

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÖNGERİLMELİ BETON KİRİŞLİ KÖPRÜ ÜSTYAPILARININ  
GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMUM TASARIMI**

**İnş. Yük. Müh. Zekeriya AYDIN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor”**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.05.2006**

**Tezin Savunma Tarihi : 22.06.2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU**

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. İsmail H. ALTAŞ**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Antonio L. TRUPIA**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2006**

## ÖNSÖZ

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

Öngörülmesi beton bitişik I-kirişli köprü üstyapılarının genetik algoritma ile optimum tasarımı konusundaki bu çalışma boyunca bana mümkün olduğunca fazla vakit ayırıp, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen ve her konuda anlayış gösteren tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf AYVAZ'a şükran ve saygılarımı sunmaktan mutluluk duyarım.

Tez hazırlanması süresince, tezin değerlendirmesini yapan tez izleme komitesindeki hocalarım Sayın Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU'na ve Sayın Doç. Dr. İsmail H. ALTAŞ'a katkılarından ötürü teşekkür ederim.

Hazırlanan bu tezin savunma sınavına jüri üyesi olarak katılan hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ'a teşekkür etmeyi bir görev sayarım.

Burada, lisans, yüksek lisans ve doktora öğrenimim boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Ayrıca, doktora çalışmamın hemen başında tanıdığım ve bu süre boyunca, hayatımın akışını değiştirecek ölçüde, yardımını ve desteğini her zaman gördüğüm, tezimde jüri üyesi olarak da görev alan, sonsuz saygı ve sevgi duyduğum çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Antonio L. TRUPIA'a şükranlarımı sunar ve minnettar olduğumu belirtirim.

Zekeriya AYDIN  
Trabzon 2006

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Optimum Tasarım .....	1
1.3. Optimum Tasarım Teknikleri .....	3
1.3.1. Matematik Programlama .....	3
1.3.2. Optimumluk Kriteri Yöntemi .....	4
1.3.3. Yapay Zeka Yöntemleri .....	4
1.3.3.1. Genetik Algoritma .....	5
1.3.3.1.1. Genetik Algoritmanın İşleyişi .....	6
1.3.3.1.2. Genetik Algoritmanın Üstünlük ve Sakıncaları .....	6
1.3.3.1.3. Basit Genetik Algoritma .....	7
1.3.3.1.4. Geliştirilmiş Genetik Algoritmalar .....	9
1.3.3.2. Yapay Sinir Ağları .....	11
1.3.3.3. Bulanık Mantık .....	13
1.4. Öngerilmeli Beton Hakkında Hatırlatmalar .....	14
1.4.1. Önçekim .....	16
1.4.2. Ardçekim .....	17
1.4.3. Kimyasal Öngerilme .....	18
1.5. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprüler .....	18
1.6. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprülerin Şekil ve Topoloji Optimizasyonu .....	21
1.7. Çalışmanın amacı ve Kapsamı .....	24

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME .....	26
2.1.	Önçekim Öngerilmeli Beton Bitişik I Kirişli Köprü Üstyapısının Tasarımı .....	26
2.1.1.	Yapının Tanımlanması .....	27
2.1.2.	Yükler .....	27
2.1.2.1.	Sabit Yükler ve Kirişlere Dağılımı .....	29
2.1.2.2.	Hareketli Yükler .....	29
2.1.2.3.	Dinamik Etki .....	32
2.1.2.4.	Hareketli Yüklerin Kirişlere Dağılımı .....	33
2.1.2.5.	Hareketli Yüklerin Azaltılması .....	33
2.1.3.	Malzeme .....	34
2.1.4.	Kiriş Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi .....	35
2.1.5.	Kirişte Oluşan İç Kuvvetlerin Hesaplanması .....	35
2.1.6.	Öngerilme Kayıplarının Hesabı .....	36
2.1.6.1.	Büzülme Kaybı .....	36
2.1.6.2.	Elastik Kısalma Kaybı .....	36
2.1.6.3.	Sünme Kaybı .....	37
2.1.6.4.	Öngerilme Donatısı Gevşeme Kaybı .....	38
2.1.7.	Eğilme Durumu Emniyet Gerilmesi Denetimleri .....	38
2.1.7.1.	Eğilme Gerilmelerinin Hesabı .....	39
2.1.7.2.	Eğilme Elemanlarında Emniyet Gerilmeleri .....	41
2.1.7.2.1.	Aktarma Sırasında Beton Emniyet Gerilmeleri .....	41
2.1.7.2.2.	Kullanım Yükleri İçin Beton Emniyet Gerilmeleri .....	41
2.1.7.2.3.	Öngerilme Çeliğinde Emniyet Gerilmeleri .....	42
2.1.8.	Eğilme Durumu Taşıma Gücü Denetimleri .....	42
2.1.8.1.	Dikdörtgen Kesitlerin veya Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalan ( $a \leq t$ ) Tablalı Kesitlerin Taşıma gücü Momenti .....	43
2.1.8.2.	Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalmayan ( $a > t$ ) Tablalı Kesitlerin Taşıma gücü Momenti .....	44
2.1.8.3.	Eğilme Taşıma Gücü Çelik Gerilmesi .....	45
2.1.9.	Süneklik Sınırları .....	45
2.1.9.1.	Maksimum Öngerilme Donatısı Oranı .....	45
2.1.9.2.	Minimum Öngerilme Donatısı Oranı .....	46
2.1.10.	Kayma Emniyet Gerilmelerine Göre Hesap .....	47

2.1.11.	Kesme Taşıma Gücü Hesabı .....	47
2.1.11.1.	Betonun Kesme Taşıma Gücü .....	48
2.1.11.2.	Kesme Donatısının Taşıma Gücü .....	49
2.1.12.	Taşıma Gücü Yöntemi İçin Yük Katsayıları ve Dayanım Kapasitesi Azaltma Faktörleri .....	50
2.1.13.	Sehim Denetimi .....	50
2.2.	Optimum Tasarım Probleminin Tanımlanması .....	53
2.2.1.	Topoloji ve Enkesit Optimum Tasarımı .....	54
2.2.2.	Amaç Fonksiyonu .....	54
2.2.3.	Tasarım Değişkenleri .....	55
2.2.4.	Tasarım Parametreleri .....	56
2.2.5.	Sınırlayıcı Fonksiyonlar .....	58
2.2.5.1.	Eğilme Durumu Emniyet Gerilmeleri Sınırlayıcıları .....	58
2.2.5.2.	Eğilme Durumu Taşıma Gücü Sınırlayıcıları .....	59
2.2.5.2.1.	Kompozit Kesit .....	59
2.2.5.2.2.	Prefabrike Kesit .....	60
2.2.5.3.	Kayma Gerilmesi Sınırlayıcıları .....	60
2.2.5.4.	Kesme Taşıma Gücü Sınırlayıcısı .....	61
2.2.5.5.	Sehim Sınırlayıcıları .....	61
2.2.5.6.	Maksimum Donatı Oranı Sınırlayıcıları .....	62
2.2.5.7.	Minimum Donatı Oranı Sınırlayıcıları .....	62
2.2.5.8.	Üst Başlık Kalınlığına İlişkin Sınırlayıcı .....	63
2.2.5.9.	Geometri Sınırlayıcıları .....	63
2.3.	Genetik Algoritma ile Optimum Tasarım Probleminin Çözümlemesi .....	64
2.3.1.	Ceza Fonksiyonu ve Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu .....	65
2.3.2.	Çözümlerin Kodlanması ve Kodların Çözümü .....	66
2.3.3.	Tasarım Değişkeni Değer kümelerinin ve Başlangıç Neslinin Belirlenmesi .....	68
2.3.4.	Çözümlerin Uyum Derecelerinin Belirlenmesi .....	69
2.3.5.	Genetik Operatörlerin Uygulanması .....	70
2.3.5.1.	Kopyalama Operatörü .....	70
2.3.5.2.	Çaprazlama Operatörü .....	71
2.3.5.2.1.	Tek Noktalı Çaprazlama .....	72
2.3.5.2.2.	İki Noktalı Çaprazlama .....	72

2.3.5.2.3. Maskeli Çaprazlama .....	73
2.3.5.3. Mutasyon Operatörü .....	74
2.3.5.3.1. Standart Mutasyon .....	74
2.3.5.3.2. Kontrollü Mutasyon .....	75
2.3.5.3.3. Melez Mutasyon .....	76
2.3.6. Optimum Çözümün Belirlenmesi .....	77
2.3.7. Genetik Algoritmanın Akış Diyagramı .....	78
2.4. Uygulamalar .....	79
2.4.1. Uygulama-1 (Edirnekapı Kavşak Köprüleri, Köprü-4) .....	79
2.4.1.1. Birinci Tasarım .....	79
2.4.1.1.1. Tasarım Parametreleri ve Tasarım Değişkenleri .....	79
2.4.1.1.2. Başlangıç Nesli Birinci Çözüm Dizisine ait Boyutlandırma Detayları .....	82
2.4.1.1.3. Başlangıç Nesli Birinci Çözüm Dizisine ait Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu Değerinin Hesaplanması .....	86
2.4.1.1.4. Genetik Algoritmanın İşleyişi .....	88
2.4.1.1.5. Genetik Algoritmanın Yakınsama Performansı .....	93
2.4.1.2. İkinci Tasarım .....	99
2.4.1.3. Üçüncü Tasarım .....	100
2.4.1.4. Dördüncü Tasarım .....	105
2.4.1.5. Beşinci Tasarım .....	107
2.4.1.6. Altıncı Tasarım .....	108
2.4.2. Uygulama-2 (O-1 Otoyolu Km:17+088 Üstgeçit Köprüsü) .....	109
2.4.2.1. Birinci Tasarım .....	112
2.4.2.2. İkinci Tasarım .....	116
2.4.3. Uygulama-3 (Dinar Köprüsü) .....	119
2.4.3.1. Birinci Tasarım .....	119
2.4.3.2. İkinci Tasarım .....	124
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	127
4. KAYNAKLAR .....	130
ÖZGEÇMİŞ .....	137

## ÖZET

Bu çalışmada, genetik algoritma kullanılarak, prefabrike önçekim önerilmeli beton bitişik I-kirişli, kısa ve orta açıklıklı köprü üstyapılarının maliyet yönünden optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir. Çalışma topoloji ve şekil optimizasyonunu içermektedir. Tasarım değişkeni olarak köprü enkesitindeki kiriş sayısı, kiriş enkesit boyutları ve kiriş enkesitinde yer alan önerilme donatısı miktarı alınmaktadır. Çalışmada eğilme emniyet gerilmeleri ve taşıma gücü, kayma emniyet gerilmeleri ve keme taşıma gücü, sehim, süneklik sınırları ve geometri sınırlayıcıları dikkate alınmaktadır. Sınırlayıcılar AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges uyarınca hesaplanmaktadır.

Optimizasyon yöntemi olarak, karmaşık problemlere kolaylıkla uygulanabilen ve ayrık tasarım değişkenlerini kullanan, rasgele seçilmiş bir grup başlangıç çözümünden yola çıkarak sonuca giden evrimsel bir optimum tasarım yöntemi olan genetik algoritma kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki genetik algoritma kopyalama operatörünün yanısıra, üç farklı çaprazlama ve üç farklı mutasyon operatörünü içermektedir.

Yapılan çalışmanın birinci bölümünde optimum tasarım çeşitleri ve teknikleri, önerilmeli beton, önerilmeli beton kirişli köprüler, çalışmanın amacı ve kapsamı hakkında genel bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde önçekim önerilmeli beton bitişik I-kirişli köprü üstyapısı tasarımının nasıl yapılacağı, optimum tasarım probleminin belirlenmesi, bu problemin genetik algoritma ile nasıl çözümleneceği açıklanmaktadır. Ayrıca yine bu bölümde geliştirilen bilgisayar programı ile optimum tasarımı yapılan üç farklı sayısal uygulamaya yer verilmekte ve bu uygulamaların çözümü ile ulaşılan bulgular irdelenmektedir. Üçüncü bölümde ise elde edilen sonuçlara ve bu konuda bundan sonra yapılacak çalışmalar için önerilere yer verilmekte olup bu son bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

Yapılan bu çalışma ile, önçekim önerilmeli bitişik I-kirişli köprü üstyapılarının şekil ve topolojik optimum tasarımında genetik algoritmadan etkili bir şekilde yararlanılabileceği ortaya konulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Önerilmeli Beton, Köprü Üstyapısı, Genetik Algoritma, Topoloji ve Şekil Optimizasyonu, Optimum Tasarım

## SUMMARY

### **Optimum Design of Prestressed Concrete Bridge Girders using Genetic Algorithm**

In this study, cost optimization of short- and medium-span bridge superstructures consisting of precast, pretensioned prestressed concrete adjacent I-shaped beams is realized. The study includes topological and shape optimization. Design variables are the number of beams on bridge cross section, dimensions of beam cross section and amount of the prestressing steel. Flexible working stress and ultimate strength, shear working stress and ultimate strength, deflection, ductility limits and geometry constraints are considered in this study. Constraints are calculated according to AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges.

Genetic algorithm is used in this study. Genetic algorithm can be adopted for complex problems easily. It uses discrete design variables and randomly selected initial solutions for evolutionary optimization. In this study, three different kinds of crossover, three different kinds of mutation and reproduction operators are considered.

In the first chapter of the study, general information is given about kinds and techniques of optimum design, prestressed concrete, prestressed concrete bridges, purpose and scope of the study. In the second chapter, designing of pretensioned prestressed concrete adjacent I-shaped bridge girders, expressing of optimum design problem, solving of this problem with genetic algorithm are explained. In addition, three numerical examples are designed with the developed program and the results of these designs are evaluated in this chapter. In the third chapter, conclusions of this study and suggestions for the future studies are given. This chapter is followed by a list of references.

In this study, it is demonstrated that genetic algorithm can be efficiently used in shape and topological optimum design of pretensioned prestressed concrete adjacent I-shaped bridge girders.

**Key Words:** Prestressed Concrete, Bridge Superstructure, Genetic Algorithm, Topological and Shape Optimization, Optimum Design



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tipik sinir ağı mimarisi .....	12
Şekil 2. Öngerilmeli basit kiriş açıklık ortasında gerilme dağılımı .....	16
Şekil 3. Önçekim öngerilmeli bitişik I kirişli köprü üstyapısı enkesiti .....	28
Şekil 4. Önçekim öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti .....	28
Şekil 5. H <sub>30</sub> -S <sub>24</sub> kamyon yüklemesinin basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için (b) kesme kuvveti için en elverişsiz yerleşimi .....	31
Şekil 6. H <sub>30</sub> -S <sub>24</sub> şerit yüklemesinin basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için (b) kesme kuvveti için en elverişsiz yerleşimi .....	32
Şekil 7. H <sub>30</sub> -S <sub>24</sub> kamyon yüklemesi maksimum sehim yerleşimi .....	53
Şekil 8. Optimum tasarım problemine ait bir çözüm dizisi .....	67
Şekil 9. Tek noktalı çaprazlama işlemi .....	72
Şekil 10. İki noktalı çaprazlama işlemi .....	73
Şekil 11. Maskeli çaprazlama işlemi .....	73
Şekil 12. Uygulama-1'in uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti .....	80
Şekil 13. Uygulama-1'in uygulama projesine ait öngerilmeli kiriş enkesiti .....	80
Şekil 14. Uygulama-1'in birinci tasarımı için 1 nolu çözüm dizisi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi .....	96
Şekil 15. Uygulama-1'in birinci tasarımı için cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerlerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi .....	97
Şekil 16. Uygulama-1'in birinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	98
Şekil 17. Uygulama-1'in birinci tasarımına ait öngerilmeli kiriş enkesiti .....	98
Şekil 18. Uygulama-1'in ikinci tasarımı için cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerlerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi .....	101
Şekil 19. Uygulama-1'in ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	102
Şekil 20. Uygulama-1'in ikinci tasarımına ait öngerilmeli kiriş enkesiti .....	102
Şekil 21. Uygulama-1'in üçüncü tasarımı için optimum çözüm cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin çözüm dizisi sayısına bağlı olarak değişimi .....	104
Şekil 22. Uygulama-2'nin uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti .....	111
Şekil 23. Uygulama-2'nin uygulama projesine ait öngerilmeli kiriş enkesiti .....	111
Şekil 24. Uygulama-2'nin birinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	115

Şekil 25. Uygulama-2'nin birinci tasarımına ait önerilmeli giriş enkesiti .....	115
Şekil 26. Uygulama-2'nin ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	118
Şekil 27. Uygulama-2'nin ikinci tasarımına ait önerilmeli giriş enkesiti .....	118
Şekil 28. Uygulama-3'ün uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti .....	120
Şekil 29. Uygulama-3'ün uygulama projesine ait önerilmeli giriş enkesiti .....	120
Şekil 30. Uygulama-3'ün birinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	123
Şekil 31. Uygulama-3'ün birinci tasarımına ait önerilmeli giriş enkesiti .....	123
Şekil 32. Uygulama-3'ün ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti .....	126
Şekil 33. Uygulama-3'ün ikinci tasarımına ait önerilmeli giriş enkesiti .....	126

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Standart kamyon ve eşdeğer şerit yükleri .....	30
Tablo 2. Yol genişliğine bağlı olarak trafik şeridi adedi .....	31
Tablo 3. Tasarım değişkeni değerinin kodlanması .....	67
Tablo 4. Beş bireyli bir çözüm kümesinde kopyalama işlemi .....	71
Tablo 5. Standart mutasyon operatörünün nesle uygulanışı .....	75
Tablo 6. Melez mutasyon operatörünün nesle uygulanışı .....	76
Tablo 7. Genetik algortmada kopyalama, çaprazlama ve mutasyon işlemi .....	77
Tablo 8. Uygulama-1'in birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	82
Tablo 9. Uygulama-1'in birinci tasarım başlangıç nesli 1. çözüm dizisi sınırlayıcı fonksiyonu ve ihlal edilme katsayıları .....	87
Tablo 10. Uygulama-1'in birinci tasarım 1. iterasyon genetik algortma işleyiş detayları .....	89
Tablo 11. Uygulama-1'in birinci tasarım 2. iterasyon genetik algortma işleyiş detayları .....	91
Tablo 12. Uygulama-1'in birinci tasarım sonuç (168. iterasyon) nesli .....	94
Tablo 13. Uygulama-1'in birinci tasarım sonucu ile uygulama projesinin karşılaştırılması .....	95
Tablo 14. Uygulama-1'in ikinci tasarımı ile birinci tasarım sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması .....	100
Tablo 15. Uygulama-1'in üçüncü tasarım için kullanılan başlangıç nesillerine ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri .....	103
Tablo 16. Uygulama-1'in üçüncü tasarımındaki sekiz farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması .....	103
Tablo 17. Uygulama-1'in dördüncü tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	105
Tablo 18. Uygulama-1'in dördüncü tasarım ve ikinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması .....	107
Tablo 19. Uygulama-1'in beşinci tasarımındaki üç farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması .....	107
Tablo 20. Uygulama-1'in altıncı tasarımındaki dört farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması .....	108
Tablo 21. Uygulama-1'in 15 farklı çözümüne ait optimum tasarım parametreleri ve optimum çözüme ait sonuçlar .....	110

Tablo 22. Uygulama-2'nin birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	113
Tablo 23. Uygulama-2'nin birinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması .....	114
Tablo 24. Uygulama-2'nin ikinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	116
Tablo 25. Uygulama-2'nin ikinci tasarımı ile birinci tasarımı sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması .....	117
Tablo 26. Uygulama-3'ün birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	121
Tablo 27. Uygulama-3'ün birinci tasarım sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması .....	123
Tablo 28. Uygulama-3'ün ikinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri .....	124
Tablo 29. Uygulama-3'ün ikinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması .....	125

## SEMBOLLER DİZİNİ

- a : Eşdeğer dikdörtgen basınç bölgesi derinliği
- $A_g$  : Öngerilmeli kiriş brüt enkesit alanı
- $A_i$  : İdeal prefabrike kesit alanı
- $A_{ps}$  : Öngerilme donatısı alanı
- $A_{sf}$  : Tablalı kesit başlığının gövde bölümü dışında kalan kısımlarının basınç dayanımına karşılık gelen öngerilme donatısı miktarının alanı
- $A_{sr}$  : Tablalı kesitin gövde bölümünün basınç dayanımına karşılık gelen öngerilme donatısı miktarının alanı
- $A_v$  : Kesme donatısı alanı
- b : Tablalı kesitlerde tabla genişliği
- $b_b$  : Öngerilmeli kiriş alt başlık genişliği
- $b_t$  : Öngerilmeli kiriş üst başlık genişliği
- $b_w$  : Kesit gövde genişliği
- C : Hareketli yüklerin kirişlere dağılımında kullanılan rijitlik parametresi, köprü üst yapısı optimum tasarım probleminin amaç fonksiyonu
- $C_{pc}$  : Prefabrike betonun maliyeti
- $C_{ps}$  : Öngerilme donatısının maliyeti
- $CR_c$  : Betonun sünmesinden dolayı oluşan öngerilme kaybı
- $CR_s$  : Öngerilme çeliğinin gevşemesinden kaynaklanan öngerilme kaybı
- d : Basınç gerilmesinin maksimum olduğu noktadan öngerilme kuvveti ağırlık merkezine olan mesafe (faydalı yükseklik)
- D : Hareketli yüklerin kirişlere dağılımının belirlenmesinde kullanılan parametre, sabit yükler
- $d_{ps}$  : Öngerilme donatısı anma çapı
- $d'_{ps}$  : Öngerilme donatısı hesap çapı
- $E_c$  : Prefabrike kiriş betonunun 28 günlük elastisite modülü
- $E_{ce}$  : Betonun sünme etkisi ile azalan elastisite modülü
- $e_{ci}$  : İdeal kompozit kesit öngerilme çeliği dışmerkezliği
- $E_{cs}$  : Tabliye betonu elastisite modülü

$e_i$	:	İdeal prefabrike kesit öngerilme çeliği dışmerkeziliği
$ES$	:	Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan öngerilme kaybı
$E_s$	:	Öngerilme çeliği elastisite modülü
$f$	:	Nihai sehim miktarı
$F$	:	Kiriş üst başlıkları ara mesafesi
$f_{su}^*$	:	Öngerilme donatısı azaltılmış hesap dayanımı
$f_1$	:	1. denetim için sehim miktarı
$f_2$	:	2. denetim için sehim miktarı
$f_3$	:	3. denetim için sehim miktarı
$f_4$	:	4. denetim için sehim miktarı
$f_{4,1}$	:	4. denetim şerit yüklemesi için sehim miktarı
$f_{4,2}$	:	4. denetim kamyon yüklemesi için sehim miktarı
$f'_c$	:	Beton karakteristik basınç dayanımı
$F_{c,i}$	:	Her bir bireyim uyum faktörü
$f_{cds}$	:	Öngerilme kuvvetinin uygulandığı andaki sabit yüklerin dışındaki tüm sabit yüklerden dolayı öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesi
$f'_{ci}$	:	Aktarma anında beton karakteristik basınç dayanımı
$f_{cir}$	:	Aktarımdan hemen sonra sabit yük ve öngerilme kuvveti nedeniyle öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesi
$f_{cs}$	:	Tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı
$f_d$	:	Sabit yükler nedeniyle kesit alt ucunda oluşan çekme gerilmesi
$F_i$	:	İlk öngerme kuvveti (öngerilme kaybı hesabı), çözümlerin uyum derecesi
$F_{ort}$	:	Çözümler kümesindeki çözümlerin uyum derecelerinin ortalama değeri
$f_{pc}$	:	Kompozit brüt kesit ağırlık merkezinde tüm kayıpların oluşumundan sonra dış yükler nedeniyle oluşan beton basınç gerilmesi
$f_{pe}$	:	Tüm öngerilme kayıpları düşüldükten sonra kesit alt ucunda sadece öngerme kuvveti nedeniyle oluşan gerilme değeri
$f_{pi}$	:	Öngerilme donatısında çekme anındaki gerilme
$f_r$	:	Kesit çatlama modülü
$f_s'$	:	Öngerilme donatısı karakteristik kopma dayanımı
$f_{sy}$	:	Enine donatı karakteristik dayanımı
$f_y^*$	:	Öngerilme donatısı akma dayanımı

- $G_1$  : Öngerilmeli kiriş öz ağırlığından kaynaklanan yük  
 $G_2$  : Tabliye öz ağırlığından kaynaklanan yük  
 $G_3$  : Diğer sabit ağırlıklardan kaynaklanan yük  
 $g_i$  :  $i$  inci sınırlayıcı fonksiyon  
 $h$  : Kompozit kesit yüksekliği  
 $h_b$  : Öngerilmeli kiriş yüksekliği  
 $I$  : İlgili yükleme aşamasında çalışan kesitin atalet momenti, hareketli yük dinamik etkisi  
 $I_{ci}$  : İdeal kompozit kesit atalet momenti  
 $I_i$  : İdeal prefabrike kesit atalet momenti  
 $K$  : Hareketli yüklerin kirişlere dağılımında kullanılan köprü ve kiriş tipine bağlı katsayı, ceza fonksiyonunu çarpanı  
 $k_c$  : 0,1 MPa'lık gerilmede betonun sünme miktarı  
 $L$  : Hareketli yük, öngerilmeli kiriş hesap açıklığı  
 $M_{cr}^*$  : Kesit çatlama momenti  
 $M_{cr}$  : Dış yükler nedeniyle oluşan çatlama momenti  
 $M_{g1}$  : Kiriş öz ağırlığından dolayı oluşan moment  
 $M_{g2}$  : Kiriş ve tabliye ağırlığından dolayı oluşan moment  
 $M_{g3}$  : Kiriş ve tabliye ağırlığı dışındaki tüm sabit yüklerden dolayı oluşan moment  
 $M_h$  : Hareketli yüklerden dolayı oluşan maksimum moment  
 $M_{max}$  : Yük katsayılarıyla çarpılmış dış yükler nedeniyle oluşan maksimum hesap momenti  
 $N$  : Hesap yük değeri  
 $n_b$  : Köprü kesitinde kullanılan öngerilmeli kiriş sayısı  
 $N_L$  : Trafik şeridi sayısı  
 $n_{ps}$  : Her bir öngerilmeli kiriş kesitinde kullanılan öngerilme donatısı adedi  
 $P$  : Kesitteki toplam öngerilme kuvveti, ceza fonksiyonu, şerit yüklemesinde tekil yük  
 $p_b$  : Öngerilmeli kiriş alt guse yüksekliği  
 $p_i$  : Her bir sınırlayıcının ihlal edilme katsayısı  
 $p_t$  : Öngerilmeli kiriş üst guse yüksekliği  
 $q$  : Şerit yüklemesinde yayılı yük  
 $RH$  : Yıllık ortalama bağıl nem oranı

$S$	: Kiriş aks aralığı
$s$	: Enine donatı aralığı
$S_{ci}$	: İdeal kompozit kesit statik momenti
$SH$	: Büzülmeden dolayı oluşan öngerilme kaybı
$S_i$	: İdeal prefabrike kesit statik momenti
$t$	: Tablalı kesitlerde tabla kalınlığı
$t_b$	: Öngerilmeli kiriş alt başlık kalınlığı
$t_{b,min}$	: Alt başlık minimum kalınlığı
$t_t$	: Öngerilmeli kiriş üst başlık kalınlığı
$UC_{pc}$	: Prefabrike kiriş betonu birim fiyatı
$UC_{ps}$	: Öngerilme donatısının birim fiyatı
$V$	: İlgili yükleme aşamasına göre hesaplanan maksimum kesme kuvveti
$V_c$	: Beton kesme dayanımı
$V_{ci}$	: Kesme kuvveti ve momentin birleşimi sonucu eğik çatlakların oluştuğu andaki beton kesme dayanımı
$V_{cw}$	: Gövdedeki asal çekme gerilmelerinin aşırı düzeye çıkması nedeniyle eğik çatlakların oluştuğu andaki beton kesme dayanımı
$V_d$	: Sabit yüklerden dolayı oluşan ve yük katsayıları ile çarpılmamış kesme kuvveti
$V_{g2}$	: Kiriş ve tabliye ağırlığından dolayı oluşan kesme kuvveti
$V_{g3}$	: Kiriş ve tabliye ağırlığı dışındaki tüm sabit yüklerden dolayı oluşan kesme kuvveti
$V_h$	: Hareketli yüklerden dolayı oluşan maksimum kesme kuvveti
$V_i$	: Yük katsayılarıyla çarpılmış dış yükler nedeniyle oluşan maksimum tasarım kesme kuvveti
$V_p$	: Öngerme kuvvetinin düşey bileşeni
$V_s$	: Kesme donatısı tarafından sağlanan itibari kesme dayanımı
$V_u$	: Hesap kesme kuvveti
$W$	: Köprü üstyapısı toplam genişliği
$W_{bci}$	: İdeal kompozit kesit kiriş alt kenarı için mukavemet momenti
$W_{bi}$	: İdeal prefabrike kesit kiriş alt kenarı için mukavemet momenti
$W_{tci}$	: İdeal kompozit kesit kiriş üst kenarı için mukavemet momenti
$W_{ti}$	: İdeal prefabrike kesit kiriş üst kenarı için mukavemet momenti
$W_{tsci}$	: İdeal kompozit kesit tabliye üst kenarı için mukavemet momenti



