle hasar görmemesi bakımından önemlidir. $\sigma_f^{sınır}$ eğrilik yarıçapı 9000 mm'yi aşarsa 125 MPa, eğrilik yarıçapı 3600 mm'nin altında ise 70 MPa, eğrilik yarıçapı 3600 mm ile 9000 mm arasında ise doğrusal oranlama ile hesaplanarak gerilme değişim değeri (σ_f^F) ile karşılaştırılmalıdır.

2.1.9.8. Sehım ve Ters Sehımın Hesaplanması

2.1.9.8.1. Hareketli Yük Nedeniyle Oluşan Ani Sehım

Sehım hesabı için kritik kamyon yüklemesi şekil 2.19'da gösterilmektedir. Burada P tekil yükün değeri, x sehımın hesaplandığı konum, a ve b yükün bulunduğu konumu gösteren mesafeler olmak üzere sehım;

$$\Delta_x (x < a) = \frac{P \cdot b \cdot x}{6 \cdot E_C \cdot I_C \cdot L} (L^2 - b^2 - x^2) \quad (2.90)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Şekil 19'da görülen kamyon yüklemesinin 35 kN'luk aksı için açıklığın ortasında ($x = L/2$) oluşan sehım;

$$\Delta_{X1}^{Tr} = \frac{35000 \cdot b \cdot \frac{L}{2}}{6 \cdot E_C \cdot I_C \cdot L} \cdot \left[L^2 - b^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad (2.91)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Burada L kiriş açıklığı (mm), E_C kiriş betonunun elastisite modülü (MPa), I_C kompozit kesitin atalet momentidir (mm⁴). Şekil 19'da gösterildiği gibi kirişin ortasındaki 145 kN'luk aks için aynı sehım;

$$\Delta_{X2}^{Tr} = \frac{145000 \cdot L^3}{48 \cdot E_C \cdot I_C} \quad (2.92)$$

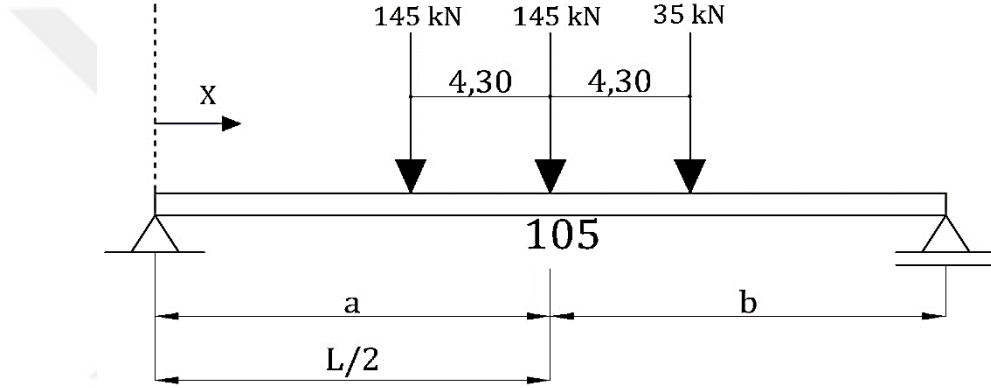
şeklinde hesap yapılmaktadır. 145 kN'luk diğer (kamyon arka aksı) aks için ise,

$$\Delta_{X3}^{Tr} = \frac{145000 \cdot b \cdot \frac{L}{2}}{6 \cdot E_c \cdot I_c \cdot L} \cdot \left[L^2 - b^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad (2.93)$$

ifadesiyle sehim hesabı yapılmaktadır. Buradan kamyon yüklemesi nedeniyle kirişin açıklık ortasında oluşan toplam sehim(mm),

$$\Delta_{105}^{Tr} = \Delta_{X1}^{Tr} + \Delta_{X2}^{Tr} + \Delta_{X3}^{Tr} \quad (2.94)$$

ifadesiyle bulunmaktadır.



Şekil 2.19. Sehim hesabı için kritik hareketli(taşıt) yük ($P = 145 \text{ kN}$)

Bulunan bu sehim değerinin kirişlere dağıtılması için dağıtım katsayısı kullanılmaktadır. Dağıtım katsayısı,

$$mg = m \cdot \frac{N_L}{KS} \quad (2.95)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada m şerit sayısına göre belirlenen çoklu bulunma katsayısı(Tablo 3.), N_L şerit sayısı, KS kiriş sayısıdır.

Bu durumda dinamik yük katkı oranı(IM) %33 alınmak(Tablo 4.) suretiyle kamyon yüklemesi nedeniyle dağıtım katsayısı kullanılarak kirişin açıklık ortasında oluşan ani sehim,

$$\Delta_{105}^{Trmg} = mg \cdot \Delta_{105}^{Tr} \cdot 1,33 \quad (2.96)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Şerit yükü(yayıllı yük $9,30 \text{ kN/m}$) nedeniyle oluşan ani sehim(mm) ise,

$$\Delta_{105}^{Lane} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W_{lane} \cdot L^4}{E_C \cdot I_C} \quad (2.97)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Şerit yük için de dağıtım katsayısı uygulanarak $\Delta_{105}^{Lane_{mg}} = mg \cdot \Delta_{105}^{Lane}$ ifadesi elde edilmektedir.

Buna göre hareketli yüklerden dolayı oluşan ani sehim,

$$\Delta_{105}^{LL+IM} = \Delta_{105}^{Tr_{mg}} + \Delta_{105}^{Lane_{mg}} \quad (2.98)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu değer in giriş açıklığının(L) $1/800$ 'ünden küçük olması istenmektedir.

2.1.9.8.2. Uzun Süreli Sehimlerin Hesabı

Öngerilme uygulandığında girişin kendi ağırlığı nedeniyle oluşan elastik sehim,

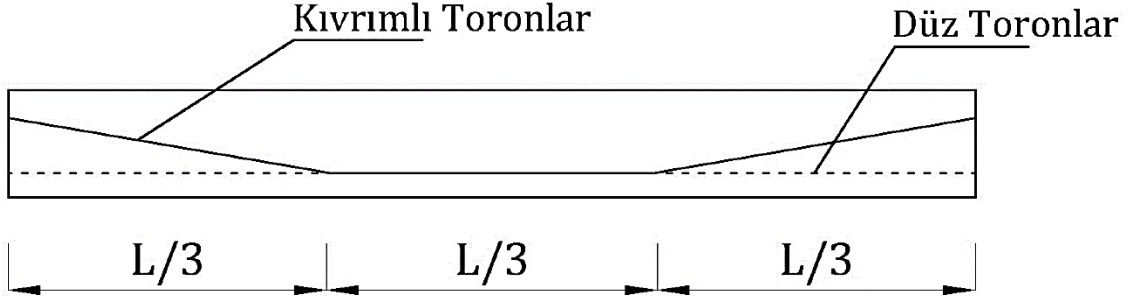
$$\Delta_{gi} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W_{beam} \cdot L^4}{E_{Ci} \cdot I_g} \quad (2.99)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada w_{beam} girişin birim boyunun ağırlığı, E_{Ci} betonun öngerilme işleminin başlangıcındaki elastisite modülünü, I_g girişin elastisite modülünü, L köprü açıklığını ifade etmektedir.

Öngerilme uygulandığında öngerilme kuvveti nedeniyle oluşan ters sehim;

$$\Delta_{pi} = \left[\frac{e_m}{8} - \frac{\beta^2}{6} (e_m - e_{end}) \right] \cdot \frac{F_i \cdot L^2}{E_{ci} \cdot I_g} \quad (2.100)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada β toronun kıvrılma noktasının kiriş açıklığına oranını ifade etmektedir. Örneğin aşağıdaki profile kıvrılmış toronlar için $\beta = 0,333$ olarak alınmaktadır.



Şekil 2.20. Kıvrımlı ve düz toronları gösteren boyuna kiriş kesiti

Tabliye ve diyafram yükleri nedeniyle oluşan elastik sehim;

$$\Delta_{slab} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(W_{slab} + W_{cntlvr})}{E_C \cdot I_g} + \frac{P_{diaf} \cdot b}{24 \cdot E_C \cdot I_g} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot b^2) \quad (2.101)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada $b(mm)$ diyaframın konumunu göstermektedir.

Kompozit kesit üzerine etki eden ilave sabit yükler nedeniyle oluşan elastik sehim,

$$\Delta_{comp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(W_{bryr} + W_{bit}) \cdot L^4}{E_C \cdot I_c} \quad (2.102)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Hesaplanan elastik sehimler, betonun sünme ve rötre etkisinde kalması nedeniyle zamanla artış göstermektedir. Uzun sürede oluşan bu sehimlerin hesaplanması için çeşitli yöntemler bulunmakla beraber bu çalışmada PCI çarpanları yöntemi kullanılacaktır.[50] Bu yöntemde aşağıda verilen Tablo 2.6. yardımıyla uzun süreli sehimlerin hesabı yapılabilmektedir.

Tablo 2.6. Uzun süreli sehımlerin hesabı için PCI çarpanları

	Kompozit olmayan kesit	Kompozit kesit
Yapımda		
Sehim- öngerilme uygulandığında eleman ağırlığı nedeniyle oluşan elastik sehime uygulanır	1,85	1,85
Ters sehim- öngerilme uygulandığında öngerilme nedeniyle oluşan elastik ters sehime uygulanır	1,80	1,80
Nihai		
Sehim- öngerilme uygulandığında eleman ağırlığı nedeniyle oluşan elastik sehime uygulanır	2,70	2,40
Ters sehim- öngerilme uygulandığında öngerilme nedeniyle oluşan elastik ters sehime uygulanır	2,45	2,20
Sehim- sadece ilave sabit yükler nedeniyle oluşan elastik sehime uygulanır	3,00	3,00
Sehim- kompozit üst kısım nedeniyle oluşan elastik sehime uygulanır	-	2,30

Böylece yapımda uzun süreli sehımlerin toplamı,

$$\Delta_{long} = \Delta_{105}^{LL+IM} + 1,85 \cdot \Delta_{gi} - 1,80 \cdot \Delta_{pi} \quad (2.103)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. AASHTO LRFD yönetmeliği nihai durumdaki uzun süreli sehımlerin denetimini gerekli görmemekle beraber, nihai durumdaki sehim,

$$\Delta_{long}^n = \Delta_{105}^{LL+IM} + 2,40 \cdot \Delta_{gi} - 2,20 \cdot \Delta_{pi} + 3,00 \cdot \Delta_{slab} + 2,30 \cdot \Delta_{comp} \quad (2.104)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

2.1.10. Dayanım Sınır Durumu İçin İnceleme

2.1.10.1. Eğilmeye Göre Tasarım

AASHTO LRFD yönetmeliğinde düşük rölaksasyonlu toronlar için akma dayanımını f_{py} çekme dayanımını f_{pu} göstermek üzere, eğilmeye göre tasarımda kullanılacak k katsayısı,

$$k = 2 \cdot \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (2.105)$$

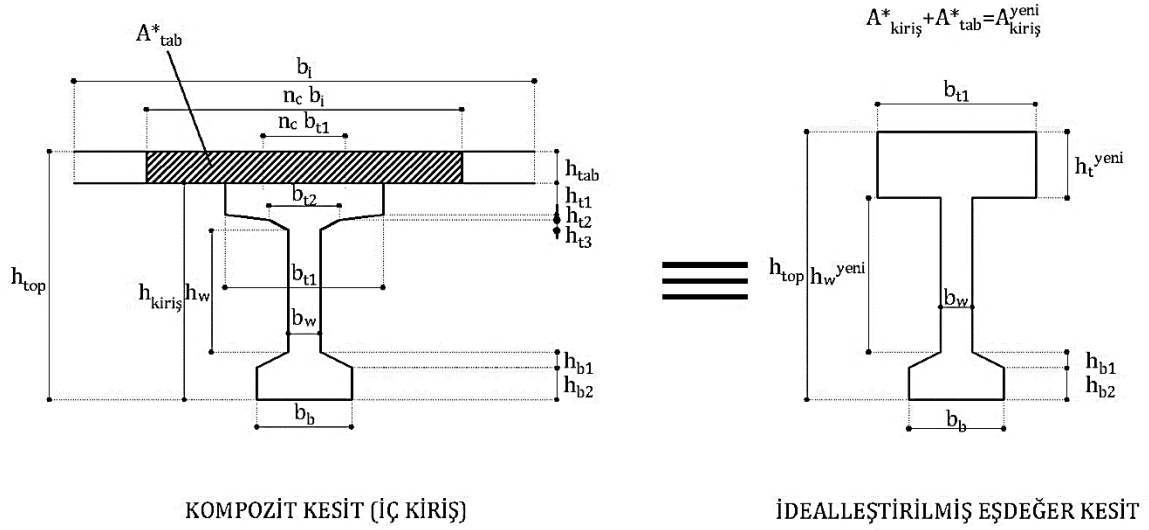
şeklinde hesaplanmaktadır. Burada düşük rölaksasyonlu toronlar için $f_{py} = 0,90 \cdot f_{pu}$ ifadesi uygulanmaktadır.

Aderanslı öngerme toronlarındaki gerilme (f_{ps}),

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - k \cdot \frac{c}{d_p} \right) \quad (2.106)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada c ile ifade edilen tarafsız eksen derinliğinin basınç bloğu dikdörtgen olan kesitlerde ve tablalı kesit şeklinde olan elemanlarda farklı hesaplandığını belirtmek uygun olmaktadır. Diğer taraftan d_p ise toronların ağırlık merkezinin kompozit kesitin en üst lifine olan uzaklığını göstermektedir.

Öngerilmeli bir kirişte taşıma gücü hesaplanırken, hesap yapılan kirişlerin üst başlıkları her zaman dikdörtgen olmamaktadır. Zira AASHTO kirişleri incelendiğinde üst başlıklarının iki eğimli yamuk bir kesit olduğu görülmektedir. Bu gibi kesitlerde eşdeğer basınç bloğunun taşıma gücü hesaplanması güçleşmektedir. Burada yapılacak bir kabul bu hesap kolaylaştırılabilir. Bu kabul gerçek kesitin idealleştirilerek aynı kesit alanına, aynı toplam kiriş yüksekliğine sahip, üst başlığı dikdörtgen olan bir kesitin oluşturulmasıyla sağlanabilmektedir. Bu kabul yapılacak hesapta çok büyük bir hatanın yapılmayacağı savunulmaktadır. [51]



Şekil 2.21. Kompozit kesit ve idealleştirilmiş kesit enkesitleri

Şekil 2.21'den de anlaşılacağı üzere kompozit kesit alanı sabit kabul edilerek yapılan hesaplamalarla idealleştirilmiş kesit için yeni tabliye kalınlığı h_{tab}^{yeni} ve yeni kiriş gövde uzunluğu h_w^{yeni} elde edilmektedir.