$Y_t$	:	Kompozit brüt kesit ağırlık merkezinin kesit alt ucuna olan mesafesi
$\beta_1$	:	Beton kalitesine bağlı katsayı
$\beta_D$	:	Sabit yük katsayısı
$\beta_L$	:	Hareketli yük katsayısı
$\gamma$	:	Yük faktörü
$\gamma^*$	:	Öngerilme donatısının türüne bağlı katsayı
$\Delta_{fs}$	:	Toplam öngerilme kaybı
$\eta_1$	:	Minimum düzeydeki öngerilme kaybı oranı
$\eta_2$	:	Maksimum düzeydeki öngerilme kaybı oranı
$\rho_p$	:	Öngerilme donatısı oranı
$\sigma_{b1}$	:	1. denetim için prefabrike kesit alt ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{b2}$	:	2. denetim için prefabrike kesit alt ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{b3}$	:	3. denetim için prefabrike kesit alt ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{b4}$	:	4. denetim için prefabrike kesit alt ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\bar{\sigma}_{cf}$	:	Prefabrike kiriş betonuna ait kullanım yükleri için basınç emniyet gerilmesi
$\bar{\sigma}_{ci}$	:	Prefabrike kiriş betonu için aktarma sırasında basınç emniyet gerilmesi
$\sigma_{t1}$	:	1. denetim için prefabrike kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{t2}$	:	2. denetim için prefabrike kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{t3}$	:	3. denetim için prefabrike kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{t4}$	:	4. denetim için prefabrike kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\bar{\sigma}_{tf}$	:	Prefabrike kiriş betonuna ait kullanım yükleri için çekme emniyet gerilmesi
$\bar{\sigma}_{ti}$	:	Prefabrike kiriş betonu için aktarma sırasında çekme emniyet gerilmesi
$\bar{\sigma}_{cs}$	:	Tabliye betonu basınç emniyet gerilmesi
$\sigma_{ts3}$	:	3. denetim için kompozit kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\sigma_{ts4}$	:	4. denetim için kompozit kesit üst ucunda eğilme nedeniyle oluşan gerilme
$\tau_f$	:	Kullanım yükleri altında kesitteki maksimum kayma gerilmesi
$\bar{\tau}_f$	:	Kullanım yükleri için kayma emniyet gerilmesi
$\tau_i$	:	Aktarma anında kesitteki maksimum kayma gerilmesi
$\bar{\tau}_i$	:	Aktarma anı için kayma emniyet gerilmesi
$\Phi$	:	Cezalandırılmış amaç fonksiyonu
$\varphi$	:	Dinamik etki katsayısı

- $\psi_c$  : Tablalı kompozit kesit için öngerilme donatısı oranı göstergesi  
 $\psi_p$  : Prefabrike kesit için öngerilme donatısı oranı göstergesi  
 $\phi$  : Dayanım kapasitesi azaltma çarpanı

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

Yapıların optimum tasarımında amaç, yeterli düzeyde emniyete sahip yapıyı en ekonomik olacak şekilde tasarlamaktır. Ancak yapının sağlam olması malzemenin fazla kullanılmasını, yapının ekonomik olması da malzemenin az kullanılmasını gerektirmektedir. Bir yapı tasarlanırken emniyetten hiçbir şekilde taviz verilemeyeceği açıktır. Bu nedenle belli bir emniyete sahip olan yapıyı mümkün olan en az malzemeyi kullanmak suretiyle tasarlamak amaç edinilmektedir. Öte yandan, bu amaç doğrultusunda projelendirilen yapıların ise, etkiyen yükler altındaki davranışının kabul edilebilir sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Böylece, etkiyen yüklere emniyetle, belirli rijitlikle dayanabilen ve ağırlığı minimum olan yapının belirlenmesi, optimum tasarım problemini oluşturmaktadır.

### **1.2. Optimum Tasarım**

Mühendislik kapsamında optimum tasarım, fiziksel modellerin matematiksel problemler olarak ifadesine en iyi çözümü belirleme işlemi olarak tanımlanır. Optimizasyon alanı içerisinde, optimizasyon için kullanılan ve kullanılacak tekniklerin çeşitli problemler için çözüm algoritmalarının oluşturulması, bu tekniklerin yapısal olarak irdelenmesi ve bilgisayar ortamında derlenmesi yer almaktadır. Mühendislik optimizasyonunda karşılaşılan yaygın problemler; yapıların statik ve dinamik davranışlarına göre optimum boyutlandırılması, mekanik ve yapısal sistemlerin optimum şekil ve geometrik tasarımı ve güvenilirlik bazında planlanan sistemlerin optimum kontrolü olarak sıralanabilir.

Yapı optimizasyonu 1960'lı yıllardan günümüze kadar gelişmekte olan bir araştırma konusudur. Ancak yapıların tasarımlarında optimizasyon teknikleri yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır. Bugün varılan nokta, bir yapı optimizasyonu teorisinin ortaya çıkmış olması ve elde edilen sonuçların uygulayıcıların hizmetine sunulmasıdır. Bilgisayar kullanımının gelişip etkinleşmesinin yanısıra çok yeni optimizasyon tekniklerinin de

kullanılmaya başlanması, teoriden uygulamaya geçişi kolaylaştırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bütün bu gelişmelere rağmen yine de optimum tasarım teknikleri uygulamada etkin bir şekilde kullanılamamaktadır.

Herhangi bir optimum tasarım problemi üç nesnenin tanımlanması ile belirlir. Bunlar amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılarıdır. Amaç fonksiyonu problemin tipine ve ihtiyaçlara göre kurulur. Tasarım değişkenleri, optimum çözüme ulaşmak için optimizasyon işlemi boyunca değiştirilen sistem parametreleridir. Sınırlayıcılar ise tasarım ve optimizasyon probleminde istenmeyen çözümlerin oluşmasını engellemek amacıyla kullanılırlar. Optimizasyon probleminde en iyi sonuca en kısa zamanda ulaşabilmek açısından, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların belirlenmesi ve tasarım değişkenlerinin seçimi son derece önemlidir.

Literatürde bir çok farklı yapının optimum tasarımına ilişkin 1960'lerden günümüze kadar yayımlanmış pek çok yayın bulunmaktadır. Optimum tasarımın bazı farklı yapı ve yapı elemanlarına uygulanışına örnek vermek için konuyla ilgili birkaç çalışmaya aşağıda değinilmiştir.

Friel (1974) ACI şartnamesine göre maksimum moment sınırlayıcısını dikkate alarak, basit mesnetli betonarme kirişlerde maliyeti minimuma indirecek optimum çelik-beton oranını bulmaya çalışmıştır. Brown (1975) ACI şartnamesine göre eğilme sınırlayıcılarını dikkate alarak, tek doğrultuda çalışan basit mesnetli döşemelerin, maliyetini minimuma indirecek, kalınlıklarının belirlenmesi için bir yöntem sunmuşlardır. Kirsch (1983) beton ve betonarme çeliğinin toplam maliyetini minimuma indirmek üzere, dikdörtgen enkesitli çok açıklıklı, sürekli betonarme kirişlerin optimum tasarımını yapmıştır. Zielinski v.d. (1995) dikdörtgen kesitli betonarme kolonların maliyet optimizasyonunu sunmuşlardır. Kocer ve Arora (1996) öngerilmeli beton enerji nakil direklerinin maliyet optimizasyonunu yapmışlardır. Simoes ve Negro (1994) asma köprülerin boyut ve geometri optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Moharrami ve Grierson (1993) yatay ve düşey yükler altında betonarme bina çerçevelerinin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tan v.d. (1993) betonarme silindirik su tanklarının maliyet optimizasyonunu çalışmışlardır. Lakshmy ve Bhavikatti (1995) katlanmış plak çatı döşemelerinin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Heinloo ve Kaliszky (1981) iç basınca maruz kalın cidarlı betonarme boruları minimum malzeme maliyeti olacak şekilde tasarlamışlardır. Saka (1980) tarafından yapılan çalışmada kafes sistemlerin şekil optimizasyonu yapılmıştır.

### 1.3. Optimum Tasarım Teknikleri

Yapı mühendisi için, problemini optimum tasarım problemi olarak ifade etmesi yanında, çözümünde kullanacağı tekniğin seçimi de önem taşımaktadır. Genel olarak, yapı mühendisliği tasarımlarında kullanılan optimum tasarım teknikleri üç farklı yaklaşım içinde kategorize edilebilirler. Bunlar: matematik programlama, optimumluk kriteri metodu ve yapay zekaya dayalı arama metodlarıdır. Bunların içinde, son yıllarda bilgisayarların da gelişmesine bağlı olarak, yapay zekaya dayalı yöntemlerin popülerliği gittikçe artmaktadır. Özellikle yapay zeka tekniklerinin kullanımı ile geliştirilen heuristikler yardımıyla, problemin matematiksel bir ifadesinin olup olmamasına bakılmaksızın her türlü problem rahatlıkla bilgisayar ortamında çözülebilmektedir.

#### 1.3.1. Matematik Programlama

Matematiksel olarak optimizasyon problemi, değişkenlere bağlı olarak değer alan amaç fonksiyonun belli sınırlayıcılar kullanılarak minimum değerinin aranması olarak tanımlanmaktadır. Sınırlayıcılar, problemde değişkenlere bağlı olarak hesaplanan bir takım fonksiyonlar olup, ulaşılan optimum çözümün geçerli olabilmesi için bu fonksiyonların aldığı değerlerin de belli sınırlar içerisinde kalmasını sağlarlar.

Matematik programlama kendi içinde, lineer programlama ve lineer olmayan programlama olarak iki gruba ayrılmaktadır. Aşağıda bunlar hakkında kısa bilgi verilmektedir.

Lineer programlamanın en önemli özelliği, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların, tasarım değişkenlerinin lineer bir kombinasyonu olarak ifade edilmesidir. Lineer programlama tekniklerinin yapısal optimizasyon problemlerine uygulanabilmesi için, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların tasarım değişkenleriyle arasındaki ilişkinin lineer hale getirilmesi zorunlu olmaktadır.

Lineer olmayan matematik programlama, lineer olmayan sınırlayıcısız şekle dönüştürülmüş optimizasyon problemleri için geliştirilmiştir. Yapısal optimizasyonda kullanılan matematik programlama teknikleri incelendiğinde, kullanılan lineer olmayan programlama algoritmalarını genel olarak üç grupta toplamak mümkündür. Bunlar: ardısıra

lineer programlama, ardısıra sınırlayıcısız minimize teknikleri, lineer olmayan temel programlama teknikleridir.

### **1.3.2. Optimumluk Kriteri Yöntemi**

Bu yöntem problemin fiziki karakterini hesaba katarak, yapının davranışlarıyla ilgili bir kriter belirlemede, kesin veya yaklaşık hesaba ve hatta sezgiye dayanan ifadelerle kurulmuş olabilmektedirler. Yapı bu kriteri sağlayacak şekilde boyutlandırıldığında, amaç fonksiyonu da aynı zamanda optimum değerini almış olmaktadır.

Optimumluk kriteri yöntemi tasarım değişkenlerinin sürekliliği esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde ayrık tasarım değişkenlerinin kullanımının gerekliliği durumunda, alışıl gelmiş iki adımlı yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemde ilk olarak, sürekli değişkenler kullanılarak optimizasyon problemi çözülmekte, ikinci olarak ise, sürekli değişkenler kullanılarak elde edilen değerler yerine ayrık değişkenlerden eşlenikleri konularak sonuca gidilmektedir. Optimumluk kriteri yöntemi, tasarım değişkeni olarak yapı elamanının tek bir enkesit özelliğini kullanmaktadır. Diğer enkesit özelliklerinin tamamı tasarım değişkeni olarak seçilen enkesit özeliğinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedirler.

### **1.3.3. Yapay Zeka Yöntemleri**

Bilgisayar programlama dendiği zaman ilk akla gelen şey bir takım matematiksel bağıntıların herhangi bir programlama dilinde kodlanmasıdır. Fakat her problemi bir matematiksel probleme dönüştürmek mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda bu problemin çözümünde bilgisayarlardan faydalanılamayacağı anlamına gelmez. Günümüzde artık problem bir matematiksel bağıntı olarak ifade edilemese bile problemin çözümü için bir mantıksal yaklaşım (höristik) geliştirilerek bu yaklaşımın bilgisayar dilinde kodlanmasıyla problemin bilgisayara çözdürülmesi mümkün olmaktadır. Böyle bir mantıksal yaklaşım sonucu kurulan bir algoritmanın hiç bir zaman kesin sonuca ulaşacağı garanti edilemez, ancak yaklaşım iyi kurulmuşsa çok iyi sonuçlara ulaşma olasılığı oldukça yüksektir.

Höristikler, bilgisayarları insanlar gibi düşünmeye çalıştıran yöntemler olarak da değerlendirilebilmektedir. Örneğin, bilgisayarda, satranç oyununda oyunu kazanmaya yönelik, matematiksel formülasyonlara dayalı bir algoritma geliştirilmesi imkansızdır. Ancak tahtanın merkez karelerini kontrol ederek oynama kuralını hedef alan bir mantıksal yaklaşım rahatlıkla kurulabilmektedir. Böyle bir mantıksal yaklaşım, kurulduğu takdirde, galibiyeti kesin olarak getirmeyecek olsa bile kazanma ihtimalini artıracaktır. Yapay zeka araştırmalarına paralel olarak höristiklerde de önemli gelişmeler olmuştur. Özellikle son yıllardaki yapay zeka çalışmalarının çoğu işe yarar, kullanışlı, zeki höristiklerin geliştirilmesi üzerine olmuştur. Bugün höristikler bilgisayar oyunlarından, ticari yazılımlara ve bilimsel araştırmalara kadar pek çok alanda kullanılmaktadırlar. Optimum tasarım problemlerinin çözümünde de höristikler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Höristiklerin bu denli yaygın hale gelmesinde özellikle bilgisayarların hızlı gelişmesinin önemli rolü bulunmaktadır. Zira mantıksal yaklaşımlara dayalı programlar matematiksel programlara oranla daha sade ifadeler içermesine karşın aynı işlemin çok fazla tekrarlanmasına dayanmakta ve çözüme ulaşmak için daha uzun süre gerektirmektedirler.

Yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritma en yaygın olarak kullanılan mantıksal yaklaşıma dayalı çözümlene teknikleri arasında yer almaktadır.

### **1.3.3.1. Genetik Algoritma**

Genetik algoritma, genetik evrim mekanizmasını model olarak alan bir stratejidir (Holland, 1975; Goldberg, 1989). Genetik algoritmanın özü en iyinin hayatta kalması ve adaptasyonu esasına dayanır. Genetik algoritma, her ne kadar belirli kriterler sayesinde en iyiyi bulmaya yönlendirilmiş bir arama yöntemi ise de, yine de en iyi çözümü bulması garanti değildir. Fakat yapılan çalışmalar göstermiştir ki genetik algoritmalar ile yapılan optimizasyon çalışmalarının çoğunda ulaşılan sonuçlar, uygulanabilirlik açısından, diğer optimizasyon teknikleriyle elde edilenlerden daha kullanılabilir olmaktadır.

Darwin'in, güçlülerin hayatlarını devam ettirirken güçsüzlerin yok olacağı prensibine göre, iyi olan bireyler varlıklarını bir sonraki nesle aktarırlarken zayıf bireyler bir sonraki nesilde bulunmayacaklardır. Dolayısıyla da daha sonraki nesiller bu iyi bireylerin eşleşmesi sonucunda oluşacak bireylerden ibaret olacaktır. Bu yaklaşımla bir sonraki nesildeki bireylerin kalitesinin bir önceki nesildekilerden daha iyi olacağını rahatlıkla söylemek mümkün olmaktadır. Böylece nesiller boyu devam edecek evrim

sonucunda topluluk içindeki bireylerin kalitesi gittikçe artacak ve sonunda mükemmel bireylerden oluşan bir topluluğa ulaşılacaktır (Zalzal ve Fleming, 1997; Kamat, 1993).

#### **1.3.3.1.1. Genetik Algoritmanın İşleyişi**

Bir genetik algoritma tasarım değişkenlerinin kodlandığı diziler ile temsil edilen muhtemel çözümlerden oluşan bir nesli başlangıç nesli olarak çalışır. Genetik algoritmalar ayrı tasarım değişkenlerini kullanırlar ve bu tasarım değişkenlerinin alabileceği değerler tasarıma başlamadan önce belirlenir. Çözüm dizilerindeki tasarım değişkenlerinin kodlama işlemi de, çözümü oluşturan tasarım değişkeni değerinin değer kümesindeki sıra numarasının kodlanması şeklinde uygulanır. Bu kodlama işlemi sıra numarasının ikili yada üçlü sayı sisteminde kodlanması olabileceği gibi gerçek değerlerin kodlanması şeklinde de olabilir. En çok kullanılan ikili sayı sistemi kullanıldığı takdirde çözüm dizileri “1” ve “0” karakterlerinden oluşmaktadır. Bu yaklaşım içinde çözüm dizilerinin oluşturduğu kümenin topluma, çözümlerin birer bireye ve çözüm dizilerini oluşturan rakamların ise genlere benzetilmesi mümkündür.

Başlangıç neslinin oluşturulmasının ardından evrimsel süreç başlar. Bu süreçte ilk olarak çözüm dizileri optimum çözüme yakınlıkları oranına bağlı olarak sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmada sınırlayıcıların ihlal edilmesine bağlı olarak hesaplanan ceza fonksiyonunun amaç fonksiyonuna ilave edilmesi ile hesaplanan cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri baz alınır. Bu sınıflandırmaya bağlı olarak kötü çözüm dizilerinin yerine iyi çözüm dizilerinin yerleştirilmesi suretiyle kopyalama operatörü uygulanır. Bunun ardından nesle çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin de uygulanması ile bir sonraki nesle ait çözüm dizileri oluşturulur. Nesildeki çözüm dizilerinin belli bir miktarı aynı değere sahip olana kadar bu evrimsel iterasyona devam edilir.

#### **1.3.3.1.2. Genetik Algoritmanın Üstünlük ve Sakıncaları**

Yapı optimizasyonunda genetik algoritmanın uygulanmasının üstünlükleri arasında, ayrı tasarım değişkenlerini kullanması, sınırlayıcılar için açık bir format kullanması ve birden çok yük kombinezonunun uygulanmasına izin vermesi sayılabilir. Ayrıca genetik algoritma ile bir araştırma ortaya çıkarmak için konu hakkında çok detaylı



bilgi sahibi olunması ve çok hassas bağıntıların kurulması gerekmez. Genetik algoritmalar, geleneksel optimizasyon yöntemlerinin aksine, türev bilgisine gereksinim duymadan çalışmaktadırlar. Bu nedenle optimum tasarım probleminin matematiksel bir gösteriminin olup olmamasının genetik algoritma için herhangi bir önemi bulunmamaktadır (Daloğlu ve Armutçu, 1997; Daloğlu ve Aydın, 1999).

Bilindiği gibi yapı optimizasyonu için geliştirilmiş olan bir çok yöntem mevcuttur. Ancak bu yöntemlerin çoğu tasarım değişkenlerinin sürekli olduğu esasına dayanarak çözüme gider. Diğer taraftan pratikteki yapısal tasarım problemlerinin çoğunluğunda tasarım değişkenleri ayrıktır. Örneğin tasarım değişkeni olarak enkesit alanını düşündüğümüz takdirde bir çelik yapı için mevcut profil alanlarının dışında bir değeri tasarım değişkeni olarak almamız mümkün değildir. Aynı şekilde yine bir betonarme eleman için belli şartları sağlamayan en kesit değerini sonuç olarak almamız mümkün değildir. Durum böyle olunca yapı optimizasyonu için ayrık tasarım değişkenlerini kullanmanın önemi son derece artmaktadır. Zira genetik algoritmayı kullanarak bir optimizasyon yaptığımız takdirde ulaştığımız sonuçları, üzerinde hiç bir değişiklik yapmaksızın, uygulamada kullanabilmekteyiz.

Genetik algoritmanın uygulanabilmesi için amaç fonksiyonu ile sınırlayıcılar arasında belirgin bir ilişkinin olması gerekmez. Bunun yerine, tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanan amaç fonksiyonunun değeri, sınırlayıcıların ihlal edilme derecelerine göre cezalandırılır.

Genetik algoritmanın bu üstünlüklerinin yanında bir takım sakıncaları olduğu da söylenebilir. Genetik algoritma ile yapılan bir optimum tasarım neticesinde ulaşılan sonucun en iyi sonuç olduğu asla söylenemez, daima daha iyi bir sonucun bulunabilme olasılığı mevcuttur. Genetik algoritma evrimsel bir optimizasyon yöntemi olduğu için çözüme ulaşma süresi matematiksel programlama yöntemlerine oranla daha uzundur.

### **1.3.3.1.3. Basit Genetik Algoritma**

Genetik algoritmaların çoğu Goldberg (1989) tarafından önerilen basit genetik algoritmanın değişik varyasyonlarıdır. Goldberg tarafından önerilen basit genetik algoritma üç temel genetik operatör olan kopyalama, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini içermektedir. Basit genetik algoritmada başlangıç nesli tamamen rasgele olarak belirlenir. Basit genetik algoritmada kopyalama işlemi Darwin'in doğal seçim ve en iyilerin hayatta

kalması, zayıfların varlıklarının sona ermesi prensibinin basit bir aracıdır (Koza, 1992). Basit genetik algorithmada çaprazlama operatörü rasgele eşlenen ebeveyn çözüm dizileri arasından yine rasgele seçilen dizilerin belirli kısımlarının birbirleri ile yerdeğiştirilmesi şeklinde uygulanır. Çaprazlama operatörü sayesinde nesle yeni çözüm dizisi varyasyonları eklenmiş olur. Mutasyon operatörü, nesildeki karakterlerden önceden belirlenen bir orandaki miktarının değerinin değiştirilmesi şeklinde uygulanır. Basit genetik algorithmada mutasyona uğrayacak karakterler rasgele belirlenir. Bir genetik algorithmada mutasyon operatörü belirli bir rutine girmiş olan nesli farklı yönere çekmek açısından faydalı olabilir.

Basit genetik algorithmanın mühendislik optimizasyon problemlerine başarıyla uygulandığı çalışmalar arasında Goldberg ve Samtani (1986), Lin ve Hajela (1992), Rajaev ve Krishnamoorthy (1992), Jenkins (1992), Grierson ve Pak (1993), Rajan (1995), Armutçu (1997), Erbatur ve Hasançebi (1997), Friswell v.d. (1998), Pezeshk v.d., (2000), Aydın (2000), Hadi ve Arfiadi (2001), Kocer ve Arora (2002) tarafından yapılan çalışmalar sayılabilir. Basit genetik algorithmanın yapısal optimum tasarım problemlerine uygulandığı diğer bazı çalışmalar ise aşağıda değinilmiştir.

Daloğlu ve Aydın (1997) tarafından yapılan çalışmada genetik algoritma kullanılarak pratikte yaygın olarak kullanılan çeşitli düzlem çatı makaslarının optimum tasarımı yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada farklı çatı eğimleri için çözüm yapılarak optimum çatı eğimi de bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmada toplam malzeme ağırlığının minimize edilmesi amaç edinilmiştir.

Rajaev ve Krishnamoorthy (1998) basit genetik algorithmayı kullanarak betonarme düzlem çerçevelerin optimum tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kolon ve kirişlere ait betonarme enkesit ebatları ve donatı miktarları tasarım değişkenleri olarak dikkate alınmıştır.

Camp vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada genetik algoritma kullanılarak iki boyutlu kafes ve çerçeve sistemlerin optimum tasarımı yapılmıştır. Amaç fonksiyonu yapının toplam malzeme ağırlığına bağlı olarak oluşturulmuştur. Kopyalama ve çaprazlama operatörleri için birkaç strateji araştırılmıştır. Farklı uyum fonksiyonları ve ceza fonksiyonları araştırılmıştır.

Ayvaz ve Aydın (2000) tarafından yapılan çalışmada basit genetik algoritma kullanılarak üç boyutlu kafes sistemlerin boyut otimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonu toplam malzeme ağırlığına bağlı olarak kurulmuştur. Gerilme, stabilite ve

deplasman sınırlayıcıları dikkate alınmıştır. Çalışmada eksenel stabilite TS 648'e uygun olarak formüle edilmiştir..

Kameshki ve Saka (2001) yaptıkları çalışmada genetik algoritma ile yarı rijit birleşimli lineer olmayan çok katlı çelik çerçevelerin optimum tasarımını yapmışlardır. Çalışmada minimum ağırlık baz alınmıştır. Kiriş-kolon birleşimlerinin moment-dönme ilişkisini dikkate almak üzere lineer olmayan ampirik bir modelden yararlanılmıştır. Kirişlere esnek olarak birleşmiş kolonların burkulma boylarının hesaplanmasında lineer olmayan etkileşim denklemlerinin çözümünden yararlanılmıştır.

Hayalioğlu (2001) yaptığı çalışmada uzay çerçeve sistemlerin genetik algoritma ile minimum ağırlıklı tasarımını yapmıştır. Çalışmada düşey yüklerin yanısıra rüzgar yükleri dikkate alınmıştır.

Krishnamoorthy (2001) çalışmasında genetik algoritma ile yapılan çalışmalar neticesinde bulunan sonuçların uygulamada rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu amaçla genetik algoritmayı kullanarak çelik kafesler, kuleler, köprüler, betonarme çerçeveler, köprü tabliyeleri gibi yapı sistemlerinin tasarımına yer vermiştir.

Atabay (2004) yapmış olduğu çalışmada perdeli betonarme yapı sistemlerinin genetik algoritma ile maliyet yönünden optimum tasarımını gerçekleştirmiştir. Çalışmada betonarme perde boyutları tasarım değişkeni olarak alınmıştır. İki ve üç boyutlu sistemlerin optimum tasarımı için iki farklı program geliştirilmiştir. Çalışmada ABYYHY ve TS 500 de betonarme perde boyutları ve donatı ile ilgili koşullar kısıtlama olarak alınmıştır.

#### **1.3.3.1.4. Geliştirilmiş Genetik Algoritmalar**

Son yıllarda genetik algoritma ile yapılan çalışmalarda, genetik algoritmanın performansını artırmak için basit genetik algoritmaya, bulanık küme teorisi, ceza fonksiyonun hesaplanmasında bulanık mantık kullanımı, melez operatörlerin kullanımı, melez başlangıç nesli seçimi gibi eklemeler yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde geliştirilmiş genetik algoritmanın özellikle sonuca ulaşma süresinin kısalması yönünde başarılı olduğu görülmektedir.

Li ve Love (1997) geliştirilmiş bir genetik algoritma kullanarak inşaat projelerindeki zaman-maliyet optimizasyonunu yapmışlardır. Bu çalışmada çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin sonucunda oluşan yeni çözüm dizilerinin kötü değerlere sahip olmaması için bu operatörlere mantıksal ilaveler yapılmıştır.

Sarma ve Adeli (2000a) tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık tekniğinde ilave edilmesi ile geliştirilmiş olan bir genetik algoritmanın kullanılması suretiyle çelik yapıların çok kriterli optimum tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada minimum maliyetli, minimum ağırlıklı ve minimum miktarda farklı enkesit çeşidine sahip çelik yapı tasarımı bulunmaya çalışılmıştır.