Basınç bloğu dikdörtgen olan kesitlerde tarafsız eksen derinliği (c),

$$c = \frac{A_{ps} \cdot f_{pu}}{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b + k \cdot A_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (2.107)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada b etkili tabliye genişliğini, β_1 ise AASHTO LRFD yönetmeliğine göre betonun 28 günlük karakteristik basınç dayanımına (f'_c) göre hesaplanan eşdeğer basınç bloğu katsayısı;

$$f'_c \leq 28 \text{ MPa ise } \beta_1 = 0,85 \quad (2.108)$$

$$28 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 56 \text{ MPa ise } \beta_1 = 0,85 - 0,05 \cdot \left(\frac{f'_c - 28}{7} \right) \quad (2.109)$$

$$f'_c \geq 56 \text{ MPa ise } \beta_1 = 0,65 \quad (2.110)$$

şeklinde belirlenmektedir.

Tarafsız eksen derinliği (c) ve öngerme toronlarındaki gerilme (f_{ps}) bulunduktan sonra basınç bloğu derinliği;

$$a = \beta_1 \cdot c \quad (2.111)$$

ifadesiyle, öngerme toronlarındaki kuvvet ise;

$$F_p = A_{ps} \cdot f_{ps} \quad (2.112)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Buna göre üst başlığı dikdörtgen hale getirilerek idealleştirilen öngerilmeli elemanın eğilme etkisinde taşıma gücü;

$$\phi M_n = \phi \left[A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (2.113)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Eğer kesitin basınç bloğu tablalı kesit şeklinde ise öngerilmeli kesitin taşıma gücü,

$$\phi M_n = \phi \left[A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + 0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot (b - b_w) \cdot h_f \cdot \left(\frac{a - h_f}{2} \right) \right] \quad (2.114)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada ϕ dayanım azaltma katsayısı olup öngerme donatısının şekil değiştirmesine göre belirlenmekte olup tam öngerilmeli beton kesitlerde 1 olarak alınmaktadır.

AASHTO LRFD'ye göre eğilme etkisindeki elemanlarda hesaplanan taşıma gücünün (ϕM_n), dayanım I sınır durumu ($U = \eta_i [1,25 \cdot DC + 1,50 \cdot DW + 1,75 (LL + IM)]$) için belirlenen yük birleşiminden büyük olması gerekmektedir.

2.1.10.2. Minimum Donatı Oranı Denetimi

Minimum donatı oranı denetiminin sağlanması için hesaplanan taşıma gücü momentinin ($\phi M_n = M_r$),

$$M_r \geq \left\{ \min \left(1,2 \cdot M_{cr} \right. \right. \\ \left. \left. 1,33 \cdot U \right) \right. \quad (2.115)$$

koşulunu sağlaması gerekmektedir. Koşuldaki kesitin çatlama momenti (M_{cr}),

$$M_{cr} = S_{ac} \cdot (f_r + f_{cpe}) - M_{dnc} \left(\frac{S_{ac}}{S_a} - 1 \right) \geq S_{ac} \cdot f_r \quad (2.116)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada f_r betonun kırılma modülünü göstermektedir ($f_r = 0,63 \cdot \sqrt{f'_c}$). $M_{dnc}(M_{DC1})$ kompozit olmayan kesitte sabit yüklerden dolayı oluşan eğilme momentini ifade etmektedir. f_{cpe} ise dış yükler etkisinde çekme gerilmesi oluşan en dış beton lifinde, etkin öngerilme kuvveti nedeniyle oluşan basınç gerilmesini göstermekte ve;

$$f_{cpe} = \left| -\frac{F_f}{A_g} - \frac{F_f \cdot e_m}{S_a} \right| \quad (2.117)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada F_f tüm kayıplardan sonra toronlardaki öngerme kuvvetini, e_m toron dışmerkezliğini ifade etmektedir.

2.2. Problemin Tanımı

Bu bölümde optimum tasarım sürecinde kullanılacak olan tasarım değişkenleri, tasarım parametreleri, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılar tanımlanacaktır. Bu tanımlamalarda verilen matematiksel ifadeler kullanılarak köprü üstyapısının, TLBO ve Jaya algoritmaları kullanılarak, maliyet yönünden optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

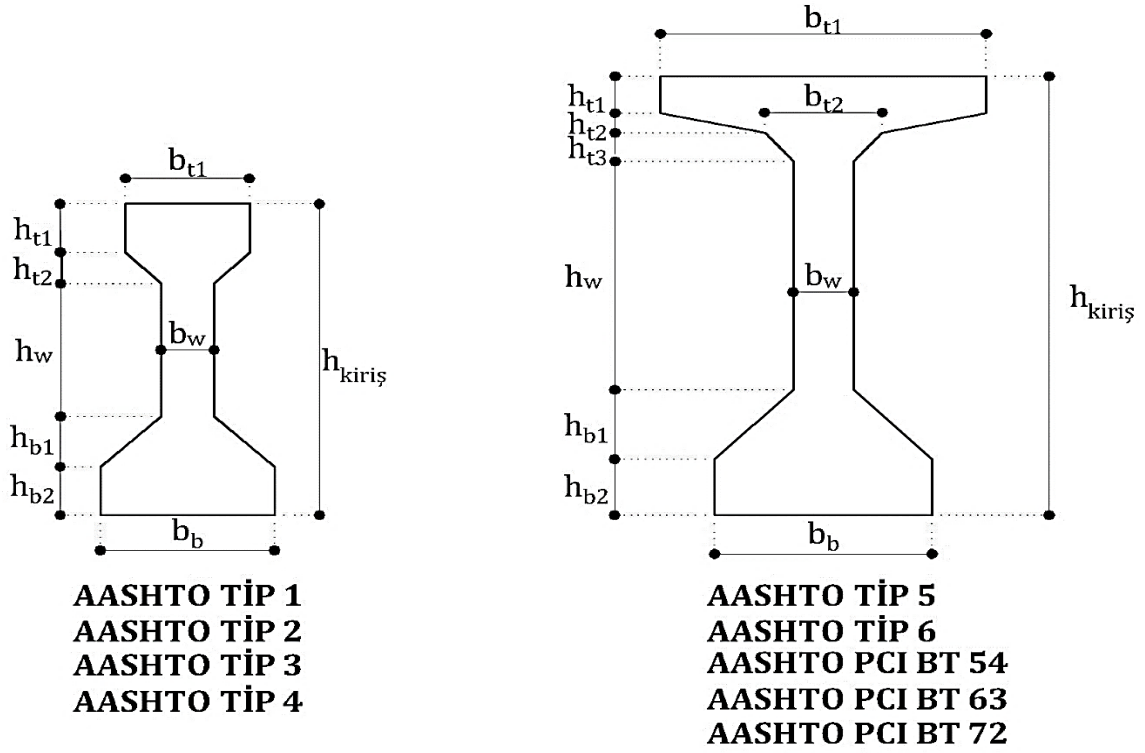
2.2.1. Tasarım Değişkenleri

Bu çalışmada tasarım değişkeni 9 adet olarak belirlenmiştir. Öngerilmeli kirişin tipi, kiriş sayısı, kiriş beton sınıfı, iç ve dış kiriş için ayrı ayrı belirlenecek olan kiriş toron türü ve sayısını kapsamak üzere söz konusu tasarım değişkenlerine ilişkin veri havuzları, alabilecekleri değer sayısı Tablo 2.7'de gösterilmektedir.

Tablo 2.7. Kullanılan tasarım değişkenleri veri havuzları

No	Tasarım Değişkeni	Değişkenler	Birimi	Alabileceği Değer Sayısı
1.	Kiriş Tipi	AASHTO Tip 1 - AASHTO Tip 2 - AASHTO Tip 3 - AASHTO Tip 4 - AASHTO Tip 5 - AASHTO Tip 6 - AASHTO PCI BT 54 - AASHTO PCI BT 63 - AASHTO PCI BT 72	Adet	9
2.	Kiriş Sayısı	2,3,4,5,6,.....34,35,36	Adet	35
3.	Kiriş İçin Beton Sınıfı	C35/45 - C40/50 - C45/55 - C50/60	MPa	4
4.	İç Kiriş Toron Türü	9,53 - 11,11 - 12,70 - 13,20 - 14,29 - 15,24 - 17,78	mm	7
5.	Dış Kiriş Toron Türü	9,53 - 11,11 - 12,70 - 13,20 - 14,29 - 15,24 - 17,78	mm	7
6.	İç Kiriş Öngerilmeli Toron Sayısı	2,4,6,.....,128,130	Adet	65
7.	İç Kiriş Öngerilmeli Kıvrımlı Toron Sayısı	2,4,6,.....,62,64	Adet	33
8.	Dış Kiriş Öngerilmeli Toron Sayısı	2,4,6,.....,128,130	Adet	65
9.	Dış Kiriş Öngerilmeli Kıvrımlı Toron Sayısı	2,4,6,.....,62,64	Adet	33

Optimizasyonda kullanılacak olan AASHTO kirişlerine ait enkesitler Şekil 2.22’de, enkesit özellikleri ise Tablo 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.22. AASHTO önerilmeli kiriş enkesitleri

Tablo 2.8. AASHTO önerilmeli kiriş enkesit özellikleri

	Birimi	TİP 1	TİP 2	TİP 3	TİP 4	TİP 5	TİP 6	PCI BT 54	PCI BT 63	PCI BT 72
b_{t1}	mm	304,8	304,8	406,4	508	1066,8	1066,8	1066,8	1066,8	1066,8
b_{t2}	mm	304,8	304,8	406,4	508	406,4	406,4	254	254	254
b_w	mm	152,4	152,4	177,8	203,2	203,2	203,2	152,4	152,4	152,4
b_b	mm	406,4	457,2	558,8	660,4	711,2	711,2	660,4	660,4	660,4
h_{t1}	mm	101,6	152,4	177,8	203,2	127	127	88,9	88,9	88,9
h_{t2}	mm	76,2	76,2	114,3	152,4	76,2	76,2	50,8	50,8	50,8
h_{t3}	mm	-	-	-	-	101,6	101,6	50,8	50,8	50,8
h_w	mm	279,4	381	482,6	584,2	838,2	1066,8	914,4	1143	1371,6
h_{b1}	mm	127	152,4	190,5	228,6	254	254	114,3	114,3	114,3
h_{b2}	mm	127	152,4	177,8	203,2	203,2	203,2	152,4	152,4	152,4
$h_{kiriş}$	mm	711,2	914,4	1143	1371,6	1600,2	1828,8	1371,6	1600,2	1828,8
A_c	cm ²	1780,6	2380,6	3609,6	5090,3	6535,5	7000	4251,6	4600	4948,4
c_a	cm	31,98	40,21	51,48	62,81	81,18	92,40	70,18	81,58	92,97

Tablo 2.8’de A_c kiriş enkesit alanını, c_a kiriş kesit merkezinden kesit alt lifine olan uzaklığı ifade etmektedir.

Maksimum kiriş sayısı, köprü genişliği değiştiğinde seçilen kirişin üst başlığı (b_{t1}) veya alt başlığına (b_b) göre havuzun güncellenmesi ile belirlenmektedir.

Kiriş için tasarım değişkeni olarak belirlenen beton sınıflarına dair mekanik özellikler Tablo 2.9’da gösterilmektedir.

Tablo 2.9. Tasarım değişkeni olarak belirlenen beton sınıflarına ait bazı mekanik özellikler

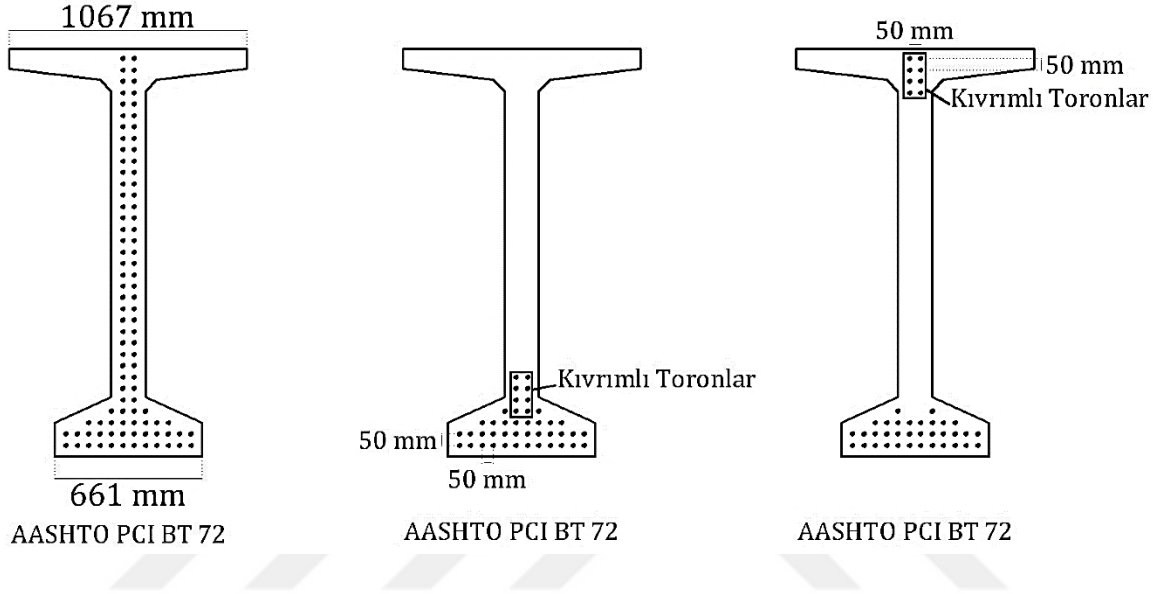
Beton Sınıfı (MPa)	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
28 Günlük Karakteristik Basınç Dayanımı (f'_c)	35	40	45	50
Öngerilme İşleminin Başlangıcında Basınç Dayanımı (f'_{ci})	26,25	30	33,75	37,5
Kayıplardan Önceki Basınç Dayanımı (f_{ci})	15,75	18	20,25	22,5
Kullanım Aşamasında Basınç Dayanımı (f_c)	15,75	18	20,25	22,5
Aderanslı Donatı İçin Aktarma Anında Çekme Dayanımı (f_{ti})	3,73	3,98	4,23	4,46
Kullanım Aşamasında Çekme Dayanımı (f_t)	2,96	3,16	3,35	3,54
28 Günlük Elastisite Modülü (E_c)	28397	30358	32199	33941
Öngerme Başlangıcında Elastisite Modülü (E_{ci})	24593	26291	27885	29394

İç ve dış kirişlerde düşük rölaksasyonlu[48] toronlar kullanılmakta olup, bu kapsamdaki 7 adet toron türüne ait mekanik özellikler Tablo 2.10’da verilmektedir.