Yang ve Soh (2000) yaptıkları çalışmada bulanık mantık kullanımı ile genetik algoritmanın yapısal optimum tasarım problemlerindeki performansını artırmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada tasarım sınırlayıcıları için bulanık küme teorisini kullanan bir yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca iterasyon sürecinin kontrolünde bilgi ve deneyimlerden yararlanılmasını sağlamak üzere bulanık mantık temelli bir karar verme mekanizmasından faydalanmışlardır. Çalışmanın neticesinde geliştirilen genetik algoritmanın basit genetik algoritmaya oranla daha yüksek bir arama performansına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Chen ve Rajan (2000) çalışmalarında basit genetik algoritmaya bazı anahtar güçlendirici ilaveler yapmak suretiyle verimliliğini, güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmaya çalışmışlardır. Bu şekilde geliştirdikleri genetik algoritma ile küçük ve büyük bazı sistemlerin boyut, şekil ve topoloji optimizasyonunu yapmışlardır.

Li v.d. (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çok aşamalı bir genetik algoritma kullanılarak yapıya yerleştirilecek aktüatörlerin sayılarının, yerleşim yerlerinin ve kontrol zincirlerinin optimum tasarımını yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada bu üç farklı problem için farklı bir genetik algoritma kullanılmış ve bunların birbirleriyle etkileşimi dikkate alınmıştır.

Nanakorn ve Meesomklin (2001) kafes ve çerçeve sistemlerin optimum tasarımı için kullandıkları genetik algoritmada, tasarım boyunca sabit kalan bir ceza katsayısı kullanmak yerine iterasyon süresince değişen bir ceza katsayısı kullanmışlardır. Ceza katsayısının iterasyon boyunca değerinin belirlenmesinde deneyimlerden yararlanan bir modül kullanılmıştır.

Deng v.d. (2004) yapısal güvenlik analizi için farklı bir genetik algoritma geliştirmeye çalışmışlardır. Yapılan bu çalışmada çözüm dizileri alt parçalara ve karakterlere ayrılarak bu parçaların performansları incelenerek sınıflandırılmıştır. Kopyalama ve çaprazlama operatörlerinin uygulanmasında da bu alt parçaların ve karakterlerin performansları dikkate alınmıştır.

Sivakumar v.d. (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çelik kafes kulelerin optimum tasarımı genetik algoritma kullanılmak suretiyle yapılmıştır. Bu çalışmada çözüm

dizisi uzunluğunu azaltmak için seçilme olasılığı az olan tasarım değişkeni değerlerinin ihmal edilmesi yaklaşımı kullanılmıştır.

Espinoza v.d. (2005) yer altı sularının düzenlenmesine ilişkin yaptıkları çalışmada geliştirilmiş bir melez genetik algoritma kullanmışlardır. Yapılan bu çalışmada nesle basit genetik algoritmaya ait operatörlerin uygulanmasının ardından belirlenen kriterler doğrultusunda nesildeki bazı çözüm dizilerinde değişime gidilerek, çözüm dizilerinin optimum çözüme yakınlığı artırılmaya çalışılmıştır.

### 1.3.3.2. Yapay Sinir Ağları

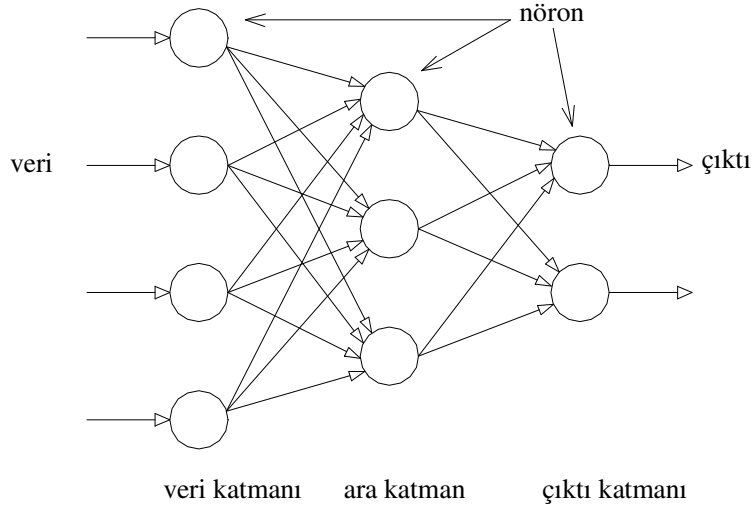
Yapay sinir ağları, basit hesap elemanlarının yüksek kapasiteli bağlantıları ve işbirliği yoluyla zor problemleri çözen, çoğunlukla benzer mimarilere sahip bir gruptur. Bir yapay sinir ağı, beynin biyolojik sistemini taklit eden esaslara dayalı bir bilgi işletim sistemidir. Zira ikisi de katmanlara tanzim edilmiş olan basit hesap birimlerinden oluşmaktadır. Yapay sinir ağlarına olan ilgi son yıllarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır.

Çoğu yapay sinir ağı uygulaması geri yayılım yöntemine dayanmaktadır. Bir geri yayımlı sinir ağı, yapay nöronlar adı verilen, birbiriyle bağlantılı çok sayıda işlem elemanından oluşmaktadır. Elemanlar iki yada daha fazla tabakaya mantıklı bir şekilde dizilmekte ve birbirlerini belirlenen bir ağırlıktaki işbirliğiyle etkilemektedirler. Bu ölçütsel ağırlıklar birbirleriyle bağlantılı olan elemanların arasındaki etkinin çeşidini ve kuvvetini belirlemektedir.

Şekil 1'de birbiriyle bağlantılı nöronlardan oluşan, üç katmanın oluşturduğu tipik bir sinir ağı mimarisi verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, her eleman bir sonraki katmandaki bütün nöronlarla bağlantılıdır. Yapay sinir ağlarında verilerin sunulduğu bir veri katmanı ve ağın verilere cevabının bulunduğu bir çıktı katmanı mevcuttur. Ara katmanlar ise veriler arasındaki etkileşimin ve veriler ile çıktılar arasındaki ilişkinin gözlenmesine olanak sağlamaktadır. Bunlara gizli katmanlar da denilmektedir. Genel olarak ara katmanların sayısının veya bu katmanlardaki nöron sayısının belirlenmesinde, deneyimlerin dışında, herhangi bir kural bulunmamaktadır. Bir çok çalışmada çözülen problem için bir ara katmana sahip ağ yeterli görülmüştür.

Geleneksel olarak, doğru etkileşim ağırlıklarının belirlenmesinde geri öğrenme işlemi kullanılmakta ve verilerle çıktılar arasında uygun bir işbirliğinin kurulabilmesi için

ağ eğitilmektedir. Ağ bir kez eğitildiği zaman, bundan sonra verilen verilerden arzu edilen çıktılara ulaşmak için hızlı bir harita oluşturulmuş olmaktadır.



Şekil 1. Tipik sinir ağı mimarisi

Yapay sinir ağları son yıllarda yapı mühendisliğinde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Yapay sinir ağlarını yapı mühendisliğinde kullananlar arasında Chang ve Zhou (2002), Brown ve Yang (2001), Tsai ve Hsu (2002), Yeh (1999), Basheer (1996), Ramasamy ve Rajasekaran (1996), Yun ve Bahng (2000), Sunar v.d. (2000) sayılabilir. Bunların yanısıra Yapay sinir ağlarının yapı tasarımında kullanıldığı diğer birkaç çalışmaya da aşağıda değinilmiştir.

Sanad ve Saka (2001) tarafından yapılan çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak betonarme yüksek kirişlerin maksimum kesme dayanımları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada literatürden alınmış 111 adet deneysel veri kullanılmıştır. Veri katmanı yüksek kirişin malzeme ve geometrik özelliklerini içeren toplam 10 adet veriden oluşturulmuştur. Çıkı katmanı ise tek sonuç olan maksimum kesme dayanımından oluşmaktadır. Çalışmanın sonucunda yapay sinir ağları metodunun, yüksek kirişlerin maksimum kesme dayanımının tespitinde verimli bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Sirca ve Adeli (2001) yaptıkları çalışmada yapay sinir ağıları tekniğini kullanarak U şeklindeki metal çatı panellerinin negatif yük taşıma kapasitelerini hesaplamışlardır. Klasik hesap yöntemleri ile hesaplanan değerler ile test sonuçlarının genellikle farklılıklar göstermesi nedeniyle, yapay sinir ağlarının bu problemin çözümü için verimli bir alternatif olduğu belirtilmiştir.

Turan (2002) yaptığı çalışmada yapay sinir ağları yöntemini kullanarak betonarme döşemelerin serbest titreşim analizini yapmıştır. Çalışmada farklı kenar oranları ve eğilme rijitliği oranlarına bağlı titreşim frekansları elde edilmiştir.

### 1.3.3.3. Bulanık Mantık

Bilgisayarların matematiksel programlanmasında sadece doğru ve yanlış kavramları vardır. Bu ikisinin arasında bir kavramın bilgisayar tarafından algılanması mümkün değildir. Ancak bir insan beyninin düşünme yapısında doğru ve yanlış kavramlarının arasında görecelilik esasına dayanan bir çok kavram söz konusudur. Örneğin, “yüksek bina”, “sıcak iklim”, “genç insan” gibi belirsizlik içeren bulanık anlatım ve ifadeler kesin olmamakla birlikte insan beyni için bilgisayarlardan farklı olarak büyük ölçüde yeterli bilgilerdir. Bulanık mantık, belirsiz ifadeleri bilgisayarlar için anlamlı kılmak üzere oluşturulmuş bir makine öğretme biçimidir. Örneğin, normal bir klima cihazı belirli termometre sıcaklığına bağlı olarak çalışıp dururken, bulanık mantık kullanılarak programlanmış bir klima cihazı çok soğuk, biraz soğuk, biraz sıcak, çok sıcak ve ılık gibi kavramları algılayarak çalışma süresini uzatıp kısaltmaya, daha yüksek yada düşük kademelerde çalışmaya kendisi karar verebilir. Günümüzde mutfak eşyalarından, iş makinelerine kadar birçok alanda bulanık mantığa dayalı programlamadan yararlanılmaktadır.

Bulanık mantık son yıllarda yapı mühendisliğinde de sıkça kullanım alanı bulmaktadır. Yapı dizaynı için kodlanmış bir bilgisayar programı, bir yapı elemanı için gerilme analizi yaptığında eğer oluşan gerilme emniyet gerilmesinin altında ise kesit yeterli, eğer üzerinde ise kesit yetersizdir. Bu ikisinin arasında bir ifade söz konusu değildir. Ancak gerilmelerin %50 oranında aşıldığı bir kesitle, %1 oranında aşıldığı bir kesit için tamamen aynı ifadeleri kullanmak çok doğru değildir. Hatta bir optimum tasarım problemi düşünüldüğü takdirde gerilmeleri %1 oranında aşan bir çözüm büyük bir

olasılıkla, emniyet gerilmesini aşmayan birçok çözüme oranla optimum çözüme daha yakındır.

Bu düşünceden hareketle Joghataie ve Ghasemi (2001) kafes sistemlerin minimum ağırlıklı tasarımı için yaptıkları çalışmada kullandıkları çok aşamalı optimizasyon tekniğine, performansını artırmak için bulanık üyelik fonksiyonlarını eklenmiştir. Bu çalışmada sınırlayıcıları ihlal eden çözümlerin ceza parametrelerini belirlemek üzere, sınırlayıcıların ihlal edilme derecesine bağlı olarak “0” ile “1” arasında değeri değişen bulanık üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

Ahlawat ve Ramaswamy (2001) bulanık mantık kontrol sistemini kullanarak yapıların titreşim kontrolü için bir optimum tasarım çalışması yapmışlardır. Çalışmada bulanık mantık yaklaşımının doğasından kaynaklanan lineer olmayan davranışı ile yapısal davranıştaki ve yükleme durumlarındaki belirsizlikleri değerlendirebilme yeteneğinden yararlanılmaya çalışılmıştır.

Sarma ve Adeli (2000b) yaptıkları çalışmada sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonu için bulanık üyelik fonksiyonlarını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda optimum çözüme ulaşma olasılığının arttığını, yakınsamanın performansının geliştiğini ve bilgisayar işlem süresinin azaldığını vurgulamışlardır.

Bulanık mantık yaklaşımının mühendislik problemlerine uygulandığı diğer bazı çalışmalar arasında Chiang v.d. (2000), Leu v.d. (1999) ve Mohammad ve Al-Dmour (2002) tarafından yapılan çalışmalar sayılabilir.

#### **1.4. Öngerilmeli Beton Hakkında Hatırlatmalar**

Öngerilme, bir yapı yada sistemde, performans artırımı için kalıcı iç kuvvetlerin oluşturulmasıdır. Bu kuvvetlerin uygulanmasındaki amaç dış yüklerin neden olduğu iç kuvvetleri azaltmaktır.

İlk öngerilmeli beton uygulaması P. H. Jackson tarafından Kaliforniya’da 1886’da yapılmıştır. Ancak günümüzdeki anlamıyla öngerilmeli beton tekniğini ilk kullanan kişi 1900’lü yılların başında Eugene Freyssinet olmuş ve 1928 yılında da patent almıştır. Eugene Freyssinet öngerilme kayıplarının önemini ve onları önlemenin yollarını ilk belirleyen kişidir. İlki 1941 yılında olmak üzere, Eugene Freyssinet tarafından, öngerilmeli beton tekniğinin kullanıldığı birçok köprü tasarlanmıştır (Naaman, 1982).

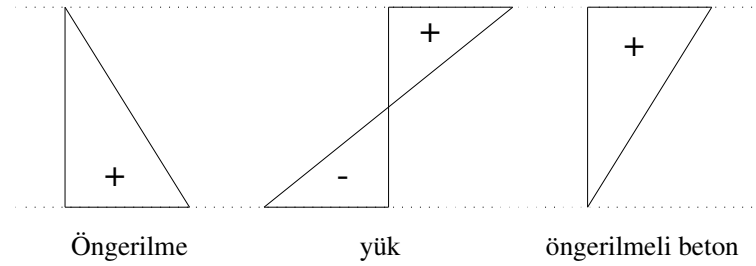


Bilindiği üzere beton, çekme dayanımı basınç dayanımına oranla çok daha düşük olan bir malzemedir. Betonun bu eksikliği, taşıyıcı bir elemanın kesitinde meydana gelen çekme gerilmelerini alacak şekilde çekme bölgelerini çelik çubuklarla donatmak suretiyle giderilmiş ve betonarme tekniği oluşmuştur. Ancak betonarme de bazı eksiklikleri nedeniyle ihtiyaçları tam olarak karşılayamamaktadır. Betonarme yapı elemanlarında çoğu kez, donatı hesap çekme dayanımının yarısına ulaşmadan beton çekme dayanımının düşüklüğü nedeniyle çatlamaktadır. Eğilmeye çalışan bir betonarme elemanda kesitin sadece bir bölümü basınç gerilmesi taşımakta, geri kalan kısmı ise kirişin taşıması gereken toplam yükü artıracak yönde etki etmektedir. Bu sebeple açıklık büyüdükçe betonarme kirişler kendi ağırlığı nedeniyle artık ekonomik olmamaktadırlar. Ayrıca deprem yükleri de yine bu ağırlığa bağlı olarak artmaktadır. Betonarme bir kesitte çatlaklar kabul edilebilir sınırlar içinde kalsalar bile, bu çatlaklar nedeniyle donatı korozyona uğrayabilmektedir (Özden v.d., 1994).

Yukarıda sıralanan sebeplerden görülebileceği üzere betonarmenin eksiklikleri çekme gerilmelerinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Betonarmenin bu eksikliklerinin giderilmesi için, kesitte hiç çekme gerilmesi olmamasını veya oluşacak çekme gerilmelerinin çatlama olmayacak kadar küçük kalmasını sağlamak gerekmektedir. Bunu sağlamak üzere kesitin çekme gerilmesi oluşumu beklenen bölümüne bir ön yükleme ile basınç gerilmesi verilmesi ve oluşacak çekme gerilmelerinin dengelenmesi mümkündür. Bu düşünceden hareketle öngerilmeli beton, dış yüklerin etkimesinden önce yaratılan, taşıyıcı sistemde dış yüklerden gelecek gerilmeleri amaca uygun şekilde değiştiren yapay ve sürekli bir gerilmenin verildiği beton olarak tanımlanabilir (Özden v.d., 1994).

Aşağıda Şekil 2’de basit mesnetli bir kirişin açıklık ortasında dış yükler nedeniyle oluşan çekme gerilmelerinin kirişe öngerilme vermek suretiyle yok edilmesi basit olarak ifade edilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere basit kiriş açıklık ortasında dış yükler nedeniyle kesit alt bölgesinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kesite şekilde gerilme dağılışı verilen, kiriş üst ucunda sıfır gerilme ve kiriş alt ucunda ise dış yükler nedeniyle oluşan çekme gerilmesine mutlak değerce eşit bir basınç gerilmesi oluşturacak şekilde eksantrik bir öngerilme verildiği düşünülün. Bu durumda yine şekilde görüldüğü üzere öngerilme ve dış yükler nedeniyle oluşan gerilmeler süperpoze edildiği takdirde kesitte çekme gerilmesi sıfır olurken maksimum basınç gerilmesi ise dış yükler nedeniyle oluşan basınç gerilmesine eşit olmaktadır.

Öngerilmeli betonun pek çok üstünlüğü bulunmaktadır. Öngerilmeli betonda yüksek kalitede çelik ve beton beraber kullanılmakta, bu sayede ağırlık azaltılarak büyük açıklıkların ekonomik olarak geçilebilmesi sağlanmaktadır. Kesitin bütün yüksekliğinin çalışması temin edilmekte ve bu sayede narin elemanlar yapılabilmektedir. İç kuvvetlerin istenilen seviyede olması sağlanabilmekte, sehimler istenilen mertebede tutulmakta ve çatlama durumuna hakim olunabilmektedir (Özden v.d., 1994).



Şekil 2. Öngerilmeli basit kiriş açıklık ortasında gerilme dağılımı

Literatürde öngerilmeli beton üzerine yazılmış ve öngerilmeli beton hakkında daha geniş bilgi alınabilecek önemli yayınlar bulunmaktadır. Bunlar arasında Wilby (1969), Raju (1986), Nawy (1996), Preston (1964), Komendant (1952), Bilge (1981), Gilbert ve Micklebrough (1990), Nilson (1987), sayılabilir.

Günümüzde birçok öngerme sistemi ve tekniği geliştirilmiş, öngerilmeli beton tekniği yaygın olarak kabul görmüş ve uygulanmaktadır. Öngerilmeli beton tekniği, köprüler başta olmak üzere, kiriş, döşeme ve kolon gibi bina elemanlarında, borularda, kazıklarda, tanklarda, tünellerde, stadyumlarda, nükleer enerji santrallerinde, televizyon kulelerinde, deniz yapılarında ve daha birçok yapıda kullanılmaktadır. Birçok öngerilme tekniği kullanılmakla birlikte kimyasal öngerilmenin dışındakiler, önçekim ve ardçekim olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılabilir (Naaman, 1982).

#### 1.4.1. Önçekim

Önçekim metodunda, öngerilme donatıları önceden belirlenen bir gerilme miktarınca gerilerek sabit kütlelere ankrajlanırlar. Beton bu gerilen donatıların etrafına yerleştirilmiş kalıpların içine dökülür, bakımı yapılır ve yeterli dayanımına ulaşıncaya kadar bekletilir.

donatılar serbest bırakılır. Beton ile donatılar arasındaki aderans donatıların kısılmasına direnç gösterir ve böylece beton basınç gerilmesi ile yüklenmiş olur. Burada öngerilme kelimesindeki “ön” eki beton sertleşmeden önce donatıların çekme gerilmesi ile yüklendiğini ifade etmektedir. Öngerilme donatılarını germek için genellikle hidrolik krikolar kullanılmaktadır.

Öngerilme elemanlarda beton ile donatı arasındaki aderansın mümkün olduğunca fazla olmasını sağlamak için öngerilme donatılarının çapının küçük seçilmesinde fayda vardır.

Öngerilme metodu fabrikasyon için büyük potansiyeller sunduğundan daha çok tercih edilmektedir. Uzun hat üretim tekniğiyle oldukça uzun miktardaki öngerilme teli tek seferde gerilerek peş peşe sıralanan birkaç kalıba aynı anda beton dökülerek, birden fazla öngerilmeli kiriş bir çekme işlemi ile üretilebilmektedir. Öngerilme mekanizmasının daha ekonomik kullanımı maksadıyla öngerilmeli kiriş betonun kürü çok iyi yapılmalı ve mümkün olan en kısa sürede betonun gerekli mukavemeti kazanması sağlanarak aktarma işlemi yapılmalıdır (Naaman, 1982).

#### **1.4.2. Ardçekim**

Ardçekim metodunda beton döküldükten ve yeterli mukavemeti kazandıktan sonra öngerilme donatıları gerilir ve beton elemanın uç noktalarına ankraj edilir.

Kılıf denilen ince cidarlı borular beton dökülmeden önce eleman boyunca yerleştirilir. Donatılar bu kılıflar içine beton dökülmeden önce serbest bir şekilde veya beton dayanımını kazandıktan sonra yerleştirilebilirler. Donatılar gerildikten ve ankrajlandıktan sonra, kılıflar ile donatılar arasındaki boşluk sonradan sertleşen özel bir harç ile doldurulur. Bu harç sayesinde, donatı ile onu çevreleyen betonun aderansı sağlanmış, öngerilmeli elemanın çatlamaya karşı direnci artırılmış ve donatılardaki korozyon riski azaltılmış olur.

Yukarda anlatıldığı şekliyle kılıflar ile donatılar arasındaki boşluk harç yerine yağ ile doldurulması durumunda, donatı boyunca aderans kaldırılmış olacak ve donatıdaki gerilme betona sadece uç noktalardaki ankrajlardan aktarılacaktır. Aderanssız öngerilme donatıları genellikle yağ yada bitümlü malzemelerle kaplanıp, su geçirmez malzemelerle sarılarak yada esnek plastik boruların içine sokularak beton dökülmeden önce kalıp içine yerleştirilirler.

Ardçekim metodu prefabrike elemanlarda da kullanılmasına rağmen, yerinde dökme elemanlar için çok daha yararlı olarak kullanılmaktadır. Özellikle boyutu itibariyle taşınması mümkün olmayan elemanların ardçekim metoduyla öngerilme vermek suretiyle yerinde dökme olarak üretilmesi çok daha verimli bir yöntemdir (Naaman, 1982).

### **1.4.3. Kimyasal Öngerilme**

Kimyasal öngerilmede öngerilme donatıları gerilmeden kalıp içine yerleştirilirler ve beton dökülür. Kullanılan özel genişleyen çimentolar sayesinde beton, kürünün ardından sertleşme süresi boyunca büzülme yerine genişlemeye çalışır. Ancak donatı ile beton arasındaki aderans nedeniyle, betonun, öngerilme donatısı yerleştirilmiş olan bölümleri genişemeyerek donatıda çekme ve betonda ise basınç gerilmesi oluşması sağlanır. Burada betonun genişemesinin kontrol edilmemesi ve öngerilme verilecek yönün dışında da genişeme oluşması gibi sakıncalar nedeniyle kimyasal öngerilme henüz uygulamada pek kullanılmamaktadır (Naaman, 1982).

## **1.5. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprüler**

Köprüler, vadi, nehir, otoyol veya benzer bir nedenle ayrılmış iki noktayı birleştirmek gibi tek ancak çok önemli bir amaç için inşa edilen yapılardır. Öngerilmeli betonun köprülerde kullanılması pek çok üstünlük sağlamaktadır. Bunlar arasında, fazla bakım gerektirmemesi, uzun ömürlü oluşu, estetik oluşu ve prefabrike elemanlar kullanıldığı takdirde güvenilir üretim kalitesi, hızlı ve kolay inşaat, düşük ilk maliyet sayılabilir.

Köprüler, tek ve genel bir amaç için yapılmalarına karşın, inşa edilecekleri arazi özelliklerine ve diğer bazı faktörlere göre her biri ayrı karakteristikler gösterir. Bu faktörler arasında toplam geçilecek açıklık ve yapının boyutu, yükleme çeşitleri, tek seferde geçilecek maksimum açıklık, fabrikasyon yada inşaat için kullanılacak teknolojiler, arazinin şekli, köprünün önemi ve maliyet sayılabilir. Bu faktörler aynı zamanda tasarım türü ve inşaat yönteminin seçimini de belirlerler.

Köprüler açıklık mesafelerine göre, kısa orta ve uzun açıklıklı olarak sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırma için kesin bir ayırım noktası bulunmamakla birlikte,

öngerilmeli beton köprüler için 15 m den küçük açıklıklı olanlar kısa, 15 m ~ 30 m arasında olanlar orta ve 30 m den büyük açıklıklı olanlar ise uzun açıklıklı olarak adlandırılabilir. Öncekim öngerilmeli kirişler kullanılan orta açıklıklı köprüler, kirişler birbirine bitişik olacak şekilde yada tabliyenin de enine doğrultuda çalışması suretiyle kirişler ayrı olacak şekilde inşa edilmektedirler (Naaman, 1982).

Dünyanın çeşitli bölgelerinde şu ana kadar yapılmış orta açıklıklı köprüler incelendiği zaman tarih boyunca kullanılan malzeme yönünden önemli bir aşama geçirdikleri görülebilmektedir. Gerçek anlamda bir mühendislik eseri olarak yapılmış ilk orta açıklıklı köprülerin kargir ve kemerli oldukları görülmektedir. Bunu izleyen dönemlerde, özellikle geçtiğimiz yüzyılın başından ortalarına kadar olan bölümde inşa edilen köprülerde ise inşaat malzemesi olarak çeliğin ön plana çıktığı açıktır. Bu dönemdeki çok açıklı köprülerde çelik malzeme, hem kafes kirişler ve hem de dolu gövdeli kirişler olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Geride bıraktığımız yüzyılın ortalarından sonra yapı mühendisliğinde betonarme tekniğinin yaygınlaşmasının ardından diğer bir çok yapı türünde olduğu gibi orta açıklıklı köprülerde de betonarme en çok kullanılan bir malzeme olmaya başlamıştır. Önceleri köprü tasarımında betonarme, basit yerinde dökme olarak kullanılmakta ve dolayısıyla çok uzun açıklıklı kirişler yapılamamaktaydı. Ancak daha sonraları prefabrike beton ve öngerilmeli beton tekniklerinin ortaya çıkmasıyla betonarmenin çok açıklı köprü tasarımlarındaki yeri çok daha önem kazanmıştır. Bu teknikler sayesinde normal yerinde dökme betonarmeye oranla çok daha uzun açıklıklar tek kirişle tasarlanabilmektedir. Ancak betonarme tekniklerindeki bütün bu gelişmelere rağmen, çelik malzemesi eski önemini yitirmekle birlikte hala kullanılmaya devam edilmektedir.

Orta açıklıklı köprülerin taşıyıcı sistemi altyapı ve üstyapı olarak iki sınıfa ayrılabilir. Altyapı temeller, köprü ayakları ve taşıyıcı duvarlardan oluşmaktadır. Üstyapıyı oluşturan başlıca yapı elemanları ise boylama kirişleri ve tabliyedir.

Köprü ayakları pratikteki uygulamaların çoğunda köprü eksenine dik perde, daire veya dikdörtgen kesitli kolonlardan teşkil edilmektedir. Köprü kirişlerinin enkesitleri için uygulamada çok çeşitli şekiller kullanılmasına rağmen bunlardan en yaygın olarak kullanılanları içi boş kutu kesit ve dolu gövdeli profil kesitlerdir.

Literatürde öngerilmeli beton kirişli köprüler ile ilgili olarak yayınlanmış pek çok yayın bulunmaktadır. Aşağıda bu yayınlardan birkaçına değinilmiştir.

Barr v.d. (2001) yaptıkları çalışmada öngerilmeli beton kirişli köprüler için yük dağıtma faktörlerinin bir değerlendirmesini yapmışlardır. Bu işlem için sonlu elemanlar yönteminin güvenilirliğini belirlemek için statik yükleme testleri sonuçları ölçülerek belirlenmiş bir köprü davranışı kullanılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemini kullanarak köprü üstyapısının çeşitli karakteristiklerinin yük dağılım katsayılarını nasıl etkilediklerini araştırmışlardır. Buldukları sonuçları köprü tasarımı ile ilgili çeşitli yönetmeliklerde sunulan yük dağıtma katsayıları ile karşılaştırmışlardır.