Tablo 2.10. Düşük rölaksasyonlu toronlara ait bazı mekanik özellikler

Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa) (f_{pu})	Aktarmadan Hemen Önce Dayanım (MPa) (f_{pbt})	Kullanım Aşamasında Dayanım (MPa) (f_{pe})	Enkesit Alanı (mm ²)
9,53	1860	1395	1339,2	54,8
11,11	1860	1395	1339,2	74,2
12,70	1860	1395	1339,2	98,7
13,20	1860	1395	1339,2	107,7
14,29	1860	1395	1339,2	123,9
15,24	1860	1395	1339,2	140,0
17,78	1860	1395	1339,2	189,7

İç ve dış kirişlerde öngerilmeli toron sayısı, düz toronlar ve kıvrımlı toronlar olmak üzere iki farklı tasarım değişkeni olarak belirlenmiştir. Veri havuzundaki 9 kiriş tipi için enkesit donatı şeması farklı olmak üzere[EK - 2], *AASHTO PCI BT 72* kirişi için Şekil 2.23'te sırasıyla enkesit donatı şeması, açıklıkta örnek toron yerleşimi ve mesnette örnek toron yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 2.23. *AASHTO PCI BT 72* kirişi için enkesit donatı şeması, açıklıkta ve mesnette örnek toron yerleşimi

2.2.2. Amaç Fonksiyonu

Bu çalışmada amaç fonksiyonu köprü üstyapısının maliyetini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonun matematiksel ifadesinde kullanılmak üzere öngerilmeli köprü üstyapısında kullanılacak malzeme ve işçiliklerle ilgili birim fiyatların belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda güncel fiyat olarak Karayolları Genel Müdürlüğü'nün[52] açıklamış olduğu Türk Lirası(₺) cinsinden 2018 yılı birim fiyatları dikkate alınarak kullanılacak pozlara ait tablo aşağıda verilmektedir.

Tablo 2.11. Kullanılacak pozlara ait KGM 2018 yılı birim fiyatları

Poz No	İmalatın Açıklaması	Birim	Birim Fiyat (₺)
KGM/16.136/K-1	Prefabrik Kirişlerin Yerlerine Konulması	Ton	39,66 ₺
KGM/23.002/K-6	Boyuna ve Enine Önçekim, Öngerme Çeliğinin (Tel, Demet, Çubuk) Yerlerine Konulması, Gerilmesi, Gevşetilmesi ve Kesilmesi İşçiliği	Ton	10.130,55 ₺
KGM/16.137/K-H	Köprülerin Öngerilmeli (Önçekim-Artçekim) Boyuna ve Enine Kirişlerinde Her Dozda Demirli Beton (C 40/50 Hazır Beton Harcı ile)	m ³	608,55 ₺
KGM/16.137/K-H-A1	Köprülerin Öngerilmeli (Önçekim-Artçekim) Boyuna ve Enine Kirişlerinde Her Dozda Demirli Beton (C 45/55 Hazır Beton Harcı ile)	m ³	613,55 ₺
KGM/16.137/K-H-A2	Köprülerin Öngerilmeli (Önçekim-Artçekim) Boyuna ve Enine Kirişlerinde Her Dozda Demirli Beton (C 50/60 Hazır Beton Harcı ile)	m ³	618,55 ₺
KGM/16.1377K-H-A3	Köprülerin Öngerilmeli (Önçekim-Artçekim) Boyuna ve Enine Kirişlerinde Her Dozda Demirli Beton (C 35/40 Hazır Beton Harcı ile)	m ³	597,30 ₺
KGM/3792/1	Yüksek Dayanımlı Öngerme Çeliği Temini (0,5 inç halat) (Tip 270K)	Ton	3.875,00 ₺

Öngerilme donatısının maliyeti $C_{\text{önger}}$, öngerilme donatısının yerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliği $C_{\text{öngerişçilik}}$, betonun maliyeti C_{beton} ve öngerilmeli kirişlerin yerleştirilme maliyeti C_{kirisyer} olmak üzere amaç fonksiyonu,

$$f(x) = C_{\text{önger}} + C_{\text{öngerişçilik}} + C_{\text{beton}} + C_{\text{kirisyer}} \quad (2.118)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Öngerilmeli toron sayısı T_{toron} , kıvrımlı toron sayısı T_{kivrimli} , bir adet öngerilme donatısı alanı A_{toron} , L kiriş açıklığı olmak üzere düz toron uzunluğu, L_{kivrimli} kıvrımlı toron uzunluğu, γ_s toron birim hacim ağırlığı ve $BF_{\text{önger}}$ yüksek dayanımlı öngerme çeliği temini pozunun($KGM/3792/1$) birim fiyatını göstermek üzere öngerilme donatısının maliyeti($C_{\text{önger}}$),

$$C_{\text{önger}} = (T_{\text{toron}} - T_{\text{kivrimli}}) \cdot A_{\text{toron}} \cdot L \cdot \gamma_s \cdot BF_{\text{önger}} + T_{\text{kivrimli}} \cdot A_{\text{toron}} \cdot L_{\text{kivrimli}} \cdot \gamma_s \cdot BF_{\text{önger}} \quad (2.119)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Öngerilme donatısının yerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliğinin maliyeti ($C_{\text{öngerişçilik}}$) ise,

$$C_{\text{öngerişçilik}} = (T_{\text{toron}} - T_{\text{kivrimli}}) \cdot A_{\text{toron}} \cdot L \cdot \gamma_s \cdot BF_{\text{öngerişçilik}} + T_{\text{kivrimli}} \cdot A_{\text{toron}} \cdot L_{\text{kivrimli}} \cdot \gamma_s \cdot BF_{\text{öngerişçilik}} \quad (2.120)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada $BF_{\text{öngerişçilik}}$ öngerme çeliğinin yerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliği pozunun (KGM/23.002/K – 6) birim fiyatıdır.

C_{beton} betonun maliyetini göstermek üzere, BF_{beton} tasarım değişkeni olarak dört adet beton sınıfı (C35/45, C40/50, C45/55, C50/60) olduğu için optimizasyon hangi beton sınıfını belirlese ona ait poz numarasını (KGM/16.137/K-H, KGM/16.137/K-H-A1, KGM/16.137/K-H-A2, KGM/16.137/K-H-A3) seçerek alınan birim fiyatı, L kiriş açıklığını, A_c kiriş enkesit alanını göstermek üzere,

$$C_{\text{beton}} = A_c \cdot L \cdot BF_{\text{beton}} \quad (2.121)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Öngerilmeli kirişlerin yerlerine konulması maliyeti ise, γ_c beton birim ağırlığını, BF_{kirisyer} kirişlerin yerine konulması pozunun (KGM/16.136/K-1) birim fiyatını göstermek üzere,

$$C_{\text{kirisyer}} = A_c \cdot L \cdot \gamma_c \cdot BF_{\text{kirisyer}} \quad (2.122)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

2.2.3. Tasarım Parametreleri

Çalışmalarda kullanılacak tasarım parametreleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 2.12. Tasarım parametreleri

Konsol uzunluğu (kiriş mesneti ortasına kadar) (S_{kon})	900 mm
Bariyer genişliği (WW_{bryr})	400 mm
Bariyer enkesit alanı (A_{bryr})	1 m ²
Nem (H)	% 70
Diyafram genişliği (b_{diaf})	300 mm
Diyafram yüksekliği (h_{fdiaf})	900 mm
Tabliye kalınlığı (h_{tab})	250 mm
Kaplama kalınlığı (h_{kplm})	50 mm
Tabliye betonu basınç dayanımı	30 MPa
Tabliye betonu elastisite modülü	26291 MPa
Toron elastisite modülü (E_{ps})	197000 MPa
Toron birim ağırlığı (γ_s)	7850 kg/m ³
Beton birim hacim ağırlığı (γ_c)	23.500 kN/m ³
Kaplama birim hacim ağırlığı ($\gamma_{bitüm}$)	22.000 kN/m ³
Bariyer birim uzunluk ağırlığı (W_{bryr})	4.670 kN/m ³

2.2.4. Sınırlayıcılar

AASHTO LRFD[45] yönetmeliğine dayanarak ve bu çalışmada açıklanan önerilmeli köprü üstyapı tasarımı için hesaplamalar göz önünde bulundurularak optimizasyon için 26 adet sınırlayıcı oluşturulmuştur.

Kirişler arası boşluk denetimi; S mesnetten mesnete kiriş aralığını, b_{t1} kiriş üst başlık genişliğini ifade etmek üzere,

$$g(1) = \frac{b_{t1}}{S} - 1 \leq 0 \quad (2.123)$$

bağıntısıyla gerçekleştirilmektedir. Tabliye dahil minimum derinlik kontrolü, h_{top} tabliye ve kiriş yüksekliği toplamını, h_{min} kiriş açıklığının 0,045 katını ifade etmek üzere,

$$g(2) = \frac{h_{min}}{h_{top}} - 1 \leq 0 \quad (2.124)$$

denetimi ile sağlanmaktadır.

Aktarma aşamasında iç kirişte açıklıkta kesitin üst lifinde oluşan gerilmenin izin verilen çekme gerilmesinden ve alt lifinde hesaplanan basınç gerilmesinin izin verilen basınç gerilmesinden küçük olup olmadığı sırasıyla,

$$g(3) = \frac{\sigma_{\bar{u}i}^A}{f_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (2.125)$$

$$g(4) = \frac{\sigma_{ai}^A}{f_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (2.126)$$

bağıntılarıyla denetlenmektedir. Benzer şekilde aktarma aşamasında iç kirişte mesnette kesitin üst lifinde ve alt lifinde hesaplanan gerilmelerin denetimi ise,

$$g(5) = \frac{\sigma_{\bar{u}i}^M}{f_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (2.127)$$

$$g(6) = \frac{\sigma_{ai}^M}{f_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (2.128)$$

ifadeleriyle gerçekleştirilmektedir.

Aktarma aşamasında dış kirişte açıklıkta kesitin üst lifinde ve alt lifinde hesaplanan gerilmelerin, izin verilen gerilmelerden küçük olup olmadığının denetimleri sırasıyla,

$$g(7) = \frac{\sigma_{\bar{u}ei}^A}{f_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (2.129)$$

$$g(8) = \frac{\sigma_{aei}^A}{f_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (2.130)$$

bağıntılarıyla sağlanmaktadır. Aktarma aşamasında dış kirişte mesnette kesitin üst lifinde ve alt lifinde hesaplanan gerilmelerin, izin verilen gerilmelerden küçük olması,

$$g(9) = \frac{\sigma_{\bar{u}ei}^M}{f_{ti}} - 1 \leq 0 \quad (2.131)$$

$$g(10) = \frac{\sigma_{aei}^M}{f_{ci}} - 1 \leq 0 \quad (2.132)$$

bağıntıları ile kontrol edilmektedir.

İç kirişlerde tüm kayıplardan sonra açıklık ortasında kiriş üst lifinde, alt lifinde ve tabliyenin en üst noktasında oluşan gerilmelerin, izin verilen gerilmelerden küçük olması denetimi sırasıyla,

$$g(11) = \frac{\sigma_{üif}^A}{f_c} - 1 \leq 0 \quad (2.133)$$

$$g(12) = \frac{\sigma_{aif}^A}{f_t} - 1 \leq 0 \quad (2.134)$$

$$g(13) = \frac{\sigma_{üif}^{tab}}{f_c} - 1 \leq 0 \quad (2.135)$$

bağıntılarıyla gerçekleştirilmektedir. Dış kirişlerde tüm kayıplardan sonra açıklıkta kiriş üst lifinde, alt lifinde ve tabliyenin en üst noktasında oluşan gerilmelerin, izin verilen gerilmelerden küçük olup olmadığının kontrolü sırasıyla,

$$g(14) = \frac{\sigma_{üef}^A}{f_c} - 1 \leq 0 \quad (2.136)$$

$$g(15) = \frac{\sigma_{aef}^A}{f_t} - 1 \leq 0 \quad (2.137)$$

$$g(16) = \frac{\sigma_{üef}^{tab}}{f_c} - 1 \leq 0 \quad (2.138)$$

denetimleriyle sağlanmaktadır.

Dış kirişte yorulma denetimi, kesit alt lifinde yorulmadan dolayı oluşan gerilmenin çekme gerilmesi olması durumunda yapılmakta olup, izin verilen gerilmeden küçük olup olmadığının kontrolü,

$$g(17) = \frac{\sigma_a^F}{0,25 \cdot \sqrt{f_c'}} - 1 \leq 0 \quad (2.139)$$

sınırlayıcısıyla yapılmaktadır. Öngerme donatısında oluşan maksimum ve minimum gerilme aralığını ifade eden yorulma gerilmesinin değişim aralığının, izin verilen yorulma sınır değerini aşıp aşmadığının kontrolü,

$$g(18) = \frac{\sigma_f^F}{\sigma_f^{sınır}} - 1 \leq 0 \quad (2.140)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir.

İç ve dış kirişlerde hareketli yük nedeniyle oluşan ani sehimler, sınır sehim değerden küçük olup olmadığının kontrolü sırasıyla,

$$g(19) = \frac{\Delta_i^{LL+IM}}{\Delta^{sınır}} - 1 \leq 0 \quad (2.141)$$

$$g(20) = \frac{\Delta_e^{LL+IM}}{\Delta^{sınır}} - 1 \leq 0 \quad (2.142)$$

sınırlayıcılarıyla yapılmaktadır. İç ve dış kirişlerde nihai durumda uzun süreli sehmlerin, sınır sehim değerden küçük olup olmadığının kontrolü ise sırasıyla,

$$g(21) = \frac{\Delta_i^{nlong}}{\Delta^{sınır}} - 1 \leq 0 \quad (2.143)$$

$$g(22) = \frac{\Delta_e^{nlong}}{\Delta^{sınır}} - 1 \leq 0 \quad (2.144)$$

ifadeleriyle sağlanmaktadır.

İç ve dış kirişlerde hesaplanan maksimum eğilme momentinin, taşıma gücü momentinden küçük olup olmadığı,

$$g(23) = \frac{M_{ui}}{\phi M_{ni}} - 1 \leq 0 \quad (2.145)$$

$$g(24) = \frac{M_{ue}}{\phi M_{ne}} - 1 \leq 0 \quad (2.146)$$

bağıntılarıyla denetlenmektedir. İç ve dış kirişlerde minimum donatı oranı denetimi ise sırasıyla,

$$g(25) = \frac{M_{ui}}{M_{rhoi}} - 1 \leq 0 \quad (2.147)$$

$$g(26) = \frac{M_{ue}}{M_{rhoe}} - 1 \leq 0 \quad (2.148)$$

bağıntılarıyla yapılmaktadır.

2.3. Parametrik Çalışmalar

Bu bölümde TLBO ve Jaya algoritmaları ile problemin tanımı(bölüm 2.2.) bölümünde bahsedilen tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonu, tasarım parametreleri ve sınırlayıcılar dikkate alınarak önerilmeli köprü üstyapısının optimum tasarımı 3 farklı sayısal uygulama üzerinde gerçekleştirilecektir.

Önerilmeli köprü üstyapısı ile ilgili hesaplamalar ve problem(madde 2.2.) ile algoritmalar Matlab[53] programlama dilinde kodlanmıştır. Sınırlayıcılardan elde edilen ihlallerin amaç fonksiyonuna işlenmesinde sabit ceza katsayısı kullanılmıştır. Jaya algoritması her iterasyonda bir amaç fonksiyonu değerlendirmesi yaparken, TLBO algoritması iki amaç fonksiyonu değerlendirmesi yapmaktadır. Bu sebepten dolayı Jaya algoritmasının popülasyon sayısı iki katına çıkartılarak her iki algoritmanın aynı problem için toplam amaç fonksiyonu sayıları eşitlenmiştir.