Onyemelukwe v.d. (2003) uygulanmış önçekim öngerilmeli beton bir köprü kirişi üzerinden ölçülen öngerilme kayıpları miktarı ile bazı yönetmeliklerde önerilen yöntemlerle hesaplanan öngerilme kayıpları miktarının bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Kiriş üzerindeki zamana bağlı öngerilme kayıplarının değişimi ve yayılımını belirlemek için eksenel şekildeğiştirme verileri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda öngerilme kayıplarının PCI ve AASHTO yönetmeliklerinde tarif edildiği gibi kesit boyunca düzenli olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmada kiriş farklı derinliklerdeki gerilmeler, ölçülmüş öngerilme değişimleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu gerilmeler PCI ve AASHTO yönetmelikleri tarafından önerilen öngerilme kayıpları ile hesaplanan gerilmelere oranla çoğu durumda daha fazla bulunmuştur.

Akgül ve Frangopol (2004) tarafından yapılan çalışmada mevcut öngerilmeli beton köprülerin kullanım süresi boyunca performans analizini gerçekleştirmek üzere bir genel metodoloji sunmuşlardır. Çalışmada sadece üstyapı elemanları (kirişler ve tabliye) dikkate alınmıştır. Metodolojinin çerçevesi dört ayrı kategorinin tanımlanmasıyla kurulmuştur. Bunlar, sınır durum denklemleri, rasgele değişkenler, gerçek belirleyici parametreler ve sabit katsayılardır. Geliştirilen metodoloji mevcut yedi adet köprüye uygulanmıştır.

Du ve Au (2005) yaptıkları çalışmada önerilmeli beton kirişli köprülerin tasarımı için Hong Kong, Çin ve AASHTO LRFD yönetmeliklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada ardçekim öngerilmeli beton kirişli, açıklığı 25 m ~ 40 m arasında değişen köprü üstyapısı dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda bu üç yönetmelik ile yapılan tasarım neticesinde bulunan sonuçlar yorumlanmıştır.

## 1.6. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprülerin Şekil ve Topoloji Optimizasyonu

Öngerilmeli beton bitişik I kirişli köprü üstyapısını oluşturan başlıca iki yapı elemanı daha öncede belirtildiği gibi boylama kirişleri ve tabliyedir.

Çok açıklı bir köprü tasarlanacağı zaman ilk akla gelen köprünün toplam açıklığının ne kadar olduğudur. Bunun ardından tasarımcılar böyle bir açıklığın geçilebilmesi için kaç açıklıklı olmasının dolayısıyla kaç adet köprü ayağı kullanılmasının en uygun sonuç olacağını düşünmeye başlarlar. Bunun seçiminde toplam açıklığın boyu kadar köprü eksen boyunca arazi profilinin kotları ve bu kotlara bağlı olarak oluşacak ayakların yükseklikleri de önem kazanmaktadır. Kısacası çok açıklıklı bir köprü tasarımı boyutsal yönden bir incelemeye geçmeden önce sistem seçimi üzerinde bir araştırma yapılmalıdır.

Bu şekilde köprü ayak aralıkları belirlendikten sonra bu aralıkların uygun bir kiriş ve tabliye sistemiyle birleştirilmesi gerekmektedir. Çözüm için bitişik kirişli bir sistem seçilmiş ise tabliye kalınlığı trafik yüküne bağlı olarak öncelikle belirlenir. Ardından Bu tabliyenin altına yerleştirilecek kirişlerin adedi ve ebatları belirlenmelidir. Uygulamada genellikle önceden belirlenmiş ve standartlaşmış belli başlı profil kesitli öngerilmeli kirişler kullanılmaktadır. Köprü ayak aralığına, tabliye genişliğine ve kullanılacak kiriş sayısına bağlı olarak bu kirişlerden uygun enkesitli olanı seçilmektedir. Ancak her köprü kendi içinde farklı karakteristiklere sahiptir. Dolayısıyla standart profil kesitlerinin şekilleri üzerinde değişiklik yapılmak suretiyle, her köprü üst yapısına özel bir minimum malzeme kullanılarak tasarlanacak bir kesitten söz edilebilir. Buradan hareketle öngerilmeli beton kirişli köprülerin şekil optimizasyonu, köprü karakteristiklerine bağlı olarak maliyeti en aza indirmek için kullanılması gereken kiriş enkesit ebatlarının belirlenmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Öngerilmeli beton I şeklinde bir köprü kirişinin belli başlı enkesit ölçüleri ise kiriş yüksekliği, alt ve üst başlık genişliği, alt ve üst başlık kalınlığı, alt ve üst guse yükseklikleri, gövde kalınlığı ve öngerilme donatısı miktarıdır.

Burada kiriş enkesit şekli üzerinde köprü karakteristikleri kadar, köprü enkesitinde kullanılacak kiriş sayısının da etkili olacağı açıktır. Köprü enkesitinde kullanılacak kiriş sayısı köprü üstyapı enkesitinin topolojisini belirlemektedir. Köprü enkesitinde kullanılacak kiriş sayısı da yine köprü karakteristiklerine bağlı belirlenmesi gereken bir başka değişkendir. Dolayısıyla yine köprü karakteristiklerine göre köprü üstyapı maliyetini minimum yapacak bir köprü kiriş sayısından söz edilebilir. Böylece,

önerilmeli beton kirişli köprülerin topoloji optimizasyonu, köprü karakteristiklerine bağlı olarak maliyeti en aza indirmek için köprü enkesitinde kullanılması gereken kiriş sayısının belirlenmesi olarak tanımlanabilir.

Yukarıda tanımlanan iki optimizasyon problemi birbirinin ardı sıra, optimum kesiti bulunmuş kirişlerin optimum sayısının belirlenmesi yada optimum sayısı belirlenmiş kirişlerin optimum şeklinin belirlenmesi şeklinde uygulanabilir. Ancak bu iki optimizasyonun birlikte yapılması ile köprü karakteristiklerine bağlı olarak köprü enkesitinde kullanılacak kiriş sayısı ve kiriş şeklinin aynı anda belirlenmesi suretiyle ardı sıra yapılacak optimizasyona göre çok daha iyi sonuçların bulunacağı açıktır. Klasik optimizasyon yöntemleriyle böyle kompleks bir problemin çözümü oldukça zordur.

Literatürde önerilmeli beton kirişli köprülerin optimum tasarımı ile ilgili olarak daha önceden yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bunların bazılarını aşağıda değinilmiştir.

Totres v.d. (1966) önerilmeli beton kirişli köprülerin optimum tasarımı ile ilgili ilk çalışmalardan birini yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada AASHTO'da verilen yükleme altında önerilmeli beton otoyolu köprülerinin maliyet yönünden optimum tasarımı bir lineer programlama tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bağımsız tasarım değişkeni olarak kirişlerin sayısı ve yüksekliği, öngerme kuvveti ve bu kuvvetin uygulanacağı dışmerkezilik seçilmiştir. Çalışmada bu değişkenlere bağlı olarak belirlenen diğer değişkenler ise, kiriş ara mesafeleri, önerilme çeliklerinin enkesit alanları, ilk öngerme kuvveti, tabliye kalınlığı ve donatı alanıdır.

Jones (1985) basit mesnetli önerilmeli prefabrike kirişlerin minimum maliyetli olarak tasarlanması için bir program geliştirmiştir. Çalışmada belirli bir kiriş enkesiti içindeki, önceden belirlenmiş bir donatı yerleşim ızgarası içinde donatıların optimum konumları, optimum sayısı ve optimum beton dayanımı belirlenmeye çalışılmıştır. Emniyet gerilmeleri, taşıma gücü momenti kapasitesi, çatlama momenti kapasitesi gibi sınırlayıcılar dikkate alınmıştır. Geliştirilen programın verimini göstermek için kutu kesitli kirişlere sahip çok açıklıklı bir otoyol köprüsünün tasarımı yapılmıştır.

Yu v.d. (1986), önerilmeli beton kutu kesitli köprü kirişlerinin optimum tasarımını sunmuşlardır. Çalışmada genel geometrik programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Maliyet fonksiyonu beton, önerilme donatısı ve metal kalıp maliyetinden oluşturulmuştur. Öngerme kuvveti ve dışmerkeziliği, kiriş yüksekliği tasarım değişkenleri olarak alınmıştır.



Lounis ve Cohn (1993) prefabrike ardçekim öngerilmeli beton I kirişler ve betonarme tabliyeden oluşan orta ve kısa açıklıklı otoyolu köprülerinin minimum maliyetli tasarımını içeren bir çalışma yapmışlardır. Üç aşamalı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılan çalışmada emniyet gerilemeleri ve taşıma gücü sınırlayıcıları dikkate alınmıştır. Optimizasyonun ilk aşamasında kiriş enkesit boyutları, tabliye kalınlığı, öngerilme donatısı ve betonarme donatısının miktarı, öngerme dışmerkeziliği gibi köprü bileşenleri dikkate alınmıştır. İkinci aşamada köprü açıklık sayısı, mesnet türü, açıklıkların oranı gibi karakteristikleri içeren köprü boy kesitinin optimizasyonu ve kiriş sayısı, tabliye yüksekliği gibi karakteristikleri içeren köprü enkesitinin optimizasyonu yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise, prefabrike I yada kutu kesitli kirişler üzerine yerleştirilmiş, kesintisiz yada ayrıık tabliyelerden oluşan köprüler gibi değişik yapı sistemleri ele alınmıştır. Çalışmada amaç fonksiyonu beton ve donatı malzemesi ile kolonlardaki birleşim maliyetlerinden oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde bir köprü sisteminin komple optimizasyonu ile ulaşılabilecek sonuçların, köprünün bir bileşeninin optimizasyonu ile ulaşılabilecek sonuçlara oranla daha verimli olacağı vurgulanmıştır.

Chon ve Lounis (1994) yine üç aşamalı optimizasyon yöntemini açıklığı 10 m ~ 15 m arasında, genişliği 8 m ~ 16 m arasında değişen kısmi ve tam öngerilmeli kirişlerden oluşan köprülere uygulamışlardır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu, minimum üstyapı maliyetini, minimum öngerilme donatısı ağırlığını, minimum beton hacmini, maksimum kiriş aralığını, minimum üstyapı yüksekliğini, maksimum uzunluk/yükseklik oranını, maksimum kullanılabilir açıklık mesafesini içermektedir. Dört şeritli, 20 m uzunluğunda tek açıklıktan oluşan bir köprü üzerinde yapılan araştırma sonucu, ayrıık döşemeli prefabrike I kirişlerden oluşan sistemlerin, kesintisiz döşemeli tek veya iki hücreli kutu kesitli kirişlerden oluşan sistemlere oranla daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir.

Lounis v.d. (1997) lineer olmayan bir optimizasyon programı kullanarak, T şekilli ardçekim parçalı köprü kirişlerinin ve I şekilli öncekim klasik köprü kirişlerinin optimum şekillerini belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada köprü tasarımı için AASHTO yönetmeliği dikkate alınmıştır. Çalışmada amaç fonksiyonu, belirli kiriş enkesitleri için maksimum kullanılabilir kiriş aralıklarının belirlenmesi olarak tanımlanmıştır. Tasarım değişkeni olarak kiriş içindeki öngerilmeli ve öngerilmesiz donatı alanları seçilmiştir. Program verisi olarak yapısal sistem özellikleri, kiriş enkesiti, malzeme özellikleri ve kiriş uzunluğu belirtilmektedir. Sunulan program çıktıları ise, maksimum kullanılabilir kiriş aralığı, öngerilme donatısı ve öngerilmesiz donatı alanlarını içermektedir. Mevcut

kullanılan üç farklı I şeklindeki kirişe bu çalışmada alternatif şekiller sunulmuş ve mevcut kirişler ile bu çalışmada sunulanların performansları karşılaştırılmıştır.

Sirca ve Adeli (2005), öngerilmeli prefabrikte I kirişli köprü üst yapısının toplam maliyetinin optimizasyonu için bir metot sunmuşlardır. Toplam maliyetin hesaplanmasında öngerilmeli beton, tabliye betonu, öngerilmeli I kirişlerin çelikleri, tabliyede kullanılan çelikler ve kalıp dikkate alınmıştır. Optimizasyon problemi ayrık tasarım değişkenlerini kullanan lineer olmayan bir problem olarak formüle edilmiştir. Problemin çözümünde ise yapay sinir ağları tekniğini baz alan bir yaklaşım kullanılmıştır. Tasarım değişkeni olarak, kiriş sayısı, standart AASHTO kesitlerinden seçilmiş öngerilmeli beton kirişlerin enkesit alanları ve yüzey alanları, tabliye kalınlığı, öngerilme donatısı alanı ve tabliye donatısı alanı alınmıştır. Çalışmada öngerilme kayıplarının dışındaki, AASHTO da eğilmeye göre hesaba ilişkin verilmiş olan formüller sınırlayıcı olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen metodun pratiğe uygunluğunu göstermek için bir örnek sunulmuştur.

Yukarda değinilen çalışmaların içeriği burada yapılan çalışmanın içeriğine yakınmış gibi görünmesine rağmen, bu çalışmaların hiçbirinde köprü enkesitindeki kiriş sayısını ve bu kirişlerin enkesit şeklini aynı anda optimum tasarım kriteri olarak alan bir yaklaşım kullanılmamıştır. Ayrıca yine bu çalışmaların hiçbirinde optimum tasarım yöntemi olarak genetik algoritma seçilmemiştir.

### **1.7. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı**

Uygulamada önerilmeli beton kirişli köprüler belli başlı ölçülere sahip standart profil şeklindeki kesitlerin kullanılması ile tasarlanmaktadır. Hangi tip kirişin kullanılacağına ise genellikle ayak aks aralığına, kiriş sarkma yüksekliğine ilişkin sınırlamalara ve deneyimlere bağlı olarak karar verilmektedir. Oysa köprüler bu iki karakteristiğin dışında köprü genişliği, yükleme durumu, trafik şeridi sayısı gibi pek çok karakteristiğe daha sahiptir. Dolayısıyla her bir öngerilmeli kiriş köprü üstyapısı için optimum malzeme maliyetini sağlayacak bir öngerilmeli kiriş enkesitinden söz edilebilir.

Bu çalışma, prefabrikte öncekim öngerilmeli beton bitişik I kirişlerden oluşan, kısa ve orta açıklıklı köprü üstyapılarının, genetik algoritma kullanılarak, malzeme maliyetinin optimizasyonunu içermektedir. Standart kesitler yerine, köprü karakteristiklerine bağlı olarak optimize edilmiş ve optimum sayıdaki profil öngerilmeli beton kirişlerin köprü enkesitinde kullanılması durumunda malzeme maliyetindeki değişimler incelenecektir.

Optimum çözüme ulaşmak için köprü üstyapısının topolojisini, köprü girişlerinin şeklini ve içindeki öngerilme donatısı miktarını belirleyen değişkenler çalışmada tasarım değişkeni olarak alınmıştır. Bu nedenle burada yapılan optimizasyon bir topoloji ve şekil optimizasyonu olarak da adlandırılabilir. Topoloji optimizasyonu tasarım değişkeni köprü üstyapısında kullanılacak giriş sayısıdır. Şekil optimizasyonu ise optimum giriş enkesit boyutlarının ve bu giriş içinde kullanılacak öngerilme donatısı miktarının belirlenmesi işlemidir.

Çalışmada gerilme, taşıma gücü, kullanılabilirlik gibi sınırlayıcılar AASHTO tarafından yayımlanmış olan Standard Specifications for Highway Bridges (AASHTO 2002) uyarınca dikkate alınmıştır. Ülkemizde konuyla ilgili olarak yayımlanmış olan yönetmelik ve standartların yetersiz olması, ayrıca uygulamada yapılan ve resmi kurumlarca onaylanmış projelerde de kullanılıyor olması nedeniyle AASHTO yönetmeliği tercih edilmiştir.

Çalışmanın amaç fonksiyonu olan köprü üstyapı maliyeti, öngerilmeli beton ve öngerilme donatısının maliyetini içermektedir. Öngerilmeli beton birim maliyeti, betonun malzeme ve işçilik maliyetinin yanısıra fabrikadan şantiye sahasına kadar olan taşıma maliyetini ve girişlerin yerlerine yerleştirilmesi maliyetini de içermektedir. Öngerilme donatısının birim maliyeti ise malzeme temin maliyetinin yanısıra kalıp içine yerleştirilmesi ve gerilmesi işlemlerinin maliyetini de içermektedir. Bu maliyetlerin hesaplanmasında Yol, Köprü, Bitümlü Kaplamalar ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi'nde (2005) belirtilen birim fiyatlar dikkate alınmıştır.

Topoloji ve şekil optimizasyonunun bir arada yapılması nedeniyle problemin klasik optimizasyon yöntemleriyle çözülmesi zordur. Bu nedenle bu çalışmada evrimsel bir optimum tasarım yöntemi olan ve ayırık tasarım değişkenlerini kullanarak sonuca giden genetik algoritma kullanılmıştır. Genetik algoritmanın performansına etkisinin araştırılması amacıyla çalışmada üç farklı çaprazlama ve mutasyon tekniği kullanılmıştır. Ayrıca yine bu amaç için farklı başlangıç nesli boyutları ve farklı tasarım değişkeni değer kümesi genişlikleri kullanılarak tasarımlar yapılmıştır.

Optimizasyon ve genetik algoritma inşaat mühendisliği uygulamalarında henüz pek kullanılmayan iki araştırma konusudur. Burada yapılan çalışmanın amaçlarından biri de uygulamaya dönük olması ve bu iki araştırma konusunun uygulamada da kullanılmasına yardımcı olmaktır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

### 2.1. Önçekim Öngerilmeli Beton Bitişik I Kirişli Köprü Üstyapısının Tasarımı

Bu bölümde çalışma kapsamında seçilen yapı sisteminin tasarımı ve boyutlandırılması ile ilgili bilgi verilecektir. Öngerilmeli kirişlere sahip köprü üstyapılarının hesabı birkaç adımı içermektedir. İlk olarak böyle bir yapının boyutlandırılması için dikkate alınması gereken yükler ve bu yüklerin taşıyıcı elemanlara ne şekilde dağıtılacağı belirlenecektir. Bunun ardından öngerilmeli kiriş hesabı için çok önemli olan öngerilme kayıplarının hesabı anlatılacaktır. Daha sonra ise öngerilmeli kirişlerin, sırasıyla eğilme ve kayma olmak üzere emniyet gerilmeleri yöntemi ile, eğilme ve kayma olmak üzere taşıma gücü yöntemi ile denetimlerinin ve sehim denetiminin nasıl yapılacağına yer verilecektir.

Halen ülkemizde öngerilmeli yapılar ile ilgili olarak TSE tarafından yayımlanmış TS 3233 (1979) standardı ve karayolu köprülerinin tasarımı ile ilgili olarak Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanmış Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname (1982) adlı yayınlar mevcuttur. Ancak yayımlanmış olan bu yayınlar bir köprü üst yapısını boyutlandırmak için bazı noktalarda yetersiz ve eksik kalmaktadırlar. Bu nedenle bu çalışmada köprü üst yapısının boyutlandırılması aşamasında, otoyol köprülerinin tasarımına yönelik olarak hazırlanmış kapsamlı bir yönetmelik olan, “American Association of State Highway and Transportation Officials” tarafından yayımlanmış “Standard Specifications for Highway Bridges” (2002) adlı yönetmelik hükümleri büyük ölçüde dikkate alınacaktır. Bu nedenle bu çalışma içinde yer alan sembollerde bu yönetmeliğe uygun olarak verilmiştir. Ülkemizde öngerilmeli kirişli köprü üstyapı projeleri hazırlayan firmalar ve bu projelerin denetimini yapan resmi kurumlar tarafından da bu yönetmelik esas kaynak olarak kabul edilmektedir.

Öngerilmeli elemanların, oluşan gerilmeler öngerilme anından başlamak üzere tüm kullanım süreleri içerisinde etkisi altında kalabilecekleri bütün elverişsiz durumlarda emniyet sınırları içerisinde kalacak, çatlak ve deformasyon yönünden kullanılabilir olacak ve taşıma güçleri de kırılmaya karşı yeterli emniyeti sağlayacak biçimde projelendirilmesi gerekmektedir. Tasarımda, elemanın yüksekliği boyunca şekil değiştirmenin lineer olduğu,

kesit çatlamadan önce gerilmenin şekil değiştirmeye lineer orantılı olduğu, kesit çatladıktan sonra betondaki çekme gerilmelerinin ihmal edildiği kabulleri yapılacaktır (AASHTO, 2002).

### **2.1.1. Yapının Tanımlanması**

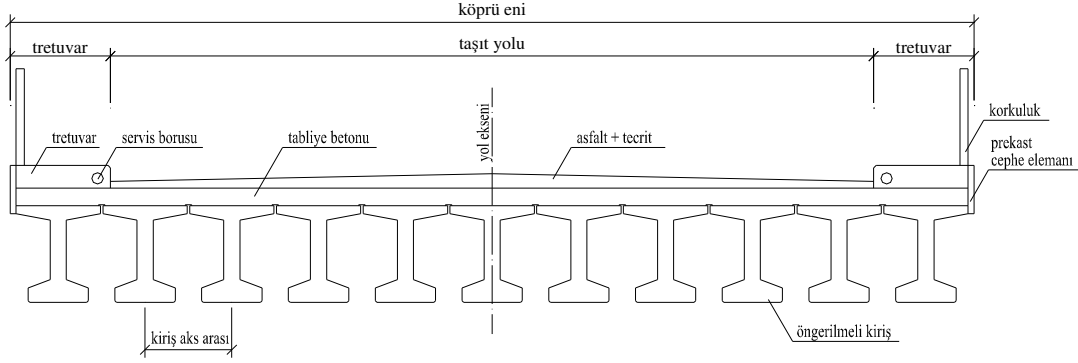
Bilindiği gibi öngerilmeli kirişlere sahip bir köprünün başlıca yapı elemanları temeller, ayaklar, öngerilmeli kirişleri ve tabliyedir. Bu çalışmada iki ayak arasındaki köprü üstyapısını oluşturan öngerilmeli kirişler ve tabliye dikkate alınmak suretiyle bir optimum tasarım gerçekleştirilecektir. Böyle bir yapının tasarlanması için uygulamada halen kullanılmakta olan bir çok sistem seçilebilir. Bu sistemler arasında içi boş değişik formdaki kutu kesitler, dolu gövdeli profil kesitler ve bunların değişik uyarlamaları sayılabilir. Burada, bu sistemlerden biri olan ve uygulamada yaygın olarak kullanılan, önçekim tekniğiyle öngerilme verilmiş bitişik I kirişlere sahip köprü üstyapısı sistem olarak seçilmiştir.

Böyle bir sistem, iki köprü ayağı arasına, köprü enkesiti boyunca başlıkları arasında son derece az mesafe kalacak şekilde yerleştirilmiş I şeklinde kesite sahip dolu gövdeli, önçekim tekniğiyle öngerilme verilmiş kirişler ve bu kirişler üzerine yerinde döküm tekniğiyle inşa edilmiş tabliyeden oluşmaktadır. Burada kullanılacak kiriş ebatları, kiriş sayısına, köprü ayak aralığına ve yükleme durumuna bağlı olarak değişmektedir. Tabliye kalınlığı ise taşıyacağı trafik yüküne bağlı olarak seçilmektedir.

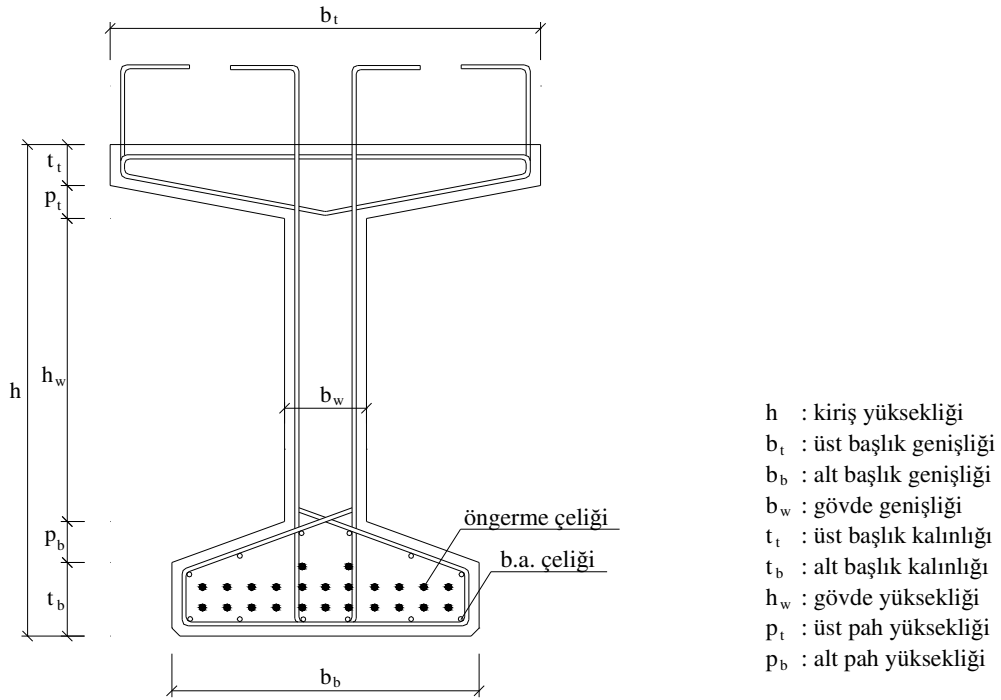
Aşağıda Şekil 3’de örnek bir önçekim öngerilmeli bitişik I kirişli köprü üstyapısı enkesiti, Şekil 4’de ise örnek bir önçekim öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti görülmektedir.

### **2.1.2. Yükler**

Bu kısımda açıklanacak olan yükler üst yapı elemanları yani tabliye ve ana taşıyıcı kirişlerin tasarımı için kullanılacak değerleri ifade etmektedir. Köprü üst yapısını oluşturan elemanların tasarımında yükleme durumu olarak sabit ve hareketli yükler dikkate alınacaktır. Bu yüklerin nasıl dikkate alınacağı ve kirişlere ne şekilde dağıtılacağı, ilgili yönetmeliklere uygun olarak, bu bölümde açıklanacaktır.



Şekil 3. Öncekim öngerilmeli bitişik I kirişli köprü üstyapısı enkesiti



Şekil 4. Öncekim öngerilmeli prefabrike I kiriş enkesiti

### 2.1.2.1. Sabit Yükler ve Kirişlere Dağılımı

Bu alışmada Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname'ye (1982) göre sabit yük olarak aşağıdaki yükler dikkate alınacaktır:

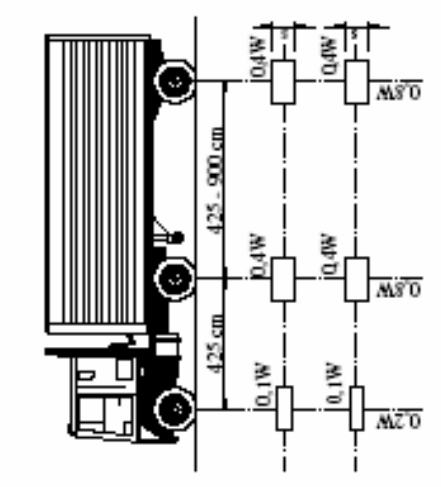
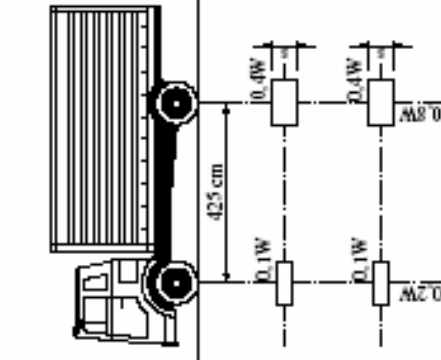
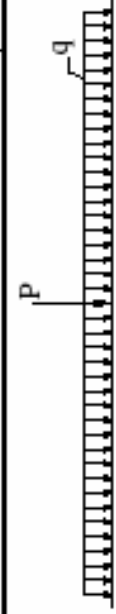
- a) ngerilmeli kiriş ağırlığı
- b) Tabliye ağırlığı
- c) Diğer yükler
  - c1) Kaplama ağırlığı
  - c2) Bordür ağırlığı
  - c3) Korkuluk ağırlığı
  - c4) Yaya yükü

Bu yüklerin prefabrike kirişlere eşit olarak dağıldığı kabulü ile bu yüklerden oluşan toplam ağırlık kiriş sayısına bölünerek her bir kirişe gelen yük belirlenecektir. Ardından kiriş ortasında oluşan maksimum moment ve mesnet iç yüzünde oluşan maksimum kesme kuvveti değerleri düzgün yayılı yük ile yüklü basit kiriş kabulü ile (a), (b) ve (c) yüklemeleri için ayrı ayrı hesaplanacaktır.