2.3.1. Sayısal Uygulama – 1

Sayısal Uygulama-1'de, TLBO ve Jaya algoritmalarında nesildeki popülasyon sayısının optimum sonuca etkisini belirlemek üzere aynı problemin optimum tasarımını farklı sayılardaki popülasyon boyutlarıyla tekrarlanmıştır.

Optimizasyon süreci boyunca değişmeyen problem parametrelerinin bir kısmı Tablo 2.12’de verilmiştir. Bu parametrelere ilave olarak dikkate alınan diğer parametreler ise Tablo 2.13’de verilmektedir

Tablo 2.13. Uygulama - 1 için belirlenen tasarım parametreleri

Köprü açıklığı (L)		30 m
Köprü genişliği (W)		14 m
İterasyon sayısı		10000
Popülasyon sayısı	TLBO	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
	JAYA	40, 60, 80, 100, 120, 140, 160
Koşturma sayısı		50

Uygulama - 1’de her popülasyon sayısı için ayrı ayrı gerçekleştirilen 50’şer koşulda, 10000 iterasyon sonucunda, TLBO algoritmasıyla elde edilen minimum maliyetlerin en iyi, en kötü, ortalama değerleri ve standart sapması, başarı oranı, minimum maliyetin elde edildiği amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarının en iyi, ortalama, en kötü değerleri ve standart sapması Tablo 2.14’de verilmektedir. Jaya algoritmasıyla elde edilenler ise Tablo 2.15’de verilmektedir. Burada başarı oranının, minimum maliyete ulaşabilen koşul oranı olduğu belirtilmelidir. Ayrıca minimum maliyet değerine ulaşamayan koşulların değerlendirme sayısının, maksimum iterasyona göre hesaplanan amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı olarak alındığı da belirtilmelidir.

Tablo 2.14. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 1 için elde edilen maliyet değerleri, başarı oranları ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

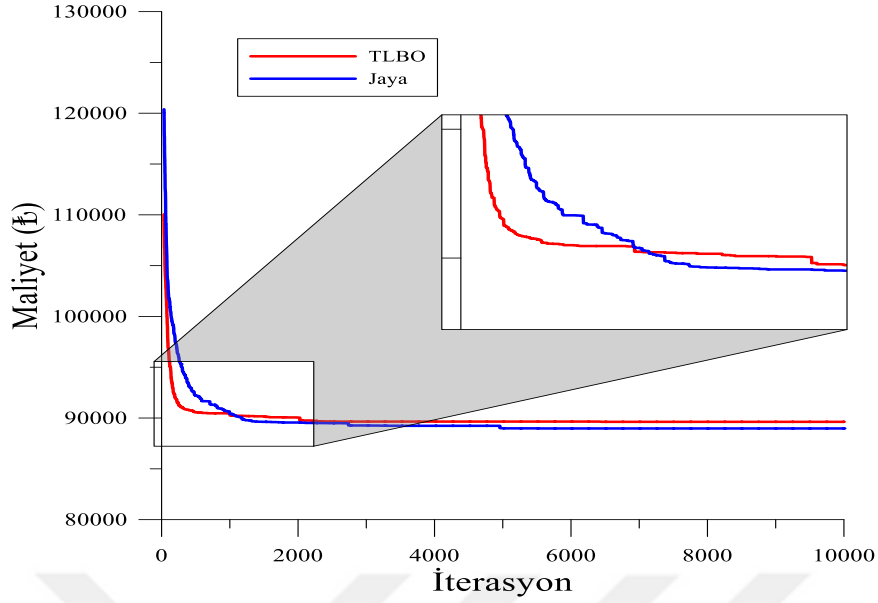
Popülasyon sayısı	20	30	40	50	60	70	80
En iyi maliyet (₺)	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73
Ortalama maliyet (₺)	104153,6	97964,74	93609,51	91860,58	91988,78	91007,37	89624,2
En kötü maliyet (₺)	148549,9	127914	117219,3	110970	111325,8	112149,1	106145,1
Standart sapma (₺)	14041,71	9594,89	7970,81	6548,29	6943,72	6164,04	3323,97
Başarı oranı (%)	4	16	46	48	70	76	78
En iyi amaç fonk. değ. say.	50180	11850	12280	16950	26220	9590	3920
Ortalama amaç fonk.değ.say.	387087,2	536956,8	511184	596116	502238,4	451718,4	469897,6
En kötü amaç fonk. değ. say.	400020	600030	800040	1000050	1200060	1400070	1600080
Standart sapma	64224,64	157514,4	340497,1	440479,2	505494,1	552623,6	638929,4

Tablo 2.15. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 1 için elde edilen maliyet değerleri, başarımlar ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

Popülasyon sayısı	40	60	80	100	120	140	160
En iyi maliyet (₺)	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73	88726,73
Ortalama maliyet (₺)	98721,55	94431,89	92819,52	91942,8	91248,34	90433,07	88978,07
En kötü maliyet (₺)	117219,3	110970	110970	112149,1	106145,1	109154,8	100869,8
Standart sapma (₺)	9709,12	8425,86	7516,46	6727,76	5524,03	5264,83	1716,96
Başarım oranı (%)	44	66	68	74	80	86	92
En iyi amaç fonk. değ. say.	12720	13860	12400	22800	20760	24780	48000
Ortalama amaç fonk. değ. say.	254714,4	273021,6	357507,2	383534	417314,4	421764	408960
En kötü amaç fonk. değ. say.	400040	600060	800080	1000100	1200120	1400140	1600160
Standart sapma	173717,9	249686,4	325366,2	388669	441012,9	474320	450281,5

Tablo 2.14. ve Tablo 2.15. incelendiğinde her iki algoritmanında aynı minimum maliyet değerine(88726,73 ₺) tüm popülasyon boyutlarında ulaşabildiği görülmektedir. Bununla birlikte popülasyon boyutu arttıkça başarımların yükseldiği ve ortalama maliyetin azaldığı gözlenmektedir. Jaya algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerin TLBO algoritmasından elde edilenlere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma göre Jaya algoritmasının TLBO algoritmasına göre daha etkin arama yaptığı kanısına varılabilir. Aynı durum başarımların incelendiğinde de görülmektedir. Jaya algoritmasının optimum sonuca ulaşmak için değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının ortalamalarının TLBO algoritmasından daha düşük olduğu, bu durumun da Jaya algoritmasının daha erken optimum yakınsadığını gösterdiği sonucuna varılabilmektedir.

Maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları aynı olan 80 bireylik popülasyon boyutuna sahip TLBO algoritması ve 160 bireylik popülasyon boyutuna sahip Jaya algoritmasıyla yapılan optimum tasarımlara ilişkin ortalama yakınsama grafikleri aşağıdaki Şekil 2.24'de görülmektedir



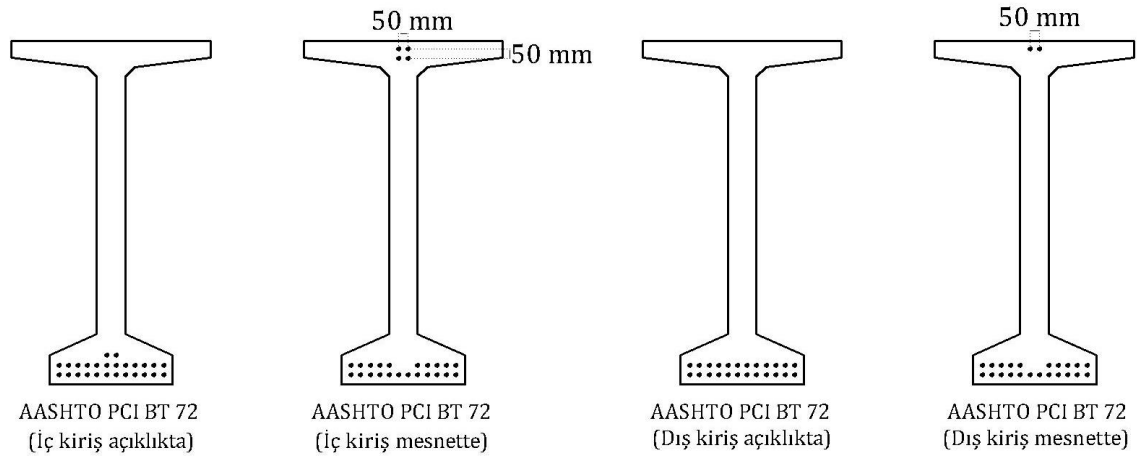
Şekil 2.24. 80 bireylik popülasyon boyutuna sahip TLBO ve 160 bireylik popülasyon boyutuna sahip Jaya algoritmasına ilişkin ortalama yakınsama grafikleri

Şekil 2.24 incelendiğinde TLBO algoritmasının Jaya algoritmasına göre daha hızlı yakınsadığı ancak ortalama maliyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum TLBO algoritmasının yakınsama hızının yüksek olduğunu, ancak Jaya algoritmasının optimum çözümü bulma konusunda daha etkin olduğunu göstermektedir.

Minimum maliyetli çözüm için elde edilen optimum tasarım değişkenleri Tablo 2.16'da, şematik olarak ise Şekil 2.25'de gösterilmektedir.

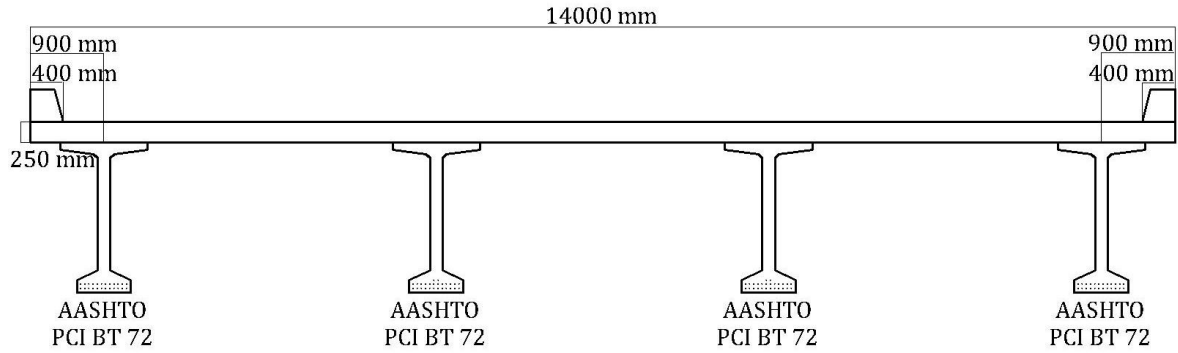
Tablo 2.16. Uygulama - 1, TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım parametreleri

Kiriş Tipi	AASHTO PCI BT 72
Kiriş Sayısı	4
Beton Sınıfı	C50/60
İç Kiriş Toron Türü	15,24 mm
Dış Kiriş Toron Türü	15,24 mm
İç Kiriş Toplam Toron Sayısı	26
İç Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	4
Dış Kiriş Toplam Toron Sayısı	24
Dış Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	2



Şekil 2.25. Uygulama - 1 için optimum tasarım değişkenlerine göre iç ve dış kirişlerin açıklıkta ve mesnette enkesit donatı şemaları

Optimum tasarım değişkenleri incelendiğinde iç ve dış kirişler için farklı sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 2.26'da optimum tasarım parametrelerine göre köprü üstyapısı enkesiti(açıklıkta) gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Uygulama - 1, optimum tasarım değişkenlerine göre açıklıkta köprü üstyapısı enkesiti

Daha önce belirtildiği gibi amaç fonksiyonu; öngerilme donatısının maliyeti $C_{önger}$, öngerilme donatısının yerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliği $C_{öngerişçilik}$, betonun maliyeti C_{beton} ve öngerilmeli kirişlerin yerleştirilme maliyetinden $C_{kirisyer}$ oluşmaktadır. Uygulama - 1 için optimum tasarım değişkenlerine göre hesaplanan maliyet detayları Tablo 2.17'de verilmektedir.

Tablo 2.17. Uygulama - 1 için optimum maliyet detayları

	Maliyetler (₺)
$C_{\text{önger}}$	12789,57
$C_{\text{öngerleşçilik}}$	33434,92
C_{beton}	36729,82
C_{kirisyer}	5772,41
En iyi maliyet	88726,73

Tablo 2.17'ye göre malzeme maliyeti olan beton (C_{beton}) ve öngerilme donatısının maliyeti ($C_{\text{önger}}$) optimum maliyetin %55,8'ini, işçilik maliyeti olan ifade edilen öngerilme donatısının yerine konulması, gerilmesi, gevşetilmesi ve kesilmesi işçiliği ($C_{\text{öngerleşçilik}}$) ve öngerilmeli kirişlerin yerleştirilme maliyeti (C_{kirisyer}) ise optimum maliyetin %44,2'sine karşılık gelmektedir.

Uygulama - 1'de iki algoritmadan elde edilen bulgular non-parametrik bir istatistiksel test olan Wilcoxon[54] testiyle karşılaştırılarak, hangi algoritmanın daha iyi sonuç verdiği karar verilmeye çalışılmıştır. Buna göre bu uygulamada her iki algoritma ile 7 farklı popülasyon sayısı için elde edilen sonuçlar Tablo 2.18'de gösterilmektedir.

Tablo 2.18. Uygulama - 1, Wilcoxon testi sonuçları

Amaç Fonksiyonu	h değeri	p değeri	z değeri	TLBO	Jaya
400020	true	0,0014	3,1878		+
600030	true	0,0009	3,313		+
800040	false	0,0679	1,8259	=	=
1000050	true	0,0342	2,1178		+
1200060	false	0,2330	1,1926	=	=
1400070	false	0,2098	1,2541	=	=
1600080	true	0,0457	1,9978		+

Wilcoxon testinde 3 farklı değer bulunmakta, bu değerlere göre test algoritmalarından birinin daha iyi olduğunu ya da birbirlerine denk olduğu sonucuna ulaşmaktadır. h değeri *true* sonucu veriyorsa algoritmalarından biri daha iyi, *false* sonucu veriyorsa algoritmalar birbirlerine denktir. p değeri için $p \leq 0,05$ ise algoritmalarından biri daha iyi, değilse

algoritmalar birbirlerine denktir. z değeri için $z < 0$ ise TLBO algoritması daha iyi diğer durumda Jaya algoritması daha iyi sonuç vermektedir.

Tablo 2.18. incelendiğinde Wilcoxon testi ile bu üç değere göre elde ettiği sonuçlarda 7 farklı popülasyonun 4'ünde Jaya algoritmasının başarımının daha iyi olduğu, 3'ünde ise TLBO ve Jaya algoritmalarının başarımının birbirine denk olduğu görülmektedir.

2.3.2. Sayısal Uygulama - 2

Bu sayısal uygulamada, köprü genişliğini sabit tutmak suretiyle farklı açıklıklar için optimum tasarımın ve minimum maliyetin nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca aynı uygulama üzerinde algoritmaların başarımı(performansı) da karşılaştırılmıştır.

Optimizasyon süreci boyunca değişmeyen problem parametrelerinin bir kısmı Tablo 2.12'de verilmiştir. Bu parametrelere ilave olarak bu uygulama için dikkate alınan diğer parametreler ise Tablo 2.19'da verilmektedir.

Tablo 2.19. Uygulama - 2 için belirlenen tasarım parametreleri

Köprü açıklığı (L)		15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, 40 m
Köprü genişliği (W)		14 m
İterasyon sayısı		20000
Popülasyon sayısı	TLBO	80
	JAYA	160
Koşurma sayısı		25

Uygulama-2'de farklı açıklıklardaki köprülerin diğer parametreler sabit tutarak optimum tasarımları, maksimum iterasyon sayısı 20000 alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu optimum tasarımlardan elde edilen bulgular TLBO algoritması için Tablo 2.20'de, Jaya algoritması için ise Tablo 2.21'de verilmektedir.

Tablo 2.20. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 2 için elde edilen maliyet değerleri, başarımlar ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

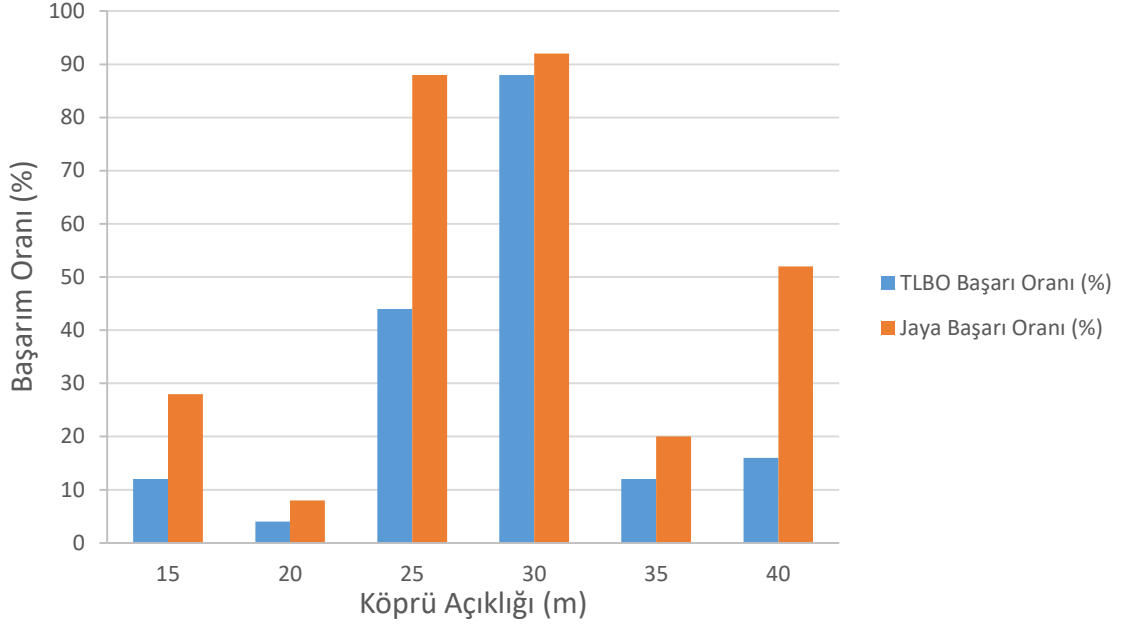
Köprü açıklığı (m)	15	20	25	30	35	40
En iyi maliyet (₺)	25933,65	42949,30	62110,11	88726,73	154101,58	255323,45
Ortalama maliyet (₺)	26628,55	43164,12	62521,48	90051,57	156059,39	269092,39
En kötü maliyet (₺)	27461,20	43374,99	63840,20	105279,17	171782,37	304606,65
Standart sapma (₺)	594,18	109,47	551,60	4582,97	3370,57	10868,26
Başarım oranı (%)	12	4	44	88	12	16
Birim maliyet (₺/m)	1728,91	2147,46	2484,40	2957,56	4402,90	6383,09
En iyi amaç fonk. değ. say.	26640	41200	38000	34320	30640	73040
Ortalama amaç fonk.değ.say.	2848726	3073725	1898442	754800	2867248	2816125
En kötü amaç fonk. değ. say.	3200080	3200080	3200080	3200080	3200080	3200080
Standart sapma	963792,8	631776	1511478	1125286	925521,9	1021346

Tablo 2.21. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 2 için elde edilen maliyet değerleri, başarımlar ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

Köprü açıklığı (m)	15	20	25	30	35	40
En iyi maliyet (₺)	25933,65	42949,30	62110,106	88726,726	154101,58	255323,45
Ortalama maliyet (₺)	26564,89	43103,48	62262,877	89857,924	155110,41	268535,38
En kötü maliyet (₺)	27461,20	43428,21	63601,826	105279,17	155362,62	366857,39
Standart sapma (₺)	649,05	123,3818	436,16	3976,64	514,82	23768,44
Başarım oranı (%)	28	8	88	92	20	52
Birim maliyet (₺/m)	1728,91	2147,46	2484,40	2957,56	4402,90	6383,09
En iyi amaç fonk. değ. say.	47840	81760	58400	35840	202880	45600
Ortalama amaç fonk.değ.say.	2509363	2951411	588358,4	570176	2649267	1674310
En kötü amaç fonk. değ. say.	3200160	3200160	3200160	3200160	3200160	3200160
Standart sapma	1162075	860947	995442,7	1000009	1126075	1504387

Tablo 2.20 ve Tablo 2.21 incelendiğinde her iki algoritmanın da farklı açıklıklar için aynı minimum maliyet değerlerine ulaşabildiği görülmektedir. Jaya algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerin TLBO algoritmasından elde edilenlere göre küçük bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma göre Jaya algoritmasının TLBO algoritmasına göre daha etkin arama yaptığı kanısına varılabilir. Aynı durum başarımlar oranları incelendiğinde de görülmektedir. Jaya algoritmasının başarımlar oranları TLBO algoritmasına göre daha yüksektir. Jaya Algoritmasının optimum sonuca ulaşmak için değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının ortalamalarının TLBO Algoritmasından daha düşük olduğu, bu

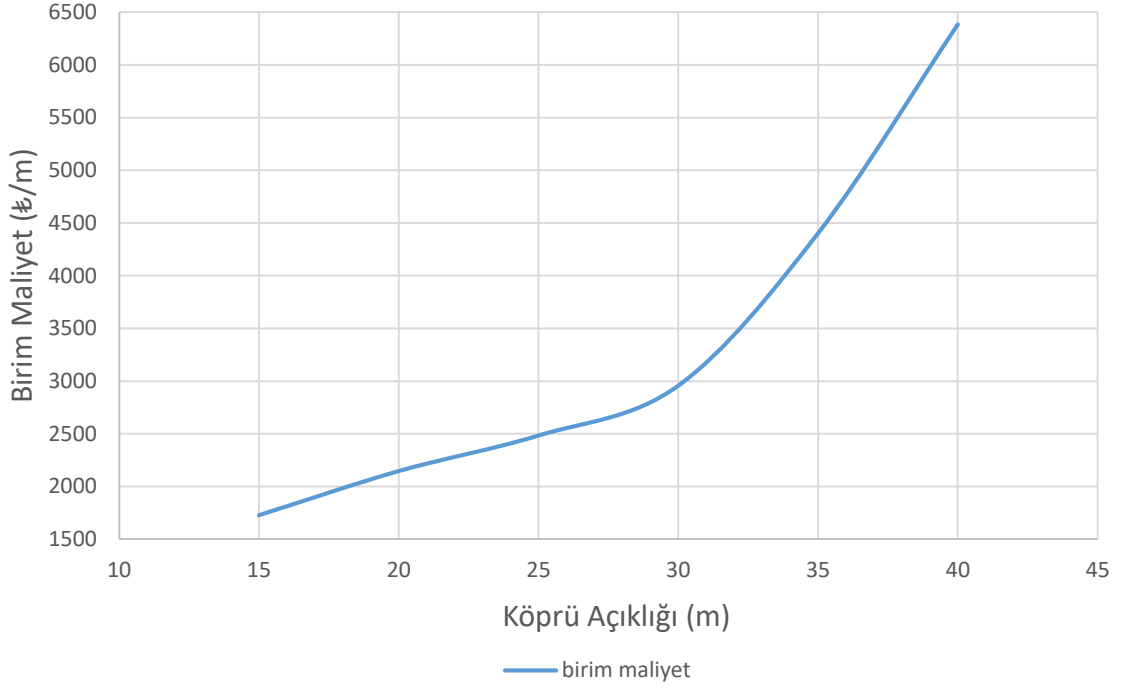
durumun da Jaya algoritmasının daha erken optimuma yakınsadığını gösterdiği sonucuna varılabilmektedir.



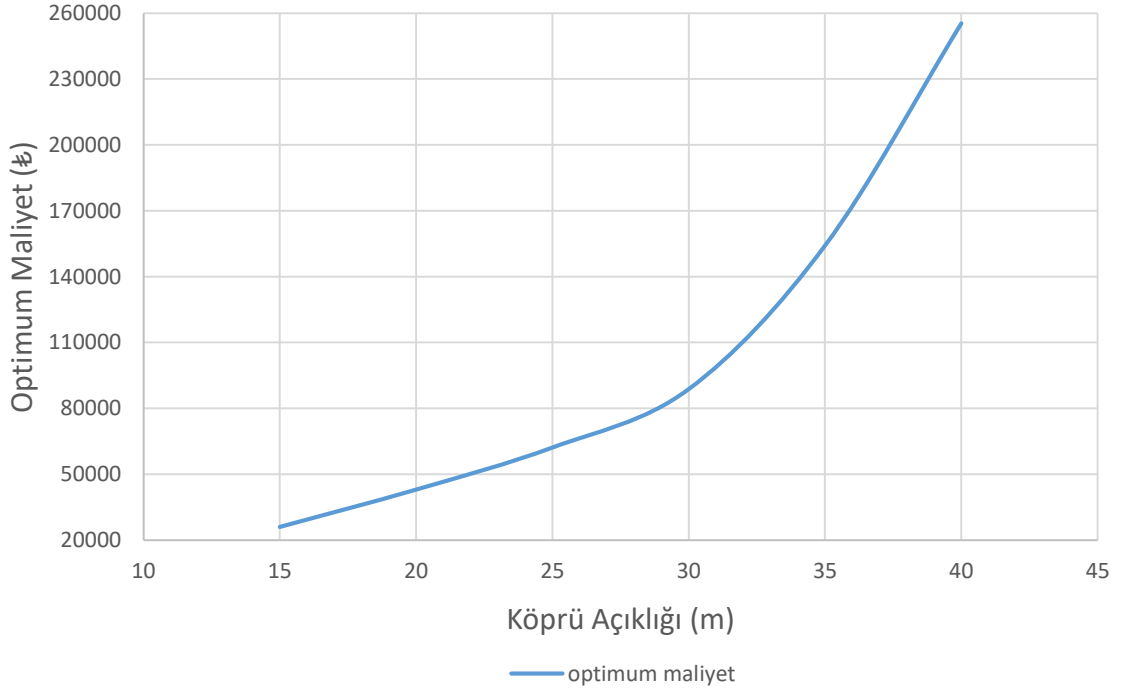
Şekil 2.27. Uygulama - 2 için TLBO ve Jaya algoritmalarının başarımları karşılaştırması

Algoritmaların farklı açıklıklarda gerçekleştirilen koşullarda elde edilen minimum maliyeti bulabilme yüzdeleri(başarımları) Şekil 2.27’de gösterilmektedir. Buna göre farklı açıklıklarda optimum maliyeti bulma oranlarının her iki algoritma için de oldukça değişken olduğu görülmektedir. Örneğin 20 metre açıklıkta her iki algoritma optimum çözüme yüzde 10’un altında başarımları ile ulaşırken, 30 metre açıklıkta optimum çözüme ulaşma her iki algoritmada da yüzde 90 civarında olmaktadır. Bu durum da bazı açıklıklarda çözüm uzayının algoritmaların kapasitelerini daha fazla zorladığını, diğer bir deyişle optimum noktaya ulaşmanın daha güç olduğunu göstermektedir.

Farklı altı açıklık için gerçekleştirilen optimum tasarımlara göre köprünün birim uzunluğu için belirlenen minimum maliyet değerleri Şekil 2.28’de, köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyet değerleri ise Şekil 2.29’da verilmektedir.



Şekil 2.28. Uygulama - 2’de köprü açıklıklarına göre birim maliyetler



Şekil 2.29. Uygulama - 2’de farklı açıklıklardaki köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyetler

Grafikler incelendiğinde açıklık arttıkça köprünün toplam maliyetinin ve birim maliyetinin doğal olarak arttığı gözlemlenmektedir. 6 farklı açıklıktaki köprünün birim maliyetlerinin(bir metre köprünün maliyeti) açıklık arttıkça değişken oranda arttığı görülmektedir. Özellikle 30 m açıklıktan sonra köprü maliyetinin daha hızlı bir şekilde yükseldiği anlaşılmaktadır. Örneğin 20 metre açıklıklı köprünün 15 metre açıklıklı köprüye göre birim maliyeti %24,2 artarken, 35 metre açıklıklı köprünün 30 metre açıklıklı köprüye göre birim maliyeti %48,8 artmaktadır. Özellikle 35 metre ve 40 metre açıklıklı köprülerin birim maliyetlerindeki artışın, daha küçük açıklıklı köprülerin birim maliyetlerindeki artıştan en az 2 kat daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.

Açıklıklara göre toplam maliyetler incelendiğinde(Şekil 2.29) yine açıklık arttıkça köprü maliyetinin değişken oranda arttığı görülmektedir. Sonuçlara göre 35 metre açıklıklı köprü 30 metre açıklıklı köprüden %73,6 oranında daha maliyetli, 40 metre açıklıklı köprü ise 35 metre açıklıklı köprüden %65,7 oranında daha yüksek maliyetli olmaktadır. Buna göre özellikle büyük açıklıklarda maliyet artışının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

Uygulama - 2’de 6 farklı açıklık için optimum maliyeti sağlayan tasarım değişkenleri Tablo 2.22’de verilmektedir.