### 2.1.2.2. Hareketli Yükler

Köprülerin zerindeki hareketli yükler AASHTO (2002) Şartnamesine göre standart kamyonlardan veya standart kamyon katarına eşdeğer olan şerit yüklerinden ibarettir. Bu çalışmada yaya yükleri, sonuçları etkilemeyeceği düşünülerek hesaplarda sadelik sağlanması açısından sabit yük sınıfına dahil edilecektir. Tablo 1'de çeşitli yükleme sınıflarına göre standart kamyon yükleme ve şerit yükleme için dikkate alınması gereken yük değerleri verilmiştir. Bu tabloda yk sınıfını belirten sembollerden H iki dingilli bir kamyonu, S ise ona bağlı bir yarım treylere tekabül etmektedir. H harfinden sonra gelen rakam kamyonun iki dingilinden intikal eden W ağırlığını, S harfinden sonra gelen rakam ise yarım treylerin tek dingilinden intikal eden ağırlığı vermektedir. Şerit yükleme bir düzgün yayılı yük ve bir adet tekil yükten oluşmaktadır.

Tablo 1. Standart kamyon ve eşdeğer şerit yükleri

STANDART KAMYON					
Şerit yükü					
Yük sınıfı	H <sub>30</sub> – S <sub>24</sub>	H <sub>20</sub> – S <sub>16</sub>	H <sub>15</sub> – S <sub>12</sub>	H <sub>10</sub>	
W ağırlığı (kN)	300	200	150	100	
P (kN)	Eğilme	90	67,5	90	
	Kesme	135	97,5	130	
q (kN/m)	15	10	7,5	5	
s (cm)	75	50	38	25	

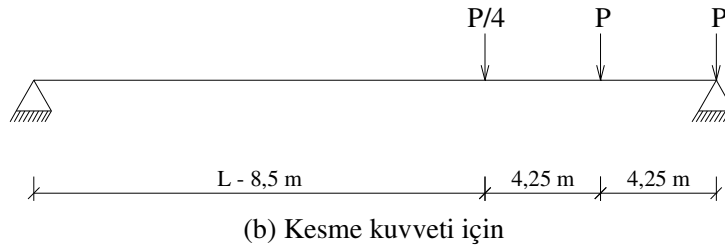
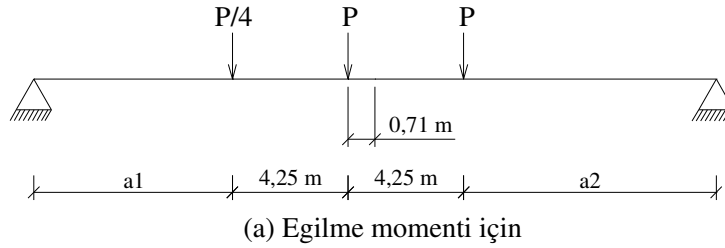


Gerek standart kamyon yükünün gerekse şerit yüklerinin 3,00 m lik bir genişliği kapladığı kabul edilir. Hesaplarda, bu yükleri yerleştirmek üzere kullanılacak birbirine eşit genişlikteki trafik şeritlerinin adedi Tablo 2’de gösterilmiştir.

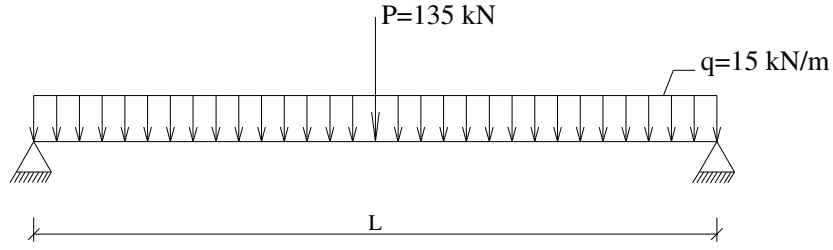
Tablo 2. Yol genişliğine bağlı olarak trafik şeridi adedi

Yol Genişliği (orta refüj genişliği hariç)	Trafik Şeridi Adedi
6,00 m – 9,00 m	2
9,01 m – 13,00 m	3
13,01 m – 16,50 m	4

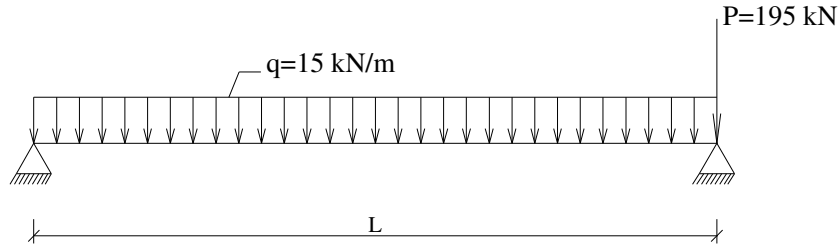
Şekil 5’de  $H_{30}-S_{24}$  standart kamyon yükünün ve Şekil 6’da  $H_{30}-S_{24}$  şerit yüklemesinin basit mesnetli kiriş üzerinde maksimum moment ve maksimum kesme kuvveti değerlerini verecek şekilde yerleştirilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 5.  $H_{30}-S_{24}$  kamyon yüklemesinin basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için (b) kesme kuvveti için en elverişsiz yerleşimi



(a) Eğilme momenti için



(b) Kesme kuvveti için

Şekil 6. H<sub>30</sub>-S<sub>24</sub> şerit yüklemenin basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için (b) kesme kuvveti için en elverişsiz yerleşimi

Öngörülmesi kırışlara standart kamyon yüklemesi ve şerit yükleme neticesinde oluşan maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri ayrı ayrı hesaplanacak, bu değerlerden büyük olanı hareketli yüklerden dolayı oluşan iç kuvvet olarak kabul edilecektir.

### 2.1.2.3. Dinamik Etki

Köprüden geçen taşıtların dinamik etkisini hesaba katmak amacı ile, standart kamyon veya şerit yüklerinden elde edilen gerilmeler, dinamik etki katsayısı ile çarpılırlar. Dinamik etki katsayısı

$$\varphi = 1 + \frac{15}{L + 37} \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntı ile hesaplanan dinamik etki katsayısı ( $\phi$ ) 1,30 değerinden küçük olmalıdır.

#### 2.1.2.4. Hareketli Yüklerin Kirişlere Dağılımı

Boylama kirişlerinin hesabında hareketli yüklerin boyuna yönde dağılmadığı kabul edilecektir. Her bir iç ve dış boylama kirişine hareketli yüklerin eşit olarak dağıldığı kabul edilerek, her bir boylama kirişin payına düşen hareketli yük miktarı,

$$\text{Yük katsayısı} = \frac{S}{D} \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda S boylama kirişlerin aks ara mesafelerini göstermektedir. D ise mm cinsinden

$$D = (1750 - 152N_L) + 213N_L(1 - 0,2C)^2 \quad (3)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $N_L$  trafik şeridi sayısını göstermektedir. C ise

$$\begin{aligned} C &= K(W/L) & , W/L < 1 \\ C &= K & , W/L \geq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda W köprü toplam genişliğini, L köprü boylama kirişlerinin hesap boyunu, K ise köprü ve kiriş tipine bağlı bir katsayı olup bu çalışmada seçilen köprü tipi için 2,2 olarak alınacaktır.

#### 2.1.2.5. Hareketli Yüklerin Azaltılması

Maksimum etkilerin, birçok trafik şeridinin aynı anda yüklenmesi ile elde edildiği hallerde, tam yük ihtimalinin çok zayıf olduğu gözönünde bulundurularak, hareketli yükten doğan etkilerin aşağıdaki yüzdesi alınmalıdır:

Bir veya iki şerit için.....	%100
Üç şerit için .....	%90
Dört veya daha fazla şerit için .....	%75

### 2.1.3. Malzeme

Öngerilmeli I kirişlerin imalatında kullanılan başlıca malzemeler beton, betonarme donatısı ve öngerilme donatısıdır. Öngerilmeli beton, yüksek dayanımlı çelik ve beton gibi yüksek kaliteli malzemelerin kullanımını gerektirmektedir. Öngerilmeli betonu oluşturan malzemelerin her biri, çelik ve beton, başlı başına birer bilimsel araştırma alanlarıdır. Bunların bir arada kullanımları, özellikleri ve üretim safhaları hakkında teknik literatürde yaygın bir bilgi mevcuttur. Burada sadece bu malzemelerin önemli karakteristikleri hakkında kısa bilgi verilecektir.

Öngerilmeli elemanlarda kullanılacak beton sınıfları TS 3233 (1979) Çizelge-4 de verilmektedir. Bu çizelgeye göre kullanılacak beton en az 30 MPa küp, 25 MPa silindir basınç dayanımlı (BS 25) olmalıdır. Öngerilmeli yapıların tasarımında betonun dayanımı kadar, büzülme ve sünme gibi zamana bağlı özellikleri de önem arz etmektedir.

Betonarme çeliği öngerilmeli kirişlerde genellikle kesme donatısı olarak kullanılmaktadır. Betonarme çeliği TS 500 (2000)'e uygun çelik çubuklardır. Çubuk olarak nervürlü donatı tercih edilmeli, ancak karakteristik akma dayanımı 420 MPa değerini aşmamalıdır.

Öngerilmeli betonda öngerilme donatısı olarak yüksek dayanımlı çelik kullanılması gerekmektedir. Aksi halde, öngerilme kayıplarından dolayı, çelikteki gerilmeler önemli ölçüde azalacak ve zamanla yok olacaktır. Öngerme çelikleri yüksek dayanımın yanı sıra yüksek gerilmelerde elastik sınırlar içinde kalabilmeli, dayanım sınırına kadar yeterli sünekliği gösterebilmeli, aderansı iyi olmalı, düşük gevşemeli olmalı, yorulmaya ve korozyona karşı dayanımlı, ekonomik ve kolay ulaşılabilir gibi özelliklere de sahip olmalıdır. Öngerme çeliği olarak, öngerme teli, öngerme toronu veya öngerme çubuğu kullanılabilir. Öngerilmeli betonda kullanılacak teller; çapları 1,5 mm den 7 mm ye kadar olan, kaplamasız, gerilmeden arınmış, orantılılık sınırı yükseltilmiş ve TS 3233 (1979) Çizelge-1 de verilen mekanik özelliklere sahip olacaktır. Öngerilme toronları iki veya daha fazla telin helis şeklinde üst üste sarılmaları ile elde edilen germe donatılarıdır.

Öngerme toronları TS 3233 (1979) Çizelge-2 de verilen mekanik özelliklere sahip olacaktır. Öngerme çubukları çapları 7 mm ile 32 mm arasına değişen, tek parçadan oluşan, sıcak çekilmiş, özel alaşımlı TS 3233 (1979) Çizelge-3 de verilen mekanik özelliklere sahip çubuklardır.

#### **2.1.4. Kiriş Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi**

Öngerilmeli beton kirişlerin boyutlandırılması için birçok aşamada kiriş mukavemet momenti, atalet momenti, enkesit alanı, öngerilme donatısı dışmerkeziliği gibi bazı kesit özelliklerinin önceden hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada dikkate alınan köprü üst yapısının ana elemanları, daha önce de bahsedildiği gibi, öngerilmeli beton kirişler ve tabliyedir. Yükleme aşamalarına göre bazen bu yükleri öngerilmeli kiriş tek başına bazen de tabliye ile birlikte taşımaktadır. Öngerilmeli kirişin tek başına çalıştığı kesite bundan böyle prefabrike kesit, tabliye betonu ile birlikte çalıştığı kesite ise kompozit kesit denecektir. Dolayısıyla kirişlerin boyutlandırılmasına geçilmeden önce prefabrike kesit ve kompozit kesit özelliklerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir.

Kirişlerin boyutlandırılması için gerekli olan bir başka bilgi ise öngerilmeli kiriş kesitindeki toplam öngerme kuvvetidir. Kesite öngerilme, imalatçı firmanın verilerine de bağlı olarak, öngerme çeliklerinin karakteristik kopma dayanımının %70 ~ %75 i oranında uygulanır. Dolayısıyla kesitteki toplam öngerme kuvveti  $P$ , öngerme çeliği karakteristik kopma dayanımının ( $f_s'$ ) yukarıda verilen oranlarının kesitteki öngerilme donatısı alanı ( $A_{ps}$ ) ile çarpılmasıyla hesaplanır.

#### **2.1.5. Kirişte Oluşan İç Kuvvetlerin Hesaplanması**

Bu çalışmada dikkate alınan köprü üst yapısına ait öngerilmeli kirişler basit olarak mesnetlenmiş moment aktarmayan kirişlerdir. Dolayısıyla sabit yükler ve hareketli yükler nedeniyle oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri, basit kiriş kabulüne göre hesaplanmaktadır. Kiriş öz ağırlığı, tabliye ağırlığı, kaplama ağırlığı ve diğer sabit yükler kiriş üzerinde çizgisel eşdeğer bir yayılı yük etkisi olarak alınıp, eşdeğer yayılı yükü yüklü basit kiriş olarak iç kuvvetler bulunmaktadır. Hareketli yükler olan kamyon yüklemesi ve

eşdeğer şerit yüklemesine ait elverişsiz yerleşimler ise daha önce belirtildiği gibi alınıp (bkz. Şekil 5 ve Şekil 6) yine basit kiriş için iç kuvvetler hesaplanmaktadır.

### 2.1.6. Öngerilme Kayıplarının Hesabı

Öncekim öngerilmeli bir kirişte oluşan öngerilme kayıpları büzülme, elastik kısılma, sünme ve donatının gevşemesinden kaynaklanan kayıpları içermektedir. Böylece kirişte oluşan toplam öngerilme kaybı,  $\Delta f_s$

$$\Delta f_s = SH + ES + CR_c + CR_s \quad (5)$$

olarak hesaplanacaktır. Burada SH betondaki büzülmeden dolayı oluşan öngerilme kaybını, ES betonun elastik kısılmasından kaynaklanan öngerilme kaybını,  $CR_c$  betondaki sünmeden kaynaklanan öngerilme kaybını ve  $CR_s$  ise öngerilme donatının gevşemesinden kaynaklanan öngerilme kaybını ifade etmektedir.

#### 2.1.6.1. Büzülme Kaybı

Kimyasal değişiklikler ve kuruma nedeniyle betonda zamana bağımlı olarak oluşan şekil değiştirmelere büzülme denmektedir. Betondaki büzülmeden dolayı oluşan kayıp MPa biriminden

$$SH = 117 - 1,03 RH \quad (6)$$

olarak hesaplanacaktır. Burada RH yıllık ortalama bağıl nem oranını göstermektedir.

#### 2.1.6.2. Elastik Kısılma Kaybı

Öngerilme kuvvetinden dolayı beton elemanların boylarının kısılmasına elastik kısılma denmektedir. Elastik kısılmadan dolayı oluşan öngerilme kaybı

$$ES = \frac{E_s}{E_c} f_{cir} \quad (7)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $E_s$  öngerilme çeliğinin elastisite modülünü,  $E_c$  betonun aktarma anındaki elastisite modülünü,  $f_{cir}$  ise aktarımdan hemen sonra sabit yük ve öngerilme kuvveti nedeniyle öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesini göstermektedir. Bu gerilme,

$$f_{cir} = \frac{F_i}{A_i} + \frac{F_i \cdot e_i^2}{I_i} - \frac{M_{g1} \cdot e_i}{I_i} \quad (8)$$

olarak hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $e_i$  ideal prefabrike kesit öngerilme çeliğinin dışmerkeziliğini,  $M_{g1}$  kiriş öz ağırlığından dolayı oluşan momenti,  $A_i$  ideal prefabrike kesitin alanını ve  $I_i$  ideal prefabrike kesitin atalet momentini ifade etmektedir.  $F_i$  ise ilk öngerme kuvvetini göstermekte olup,

$$F_i = A_{ps} \cdot f_{pi} \quad (9)$$

olarak hesaplanacaktır. Burada  $A_{ps}$  öngerilme donatısının alanını göstermektedir,  $f_{pi}$  ise AASHTO şartnamesine göre yeterli yaklaşımla gerilme azaltılmış çelikler için  $0,63 \cdot f_s'$  düşük gevşemeli çelikler için  $0,69 \cdot f_s'$  olarak dikkate alınacaktır.

### 2.1.6.3. Sünme Kaybı

Kalıcı yüklerden dolayı betonda zamana bağlı olarak oluşan şekil değiştirmeye sünme denmektedir. Sünmeden dolayı oluşan öngerilme kaybı

$$CR_c = 12 f_{cir} - 7 f_{cds} \quad (10)$$

Bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $f_{cds}$  öngerilme kuvvetinin uygulandığı andaki sabit yüklerin dışındaki tüm sabit yüklerden dolayı öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesini ifade etmektedir ve

$$f_{cds} = \frac{(M_{g2} - M_{g1}) \cdot e_i}{I_i} + \frac{M_{g3} \cdot e_{ci}}{I_{ci}} \quad (11)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda da  $M_{g2}$  kiriş ve tabliye ağırlığından dolayı oluşan momenti,  $M_{g3}$  kiriş ve tabliye ağırlığı dışındaki tüm sabit yüklerden dolayı oluşan momenti,  $e_{ci}$  ideal kompozit kesit öngerilme çeliği dışmerkeziliğini,  $I_{ci}$  ideal kompozit kesit atalet momentini göstermektedir.

#### 2.1.6.4. Öngerilme Donatısı Gevşeme Kaybı

Zamana bağlı olarak öngerilme donatısındaki gerilmede oluşan azalmaya donatının gevşemesi denmektedir. Öngerilme donatısının gevşeme kaybı genellikle imalatçı firma tarafından gerilme oranına bağlı bir değer olarak verilmektedir. Bu değer bilmediği durumlarda gerilme azaltılmış çelikler için MPa biriminden

$$CR_s = 138 - 0,4 ES - 0,2 (SH + CR_c) \quad (12)$$

bağıntısı ile ve düşük gevşemeli çelikler için ise yine MPa biriminden olmak üzere

$$CR_s = 34 - 0,1 ES - 0,05 (SH + CR_c) \quad (13)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

#### 2.1.7. Eğilme Durumu Emniyet Gerilmesi Denetimleri

Bu çalışmada gerilme denetimleri kirişin yükleme aşamalarına göre dört farklı durum incelenecektir. Yapılacak olan denetimler ve bu denetimler için beton alt ve üst liflerinde oluşacak gerilmeler aşağıda sırasıyla verilmektedir.



### 2.1.7.1. Eğilme Gerilmelerinin Hesabı

1. Denetim : Öngerilmenin ilk verildiği an dikkate alınacaktır. Bu denetimde yük olarak öngerilme kuvvetine ek olarak sadece kiriş öz ağırlığı mevcuttur. Öngerilme kayıpları minimum düzeyde olup, zamana bağlı öngerilme kayıpları henüz oluşmamış, sadece elastik kısalma kaybı mevcuttur. Bu aşama için prefabrike kesit alt ve üst ucunda oluşan gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{b1} = \frac{\eta_1 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_1 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{Mg_1}{W_{bi}} \quad (14)$$

$$\sigma_{t1} = \frac{\eta_1 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_1 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{Mg_1}{W_{ti}} \quad (15)$$

bağıntıları ile hesaplanabilmektedir. Bu bağıntılarda  $\eta_1$  minimum düzeydeki öngerilme kaybının oranını ifade etmekte olup sadece elastik kısalmayı içermektedir. Ayrıca P kesitteki toplam öngerilme kuvvetini,  $W_{bi}$  ve  $W_{ti}$  ideal prefabrike kesit için sırasıyla kiriş alt kenarına ve kiriş üst kenarına göre mukavemet momentlerini göstermektedir.

2. Denetim : Bu denetimde 1. denetime ilave olarak tabliye betonu ağırlığının da prefabrike kiriş tarafından taşındığı kabul edilmektedir. Öngerilme kayıplarının maksimum düzeyde olduğu dolayısıyla, elastik kısalmaya ilave olarak büzülme, sünme ve donatı gevşeme kayıplarının da oluştuğu varsayılmaktadır. Bu aşama için yine prefabrike kesit alt ve üst ucunda oluşan gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{b2} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{Mg_2}{W_{bi}} \quad (16)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{Mg_2}{W_{ti}} \quad (17)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda  $\eta_2$  maksimum düzeydeki öngerilme kaybı oranını ifade etmekte olup tüm öngerilme kayıplarını içermektedir.

3. Denetim : Bu denetimde taşıt yükü dışındaki tüm yüklerin mevcut olduğu, kiriş ve tabliye ağırlıkları prefabrike kesit, bordür, kaplama ve korkuluk yükleri ile yaya yüklerinin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilecektir. Bu denetimde de öngerilme kayıplarının maksimum olduğu varsayılacaktır. Prefabrike kesit alt ve üst ucunda oluşan gerilmeler ile kompozit kesit üst ucunda oluşan gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{b3} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{Mg_2}{W_{bi}} - \frac{Mg_3}{W_{bci}} \quad (18)$$

$$\sigma_{t3} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{Mg_2}{W_{ti}} + \frac{Mg_3}{W_{tci}} \quad (19)$$

$$\sigma_{ts3} = \frac{Mg_3}{W_{tsci}} \quad (20)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda  $W_{bci}$  ,  $W_{tci}$  ve  $W_{tsci}$  ideal kompozit kesit için sırasıyla kiriş alt kenarına, kiriş üst kenarına ve tabliye üst kenarına göre mukavemet momentlerini göstermektedir.

4. Denetim : Bu denetimde taşıt yükü de dahil olmak üzere tüm yüklerin mevcut olduğu kabul edilmektedir. Kiriş ve tabliye ağırlıklarının prefabrike kesit, diğer tüm yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı ve öngerilme kayıplarının yine maksimum düzeyde olduğu varsayılmaktadır. Bu aşama için de yine prefabrike kesit alt ve üst ucunda oluşan gerilmeler ile kompozit kesit üst ucunda oluşan gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{b4} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{Mg_2}{W_{bi}} - \frac{Mg_3 + M_h}{W_{bci}} \quad (21)$$

$$\sigma_{t4} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{Mg_2}{W_{ti}} + \frac{Mg_3 + M_h}{W_{tci}} \quad (22)$$

$$\sigma_{ts4} = \frac{Mg_3 + M_h}{W_{tsci}} \quad (23)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda  $M_h$  hareketli yüklerden dolayı oluşan maksimum momenti göstermektedir.

### 2.1.7.2. Eğilme Elemanlarında Emniyet Gerilmeleri

Bu kısımda öngerilmeli elemanlarda eğilme durumu için emniyet gerilmelerinin beton ve öngerilme donatısı için nasıl hesaplanacağı açıklanacaktır. Beton için eğilme yükleri altında emniyet gerilmeleri aktarma sırasında ve uzun süreli kullanım yükleri altında olmak üzere iki farklı durum için ayrı ayrı belirlenecektir.

#### 2.1.7.2.1. Aktarma Sırasında Beton Emniyet Gerilmeleri

Aktarma sırasında emniyet gerilmeleri öngerme kuvvetinin betona aktarıldığı andaki emniyet gerilmeleridir. Bu anda zamana bağlı öngerilme kayıpları henüz oluşmamıştır. AASHTO'ya göre önçekim öngerilmeli elemanlar için beton basınç emniyet gerilmesi,

$$\bar{\sigma}_{ci} = 0,60 f'_{ci} \quad (24)$$

bağıntısı ile, çekme emniyet gerilmeleri ise MPa biriminden,

$$\bar{\sigma}_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_{ci}} \quad (25)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Yukarıdaki bağıntılarda  $f'_{ci}$  betonun aktarma anındaki karakteristik silindirik basınç dayanımıdır. Bu çalışmada betonun aktarma anındaki karakteristik basınç dayanımı, uygulama projelerine bağlı bir genelleme yapılmak suretiyle, uzun süreli karakteristik basınç dayanımının %75'i olarak dikkate alınacaktır.

#### 2.1.7.2.2. Kullanım Yükleri İçin Beton Emniyet Gerilmeleri

Kullanım yükleri altında betonda emniyet gerilmeleri, yapısal analizde elemana etki yapacağı öngörülen tüm yükler ve deformasyonlardan oluşan yük etkileri için verilmiştir. Bu durumda zamana bağlı tüm öngerilme kayıplarının olduğu kabul edilmiştir. AASHTO'ya göre kullanım yükleri altında köprü elemanları için betonda basınç emniyet gerilmesi

$$\bar{\sigma}_{cf} = 0,40 f'_c \quad (26)$$

bağıntısı ile, çekme emniyet gerilmesi ise MPa biriminden,

$$\bar{\sigma}_{cf} = 0,25 \sqrt{f'_c} \quad (27)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntılarda  $f'_c$  betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir.

Tabliye betonu için basınç emniyet gerilmesi ise benzer şekilde,

$$\bar{\sigma}_{cs} = 0,40 \cdot f_{cs} \quad (28)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $f_{cs}$  tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı göstermektedir.

### 2.1.7.2.3. Öngerilme Çeliğinde Emniyet Gerilmeleri

AASHTO'ya göre öngerilme çeliği için emniyet gerilmeleri, öngerilmeden dolayı meydana gelecek çekme gerilmesi için, imalatçısının verdiği değeri aşmamak kaydıyla,  $f'_s$  öngerme çeliğinin karakteristik kopma dayanımını göstermek üzere,  $0,80 f'_s$  olarak alınabilir. Aktarmadan hemen sonra meydana gelebilecek çekme gerilmesi ise düşük gevşemeli çelikler için  $0,75 f'_s$  ve gerilme azaltılmış çelikler için ise  $0,70 f'_s$  olarak alınmalıdır.

### 2.1.8. Eğilme Durumu Taşıma Gücü Denetimleri

Eğilme taşıma gücü denetimi tabliye betonu ile prefabrike kiriş betonun oluşturduğu kompozit kesit ve prefabrike kesit için ayrı ayrı gerçekleştirilecektir. Eğilme elemanlarında, eğilme taşıma gücü değerinin, en elverişsiz yük tertibinden elde edilen hesap eğilme momenti değerinden büyük olması gerekmektedir.

Bu bölümde dikdörtgen ve tablalı kesitler için eğilme taşıma gücü direnme momentlerinin nasıl hesaplanacağı belirtilmektedir.

### 2.1.8.1. Dikdörtgen Kesitlerin veya Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalan ( $a \leq t$ ) Tablalı Kesitlerin Taşıma gücü Momenti

AASHTO yönetmeliğine göre dikdörtgen kesitler için eşdeğer dikdörtgen basınç bölgesi derinliği,

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{su}^*}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \quad (29)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada  $f_{su}^*$  öngerme çeliği azaltılmış hesap dayanımını,  $b$  ise tablalı kesitlerde tabla genişliğini yada dikdörtgen kesit genişliğini göstermektedir. Bu bağıntı ile hesaplanan değer, tablalı kesit başlık kalınlığına eşit veya küçük olduğu kesitler dikdörtgen kesit olarak değerlendirilmektedir. Dikdörtgen kesitler için taşıma gücü direnme momenti,

$$\phi M_n = \phi \cdot \left[ A_{ps} \cdot f_{su}^* \cdot d \cdot \left( 1 - 0,6 \cdot \frac{\rho_p \cdot f_{su}^*}{f_c'} \right) \right] \quad (30)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $d$  basınç gerilmesinin maksimum olduğu noktadan öngerilme kuvvetinin ağırlık merkezine olan mesafeyi (faydalı yükseklik),  $\rho_p$  ise kesitteki öngerilmeli donatı oranının yüzdesini göstermektedir.

### 2.1.8.2. Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalmayan ( $a > t$ ) Tablalı Kesitlerin Taşıma gücü Momenti

Tablalı kesitler için eşdeğer dikdörtgen basınç bölgesi derinliği,

$$a = \frac{A_{sr} \cdot f_{su}^*}{0,85 \cdot f_c' \cdot b_w} \quad (31)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada  $A_{sr}$  tablalı kesitin gövde bölümünün basınç dayanımına karşılık gelen öngerilme donatısı miktarının alanını,  $b_w$  ise tablalı kesitin gövde genişliğini ifade etmektedir. Bu bağıntı ile hesaplanan değer, tablalı kesit başlık kalınlığından büyük olan kesitler için taşıma gücü direnme momenti değeri,

$$\phi M_n = \phi \left\{ A_{sr} \cdot f_{su}^* \cdot d \cdot \left[ 1 - 0,6 \cdot \left( \frac{A_{sr} \cdot f_{su}^*}{b_w \cdot d \cdot f_c'} \right) \right] + 0,85 \cdot f_c' \cdot (b - b_w) \cdot t \cdot (d - 0,5 \cdot t) \right\} \quad (32)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Yukarıdaki bağıntılarda yer alan  $A_{sr}$  değeri ise

$$A_{sr} = A_{ps} - A_{sf} \quad (33)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda ise  $A_{sf}$  tablalı kesit başlığının gövde bölümü dışında kalan kesimlerinin basınç dayanımına karşılık gelen öngerilme donatısı miktarının alanını göstermekte olup,

$$A_{sf} = 0,85 \cdot f_c' \cdot (b - b_w) \cdot t / f_{su}^* \quad (34)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

### 2.1.8.3. Eğilme Taşıma Gücü Çelik Gerilmesi

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan öngerilme donatısı için azaltılmış hesap dayanımı, detaylı analizler neticesinde daha kesin olarak belirlenemiyorsa, sadece öngerilmeli donatının kullanıldığı kesitlerde aderanslı elemanlar için

$$f_{su}^* = f_s' \cdot \left[ 1 - (\gamma^* / \beta_1) \cdot (\rho_p \cdot f_s' / f_c') \right] \quad (35)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntı ile hesaplanan değer hiçbir zaman öngerme çeliği akma dayanımından ( $f_y^*$ ) büyük olmamalıdır. Yukarıdaki bağıntıda  $\gamma^*$  öngerme çeliğinin türüne bağlı bir katsayı olup AASHTO (2002) standardına göre

düşük gevşemeli çelikler için,  $\gamma^* = 0,28$

gerilme azaltılmış çelikler için,  $\gamma^* = 0,40$

çubuklar için,  $\gamma^* = 0,55$

olarak alınacaktır.  $\beta_1$  ise beton kalitesine bağlı bir katsayı olup

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,85 & , f_c' \leq 28 \text{ MPa} \\ \beta_1 &= 0,85 - (0,05 \cdot (f_c' - 28) / 7) & , f_c' > 28 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (36)$$

olarak belirlenecek ve bu değer hiçbir zaman 0,65 den küçük olmayacaktır.

### 2.1.9. Süneklik Sınırları

#### 2.1.9.1. Maksimum Öngerilme Donatısı Oranı

Öngerilmeli beton elemanlar, donatı akma gerilmesine ulaştığı zaman maksimum kapasitede olacak şekilde tasarlanabilir. Donatı oranı göstergeleri dikdörtgen ve tablalı kesitler için sırasıyla

$$(\rho_p \cdot f_{su}^*) / f'_c \quad (37)$$

$$A_{sr} \cdot f_{su}^* / (b_w \cdot d \cdot f'_c) \quad (38)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Bu bağıntılar ile hesaplanan değerlerin AASHTO (2002) ya göre  $0,36\beta_1$  değerini aşmaması gerekmektedir.

### 2.1.9.2. Minimum Öngerilme Donatısı Oranı

Kesitteki toplam donatı miktarı, kritik kesitte çatlama momenti değerinin 1,2 kat daha fazla bir direnme momenti oluşumunu sağlayacak düzeyde olmalıdır. Kesit çatlama momenti değeri ise kompozit kesit için;

$$M_{cr,c}^* = W_{bci} \cdot (f_r + f_{pe}) - M_{g1} \cdot (W_{bci} / W_{bi} - 1) \quad (39)$$

bağıntısı ile, prefabrike kesit için ise

$$M_{cr,p}^* = W_{bi} \cdot (f_r + f_{pe}) \quad (40)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntılarda  $f_r$  kesit çatlama modülünü göstermekte olup MPa biriminden

$$f_r = 0,62 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (41)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır.  $f_{pe}$  ise tüm öngerilme kayıpları düşüldükten sonra kesit alt ucunda sadece öngerme kuvveti nedeniyle oluşan gerilme değerini göstermekte olup

$$f_{pe} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} \quad (42)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır.



### 2.1.10. Kayma Emniyet Gerilmelerine Göre Hesap

Kayma emniyet gerilmeleri denetimi, eğilmenin aktarma anında ve kullanım yükleri altında olması bakımından iki farklı yükleme aşaması için yapılacaktır. Buna göre aktarma anı için kayma gerilmeleri

$$\tau_i = \frac{S_i \cdot V_{g2}}{b_w \cdot I_i} \quad (43)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $S_i$  ideal prefabrike kesitin statik momentini,  $V_{g2}$  giriş ve tabliye ağırlığından dolayı oluşan kesme kuvvetini göstermektedir. Kullanım yükleri için kayma gerilmeleri ise

$$\tau_f = \frac{S_{ci} \cdot (V_{g2} + V_{g3} + V_h)}{b_w \cdot I_{ci}} \quad (44)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $S_{ci}$  ideal kompozit kesit statik momentini,  $V_{g3}$  giriş ve tabliye ağırlığı dışındaki tüm sabit yüklerin neden olduğu kesme kuvvetini,  $V_h$  ise hareketli yüklerden dolayı oluşan maksimum kesme kuvvetini göstermektedir.

Kullanım yükleri için beton kayma emniyet gerilmesi  $\bar{\tau}_f$  beton basınç dayanımına bağlı olarak, MPa biriminden  $0,50\sqrt{f_c}$  bağıntısı ile hesaplanacaktır. Aktarma anındaki kayma emniyet gerilmesi  $\bar{\tau}_i$  yine aynı bağıntı ile hesaplanacak ancak beton basınç dayanımı 0,75 ile çarpılacaktır.

### 2.1.11. Kesme Taşıma Gücü Hesabı

Öngerilmeli giriş kesitinin kesme taşıma gücü, öngerilmeli beton kesme taşıma gücü ve kayma donatısı kesme taşıma gücüne bağlı olarak

$$V_u \leq \phi \cdot (V_c + V_s) \quad (45)$$

bağıntısını sağlayacak şekilde hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $V_u$  dikkate alınan kesitteki hesap kesme kuvvetini,  $V_c$  itibari beton kesme dayanımını,  $V_s$  ise kesme donatısı tarafından sağlanan itibari kesme dayanımını göstermektedir.

### 2.1.11.1. Beton Kesme Taşıma Gücü

Beton tarafından sağlanan kesme dayanımı  $V_c$ , hesaplanacak  $V_{ci}$  ve  $V_{cw}$  değerlerinden küçük olanı olarak dikkate alınacaktır.

Kesme kuvveti ve momentin birleşimi sonucu eğik çatlakların olduğu andaki beton kesme dayanımı olan,  $V_{ci}$

$$V_{ci} = 0,05 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d + V_d + \frac{V_i \cdot M_{cr}}{M_{max}} \quad (46)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıda birimler N ve mm cinsindedir. Bu bağıntıda  $V_d$  sabit yüklerden dolayı oluşan ve yük katsayıları ile çarpılmamış kesme kuvvetini göstermektedir. Bu bağıntı ile hesaplanan değer  $0,14\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$  değerinden küçük olmayacak ve  $d$  değeri  $h$  kompozit kesit yüksekliğini göstermek üzere  $0,8h$  dan küçük olmayacak şekilde alınacaktır. Buradaki kesitte dış yükler nedeniyle oluşan çatlama momenti,  $M_{cr}$ ,

$$M_{cr} = \frac{I}{Y_t} \left( 0,5\sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right) \quad (47)$$

bağıntısı ile Nmm biriminden hesaplanabilmektedir. Bu bağıntıdaki  $Y_t$  kompozit brüt kesit ağırlık merkezinin kesit alt ucuna olan mesafesini göstermektedir.  $f_d$  ise sabit yükler nedeniyle kesit alt ucunda oluşan çekme gerilmesini göstermekte olup hesap yapılan bölüm mesnet bölgesinde olduğundan sıfır alınacaktır. Yukarıdaki bağıntıda yük katsayılarıyla çarpılmış dış yükler nedeniyle oluşan maksimum hesap momenti,  $M_{max}$ , ve hesap kesme kuvveti,  $V_i$ , kesitte maksimum momenti oluşturan yük kombinasyonundan hesaplanmalıdır.

Gövdedeki asal çekme gerilmelerinin aşırı düzeye çıkması nedeniyle eğik çatlakların oluştuğu andaki beton kesme dayanımı olan  $V_{cw}$  değeri ise N biriminden

$$V_{cw} = (0,29\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc}) \cdot b_w \cdot d + V_p \quad (48)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Ancak d burada da 0,8h değerinden küçük alınmamalıdır. Bu bağıntıda  $V_p$  öngerme kuvvetinin düşey bileşenini ifade emekte olup bu çalışmada öngerme tellerinin düz çekildiği kabul edildiğinden sıfır alınacaktır.  $f_{pc}$  ise kompozit brüt kesit ağırlık merkezinde tüm kayıpların oluşumundan sonra dış yükler nedeniyle oluşan beton basınç gerilmesini ifade etmektedir.

Yukarıdaki bağıntılarda, kiriş mesnet kesitinde kılıflamadan ötürü öngerme kuvvetinin yarıya indiği kabulü yapılacaktır.

### 2.1.11.2. Kesme Donatısı Taşıma Gücü

Kesme donatısı taşıma gücü

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{sy} \cdot d}{s} \quad (49)$$

olarak alınabilir. Burada  $A_v$  belli bir s aralığındaki kesme donatısı alanını ve  $f_{sy}$  ise kesme donatısı karakteristik akma dayanımını göstermektedir.  $V_s$  değeri MPa biriminden olmak üzere  $0,66\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$  ile hesaplanan değerden büyük alınmamalıdır ve bu bağıntıdaki d değeri 0,8h değerinden az olmamalıdır.

Minimum kesme donatısı alanı  $\text{mm}^2$  cinsinden olmak üzere

$$A_v = \frac{0,34 \cdot b_w \cdot s}{f_{sy}} \quad (50)$$

olarak hesaplanabilir. Bu bağıntıda  $f_{sy}$  değeri MPa birimindedir.

### 2.1.12. Taşıma Gücü Yöntemi İçin Yük Katsayıları ve Dayanım Kapasitesi Azaltma Faktörleri

Yapıyı etkileyen yükler ve yapının gerçek dayanımı, hesaplarda varsayılanlardan değişik olabilir. Yük etkisi ve dayanım sabit olmayıp zamanla büyük değişiklikler gösterebilirler. Yapı emniyeti, ancak dayanımın yük etkisinden büyük veya ona eşit olması ile sağlanabileceğinden yükün varsayılandan büyük, dayanımın ise varsayılandan küçük olma olasılıkları gözönünde bulundurularak, yükler yük katsayıları ile çarpılarak artırılır, dayanım ise dayanım kapasitesi azaltma katsayıları ( $\Phi$ ) ile çarpılmak suretiyle azaltılır. AASHTO (2002) ya göre yapıya etkiyen yükler

$$N = \gamma[\beta_D \cdot D + \beta_L(L + I)] \quad (51)$$

bağıntısındaki katsayılarla çarpılmak suretiyle hesaplanacaktır. Bu bağıntıda N hesap yükünü, D sabit yükleri, L hareketli yükü, I hareketli yük dinamik etkisini,  $\gamma$  yük faktörünü,  $\beta_D$  sabit yük katsayısını,  $\beta_L$  ise hareketli yük katsayısını göstermektedir. Aynı standartta sadece sabit yük ve hareketli yükün etki ettiği yapılar için bu katsayılar

$$\gamma = 1,3$$

$$\beta_D = 1,0$$

$$\beta_L = 1,67$$

olarak verilmiştir.

Yine AASHTO (2002) standardına göre dayanım kapasitesi azaltma katsayıları ise eğilmeye göre hesapta  $\Phi = 1,0$  ve kesmeye göre hesapta  $\Phi = 0,90$  olarak alınacaktır.

### 2.1.13. Sehim Denetimi

Sınırlı öngerilmeli elemanların dışında öngerilmeli beton kirişlerde hareketli ve kısa süreli yüklemeler için sehim, elastik analiz ile yani çatlama kesit kabulü ve 28 günlük beton elastisite modülü değerleri kullanılmak suretiyle hesaplanabilir. Öngerilmeli elemanların aktarma sırası ve kullanım yükleri altında hesaplanan sehim değerleri TS 500 (2000) de verilen sınırları aşmamalıdır.

Uzun süreli yükler altındaki sehim hesabı için önerilme kuvveti, kalıcı yükler altındaki beton kesit özellikleri ve sünmeden dolayı değişen beton elastisite modülü TS 3233 (1979)'e göre,

$$E_{cc} = \frac{E_c}{1 + k_c \cdot E_c} \quad (52)$$

ile hesaplanabilir. Burada  $E_c$  28 günlük beton elastisite modülünü,  $k_c$  ise 0,1 MPa'lık gerilmeye betonun sünme miktarını göstermektedir ve ön çekmeli elemanlar için TS 3233 (1979)'e göre  $k_c = 48 \times 10^{-7}$  olarak dikkate alınacaktır.

AASHTO (2002)'da hareketli yükler ve bu yüklerin neden olduğu dinamik etki altında, köprü üst yapı kirişlerinde oluşan maksimum sehimin açıklığa oranının 1/800 den küçük olması, ayrıca şehir merkezinde bulunan köprüler için ise tercihen 1/1000 değerinin altında kalması tavsiye edilmektedir. Bunlara ilaveten aktarma anında ve yapım anındaki yüklemeler altında sehimin 1/500 den küçük olması ve nihai sehimin de yine 1/500 değerinin altında kalması yeterli kabul edilecektir.

Burada sehim denetimi de gerilme denetiminde olduğu gibi dört farklı yükleme aşaması için gerçekleştirilecektir. 1. denetim önerilme kayıplarının minimumda olduğu ve sadece kiriş öz ağırlığının mevcut olduğu durum (aktarma anı) için yapılacaktır. Bu durum için sehim

$$f_1 = -\frac{P \cdot e_i \cdot L^2}{8 \cdot E_c \cdot I_i} + \frac{5 \cdot G_1 \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i} \quad (53)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $G_1$  önerilmeli kiriş öz ağırlığından kaynaklanan yükü göstermektedir. 2. denetim önerilme kayıplarının maksimumda olduğu, kiriş öz ağırlığına ilaveten tabliye ağırlığının da bulunduğu ve tüm yüklerin prefabrike kesit tarafından taşındığı durum için yapılacaktır. Bu durum için sehim

$$f_2 = f_1 + \frac{5 \cdot G_2 \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i} \quad (54)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $G_2$  tabliye öz ağırlığından kaynaklanan yükü göstermektedir. 3. denetim öngerilme kayıplarının maksimumda olduğu ve diğer sabit yüklerin de mevcut olduğu durum için yapılacaktır. Bu durum için sehim

$$f_3 = f_2 + \frac{5 \cdot G_3 \cdot L^4}{384 \cdot E_{cc} \cdot I_{ci}} \quad (55)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada  $G_3$  kiriş ve tabliye öz ağırlı dışındaki diğer sabit ağırlıklardan kaynaklanan yükü ifade etmektedir. 4. denetim tüm öngerilme kayıplarının maksimumda olduğu ve kirişin hareketli yüklerin etkisi altında olduğu durum için yapılacaktır. Bu durumda şerit yüklemesi ile kamyon yüklemesi için ayrı ayrı sehimler hesaplanacak ve bu sehim değerlerinden büyük olanı 4. denetim için sehim miktarı olarak dikkate alınacaktır. Şerit yüklemesi için sehim miktarı, eğilme etkisi için verilmiş olan yükleme durumu (bkz. Şekil 6) dikkate alınmak suretiyle,

$$f_{4,1} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_c \cdot I_{ci}} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I_{ci}} \quad (56)$$

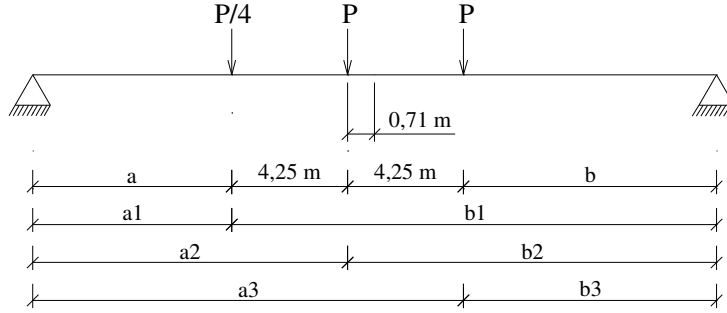
bağıntısı ile hesaplanacaktır. Burada P ve q sırasıyla şerit yüklemesindeki tekil yükü ve yayılı yükü göstermektedir. Benzer şekilde kamyon yüklemesi için sehim miktarı, eğilme etkisi için verilmiş olan yükleme durumu (bkz. Şekil 7 ) dikkate alınmak suretiyle

$$f_{4,2} = \frac{P \cdot L^2}{12 \cdot E_c \cdot I_{ci}} \left[ \frac{b_1}{4} \left( \frac{a_1}{L} \left( 1 + \frac{b_1}{L} \right) - 0,25 \right) + b_2 \left( \frac{a_2}{L} \left( 1 + \frac{b_2}{L} \right) - 0,25 \right) + a_3 \left( \frac{b_3}{L} \left( 1 + \frac{a_3}{L} \right) - 0,25 \right) \right] \quad (57)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntılarda P ve q değerleri dinamik etki katsayısı ve yük dağıtma katsayısı ile çarpılmış değerler olarak hesaba katılacaktır. Nihai sehim ise

$$f = f_3 + f_4 \quad (58)$$

bağıntısıyla hesaplanacaktır.



Şekil 7. H<sub>30</sub>-S<sub>24</sub> kamyon yüklemesi maksimum sehim yerleşimi

## 2.2. Optimum Tasarım Probleminin Tanımlanması

Daha öncede değinildiği gibi, yapıların tasarımında en önemli iki kriter emniyet ve maliyettir. Yapıların optimum tasarımı denince akla ilk gelen, yeterli düzeyde emniyete sahip yapının mümkün olan en az maliyetle yapılabilmesidir. Yapının maliyetini en aza indirebilmek için ise yapının güvenlik sınırları içerisinde kalarak mümkün olan en az malzeme kullanılacak şekilde projelendirilmesi gerekmektedir.

Yapılacak bu çalışmada önerilmeli beton kirişler kullanılarak inşa edilen çok açıklıklı köprülerin üst yapılarının maliyet yönünden optimum tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu tür bir köprünün üst yapısını oluşturan başlıca iki yapı elemanı önerilmeli beton kirişler ve yerinde dökme tabliyedir. Önerilmeli beton kirişlerin ana malzemesi prefabrike beton, önerilme donatısı ve betonarme donatısı, tabliyeyi oluşturan başlıca malzemeler ise yerinde dökme beton ve betonarme donatısı olarak sıralanabilir. Ancak tabliye betonun kalınlığı ve içine konması gereken betonarme donatısı miktarı, üzerindeki trafik yüküne bağlı olup optimum tasarıma etki edebilecek önemli bir faktör oluşturmamaktadır. Bir köprünün üst yapısının inşaatına etki edecek başka bir çok malzeme ve diğer giderlerin olacağı açıktır. Ancak bu çalışmada burada sayılan ve köprü üst yapı maliyetinin çok önemli bir kısmını teşkil eden iki malzeme olan prefabrike beton ve önerilme donatısının maliyeti dikkate alınarak bir optimum tasarım gerçekleştirilecektir.

### 2.2.1. Topoloji ve Enkesit Optimum Tasarımı

Öngerilmeli öncekim I kirişli köprülerin üst yapısının optimum tasarımı topoloji ve enkesit özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilecektir. Böyle bir yapının topolojik tasarımı belirli bir tabliye genişliğine sahip olan köprü üst yapısının enkesitinde bulunması gereken kiriş adetinin belirlenmesi şeklinde tanımlanabilir. Enkesit optimum tasarımı ise öngerilmeli öncekim kirişlerin enkesit boyutlarının ve kiriş içinde bulunması gereken öngerilme donatısının miktarının optimum değerlerinin belirlenmesi işlemidir.

Bu çalışmada, yapının optimum topolojisi ve enkesiti birbirinin ardı sıra değil, genetik algoritma kullanılmak suretiyle aynı anda belirlenecektir. Böylece optimum kiriş sayısı ve bu kirişlerin enkesit şekilleri ve içinde bulunması gereken donatı alanı tek seferde bulunması hiç şüphesiz bulunacak sonuçların daha optimum değerler olacağı anlamına gelmektedir.

### 2.2.2. Amaç Fonksiyonu

Her bir optimum tasarım problemi amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılardan oluşur. Amaç fonksiyonu problemin tipine ve ihtiyaçlara göre kurulur. Tasarım değişkenleri, optimum çözüme ulaşmak için optimum tasarım boyunca değiştirilebilen sistem parametreleridir. Sınırlayıcılar ise optimum tasarım sonucunda ulaşılan sonucun kullanılabilir sınırlar içinde kalmasını sağlayan yapısal sınırlamalardır.

Optimum tasarım probleminin amacını oluşturan iki malzeme olan prefabrike beton ve öngerilme donatısı birim fiyatları birbirinden farklı olduğundan bu malzemelerin miktarlarının ayrı ayrı en aza indirilmesi maliyetin en aza inmesi anlamına gelmemektedir. Bu nedenle optimum tasarım problemi doğrudan malzeme miktarlarına bağlı bir fonksiyon olarak değil, malzeme miktarlarının malzeme birim fiyatlarıyla çarpılması sonucu bulunacak malzeme maliyetlerinin bir fonksiyonu olarak kurulacaktır. Buradan hareketle en genel anlamda köprü üst yapısı optimum tasarım probleminin amaç fonksiyonu,

$$C = C_{pc} + C_{ps} \quad (59)$$



olarak yazılabilir. Burada  $C_{pc}$  prefabrike betonun maliyetini,  $C_{ps}$  ise öngerilme donatısının maliyetini göstermektedir.

Prefabrike betonun maliyeti, bir kesitte kullanılacak öngerilmeli kiriş sayısına, kiriş boyuna ve kirişlerin enkesit alanına bağlı olarak,

$$C_{pc} = n_b \cdot A_g \cdot L \cdot UC_{pc} \quad (60)$$

şeklinde verilebilir. Burada  $n_b$  köprü kesitinde kullanılan öngerilmeli kiriş sayısını,  $A_g$  öngerilmeli kiriş brüt enkesit alanını göstermekte olup en kesit boyutlarına bağlı olarak hesaplanacaktır,  $UC_{pc}$  ise prefabrike kiriş betonu birim fiyatını göstermektedir. Öngerilme donatısının maliyeti ise,

$$C_{ps} = n_b \cdot A_{ps} \cdot L \cdot UC_{ps} \quad (61)$$

şeklinde verilebilir. Burada  $UC_{ps}$  öngerilme donatısının birim fiyatını göstermektedir.

### 2.2.3. Tasarım Değişkenleri

Köprü en kesitindeki öngerilmeli kiriş adedini gösteren  $n_b$ , optimum tasarım probleminin en önemli tasarım değişkenlerinden biridir. Öngerilmeli kiriş enkesit alanı tek başına bir tasarım değişkeni olmayıp, tasarım değişkeni olarak dikkate alınacak olan enkesit boyutları olan kiriş yüksekliği, üst başlık kalınlığı, alt başlık kalınlığı, gövde genişliği, alt başlık genişliği, üst guse yüksekliği, alt guse yüksekliği değerlerine bağlı olarak tasarım sırasında hesaplanacaktır. Öngerilmeli donatı alanı  $A_{ps}$ , yine doğrudan tasarım değişkeni olarak alınmayacak olup onun yerine çapları problemin türüne göre önceden belirlenmiş öngerme çeliklerinden kullanılacak donatı sayısı tasarım değişkeni olarak problemin çözümünde kullanılacaktır. Bunun dışındaki değerler köprünün geometrik ve ekonomik özelliklerine bağlı olarak önceden seçilmiş sabit değerlerdir.

Böylece optimum tasarım probleminde çözüme ulaşmak için dikkate alınması düşünülen 9 adet tasarım değişkeni aşağıda verilmektedir.

- $n_b$  : Köprü üstyapısını oluşturan öngerilmeli kiriş sayısı  
 $h_b$  : Öngerilmeli kiriş yüksekliği  
 $b_b$  : Öngerilmeli kiriş alt başlık genişliği  
 $b_w$  : Öngerilmeli kiriş gövde genişliği  
 $t_t$  : Öngerilmeli kiriş üst başlık kalınlığı  
 $t_b$  : Öngerilmeli kiriş alt başlık kalınlığı  
 $p_t$  : Öngerilmeli kiriş üst guse yüksekliği  
 $p_b$  : Öngerilmeli kiriş alt guse yüksekliği  
 $n_{ps}$  : Her bir öngerilmeli kiriş kesitinde kullanılan öngerilme donatısı adedi

#### 2.2.4. Tasarım Parametreleri

Bir optimum tasarım problemine başlamadan önce tasarım değişkenlerinin yanısıra tasarım parametreleri de belirlenir. Tasarım parametreleri optimum tasarım süresince sabit kalan yapı karakteristik özellikleridir (Lin ve Frangopol, 1996). Bu çalışmada sonuçları önemli ölçüde etkilemesi düşünülen tasarım parametreleri de aşağıda verilmektedir.

- Köprü ayak aks aralığı (L)  
 Köprü tabliye genişliği (W)  
 Taşıt yolu genişliği  
 Trafik şeridi sayısı ( $N_L$ )  
 Tabliye kalınlığı  
 Tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı ( $f_{cs}$ )  
 Tabliye betonu elastisite modülü ( $E_{cs}$ )  
 Prefabrike beton karakteristik basınç dayanımı ( $f'_c$ )  
 Prefabrike beton elastisite modülü ( $E_c$ )  
 Öngerilme donatısı karakteristik kopma dayanımı ( $f'_s$ )  
 Öngerilme çeliği elastisite modülü ( $E_s$ )  
 Betonarme çeliği karakteristik akma dayanımı ( $f_{sy}$ )  
 Prefabrike beton birim fiyatı ( $UC_{pc}$ )  
 Öngerilme donatısı birim fiyatı ( $UC_{ps}$ )

Kiriş üst başlıkları ara mesafesi (F)  
 Tabliye-kiriş ara mesafesi  
 Öngerilme donatısı hesap çapı ( $d'_{ps}$ )  
 Beton birim hacim ağırlığı  
 Kaplama birim hacim ağırlığı  
 Kaplama kalınlığı  
 Bordür kalınlığı  
 Korkuluk ve prekast yükü  
 Yaya yükü  
 Yıllık ortalama nem oranı  
 Hareketli yük vasıta sınıfı

Yukarıda açıklanan tasarım değişkenleri ve parametrelere bağlı olarak kiriş üst başlık genişliği,

$$b_t = \frac{W}{n_b} - F \quad (62)$$

bağıntısı ile hesaplanacak ve böylece kiriş başlıkları arasında F kadar, tabliye kenarı ile kiriş üst başlığı arasında ise F/2 kadar bir boşluk olduğu kabul edilecektir. Her bir öngerilmeli kiriş içindeki toplam öngerilme donatısı alanı,

$$A_{ps} = \frac{n_{ps} \cdot d_{ps}'^2 \cdot \pi}{4} \quad (63)$$

bağıntısı ile, her bir öngerilmeli kirişin en kesit alanı da, kesit boyutlarına bağlı olarak,

$$A_g = b_w \cdot h_b + \frac{(2 \cdot t_t + p_t) \cdot (b_t - b_w)}{2} + \frac{(2 \cdot t_b + p_b) \cdot (b_b - b_w)}{2} \quad (64)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır.

### 2.2.5. Sınırlayıcı Fonksiyonlar

Daha önce de belirtildiği gibi optimum tasarım boyunca, yapı eleman boyutları minimize edilirken, yapı davranışının da belli sınırlar içinde kalmasını sağlamak amacıyla sınırlayıcı fonksiyonları kullanılır. Sınırlayıcılar genel anlamda gerilme, taşıma gücü, kullanılabilirlik ve geometri sınırlayıcıları olarak sınıflandırılabilirler. Bu çalışmada dikkate alınacak sınırlayıcılar normalize edilmiş formlarda aşağıda sırasıyla verilmektedir.

#### 2.2.5.1. Eğilme Durumu Emniyet Gerilmeleri Sınırlayıcıları

Eğilme durumu için dört farklı yükleme aşamasında yapıda oluşacak gerilmeler ve yine bu yükleme aşamalarında yapıyı oluşturan malzemelerin emniyet gerilmelerinin nasıl hesaplanacağı daha önce anlatılmıştı. Bu nedenle burada sadece sınırlayıcı fonksiyonları verilmektedir.