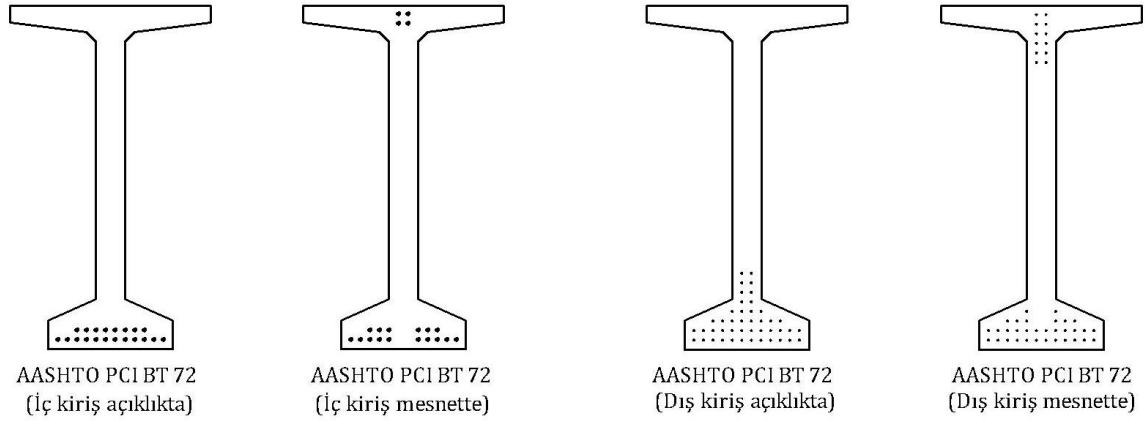
Tablo 2.22. Uygulama - 2 için TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım değişkenleri

Köprü açıklığı (m)	15	20	25	30	35	40
Kiriş Tipi	AASHTO Tip 3	AASHTO PCI BT 54	AASHTO PCI BT 72	AASHTO PCI BT 72	AASHTO Tip 6	AASHTO PCI BT 72
Kiriş Sayısı	4	4	4	4	4	8
Beton Sınıfı	C35/45	C35/45	C35/45	C50/60	C50/60	C50/60
İç Kiriş Toron Türü	13,20 mm	15,24 mm	12,70 mm	15,24 mm	17,78 mm	17,78 mm
Dış Kiriş Toron Türü	12,70 mm	13,20 mm	14,29 mm	15,24 mm	14,29 mm	13,20 mm
İç Kiriş Toplam Toron Sayısı	16	16	26	26	30	20
İç Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	2	2	4	4	6	4
Dış Kiriş Toplam Toron Sayısı	16	20	20	24	42	44
Dış Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	2	2	2	2	6	12

Tablo 2.22’de 6 farklı açıklıkta elde edilen optimum tasarım parametrelerine göre tüm açıklıklarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. 6 açıklıkta optimum çözüm için 4 farklı kiriş tipi,

2 farklı beton sınıfı, iç ve dış toronlarda 6 farklı toron türünün kullanıldığı görülmektedir. 40 metre açıklıkta kiriş sayısı 8 adet olurken, diğer açıklıkların optimum tasarımında kiriş sayısı 4 adettir.

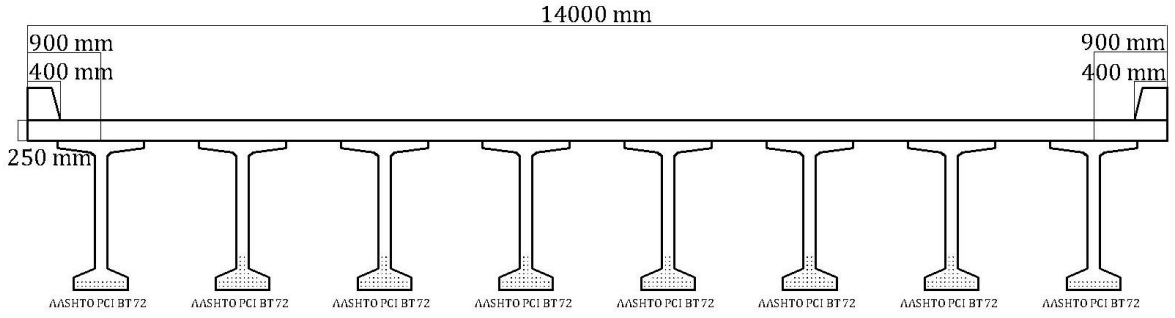
Uygulama - 2’de en büyük açıklık olan 40 metre için elde edilen optimum tasarıma göre iç ve dış kirişlerin enkesit donatı şemaları Şekil 2.30’da gösterilmektedir.



Şekil 2.30. Uygulama - 2, optimum tasarım parametrelerine göre iç ve dış kirişlerin açıklıkta ve mesnette enkesit donatı şemaları

Tablo 2.22. ve Şekil 2.31’de görüldüğü üzere 40 metre açıklık için optimum tasarımda; iç kirişlerde toron çapı 17,78 mm olmak üzere 16 adet düz toron ve 4 adet kıvrımlı toron, dış kirişlerde toron sayısı ise 13,20 mm çapında 32 adet düz toron ve 12 adet kıvrımlı toron kullanılmaktadır.

40 metre açıklıkta optimum çözüm için köprü üstyapı enkesiti(açıklıkta) Şekil 2.31’de gösterilmektedir.



Şekil 2.31. Uygulama - 2, optimum tasarım parametrelerine göre açıklıkta köprü üstyapısı enkesiti

Uygulama - 2 için optimum tasarım değişkenlerine göre hesaplanan maliyet detayları Tablo 2.23’de verilmektedir.

Tablo 2.23. Uygulama - 2 için optimum maliyet detayları

Köprü açıklığı (m)	15	20	25	30	35	40
$C_{önger}$	3018,28	5353,06	7684,49	12789,57	23223,61	39270,11
$C_{öngerisçilik}$	7890,49	13994,15	20089,05	33434,94	60711,92	102661,2
C_{beton}	12936,34	20315,87	29556,66	36729,82	60617,78	97946,2
$C_{kirisyer}$	2088,54	3286,22	4779,91	5772,41	9548,27	15445,96
En iyi maliyet (₺)	25933,65	42949,3	62110,11	88726,73	154101,6	255323,4

Uygulama - 2 için Wilcoxon test sonuçları Tablo 2.24’te gösterilmektedir. Test sonuçlarına göre 15 metre, 30 metre ve 35 metre açıklık için her iki algoritmanın başarımı benzerdir. 20 metre, 25 metre ve 40 metre açıklık için ise Jaya algoritmasının başarımının TLBO algoritmasının başarımından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 2.24. Uygulama - 2 için Wilcoxon testi sonuçları

Köprü açıklığı (m)	h değeri	p değeri	z değeri	TLBO	Jaya
15	false	0,2581	1,1309	=	=
20	true	0,0437	0,7441		+
25	true	0,0040	0,9409		+
30	false	0,6546	0,0934	=	=
35	false	0,2371	0,4075	=	=
40	true	0,0093	0,9654		+

2.3.3. Sayısal Uygulama - 3

Uygulama - 3'de 4 farklı köprü genişliği ele alınarak her iki algoritma ile köprü üstyapısının optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon süreci boyunca değişmeyen problem parametrelerinin bir kısmı Tablo 2.12'de verilmiştir. Bu parametrelere ilave olarak bu uygulama için dikkate alınan diğer parametreler ise Tablo 2.25'de verilmektedir.

Tablo 2.25. Uygulama - 3 için belirlenen tasarım parametreleri

Köprü açıklığı (L)		30 m
Köprü genişliği (W)		6 m, 9 m, 12 m, 15 m
İterasyon sayısı		10000
Popülasyon sayısı	TLBO	80
	JAYA	160
Koşturma sayısı		50

Uygulama - 3'de farklı genişlikteki köprülerin diğer parametreler sabit tutularak optimum tasarımları, maksimum iterasyon sayısı 10000 alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu optimum tasarımlardan 50'şer koşum yapılmış ve elde edilen bulgular TLBO algoritması için Tablo 2.26'da, Jaya algoritması için ise Tablo 2.27'de verilmektedir

Tablo 2.26. TLBO algoritmasıyla Uygulama - 3 için elde edilen maliyet değerleri, başarımlar ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

Köprü genişliği (m)	6	9	12	15
En iyi maliyet (₺)	43796,96	64212,96	82864,61	92462,58
Ortalama maliyet (₺)	47578,77	64706,02	84369,52	97651,88
En kötü maliyet (₺)	55731,03	75803,15	99037,09	118351,03
Standart sapma (₺)	5306,94	2277,64	4101,54	6897,10
Başarım oranı (%)	58	88	56	48
Birim maliyet (₺/m)	1459,90	2140,43	2762,15	3082,09
Birim maliyet W (₺/m)	7299,49	7134,77	6905,38	6164,17
En iyi amaç fonk. değ. say.	52400	8880	20560	12880
Ortalama amaç fonk.değ.say.	899744	260003,20	786073,60	994460,80
En kötü amaç fonk. değ. say.	1600080	1600080	1600080	1600080
Standart sapma	670020,10	507231,60	746052,20	686673,20

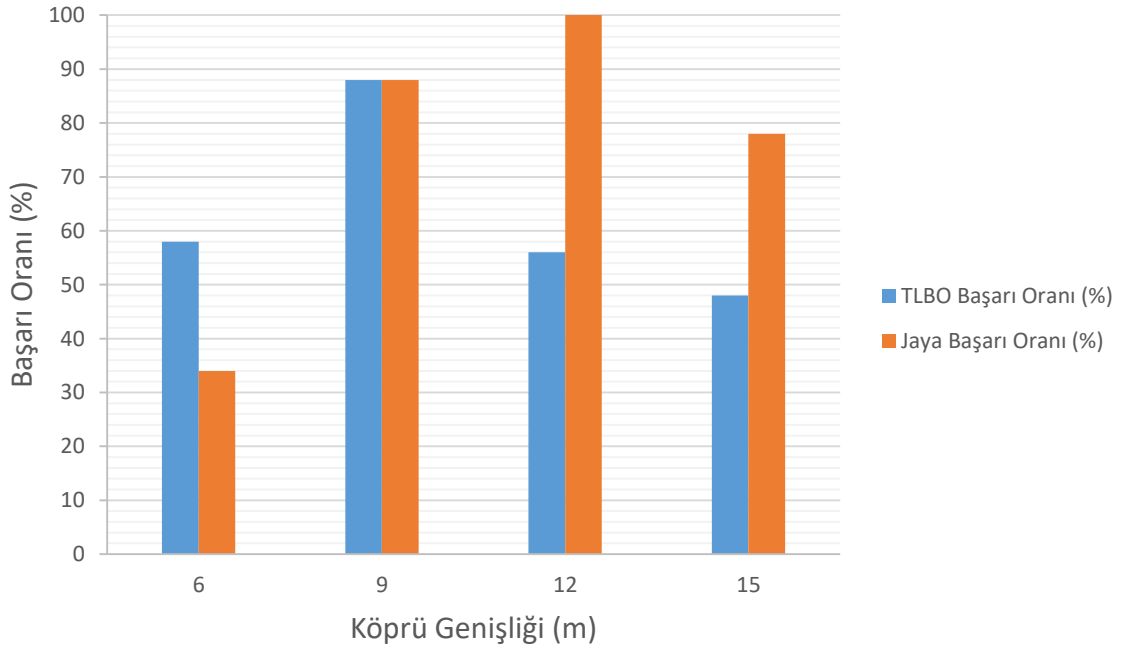
Tablo 2.27. Jaya algoritmasıyla Uygulama - 3 için elde edilen maliyet değerleri, başarımlar ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları

Köprü genişliği (m)	6	9	12	15
En iyi maliyet (₺)	43796,96	64212,96	82864,61	92462,58
Ortalama maliyet (₺)	50640,42	65416,26	82864,61	95999,73
En kötü maliyet (₺)	55869,59	76642,64	82864,61	115773,24
Standart sapma (₺)	5215,76	3649,10	0,00	7409,76
Başarım oranı (%)	34	88	100	78
Birim maliyet (₺/m)	1459,90	2140,43	2762,15	3082,09
Birim maliyet W (₺/m)	7299,49	7134,77	6905,38	6164,17
En iyi amaç fonk. değ. say.	8160	10560	16160	36640
Ortalama amaç fonk.değ.say.	1102090	303638,4	101436,80	633318,40
En kötü amaç fonk. değ. say.	1600160	1600160	326400	1600160
Standart sapma	703744,2	497195,7	66666,25	641497,30

Tablo 2.26 ve Tablo 2.27 incelendiğinde her iki algoritmanın da farklı açıklıklar için aynı minimum maliyet değerlerine ulaşabildiği görülmektedir. Jaya algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerin TLBO algoritmasından elde edilenlere göre 12 m ve 15 m için bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma göre genişliği 12 m ve 15 m olan problemlerde Jaya algoritmasının TLBO algoritmasına göre daha etkin arama yaptığı, 6 m ve 9 m için ise bunun tersi durumun ortaya çıktığı kanısına varılabilir. Aynı durum başarımlar oranları incelendiğinde de görülmektedir. Jaya algoritmasının başarımlar oranları TLBO

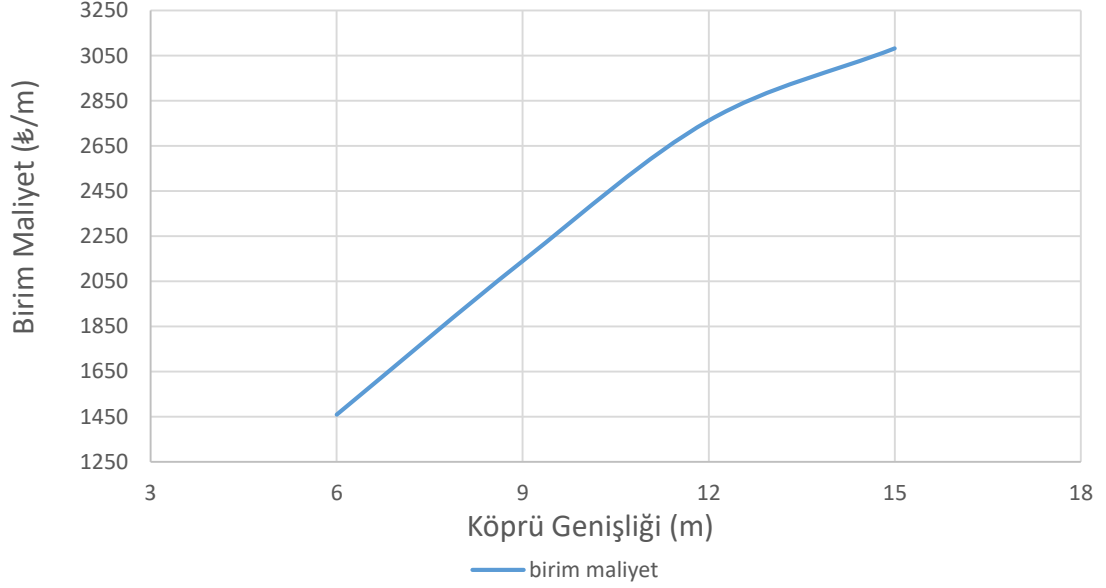
algoritmasına göre genişliğe 12 m ve 15 m olan problemlerde daha yüksektir. Jaya algoritmasının optimum sonuca ulaşmak için değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının ortalamalarının TLBO algoritmasından genişliği 12 m ve 15 m olan problemlerde daha düşük olduğu, bu durumun da söz konusu problemlerde Jaya algoritmasının daha erken optimuma yakınsadığını gösterdiği sonucuna varılabilmektedir. Genişliği 6 m ve 9 m olan köprülerde bu durumun tersinin ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

4 farklı köprü genişliği için her iki algoritmanın gerçekleştirilen koşumlardan elde edilen minimum maliyeti bulabilme yüzdeleri(başarım oranları) Şekil 2.32'de gösterilmektedir. TLBO algoritması bu uygulamada 6 metre köprü genişliğinde Jaya algoritmasına göre daha fazla sayıda optimum çözüme ulaşırken, diğer üç köprü genişliği için Jaya algoritması daha başarılı yüzdeyle optimum çözüme ulaşmıştır. Jaya algoritması 12 metre açıklıkta 50 koşumun hepsinde optimum çözümü bulmuştur. TLBO ve Jaya algoritmaları 9 metre köprü genişliğinde %88 ile aynı oranda başarılı çözüme ulaşmıştır. Uygulama - 3 için Jaya algoritmasının genel anlamda daha başarılı bir performans gösterdiğini söylemek mümkün olmakla beraber, TLBO algoritmasından elde edilen ortalama maliyet, standart sapma değeri ve optimum çözüme ulaşma oranlarının Jaya algoritmasından elde edilen sonuçların çok gerisinde olmadığı görülmektedir.