Öngerilmeli kirişlerin sadece kendi öz ağırlıklarını taşıdığı aşamada emniyet gerilmeleri sınırlayıcıları,

$$g_1 = \frac{\sigma_{b1}}{\bar{\sigma}_{ci}} - 1 \quad (65)$$

$$g_2 = \frac{\sigma_{t1}}{\bar{\sigma}_{ti}} - 1 \quad (66)$$

bağıntıları ile verilebilir. Kirişin kendi öz ağırlığına ilave olarak tabliye betonu ağırlığını da taşıdığı aşamada emniyet gerilmeleri sınırlayıcıları,

$$g_3 = \frac{\sigma_{b2}}{\bar{\sigma}_{tf}} - 1 \quad (67)$$

$$g_4 = \frac{\sigma_{t2}}{\bar{\sigma}_{cf}} - 1 \quad (68)$$

bağıntıları ile verilebilir. Taşıt yükü hariç tüm yüklerin mevcut olduğu ve kiriş ve tabliye ağırlıklarının prefabrike kesit, diğer tüm yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilen aşamada emniyet gerilmeleri sınırlayıcıları,

$$g_5 = \frac{\sigma_{b3}}{\bar{\sigma}_{tf}} - 1 \quad (69)$$

$$g_6 = \frac{\sigma_{t3}}{\bar{\sigma}_{cf}} - 1 \quad (70)$$

$$g_7 = \frac{\sigma_{ts3}}{\bar{\sigma}_{cs}} - 1 \quad (71)$$

bağıntıları ile verilebilir. Bir önceki aşamaya ilaveten taşıt yüklerinin de kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilen aşamada ise emniyet gerilmeleri sınırlayıcıları,

$$g_8 = \frac{\sigma_{b4}}{\bar{\sigma}_{tf}} - 1 \quad (72)$$

$$g_9 = \frac{\sigma_{t4}}{\bar{\sigma}_{cf}} - 1 \quad (73)$$

$$g_{10} = \frac{\sigma_{ts4}}{\bar{\sigma}_{cs}} - 1 \quad (74)$$

bağıntıları ile verilebilir.

### 2.2.5.2. Eğilme Durumu Taşıma Gücü Sınırlayıcıları

Daha öncede değinildiği gibi eğilme durumu taşıma gücü denetimi tablalı kompozit kesit ve prefabrike kesit için ayrı ayrı yapılacaktır. Dolayısıyla burada da eğilme taşıma gücü sınırlarının ve kesit çatlama momenti değerlerinin aşılp aşılmadığı tablalı kompozit kesit için ve prefabrike kesit için incelenecektir.

#### 2.2.5.2.1. Kompozit Kesit

Öngörülen prefabrike kiriş ve tabliyenin birarada düşünüldüğü, kompozit kesit için eğilme durumu taşıma gücü sınırlayıcıları

$$g_{11} = \frac{M_{d,c}}{\phi M_n} - 1 \quad (75)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bu bağıntıdaki  $M_{d,c}$  ise

$$M_{d,c} = \gamma \cdot [\beta_D \cdot (M_{g2} + M_{g3}) + \beta_L \cdot M_h] \quad (76)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır.

#### 2.2.5.2.2. Prefabrike Kesit

Prefabrike kesit için eğilme durumu taşıma gücü sınırlayıcıları ise, tablalı kompozit kesite benzer şekilde,

$$g_{12} = \frac{M_{d,p}}{\phi M_n} - 1 \quad (77)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bu bağıntıdaki  $M_{d,p}$  ise

$$M_{d,p} = \gamma \cdot \beta_D \cdot M_{g2} \quad (78)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır.

#### 2.2.5.3. Kayma Gerilmesi Sınırlayıcıları

Kayma gerilmesi sınırlayıcıları aktarma anı için ve kullanım yükleri için sırasıyla,

$$g_{13} = \frac{\tau_i}{\bar{\tau}_i} - 1 \quad (79)$$

$$g_{14} = \frac{\tau_f}{\bar{\tau}_f} - 1 \quad (80)$$

olarak verilmektedir.

#### 2.2.5.4. Kesme Taşıma Gücü Sınırlayıcısı

Kesme taşıma gücü sınırlayıcısı, beton ve kesme donatısının kesme dayanımına bağlı olarak

$$g_{15} = \frac{V_u}{\phi(V_c + V_s)} - 1 \quad (81)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Buradaki hesap kesme kuvveti,  $V_u$ ,

$$V_u = \gamma \cdot [\beta_D \cdot (V_{g2} + V_{g3}) + \beta_L \cdot V_h] \quad (82)$$

bağıntısıyla hesaplanacaktır.

#### 2.2.5.5. Sehim Sınırlayıcıları

Sistemin sehim denetimleri, eğilme durumu emniyet gerilmeleri denetiminde olduğu gibi, dört farklı aşamada incelenecektir. Bu aşamalar ve sehim miktarları için gerekli sınır değerleri bölüm 2.1.13 de verilmişti. Buna bağlı olarak sehim sınırlayıcıları bu dört farklı aşama için ve nihai durum için sırasıyla,

$$g_{16} = \frac{f_1}{(L/500)} - 1 \quad (83)$$

$$g_{17} = \frac{f_2}{(L/500)} - 1 \quad (84)$$

$$g_{18} = \frac{f_3}{(L/500)} - 1 \quad (85)$$

$$g_{19} = \frac{f_4}{(L/1000)} - 1 \quad (86)$$

$$g_{20} = \frac{f}{(L/500)} - 1 \quad (87)$$

bağıntıları ile verilmektedir. Bu bağıntılarda f ilgili indis yükleme aşaması için kiriş ortasında hesaplanan sehim miktarını göstermektedir.

### 2.2.5.6. Maksimum Donatı Oranı Sınırlayıcıları

Öngörilmeli betonda gevrek kırılmayı önlemek amacıyla donatı oranının maksimum değeri için AASHTO (2002)'da bir sınırlandırma getirilmiştir. Maksimum donatı oranı sınırlayıcıları tablalı kompozit kesit için ve prefabrike kesit için ayrı ayrı olmak üzere, sırasıyla

$$g_{21} = \frac{\psi_c}{0,36\beta_1} - 1 \quad (88)$$

$$g_{22} = \frac{\psi_p}{0,36\beta_1} - 1 \quad (89)$$

bağıntıları ile verilmektedir. Bu bağıntılardaki  $\psi_c$  ve  $\psi_p$  sırasıyla tablalı kompozit kesit ve prefabrike kesit için öngörülme donatısı oranı göstergeleridir.

### 2.2.5.7. Minimum Donatı Oranı Sınırlayıcıları

Kesitteki minimum donatı oranı miktarı, kesit direnme momentinin kesit çatlama momentinden en az 1,2 kat daha fazla olmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Buna bağlı olarak tablalı kompozit kesit için ve prefabrike kesit için minimum donatı oranı sınırlayıcıları,

$$g_{23} = \frac{M_{cr,c}^* \cdot 1,2}{\phi M_n} - 1 \quad (90)$$

$$g_{24} = \frac{M_{cr,p}^* \cdot 1,2}{\phi M_n} - 1 \quad (91)$$



bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntılardaki  $M_{cr,c}^*$  ve  $M_{cr,p}^*$  sırasıyla kompozit kesit ve prefabrike kesit için kesit çatlama momenti değerlerini göstermektedir.

#### 2.2.5.8. Üst Başlık Kalınlığına İlişkin Sınırlayıcı

Öngörilmeli kiriş üst başlığının genişliği tasarım neticesinde büyük değerler alabilmektedir. Burada, üst başlığın gövdeye birleştiği kısımdaki kalınlığının, maruz kaldığı eğilme etkilerini minimum donatı ile karşılayabilmesi kabulü ile bir denetim yapılmaktadır. Böylece üst başlık için hesaplanan minimum kalınlığın optimum tasarım sonucunda belirlenen kalınlıktan büyük olması için gerekli sınırlayıcı

$$g_{25} = \frac{(t_t + p_t)_{\min}}{(t_t + p_t)} - 1 \quad (92)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada  $(t_t + p_t)_{\min}$  üst başlığın gövdeye birleştiği kısımdaki olması gereken minimum kalınlığı ifade etmektedir.

#### 2.2.5.9. Geometri Sınırlayıcıları

Köprü enkesitinin uygulanabilir olması için geometrik olarak bazı sınırlamalar içinde kalması gerekmektedir (Lin ve Frangopol, 1996). Burada genetik algoritma ile tasarım için kullanılacak tasarım değişkenleri için değerlerini alabilecekleri kümeler baştan seçildiği için geometri sınırlayıcılarının bir çoğu tasarıma başlamadan sağlanmış olmaktadır. Ancak bu şekilde kontrol edilmesi mümkün olmayacak geometri sınırlayıcıları ise sınırlayıcı fonksiyonu olarak amaç fonksiyonuna eklenmektedir.

Tasarım sonucunda ulaşılan kiriş alt başlık genişliği, kiriş üst başlık genişliğini aşmamalıdır. Buradan

$$g_{26} = \frac{b_b}{b_t} - 1 \quad (93)$$

sınırlayıcısı yazılabilmektedir. Benzer şekilde kiriş gövde kalınlığı da kiriş alt başlık genişliğinden fazla olmamalıdır. Bu durum için gerekli sınırlayıcı da,

$$g_{27} = \frac{b_w}{b_b} - 1 \quad (94)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

Öngörilmeli kirişlerde öngerilme donatılarının birbirlerine olan mesafelerinin ve öngerilme donatılarının beton kenarına olan mesafesinin, kiriş türüne göre 5 cm ~ 10 cm olması gerekmektedir. Tasarım sonucunda bulunan öngerilme donatıları çoğu kez bir sıraya sığmayabilmektedir. Bu durumda öngerilme donatıları iki veya daha fazla sıraya yerleştirilirler. Bu şekilde üst üste sıralanan öngerilme donatılarının alt başlık yüksekliğini aşmaması gerekmektedir. Bunu denetlemek için gerekli sınırlayıcı

$$g_{28} = \frac{t_{b,min}}{t_b} - 1 \quad (95)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $t_{b,min}$  öngerilme donatılarının sığabileceği minimum kalınlığı ifade etmekte olup, öngerilme donatısı aralarında olması gereken düşey mesafeler ve beton kenarına olması gereken mesafeler toplanarak belirlenmektedir.

### 2.3. Genetik Algoritma ile Optimum Tasarım Probleminin Çözülmesi

Genetik algoritma, doğadaki genetik evrimi model alarak geliştirilmiş bir en iyiyi arama yöntemidir. Genetik algoritmalar, problemin muhtemel çözümlerinden oluşan bir nesilde çalışır. Bu nesle, yeni çözümler oluşmasını sağlamak üzere çaprazlama ve mutasyon, en iyilerin varlığının devam ettirmelerini sağlamak üzere kopyalama işlemleri uygulanarak daha iyi çözümlerin olduğu bir nesle ulaşılmaya çalışılır (Zalzala ve Fleming, 1997).

Aşağıda öngörilmeli öçekim I kirişli köprü üstyapısının optimum tasarımı probleminin genetik algoritma ile ifadesi açıklanmaktadır.

### 2.3.1. Ceza Fonksiyonu ve Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu

Bundan önceki bölümlerde de değinildiği gibi genetik algoritma sınırlayıcısız optimum tasarım problemleri için uygun bir yöntemdir. Dolayısıyla şu ana kadar tanımlanmış olan, sınırlayıcılara bağlı optimum tasarım probleminin sınırlayıcısız bir fonksiyon olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yukarıda 9 başlık altında toplanan 28 adet sınırlayıcının ihlal edilme miktarını hesaplayan bir fonksiyon amaç fonksiyonuna eklenecektir. Böylece, sınırlayıcıların ihlal edilmesi fonksiyonunun büyüklüğü ölçüsünde amaç fonksiyonu cezalandırılacak ve cezalandırılmış amaç fonksiyonunun kullanılması suretiyle problem sınırlayıcısız bir probleme dönüştürülmüş olacaktır. Bu çalışmada ceza fonksiyonu,

$$P = \sum_{i=1}^{28} p_i \quad (96)$$

bağıntısı ile hesaplanacaktır. Bu bağıntıda  $p_i$  her bir sınırlayıcının ihlal edilme katsayısını göstermekte olup,

$$\begin{aligned} p_i &= g_i, & g_i > 0 \text{ için} \\ p_i &= 0, & g_i \leq 0 \text{ için} \end{aligned} \quad (97)$$

olarak dikkate alınacaktır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı üzere ceza fonksiyonu ihlal edilen sınırlayıcıların normalize edilmiş değerlerinin toplanması suretiyle hesaplanmaktadır.

Ceza fonksiyonu bu şekilde belirlendikten sonra, daha önce verilmiş olan amaç fonksiyonuna ilave edilmektedir. Böylece cezalandırılmış amaç fonksiyonu,

$$\Phi_{(x)} = C_{(x)} \cdot [1 + K \cdot P] \quad (98)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Bu bağıntıda  $K$  problemin türüne bağlı olarak değiştirilen bir sabittir. Bağıntıdan da görüleceği üzere  $K$  sabiti ceza fonksiyonunun, amaç fonksiyonunun hesaplanmasındaki etkinliğini belirlemektedir.  $K$  sabiti büyük tutulduğu durumda optimum çözümü arama işlemi sınırlayıcıların çok az ihlal edildiği bir kümede en az maliyetli

çözümü arama şeklinde gerçekleşecek, K sabiti küçük tutulduğu durumda ise maliyeti az olan çözümler arasında sınırlayıcıları ihlal etmeyen çözümü arama işlemi etkin olacaktır. Dolayısıyla optimum tasarım sonucunda en iyi çözüme en kısa sürede ulaşılabilmesi için K sabitinin seçimi oldukça önemli olmaktadır (Ayvaz ve Aydın, 2000).

### 2.3.2. Çözümlerin Kodlanması ve Kodların Çözümü

Birinci bölümde de değinildiği gibi, genetik algoritma, rasgele belirlenmiş mevcut çözümleri temsil eden belli sayıdaki diziden oluşan bir küme içerisinde çalışır. Bu diziler çözümleri oluşturan tasarım değişkeni değerlerinin kodlanması ile elde edilir. Bu kodlama işlemi genellikle ikili sayı sisteminde yapılmakla birlikte, üçlü sayı sistemi, tamsayı yada gerçek değerlerin kodlanması ile de yapılabilmektedir. Çözümleri oluşturan tasarım değişkenlerinin kodlanmasından kastedilen ise, tasarım değişkeni için seçilen değer, değerler kümesi içerisindeki sıra sayısının kodlanmasıdır.

Genetik algoritma ayrık tasarım değişkenlerini kullanarak sonuca gitmektedir. Bunun için de her bir tasarım değişkeninin alabileceği değerler önceden belirlenerek bir küme oluşturulur ve optimum tasarım sırasında, tasarım değişkenlerinin değerlerini bu küme içerisinde seçmesi sağlanır. Böylece tasarım değişkeninin alabileceği değerlerden oluşan bu küme tasarım değişkeni değerler kümesi olarak adlandırılabilir.

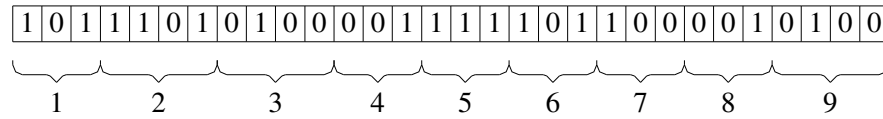
Bu çalışmada, çözümlerin kodlanması için en yaygın olarak kullanılan ikili sayı sisteminde kodlanma uygulanacaktır. Çözümleri ifade etmek üzere, çözümü oluşturan tasarım değişkeni değerlerinin, tasarım değişkenleri değer kümesindeki sıra numarasının bir eksiği ikili sayı sisteminde kodlanacaktır. Burada bir eksiğinin kodlanmasının nedeni ise daima rasgele seçilecek bir dizinin tamamen "0" elemanından oluşma ihtimalinin varlığıdır. Bu durumda dizi sıfırcı elemanı göstereceğinden ve böyle bir eleman olmadığından bu değer geçerli olmayacaktır (Daloğlu ve Aydın, 1999).

Örnek bir tasarım değişkeni olarak köprü enkesitinde kullanılacak kiriş sayısı seçilmiş olsun. Köprü enkesitinde 5 ila 12 arasında kiriş kullanılması düşünülecek olursa, bu tasarım değişkeni için 8 adet değer içeren bir tasarım değişkeni değer kümesi seçilmiş demektir. 8 adet sıra numarasını ikili sayı sisteminde kodlamak için 3 adet karakterden oluşan bir dizi kullanılması gerekmektedir. Böylece bu tasarım değişkeni için muhtemel diziler ve bu dizilerin temsil ettiği tasarım değişkeni değerleri Tablo 3'de gösterildiği gibi olacaktır.

Tablo 3. Tasarım değişkeni değerinin kodlanması

Muhtemel dizi	Onluk sistemdeki karşılığı	Tasarım değişkeni sıra numarası	Tasarım değişkeni değeri
000	0	1	5
001	1	2	6
010	2	3	7
011	3	4	8
100	4	5	9
101	5	6	10
110	6	7	11
111	7	8	12

Aynı yaklaşımla optimum tasarım probleminin çözümünü oluşturan 9 adet tasarım değişkeninin değerinin kodlanmasıyla oluşturulmuş bir çözüm dizisi Şekil 8’de verilmektedir. Bu diziyi oluşturan 2, 3 ve 9 nolu tasarım değişkenleri 4 er adet karakterle temsil edilmişlerdir. Bu da tasarım değişkenleri değer kümelerinin 16 adet değerden oluştuğu anlamına gelmektedir. Diğer tasarım değişkenleri ise 3 adet karakterden oluşmaktadır ki bu da bu tasarım değişkenleri için 8 er adet değer içeren kümelerin mevcut olduğunu göstermektedir. Şekil 8’de gösterilen çözüm dizisinin temsil ettiği çözüme ait 9 adet tasarım değişkeni değerinin, tasarım değişkeni değer kümelerindeki sıra numaraları sırasıyla 6, 14, 5, 2, 8, 6, 5, 2 ve 5 olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 8. Optimum tasarım problemine ait bir çözüm dizisi

Şekildeki çözüm dizisinden de görülebileceği gibi tasarım değişkenlerinin temsil edildiği dizilerin uzunluğu, tasarım değişkeni değer kümelerinin büyüklüğüne bağlı olarak uzun yada kısa olabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi genetik algoritma birbirinden farklı çözümlerden oluşan bir kümede çalışır. Çözümlerin oluşturduğu bu küme bir topluluğa benzetilecek

olunursa, her bir çözüm dizisi topluluk içindeki bir birey, tasarım değişkenlerinin kodlandığı küçük diziler bireyleri oluşturan kromozomlar ve küçük dizileri oluşturan “1” ve “0” rakamları da genler olarak düşünülebilir.

Bu şekilde çözümleri oluşturan tasarım değişkenleri kodlandıktan sonra genetik süreç işletilir ve ardından bir sonraki nesle ait tasarım değişkeni değerlerinin belirlenmesi için ikilik sayı sisteminde kodlanmış olan tasarım değişkeni değerleri tersi bir işlemle onluk sisteme çevrilerek yeni çözümleri oluşturan tasarım değişkeni değerleri belirlenir.

### **2.3.3. Tasarım Değişkeni Değer kümelerinin ve Başlangıç Neslinin Belirlenmesi**

Optimum çözümlere ulaşılabilmesi için tasarım değişkeni değer kümelerinin fazla miktarda değere sahip olması gerekmektedir. Ancak tasarım değişkeni değer kümesinin büyük olması, çözüm dizilerinin de büyük olmasına ve optimum çözüme ulaşma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, tasarım değişkeni değer kümeleri belirlenirken, optimum değerlere ulaşılabilmesini sağlayacak ve optimum çözüme ulaşma süresini çok uzatmayacak sayıda değer içermelerine dikkat edilmelidir. Tasarım değişkeni değer kümelerinin belirlenmesinde mesleki deneyimlerden yararlanılabileceği gibi, bu işlem için bir ön tasarım yapmakta mümkündür.

Tasarım problemlerinde dizilerin boyutunun kısıtlanabilmesi için en etkili yollardan biri de değişkenlerin gruplandırılmasıdır. Ancak bu çalışmada kullanılan tasarım değişkenlerinin özelliği gereği gruplandırılması mümkün değildir. Bu nedenle, sonuçlar üzerinde daha etkili olacağı düşünülen tasarım değişkenleri için daha çok değer içeren tasarım değişkeni değer kümeleri seçilirken, diğer tasarım değişkenleri için daha az sayıda değer içeren kümeler belirlenecektir.

Daha önce de belirtildiği gibi bir çözüm dizisinin uzunluğu tasarım değişkeni sayısına ve bu tasarım değişkenleri için seçilen değişken kümesindeki değer sayısına bağlı olarak değişmektedir. Topluluk içindeki çözüm dizisi sayısı da dizilerin uzunluğuna bağlı olarak belirlenmektedir. Uzun dizilerden oluşan bir toplulukta genetik operatörlerin verimli olabilmesi için, topluluktaki birey sayısının da dizi uzunluğuna bağlı olarak fazla olması gerekmektedir. Topluluktaki birey sayısı arttıkça çözüme ulaşma süresi de artmaktadır. Durum böyle olunca dizilerin uzunluğunu seçerken, elde edilecek sonuçların kabul edilebilir olmasına ve çözüme ulaşma süresinin de fazla uzamamasına dikkat etmek

gerekmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, optimum tasarım neticesinde başarılı sonuçlara ulaşılabilmesi için, başlangıç neslini oluşturan çözüm sayısının bir dizideki toplam karakter sayısı kadar veya daha fazla olmalıdır. Bu şekilde çözüm dizisini oluşturan karakter sayısı ve başlangıç neslini oluşturan çözüm dizisi sayısı belirlendikten sonra bu iki sayının çarpımı kadar “1” ve “0” karakteri bilgisayarda rasgele belirlenerek genetik algoritmanın başlangıç nesli belirlenmiş olur.

### 2.3.4. Çözümlerin Uyum Derecelerinin Belirlenmesi

Genetik algoritmada, nesildeki çözümlerin optimum çözüme yakınlık derecesini ifade etmek üzere çözümlerin uyum derecesi kullanılır. Bir çözümün uyum derecesi, doğadaki bir bireyin hayatta kalma yeteneğine benzetilebilir. Kopyalama operatörünün uygulanabilmesi için çözümlerin öncelikle uyum derecelerine göre sınıflandırılmaları gerekmektedir. Böylelikle çözümler kümesinde yer alan uyum derecesi en iyi çözümler, uyum derecesi en kötü olan çözümler yerine kopyalanabilecektir. Bir çözümler kümesindeki çözümlerin uyum derecesi  $F_i$ , cezalandırılmış amaç fonksiyonuna bağlı olarak,

$$F_i = (\Phi_{(x)\max} + \Phi_{(x)\min}) - \Phi_{(x)i} \quad (99)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu bağıntıda  $\Phi_{(x)\max}$  ve  $\Phi_{(x)\min}$  çözümler kümesinde yer alan çözümlerin cezalandırılmış amaç fonksiyonunun maksimum ve minimum değerlerini,  $\Phi_{(x)i}$  ise uyum derecesi hesaplanacak olan çözümün cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini göstermektedir.

Çözüm dizilerinin uyum derecelerinin belirlenmesinin ardından, hangi çözümlere kopyalama operatörünün uygulanacağını belirleneceği değer olan uyum faktörleri hesaplanır. Her bir bireyin uyum faktörü  $F_{c,i}$ ,

$$F_{c,i} = F_i / F_{ort} \quad (100)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda  $F_{ort}$  çözümler kümesindeki çözümlerin uyum derecelerinin ortalama değerini göstermektedir (Daloğlu ve Aydın, 1999).

### 2.3.5. Genetik Operatörlerin Uygulanması

Yukarıda anlatıldığı gibi başlangıç nesli belirlendikten sonra amaç, bu nesli genetik süreçlerden geçirmek suretiyle optimum çözümlerin içinde bulunduğu sonuç nesline ulaşmaktır.

Başlangıç neslinden yola çıkılıp sonuç nesline ulaşılması, iterasyon sayısı önceden bilinmeyen bir evrimi gerektirmektedir. Bu evrim boyunca nesilde, algoritma tarafından, genetik operatörler adı verilen işlemler yardımıyla bir takım değişiklikler yapılmaktadır. Genetik operatörler uygulandıkça bir sonraki nesil bir önceki nesle göre uyum derecesi daha iyi olan bireylerden oluşmaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi, genetik operatörlerin en yaygın olarak kullanılanları ve en etkili olanları kopyalama, çaprazlama ve mutasyondur. Kopyalama, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin nesle uygulanışı aşağıda ilgili başlıklar altında geniş olarak anlatılmaktadır. Buradan da görüleceği üzere bu operatörler basit işlemlerden oluşmasına rağmen, sonuca ulaşma açısından oldukça etkili olmaktadır.

#### 2.3.5.1. Kopyalama Operatörü

Genetik algoritmada, Darwin'in teorisinin en önemli esası olan güçlülerin varlığını devam ettirirken güçsüzlerin yok olması prensibi, kopyalama operatörü tarafından yerine getirilmektedir. Başlangıç nesline genetik operatörlerin uygulanabilmesi için, bir bireyin amaç fonksiyonun değerini istenen duruma göre en az yada en fazla yapması ve sınırlayıcıları ihlal etmeme katsayısına bağlı olarak belirlenen göreceli bir değer olan, uyum faktörlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Uyum faktörlerinin hesaplanmasının ardından, topluluk içindeki çözüm dizileri arasında uyum faktörleri belli bir değerden az ve belli bir değerden çok olanlar arasında kopyalama işlemi uygulanacaktır. Bu işlem, çaprazlama havuzunda, uyum faktörü düşük olan çözüm dizilerinin yerine uyum faktörü yüksek olan çözüm dizilerinin yerleştirilmesi ile yapılmaktadır. Böylece kopyalama sonucu bir sonraki nesli oluşturmak üzere çaprazlamaya girecek çözüm dizileri arasında uyum faktörleri iyi olanlar iki kez yer alırken, uyum faktörleri düşük olanlar yer almayacaklardır.

Örneğin her biri 3 er gene sahip iki kromozomdan oluşan 5 bireyli bir nesle uygulanan kopyalama işlemi Tablo 4'de verilmektedir. Bu tablodan da görüldüğü gibi



uyum faktörü en az olan 4 nolu bireyin yerine uyum faktörü en iyi olan 2 nolu birey, çaprazlama havuzunda ikinci kez bulunmak üzere, kopyalanmıştır.

Tablo 4. Beş bireyli bir çözüm kümesinde kopyalama işlemi

Birey No	Bir önceki Nesil	Uyum Faktörü	Birey Adedi	Çaprazlama Havuzu
1	110010	1,12	1	110010
2	001101	1,22	2	001101
3	111001	1,05	1	111001
4	101010	0,72	0	001101
5	100010	1,15	1	100010

Kopyalama işleminin amacı, uyum faktörü zayıf, yani optimum çözüme uzak olan çözümleri topluluk dışına çıkararak onların yerine uyum faktörleri iyi olan, yani optimum çözüme daha yakın olan, çözümleri yerleştirmektir. Böylece bir sonraki nesil bir önceki nesle oranla daha optimum bireylerden oluşacaktır. Bu nedenle kopyalama operatörünün genetik algoritma içindeki rolü çok önemlidir.

### 2.3.5.2. Çaprazlama Operatörü

Yukarıda anlatılmış olan kopyalama operatörü bir topluluk içindeki çözüm dizileri arasında gerçekleştirilen bir iyiyi seçme ve koruma işlemidir. Topluluğa yeni bireyler kazandırmamakta sadece mevcut bireyleri kullanmaktadır. Oysa genetik algoritmanın bir sonuca ulaşabilmesi için topluluğu oluşturan çözüm dizilerinin yenilenmesi, bir başka deyişle yeni nesillerin oluşturulması gerekmektedir.