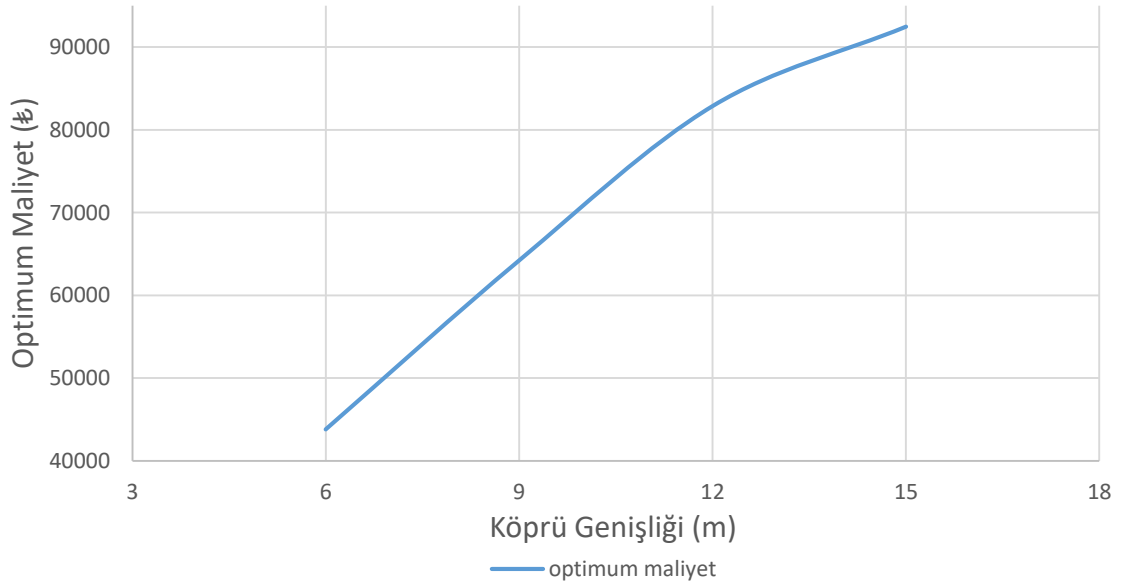


Şekil 2.32. Uygulama - 3 için TLBO ve Jaya algoritmalarının başarı oranı karşılaştırması

Farklı altı genişlik için gerçekleştirilen optimum tasarımlara göre köprünün birim uzunluğu için belirlenen minimum maliyet değerleri Şekil 2.33’de, köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyet değerleri ise Şekil 2.34’de verilmektedir.



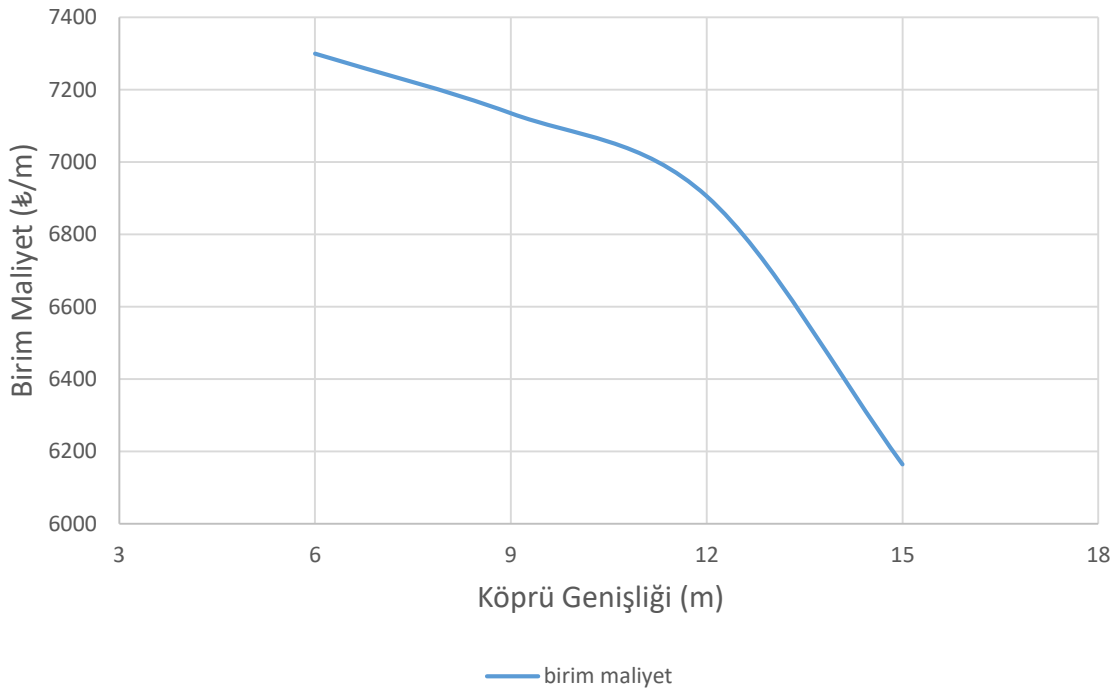
Şekil 2.33. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün birim uzunluğu için minimum maliyetler



Şekil 2.34. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün toplam uzunluğu için minimum maliyetler

30 metre açıklık için 6 metre, 9 metre, 12 metre, 15 metre genişlikteki 4 farklı köprü üstyapısı ile ilgili minimum maliyetler incelendiğinde; ilk üç genişlikte optimum ve birim maliyetlerin doğrusal olarak arttığı, 12 metre ile 15 metre köprü genişliğindeki köprü üstyapısı maliyetleri arasındaki farkın diğer genişlikler arasındaki maliyet farkı kadar çok olmadığı görülmektedir. Bunun 12 metre ile 15 metre köprü genişliğinde şerit sayısının aynı olmasından kaynaklandığı kanısına varılabilmektedir.

Şekil 2.35’de Uygulama - 3 için elde edilen optimum maliyetlerin birim köprü genişliğine göre maliyetinin grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde sabit açıklıkta genişlik arttıkça köprü birim maliyetinin azaldığı görülmektedir. Buna göre köprü üstyapısı maliyetinin genişlikten ziyade açıklıktan dolayı arttığı ilgili grafiklere göre ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.35. Uygulama - 3’de farklı genişlikteki köprünün birim genişliği için minimum maliyetler

Uygulama - 3 ile ilgili elde edilen optimum tasarım değişkenleri Tablo 2.28’de verilmektedir. Optimum çözümlerin hepsinde *AASHTO PCI BT 72* kullanıldığı, ancak farklı genişliklerde kiriş sayılarının değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.28. Uygulama - 3 için TLBO ve Jaya algoritmaları ile elde edilen optimum tasarım değişkenleri

Köprü genişliği (m)	6	9	12	15
Kiriş Tipi	AASHTO PCI BT 72	AASHTO PCI BT 72	AASHTO PCI BT 72	AASHTO PCI BT 72
Kiriş Sayısı	2	3	4	4
Beton Sınıfı	C50/60	C50/60	C50/60	C50/60
İç Kiriş Toron Türü	12,70 mm	12,70 mm	17,78 mm	15,24 mm
Dış Kiriş Toron Türü	17,78 mm	14,29 mm	15,24 mm	15,24 mm
İç Kiriş Toplam Toron Sayısı	40	34	16	28
İç Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	6	4	2	6
Dış Kiriş Toplam Toron Sayısı	18	26	22	26
Dış Kiriş Kıvrımlı Toron Sayısı	2	2	2	4

Uygulama - 3 için optimum tasarım değişkenlerine göre hesaplanan maliyet detayları Tablo 2.29’da verilmektedir.

Tablo 2.29. Uygulama - 3 için optimum maliyet detayları

Köprü genişliği (m)	6	9	12	15
$C_{önger}$	6238,51	8948,75	11172,2	13820,31
$C_{öngerleşçilik}$	16308,92	23394,12	29206,73	36129,49
C_{beton}	18364,91	27547,37	36729,82	36729,82
$C_{kirisyer}$	2884,61	4322,72	5755,86	5782,96
En iyi maliyet (₺)	43796,96	64212,96	82864,61	92462,58

Uygulama - 3 için Wilcoxon testi sonuçları Tablo 2.30’da verilmektedir. Test sonuçları incelendiğinde 4 farklı köprü genişliğinden; 6 metre genişlikte TLBO algoritmasının başarımının daha iyi olduğu, 12 ve 15 metre genişlikte Jaya algoritmasının başarımının daha iyi olduğu, 9 metre genişlikte ise her iki algoritmanın başarımının benzer olduğu görülmektedir.

Tablo 2.30. Uygulama - 3 için Wilcoxon testi sonuçları

Köprü genişliği (m)	<i>h</i> değeri	<i>p</i> değeri	<i>z</i> değeri	TLBO	JAYA
6	true	0,0447	-2,0074	+	
9	false	0,9076	-0,1160	=	=
12	true	0,000168	5,2311		+
15	true	0,0107	2,5524		+

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı öngerilmeli I kirişli köprü üstyapısının maliyet yönünden optimizasyonunu Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon(TLBO) algoritma ve Jaya algoritması ile gerçekleştirmektir.

Bu amaçla birinci bölümde öngerilmeli beton yapı tekniği ve öngerilmeli köprüler hakkında bilgiler verilmiş, yapı optimizasyonu tekniği açıklanarak, kullanılacak olan iki algoritma(TLBO ve Jaya) tanıtılmıştır. İkinci bölümde köprü üstyapı tasarımı için gerekli matematiksel ifadeler detaylı bir şekilde açıklanmış ve öngerilmeli köprü üstyapısı ile ilgili optimizasyon problemini tanımlamada kullanılan; amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri, tasarım parametreleri ve sınırlayıcılar belirlenmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında üç farklı sayısal uygulamada TLBO ve Jaya algoritmaları ile öngerilmeli köprü üstyapısı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek sonuç ve öneriler aşağıda sıralanmaktadır;

Çalışmada AASHTO LRFD[45] yönetmeliği dikkate alınarak MATLAB programlama dilinde TLBO ve Jaya algoritmaları ile öngerilmeli I kirişli köprü üstyapısının optimum tasarımını yapabilen yazılımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan yazılımla üç farklı sayısal uygulamada söz konusu her iki ayrı algoritmayla bağımsız koşullar gerçekleştirilmiştir.

Uygulama - 1'de nesildeki popülasyon sayısının optimum sonuca etkisini inceleyebilmek amacıyla aynı problemin optimum tasarımı 7 farklı sayıda popülasyon boyutuyla tekrarlanmıştır. TLBO ve Jaya algoritmaları tüm popülasyon boyutlarında minimum maliyet değerine ulaşmıştır. Popülasyon boyutu arttıkça her iki algoritmada da başarımlarının arttığı ve ortalama maliyetin azaldığı gözlemlenmiştir. Jaya algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerin TLBO algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerden tüm popülasyon boyutlarında düşük olduğu, başarımlarını incelendiğinde de Jaya algoritmasının başarımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Jaya algoritmasının optimum sonuca ulaşmak için değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının ortalamalarının TLBO algoritmasından daha düşük olduğu görülmüş, bu durumun Jaya algoritmasının daha erken optimum yakınsadığını gösterdiği kanısına varılmıştır. Uygulama - 1'de iki algoritmadan elde edilen bulguları karşılaştırmak üzere gerçekleştirilen Wilcoxon testine göre 7 farklı

popülasyon boyutunun 4'ünde Jaya algoritmasının başarımının daha iyi olduğu, 3'ünde ise TLBO ve Jaya algoritmalarının başarımının birbirine denk olduğu görülmektedir.

Uygulama - 2'de köprü genişliği 14 metre olmak üzere 6 farklı köprü açıklığı için(15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m ve 40 m) optimum tasarımın ve minimum maliyetin değişimi incelenmiş, algoritmaların başarımı karşılaştırılmıştır. 6 farklı açıklıktan elde edilen optimum maliyet sonuçlarında köprü açıklığı arttıkça 1 metre köprü maliyetinin de arttığı, özellikle 35 m ve 40 m gibi büyük açıklıklarda köprü birim maliyetindeki artışın bir önceki açıklığa göre %50 civarında olduğu görülmüştür. Algoritmalar 6 farklı açıklıktan bazılarında çok daha başarılı sonuçlar vermiştir. Örneğin 15 metre açıklıkta 50 koşum için TLBO %12 Jaya %16 oranında optimum çözüme ulaşırken, 30 metre açıklıkta TLBO %88, Jaya %92 oranında optimum çözüme ulaşmıştır. Bu durum bazı açıklıklarda çözüm uzayının algoritmaların kapasitelerini daha fazla zorladığını göstermektedir. Jaya algoritmasıyla elde edilen ortalama maliyetlerin TLBO algoritmasından elde edilenlere göre küçük bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Bu duruma göre söz konusu sayısal uygulama için Jaya algoritmasının TLBO algoritmasına göre daha etkin arama yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Diğer taraftan Jaya algoritmasının başarım oranlarının TLBO algoritmasının başarım oranlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Optimum sonuca ulaşmak için değerlendirilen amaç fonksiyonu sayılarının ortalamalarının Jaya algoritmasının daha düşük olduğu, dolayısıyla da Jaya algoritmasının TLBO algoritmasına göre daha erken optimuma yakınsadığı sonucuna varılabilmektedir. Bu sayısal uygulama için gerçekleştirilen Wilcoxon test sonuçlarına göre 15 metre, 30 metre ve 35 metre açıklık için her iki algoritmanın başarımı benzerdir. 20 metre, 25 metre ve 40 metre açıklık için ise Jaya algoritmasının başarımının TLBO algoritmasının başarımından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Uygulama - 3'de köprü açıklığı 30 metre olmak üzere 4 farklı köprü genişliği için(6 m, 9 m, 12 m ve 15 m) 50'şer koşum ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İki algortmada tüm genişliklerde minimum maliyet değerlerine ulaşmıştır. 6 m ve 9 m genişlik için TLBO algoritmasının, 12 m ve 15 m genişlikte ise Jaya algoritmasının elde ettiği ortalama maliyetlerin daha düşük olduğu görülmüştür. Başarım oranları incelendiğinde 6 m genişlikte TLBO, 12 m ve 15 m genişlikte ise Jaya algoritması daha fazla sayıda optimum çözüme ulaşmıştır. 9 m genişlik için her iki algortmada %88 ile aynı oranda başarılı çözüme ulaşmıştır. 4 farklı köprü genişliği için minimum maliyetler incelendiğinde şerit sayısı aynı olan 12 metre ve 15 metre köprü genişliğinin minimum maliyetleri arasındaki fark diğer genişlikler arasındaki farklara göre oldukça az çıkmıştır. Bunun sebebinin şerit sayısının

aynı olmasından kaynaklandığı kanısına varılabilmektedir. Sabit açıklıkta genişlik arttıkça köprü birim maliyetinin azaldığı görülmektedir. Bu bağlamda köprü üstyapısı maliyetinin genişlikten ziyade açıklıktan dolayı arttığı ifade edilebilmektedir. Uygulama - 3 için Jaya algoritması genel anlamda daha yüksek bir başarımlar gösterdiğini söylemek mümkün olmakla beraber, TLBO algoritmasından elde edilen ortalama maliyet, standart sapma değeri ve optimum çözüme ulaşma oranlarının Jaya algoritmasından elde edilen sonuçların çok gerisinde olmadığı da görülmektedir. Wilcoxon test sonuçlarına göre 6 metre genişlikte TLBO algoritmasının başarımlarının daha iyi olduğu, 12 metre ve 15 metre genişlikte Jaya algoritmasının başarımlarının daha iyi olduğu, 9 metre genişlikte ise her iki algoritmanın başarımlarının benzer olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmanın geliştirilmesi bakımından, önerilmeli kirişlerin kesme tasarımının ve kirişler üzerindeki tabliyenin tasarımının da optimum sürecine eklenmesi, kiriş kesitlerinin seçiminde kullanılan veri havuzlarının ulusal ve uluslararası kesitler kullanılarak genişletilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir. Ayrıca farklı algoritmaların da bu problem üzerindeki başarımlarının incelenmesi de gerekmektedir. Tüm bu hususlar çalışmalarımızın devamını sağlayacaktır.

4. KAYNAKLAR

1. Keyder, E., Öngerilmeli Beton, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2013.
2. TS 3233, Öngerilmeli Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, T.S.E, Ankara, 1979.
3. Kozak, M., Öngermeli Betonlar ve Özelliklerinin Teorik Olarak Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7,1 (2011) 100-106.
4. Xercavins, M., Öngerilmeli Beton Kirişli ve Plak Köprüler, Celasun H., Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 1973.
5. Şener, S., Öngerilmeli Beton, Alp Yayınevi, Ankara, 2006.
6. Ünal, O. ve Kürklü, G., Öngerilmeli Beton Teknolojisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2 (2007) 26-35.
7. Aydın, Z., Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üstyapılarının Genetik Algoritma İle Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
8. Akoğul, C., Prekast Kirişli Betonarme Köprülerin AASHTO'ya göre Depreme Dayanıklı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
9. Caner, A., Erdem, A. ve Bozalioğlu, D., Yüksek Hızlı Tren Köprüleri için Üstyapı Sistemlerinin Değerlendirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım 2007, Antalya, Bildiriler Kitabı, 325 - 336.
10. T.C.K., Köprü Envanter Bilgileri, T.C.K. İstatistiki Yayınlar, Ankara, 2013.
11. Öztürk, H. T., Deprem Bölgelerinde Yapılacak Betonarme Sığ Tünellerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
12. Rao, S. S., Engineering Optimization: Theory and Practice. Wiley, New York, USA, 1996.
13. Yang, X. S., Optimization and Metaheuristic Algorithms in Engineering. Metaheuristic in Water, Geotechnical and Transport, Elsevier, 2013.
14. Rao, R.V., Teaching Learning Based Optimization Algorithm: And Its Engineering Applications, Springer, 2016.
15. Rao, R.V., Savsani, V.J., ve Vakharia, D.P., Teaching-Learning-Based Optimization: a Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems, Computer-Aided Design, 43,3 (2011) 303-315.

16. Dede, T., Application of teaching-learning-based-optimization algorithm for the discrete optimization of truss structures, KSCE Journal of Civil Engineering, 18,6 (2014) 1759-1767.
17. Öztürk H.T., Cost optimum design of spread footing under uniaxial combined bending according to TS500 via various metaheuristic algorithms, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24,6 (2018) 1030-1036.
18. Artar, M., Öğretme-Öğrenme Esaslı Optimizasyon Yöntemi İle Uzay Kafes Kule Yapı Sisteminin Optimum Boyutlandırılması, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 7,3,3 (2016) 471-480.
19. Değertekin, S.Ö., Hayalioğlu, M.S., Kafes Yapıların Öğretme-Öğrenme Esaslı Optimizasyon Yöntemiyle Boyutlandırılması, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, Aralık 2015, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 409 - 418.
20. Kayabekir, A.E., Bekdaş, G., Niğdeli, S.M., Temür, R., Statik ve Dinamik Yükler Altında İstinat Duvarlarının Optimum Tasarımı, NWSA Engineering Sciences, 12,1 (2017) 46-56.
21. Topal, U., Dede, T., Öztürk, H.T., Stacking Sequence Optimization for Maximum Fundamental Frequency of Simply Supported Antisymmetric Laminated Composite Plates using Teaching-Learning-Based Optimization, Ksce Journal Of Civil Engineering, 21 (2017) 2281-2288.
22. Rao, R.V., Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, International Journal of Industrial Engineering Computations, 7 (2016) 19-34.
23. Öztürk, H.T., Dede, T., Payandalı Betonarme İstinat Duvarlarının Jaya Algoritmasıyla Optimum Tasarımı, Uluslararası Katılımlı 7.Geoteknik Sempozyumu, Kasım 2017, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 939 - 950.
24. Dede, T., Jaya Algorithm to Solve Single Objective Size Optimization Problem for Steel Grillage Structures, Steel And Composite Structures, 26,2 (2018) 163-170.
25. Jones, H. L., Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design, Journal of Structural Engineering, 111,11 (1985) 2464-2478.
26. Yu, C. H., Das Gupta, N. C. ve Paul, H., Optimization of Prestressed Concrete Bridge Girders, Engineering Optimization, 10,1 (1986) 13-24.
27. Lounis, Z. ve Cohn, M. Z., Optimization of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Systems, PCI Journal, 38,4 (1993) 60-78.
28. Oktar, B.Ö., Öngerilmeli Beton Kirişlerin Lineer Olmayan Programlamayla Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1995.

29. Lin, K.Y., ve Frangopol, D.M., Reliability-Based Optimum Design of Reinforced Concrete Girders, Structural Safety, 18,2 (1996) 239-258.
30. Çağatay, İ.H., Öngerilmeli Beton Kirişlerin Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1996.
31. Nohutçu, H., Öngerilme Kompozit ve Kompozit Olmayan Köprü ve Viyadük Kirişlerinin Bir Bilgisayar Programı ile Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 1996.
32. Aparicio, A.C., Casas, J.R. ve Ramos G., Computer Aided Design of Prestressed Concrete Highway Bridges, Computers and Structure, 60,6 (1996) 957-969.
33. Cagatay, I.H., Dundar, C. ve Aksogan, O., Optimum Design of Prestressed Concrete Beams by a Modified Grid Search Method, Structural Engineering and Mechanics, 15,1 (2003) 39-52.
34. Wagdy, G., Compressive Design Example for Prestressed Concrete (PSC) Girder Superstructure Bridge with Commentary, Modceski and Masters, Ing, The Federal Highway Administration., Virginia, DTFH61-02-T-63032, 2003.
35. Sirca, G. F. ve Adeli, H., Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges, Journal of Structural Engineering, 131,3 (2005) 380-388.
36. Du, J.S. ve Au, F.T.K., Deterministic and Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of the Chinese Hong Kong and AASHTO LRFD Codes, Structural Safety, 27,3 (2005) 230-245.
37. Aydın, Z., Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üst Yapılarının Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
38. Sarsık, S. T., Öngerilmeli Prefabrike I Kesitli Köprü Kirişlerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
39. Rana, S., Ahsan, R., ve Ghani, S.N., Design Of Prestressed Concrete I-Girder Bridge Superstructure Using Optimization Algorithm, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, Dhaka, Bangladesh, 2010.
40. Hernandez, S., Fontan, A.N., Diaz, J. ve Marcos, D., VTOP. An Improved Software for Design Optimization of Prestressed Concrete Beams, Advances in Engineering Software, 41 (2010) 415-421.
41. Ahsan, R., Rana, S. ve Ghani, S. N., Cost Optimum Design of Posttensioned I Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm, Journal of Structural Engineering ASCE, 138 (2012) 272-283.

42. Aydin, Z. ve Ayvaz, Y., Overall Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridge Using Genetic Algorithm, KSCE Journal of Civil Engineering, 17,4 (2013) 769-776.
43. Quaranta, G., Fiore, A. ve Marano, G. C., Optimum Design of Prestressed Concrete Beams Using Constrained Differential Evolution Algorithm, Structural and Multidisciplinary Optimization, 49,3 (2014) 441-453.
44. Türkeli, E., Kısmen Öngerilmeli Beton Kirişlerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
45. AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications, 7th Ed., Washington, D.C., 2014.
46. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2013.
47. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A416A416M-18>
48. Barker, R.M. ve Puckett, J.A., Design of Highway Bridges An LRFD Approach Third Edition, 2013.
49. Collins, M.P. ve Mitchell, D., Prestressed Concrete Structures (Vol. 9), Englewood Cliffs: NJ: Prentice Hall, 1991.
50. Nawy, E., Reinforced Concrete: A Fundamental Approach, Pearson Education, New York, 2000.
51. Naaman, A. E., Prestressed concrete analysis and design: Fundamentals, McGraw-Hil, New York, 1982.
52. Oska Yazılım, Oska Bilgisayar Sistemleri, Ankara, Türkiye, 2018.
53. MATLAB, The Language of Technical Computing, MathWorks, Massachusetts, ABD, 2013.
54. Wilcoxon, F., Individual Comparisons By Ranking Methods, Biometrics Bulletin, 1 (1945) 80-83.

5. EKLER

Ek 1. AASHTO Kirişlerinin Özellikleri

Kiriş Tipi	Ağırlık (kN/m)	Enkesit Alanı (cm ²)	Kesit Merkezden en alt life uzaklık (cm)	Alan Momenti (cm ⁴)	Sa (cm ³)	Su (cm ³)
TIP I	4.45	1780.6	31.98	946926	29610	24193
TIP II	5.95	2380.6	40.21	2121906	52771	41419
TIP III	9.03	3612.6	51.48	5219125	101382	83094
TIP IV	12.73	5090.3	62.81	10852859	172789	145989
TIP V	16.34	6535.5	81.18	21693149	267223	275154
TIP VI	17.50	7000.0	92.40	30523083	330336	337383
PCI BT 54	10.63	4251.6	70.18	11158207	158994	166491
PCI BT 63	11.50	4600.0	81.58	16342827	200329	208401
PCI BT 72	12.37	4948.4	92.96	22721824	244426	252633

AASHTO TIP 1

AASHTO TIP 2

AASHTO TIP 3

AASHTO TIP 4

AASHTO TIP 5

AASHTO TIP 6

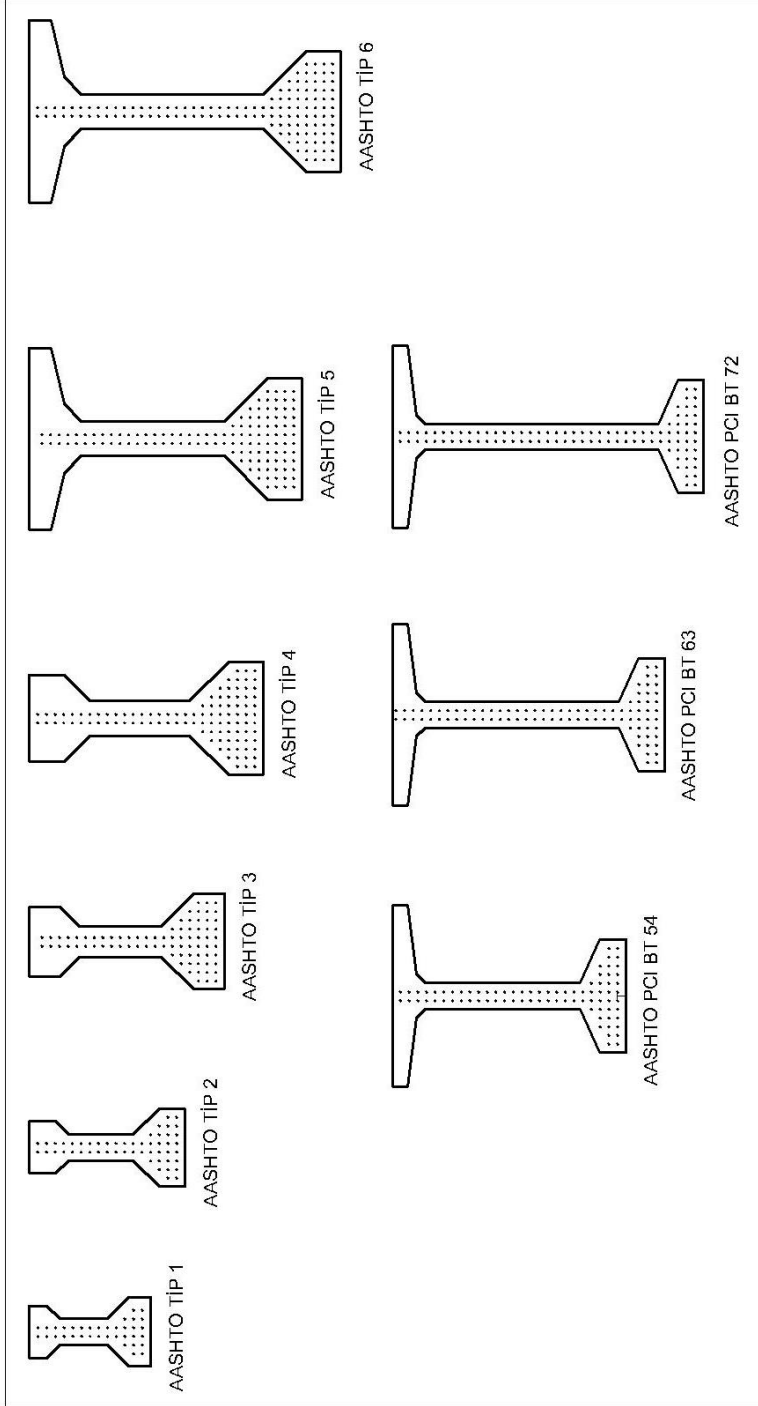
AASHTO PCI BT 54

AASHTO PCI BT 63

AASHTO PCI BT 72

AASHTO ÖNGERİLMELİ KIRIŞ ENKESİT ÖZELLİKLERİ

Ek 2. AASHTO Kirişlerinin Toron Şablonları



ÖZGEÇMİŞ

Şadi AKTEPE 1986 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini 1991-2000 yılları arasında İstanbul'da, lise öğrenimini ise 2000-2003 yılları arasında Rize'de tamamladı. 2004-2010 yılları arasında Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 2012 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'na İnşaat Mühendisi olarak atanan Şadi AKTEPE halen görevini sürdürmektedir. Evli ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