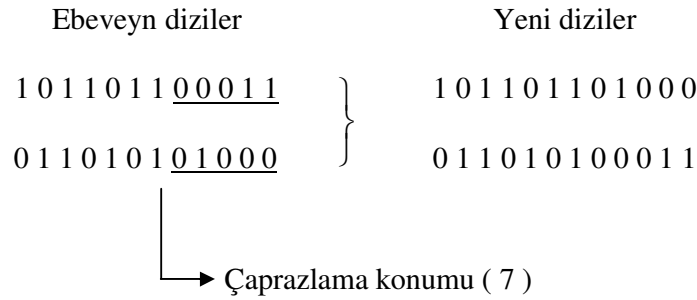
Genetik algoritmada yeni nesilleri oluşturmanın en etkili aracı çaprazlama operatörüdür. Çaprazlama işleminde seçilen ebeveyn çözüm dizilerinin genleri arasında yer değiştirme yapılması suretiyle bir sonraki nesilde yer alacak yeni çözüm dizileri oluşturulmaktadır. Böylece devam eden evrim sürecinde yeni bir nesil meydana gelmektedir.

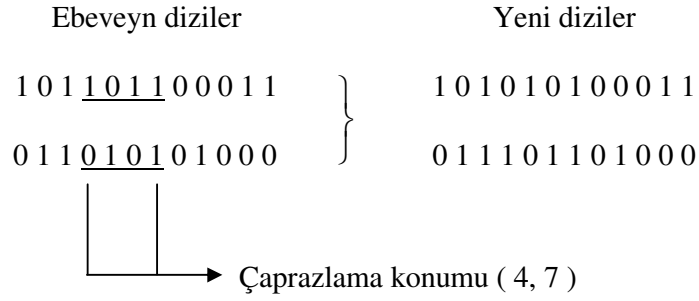
Bireylerin genleri arasında değiş tokuş yapılması suretiyle gerçekleştirilen çaprazlama işlemi birkaç şekilde olabilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda en çok kullanılan çaprazlama türleri tek noktalı, iki noktalı ve maskeli çaprazlamadır.

### 2.3.5.2.1. Tek Noktalı aprazlama

Bu çaprazlamada iki ebeveyn çözüm dizisi üzerlerinde belirlenen bir noktadan iki parçaya ayrılmakta ve belirlenen bu noktadan sonraki veya önceki iki ebeveyn dizi genleri birbirleri arasında yer değiştirilmektedir (şekil 9). Burada çaprazlamanın verimli olması için, her ebeveyn çiftinin çaprazlanma noktalarının diğerlerinden farklı olarak ve rasgele belirlenmesi önemli olmaktadır.

şekil 9'dan görüldüğü gibi çaprazlama konumu olan 7. karakterden sonraki altı çizili olarak gösterilmiş olan 8., 9., 10., 11. ve 12. karakterler ebeveyn diziler arasında yer değiştirilmek suretiyle yeni çözüm dizileri oluşturulmuştur.

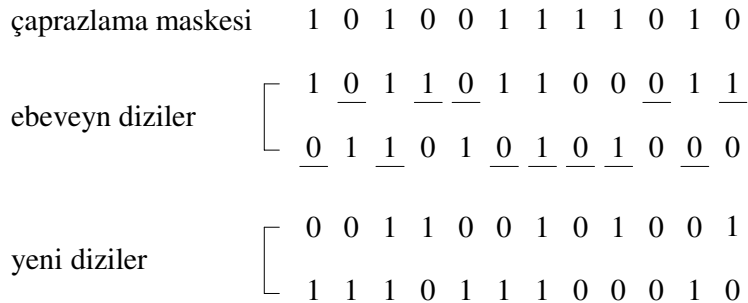




Şekil 10. İki noktalı çaprazlama işlemi

### 2.3.5.2.3. Maskeli Çaprazlama

Bu çaprazlamada, çaprazlama işlemi yapılırken çaprazlama maskesi denilen, topluluktaki çözüm dizilerinin uzunluğunda, karakterleri rasgele belirlenen ikilik sayı sisteminde kodlanmış, bir üçüncü diziden faydalanılmaktadır. Bu çaprazlama ile birinci yeni çözüm dizisi oluşturulurken çaprazlama maskesindeki değer “0” ise birinci ebeveyn bireyin karakteri, “1” ise ikinci ebeveyn bireyin karakteri kullanılmaktadır. Bu şekilde birinci yeni çözüm dizisi belirlendikten sonra arda kalan karakterler ile de ikinci yeni çözüm dizisi oluşturulmaktadır (Zalzala ve Fleming, 1997). Şekil 11’de maskeli çaprazlama işlemine ait bir örnek verilmektedir. Bu örnekte altı çizili olan karakterler çaprazlama maskesi yardımıyla seçilmiş karakterler olup, birinci yeni çözüm dizisinin oluşturulmasında kullanılmaktadırlar. Diğer karakterler ile de ikinci yeni çözüm dizisi oluşturulmaktadır.



Şekil 11. Maskeli çaprazlama işlemi

### 2.3.5.3. Mutasyon Operatörü

Genetik süreç boyunca yeni çözüm dizilerinin oluşmasına katkı sağlayan bir başka operatör ise mutasyondur. Mutasyon işlemi topluluk içindeki çözüm dizilerini oluşturan karakterlerden belli bir orandaki miktarının değerinin değiştirilmesi yoluyla uygulanır. Mutasyon uygulanacak çözüm dizisi ve karakter rasgele belirlenmektedir. Genellikle mutasyona uğrayacak karakter oranı %0,1 ~ %1 arasında belirlenir (Zalzala ve Fleming, 1997). Bu oranın daha yüksek değerlere çekilmesi durumunda çok iyi değerlere ulaşmış çözüm dizileri bozularak kötü sonuçlara gidebilir. Mutasyon özellikle belli bir rutine girmiş bir araştırmayı farklı yönlere çekmek için etkili olabilmektedir.

Bu çalışmada standart mutasyon, kontrollü mutasyon ve melez mutasyon olmak üzere üç farklı mutasyon türü kullanılmaktadır.

#### 2.3.5.3.1. Standart Mutasyon

Standart mutasyon, optimum tasarıma başlamadan önce belirlenmiş bir oranda nesildeki karakterlerin değerlerinin değiştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Mutasyona uğrayacak karakter miktarı, nesildeki toplam karakter sayısının mutasyon oranı ile çarpılması sonucunda bulunur. Bu sayıda çözüm dizisi nesilde rasgele belirlenir ve bu çözüm dizileri içinde de bir karakter rasgele seçilerek değeri "1" ise "0" veya "0" ise "1" yapılmak suretiyle mutasyona uğratılır. Standart mutasyonda mutasyon oranı tasarımın başından sonuna kadar aynı kalmaktadır. Optimum çözüme yaklaşmış nesildeki bireylerin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerlerini optimum çözümden uzaklaştırma olasılığı yüksek olduğundan standart mutasyon oranı diğer mutasyon türlerine oranla daha düşük tutulmalıdır. Tablo 5'de standart mutasyonun nesle uygulanışına ilişkin bir örnek verilmiştir. Bu örnekte her biri 20 adet karaktere sahip 10 adet çözüm dizisinden oluşan bir nesil kullanılmıştır ve dolayısıyla nesildeki toplam karakter sayısı 200'dür. Mutasyon oranı %1 olarak seçildiğinden mutasyona uğrayacak karakter sayısı 2 olmaktadır. Rasgele belirlenen iki çözüm dizisi ile bunlar üzerinde rasgele belirlenen karakterler ise 7. çözüm dizisinin 12. karakteri ve 3. çözüm dizisinin 8. karakteridir. Tablodan da görüldüğü gibi

mutasyon öncesi değerleri “0” olan bu iki karakter mutasyon sonrasındaki nesilde “1” olarak yer almışlardır.

Tablo 5. Standart mutasyon operatörünün nesle uygulaması

Dizi No	Mutasyon öncesi nesil	Mutasyon noktaları	Mutasyon sonrası nesil
1	10100011100011100111	7 - 12 3 - 8	10100011100011100111
2	10100001110101001110		10100001110101001110
3	01010000111001110111		01010001111001110111
4	11000100100001111101		11000100100001111101
5	00110001010001110101		00110001010001110101
6	10101100101010011000		10101100101010011000
7	00111011111010111011		00111011111110111011
8	01101111011101110111		01101111011101110111
9	10011100000011010010		10011100000011010010
10	00011100011111011011		00011100011111011011

Mutasyon oranı : %1

### 2.3.5.3.2. Kontrollü Mutasyon

Kontrollü mutasyonun da nesle uygulaması standart mutasyonla aynıdır. Ancak standart mutasyonda yaşanan optimum çözüme yaklaşmış neslin bozulmasını önlemek amacıyla kontrollü mutasyonda optimum çözüme yaklaşıldıkça nesle uygulanan mutasyon oranı azaltılmaktadır. Bu çalışmada yakınsama kriteri 1/3 oranında sağlandığı durumda mutasyon oranı yarıya indirilerek ve yakınsama kriteri 2/3 oranında sağlandığı durumda da mutasyona son verilerek kontrollü mutasyon uygulanmaktadır. Örneğin yakınsama kriteri olarak %75 seçilmiş bir optimum tasarımda, %1 oranında kontrollü mutasyon uygulanacaksa, nesildeki çözüm dizilerinin %25 i birbiriyle aynı olunca mutasyon oranı %0,5 e indirilecek, çözüm dizilerinin %50 si birbiriyle aynı olduğunda ise mutasyona son verilecek demektir.

### 2.3.5.3.3. Melez Mutasyon

Melez mutasyonda, mutasyona uğramak üzere seçilmiş karakterler doğrudan değiştirilmek yerine, nesil içindeki uyum faktörü en iyi olan çözüm dizisine benzetilmektedir. Bu durumda rasgele seçilmiş karakterin değeri uyum faktörü en iyi olan çözüm dizisindeki değerle aynı ise karakterin değeri değiştirilmemekte, farklı ise değiştirilmektedir (Balakrishnan v.d., 2004). Böylece mutasyonun nesli mümkün olduğunca olumlu yönde etkilemesi sağlanmaya çalışılmakta ve çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayısı azaltılmaktadır. Tablo 6’da melez mutasyonun nesle uygulanışına ilişkin bir örnek verilmektedir. Bu örnekte uyum faktörü en iyi olan çözüm dizisi 5 nolu çözüm dizisidir ve mutasyona uğrayacak karakterler bu dizinin karakterlerine benzetilecektir. Mutasyona uğrayacak karakterlerden ilki olan 7. çözüm dizisinin 12. karakteri 5 nolu çözüm dizisindeki karakterle aynıdır dolayısıyla mutasyon sonrası nesilde aynen yer almıştır. İkinci mutasyona uğrayacak karakter olan 3. çözüm dizisinin 12. karakterinin değeri “0” iken 5 nolu çözüm dizisinin 12. karakterinin değeri “1” olduğu için yeni nesilde bu karakter artık “1” olarak yer almıştır.

Tablo 6. Melez mutasyon operatörünün nesle uygulanışı

Dizi No	Mutasyon öncesi nesil	Uyum faktörü	Mutasyon noktaları	Mutasyon sonrası nesil
1	10100011100011100111	1,10	7 - 12 3 - 8	10100011100011100111
2	10100001110101001110	0,74		10100001110101001110
<b>3</b>	0101000 <b>0</b> 111001110111	0,48		0101000 <b>1</b> 111001110111
4	11000100100001111101	1,12		11000100100001111101
<b>5</b>	<b>00110001010001110101</b>	<b>1,49</b>		00110001010001110101
6	10101100101010011000	1,14		10101100101010011000
<b>7</b>	00111011111 <b>0</b> 10111011	0,96		00111011111 <b>0</b> 10111011
8	01101111011101110111	0,85		01101111011101110111
9	10011100000011010010	1,11		10011100000011010010
10	00011100011111011011	1,01		00011100011111011011

Mutasyon oranı : %1

### 2.3.6. Optimum Çözümün Belirlenmesi

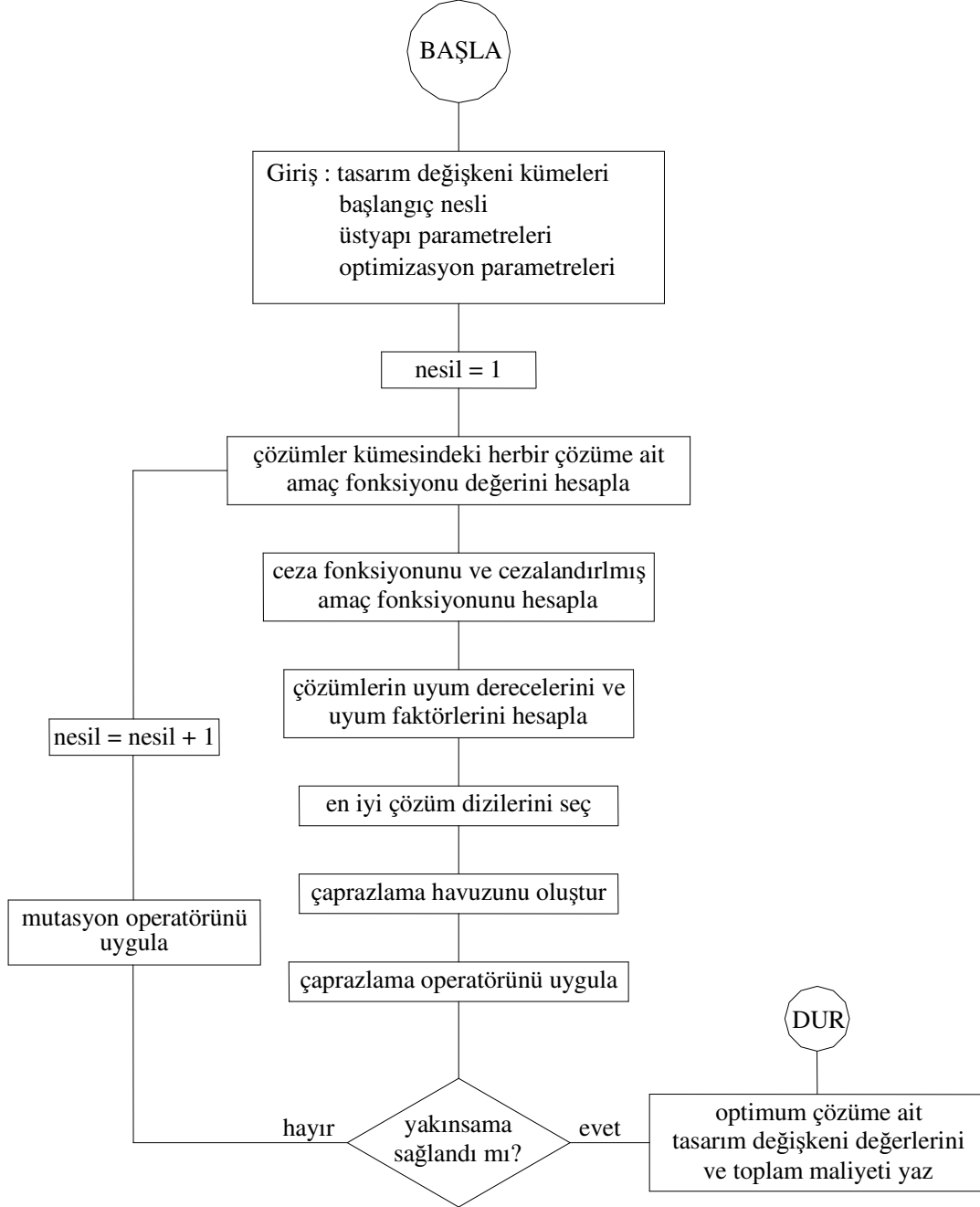
Genetik operatörlerin uygulanması tamamlandıktan sonra artık yeni nesle ait bireyler oluşturulmuş olmaktadır. Takip eden iterasyona ait yeni nesiller benzer işlemler tekrarlanarak oluşturulmaktadır. Bu şekilde topluluğu oluşturan çözüm dizilerinin belli çoğunluğu aynı değere sahip olana kadar genetik süreç devam ettirilir. Böylece belirlenen sonuç neslindeki çözüm dizileri arasında uyum faktörü en yüksek olan çözüm optimum çözüm olarak kabul edilmektedir. Tablo 7’de, 8 bireye sahip bir çözüm dizisi topluluğu ele alınmakta ve kopyalama, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin sonucunda yeni neslin oluşumu verilmektedir. Bu örnekteki genetik süreçte çaprazlama operatörü olarak maskeli çaprazlama kullanılmıştır.

Optimum tasarım için gerekli olan hesaplamaları bilgisayar ortamında yapmak üzere Visual Basic programlama dili kullanılarak bir program geliştirilmiştir. Hazırlanan bilgisayar programında veri girişini sağlamak üzere bir arayüz kullanılmakta, çıktılar ise üç farklı dosya içinde sunulmaktadır.

Tablo 7. Genetik algıtmada kopyalama, çaprazlama ve mutasyon işlemi

Birey no	Eski nesil	Birey adedi	Çaprazlama havuzu	Eşleşme	Çaprazlama maskesi	Çaprazlama sonrası	Mutasyon noktaları	Yeni nesil
1	110011	1	110011	4	101011	010001	2 - 6 4 - 4	010001
2	101001	1	101001	7	110011	011010		011011
3	100011	2	100011	5	010101	110010		110010
4	010101	1	010101	1	101011	110111		110011
5	111000	1	111000	3	010101	101001		101001
6	010011	0	100011	8	111001	011010		011010
7	010010	1	010010	2	110011	100001		100001
8	011100	1	011100	6	111001	100101		100101

### 2.3.7. Genetik Algoritmanın Akış Diyagramı





## 2.4. Uygulamalar

### 2.4.1. Uygulama-1 (Edirnekapı Kavşak Köprüleri, Köprü-4)

Bu çalışmada ilk uygulama olarak T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü denetimi altında inşa edilen İstanbul 1.Çevreyolu Edirnekapı Kavşak Köprüleri, Köprü-4 uygulana projesi seçilmiştir. Bu köprüye ait uygulama projesi ve hesapları Emay Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından yapılmıştır (Emay, 2004). Uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti ve öngerilmeli kiriş enkesiti sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13’de verilmektedir.

Bu uygulamanın farklı optimum tasarım parametreleri kullanılmak suretiyle altı farklı optimum tasarımı yapılmıştır.

#### 2.4.1.1. Birinci Tasarım

##### 2.4.1.1.1. Tasarım Parametreleri ve Tasarım Değişkenleri

Bu köprü üst yapısına ait üstyapı tasarım parametreleri uygulama projesindeki değerler ile aynı alınmıştır. Birinci tasarım için seçilen üstyapı tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Köprü ayak aks aralığı (L) .....	: 32,00 m
Köprü tabliye genişliği (W) .....	: 10,00 m
Taşıt yolu genişliği .....	: 8,00 m
Trafik şeridi sayısı ( $N_L$ ) .....	: 2
Tabliye kalınlığı .....	: 0,20 m
Tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı ( $f_{cs}$ ) .....	: 25 MPa
Tabliye betonu elastisite modülü ( $E_{cs}$ ) .....	: 30250 MPa
Prefabrike beton karakteristik basınç dayanımı ( $f'_c$ ) .....	: 40 MPa
Prefabrike beton elastisite modülü ( $E_c$ ) .....	: 34550 MPa
Öngerilme donatısı karakteristik kopma dayanımı ( $f'_s$ ) ...	: 1898 MPa



Öngerme çeliği elastisite modülü ( $E_s$ ) .....	: 207300 MPa
Betonarme çeliği karakteristik dayanımı ( $f_{sy}$ ) .....	: 420 MPa
Prefabrike beton birim fiyatı ( $UC_{pc}$ ) .....	: 650 br/m <sup>3</sup>
Öngerilme donatısı birim fiyatı ( $UC_{ps}$ ) .....	: 700 br/kN
Kiriş üst başlıkları ara mesafesi (F) .....	: 7,77 cm
Tabliye-kiriş ara mesafesi .....	: 0
Kullanılacak öngerilme donatısı anma çapı ( $d_{ps}$ ) .....	: 15,24 mm
Beton birim hacim ağırlığı .....	: 25 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama birim hacim ağırlığı .....	: 24 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama kalınlığı .....	: 10 cm
Bordür kalınlığı .....	: 30 cm
Korkuluk ve prekast yükü .....	: 30 N/cm
Yaya yükü .....	: 0,003 MPa
Yıllık ortalama nem oranı (RH) .....	: % 40
Hareketli yük vasıta sınıfı .....	: H30-S24
Öngerilme donatılarının minimum ara mesafesi .....	: 6 cm
Kesme donatısı çapı .....	: 10 mm
Kesme donatısı aralığı.....	: 10 cm

Optimum tasarım probleminin 9 adet tasarım değişkeni için seçilen değerlerini alabilecekleri kümeler Tablo 8'de verilmektedir. Bu tabloda birinci sütunda tasarım değişkeninin adı, ikinci sütunda tasarım değişkeninin alabileceği farklı değerlerin sayısı ve üçüncü sütunda ise tasarım değişkenlerinin optimum tasarım neticesinde alabilecekleri değerler gösterilmiştir. Tasarım değişkeni değer kümelerindeki değerler seçilirken mesleki deneyimler ve yapı tasarımıyla ilgili sınırlamalar dikkate alınmaktadır.

Uygulama-1'in birinci tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı	: 20
Çözüm dizisi karakter adedi	: 30
Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,5

Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,1

Tablo 8. Uygulama-1'in birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli giriş sayısı ( $n_b$ )	8	7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14
Öngerilmeli giriş yüksekliği ( $h_b$ )	16	70; 75; 80; 85; 90; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125; 130; 135; 140; 150
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	16	30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100; 105
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 17; 20; 22; 25; 30; 35; 40
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	8	8; 10; 12 ; 15; 18; 20; 22; 25
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	8	15; 18; 20; 22; 25; 28; 30; 35
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	8	5; 8; 10; 12; 15; 17; 20; 25
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 8; 10; 12; 15; 17; 20; 25
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	16	6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36

Bütün bu verilerin yanı sıra bu tasarımda, uygulama projesiyle sonuçların karşılaştırılabilmesi için taşıma gücü yük katsayısı uygulama projesiyle aynı olacak şekilde  $\beta_L=2,2$  olarak alınmıştır.

#### 2.4.1.1.2. Başlangıç Nesli Birinci Çözüm Dizisine ait Boyutlandırma Detayları

Burada, hazırlanan programın köprü üst yapı boyutlandırılmasına ilişkin bölümüne ait hesap detayları, başlangıç neslinin birinci çözüm dizisi için, verilmiştir.

Birinci bireye ait tasarım değişkeni değerleri :

$$n_b = 9 \text{ ad.}$$

$$h_b = 135 \text{ cm}$$

$$b_b = 70 \text{ cm}$$

$$b_w = 22 \text{ cm}$$

$$t_t = 10 \text{ cm}$$

$$t_b = 20 \text{ cm}$$

$$p_t = 17 \text{ cm}$$

$$p_p = 10 \text{ cm}$$

$$n_{ps} = 16 \text{ ad.}$$

Kiriş geometrik özellikleri :

$$P = 3189 \text{ kN}$$

$$A_i = 5803 \text{ cm}^2$$

$$I_i = 13652319 \text{ cm}^4$$

$$W_{bi} = 194740 \text{ cm}^3$$

$$W_{ti} = 210376 \text{ cm}^3$$

$$I_{ci} = 21938304 \text{ cm}^4$$

$$W_{bci} = 246440 \text{ cm}^3$$

$$W_{tci} = 477134 \text{ cm}^3$$

$$W_{tsci} = 332503 \text{ cm}^3$$

$$e_i = 62,23 \text{ cm}$$

$$e_{ci} = 81,15 \text{ cm}$$

Yükler :

$$G_1 = 142,3 \text{ N/cm}$$

$$G_2 = 56,0 \text{ N/cm}$$

$$G_3 = 51,3 \text{ N/cm}$$

$$\varphi = 1,22$$

$$S/D = 0,63$$

$$P = 92,67 \text{ kN}$$

İç kuvvetler :

$$M_{g1} = 1821 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{g2} = 2538 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{g3} = 657 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\begin{aligned}
 M_h &= 1425 \text{ kN}\cdot\text{m} \\
 V_{g2} &= 317 \text{ kN} \\
 V_{g3} &= 82 \text{ kN} \\
 V_h &= 198 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Öngerilme kayıpları :

$$\begin{aligned}
 f_{cir} &= 3,92 \text{ MPa} \\
 f_{cds} &= 5,70 \text{ MPa} \\
 SH &= 74,41 \text{ MPa} \\
 ES &= 23,49 \text{ MPa} \\
 CR_c &= 7,10 \text{ MPa} \\
 CR_s &= 27,58 \text{ MPa} \\
 \eta_1 &= 0,984 \\
 \eta_2 &= 0,907
 \end{aligned}$$

Beton emniyet gerilmeleri :

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_{ci} &= 18,00 \text{ MPa} \\
 \bar{\sigma}_{ti} &= -1,37 \text{ MPa} \\
 \bar{\sigma}_{cf} &= 16,00 \text{ MPa} \\
 \bar{\sigma}_{tf} &= -1,58 \text{ MPa} \\
 \bar{\sigma}_{cs} &= 10,00 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Eğilme durumu beton gerilmeleri ve emniyet gerilmelerinin denetimi :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{b1} &= 6,08 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{ci} \\
 \sigma_{t1} &= 4,78 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{ci} \\
 \sigma_{b2} &= 1,20 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{cf} \\
 \sigma_{t2} &= 8,49 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{cf} \\
 \sigma_{b3} &= -1,47 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{tf} \\
 \sigma_{t3} &= 9,87 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{cf} \\
 \sigma_{ts3} &= 1,98 \text{ MPa} &<& \bar{\sigma}_{cs}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{b4} &= -7,25 \text{ MPa} > \bar{\sigma}_{tf} & \text{Yetersiz !!!} \\
 \sigma_{t4} &= 12,86 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{cf} \\
 \sigma_{ts4} &= 6,26 \text{ MPa} < \bar{\sigma}_{cs}
 \end{aligned}$$

Eğilme taşıma gücü değerlerinin hesabı :

$$\gamma^* = 0,28$$

$$\beta_1 = 0,766$$

Kompozit kesit

$$f_{su}^* = 1837 \text{ MPa}$$

$$a = 14,86 \text{ cm (basınç bölgesi dikdörtgen)}$$

$$\phi M_n = 5741 \text{ kN}\cdot\text{m} < M_{d,c} = 8229 \text{ kN}\cdot\text{m} \text{ Yetersiz !!!}$$

Prefabrike kesit

$$f_{su}^* = 1843 \text{ MPa}$$

$$a = 11,65 \text{ cm (basınç bölgesi dikdörtgen)}$$

$$\phi M_n = 5002 \text{ kN}\cdot\text{m} > M_{d,p} = 3299 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Maksimum donatı oranı denetimi :

$$\psi_c = 0,085 < 0,36 \beta_1$$

$$\psi_p = 0,078 < 0,36 \beta_1$$

Minimum donatı oranı denetimi :

$$M_{cr,c}^* = 3993 \text{ kN}\cdot\text{m} < \phi M_n / 1,2 = 4784 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{cr,p}^* = 3538 \text{ kN}\cdot\text{m} < \phi M_n / 1,2 = 4168 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Kayma emniyet gerilmeleri denetimi :

$$\tau_i = 1,38 \text{ MPa} < \bar{\tau}_i = 2,74 \text{ MPa}$$

$$\tau_f = 2,34 \text{ MPa} < \bar{\tau}_f = 3,16 \text{ MPa}$$

Kesme taşıma gücü hesabı :

$$V_{ci} = 501 \text{ kN}$$

$$V_{cw} = 614 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= 501 \text{ kN} \\
 V_s &= 970 \text{ kN} \\
 \phi \cdot (V_c + V_s) &= 1324 \text{ kN} > V_u = 1085 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Sehim denetimleri :

$$\begin{aligned}
 f_1 &= -1,22 \text{ cm} < L/500 = 6,4 \text{ cm} \\
 f_2 &= 0,46 \text{ cm} < L/500 = 6,4 \text{ cm} \\
 f_3 &= 3,00 \text{ cm} < L/500 = 6,4 \text{ cm} \\
 f_{4,1} &= 2,10 \text{ cm} \\
 f_{4,2} &= 1,84 \text{ cm} \\
 f_4 &= 2,10 \text{ cm} < L/1000 = 3,2 \text{ cm} \\
 f &= 5,10 \text{ cm} < L/500 = 6,4 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Geometri denetimleri :

$$\begin{aligned}
 (t_t + p_t)_{\min} &= 7,80 \text{ cm} < (t_t + p_t) = 27 \text{ cm} \\
 b_b &= 70 \text{ cm} < b_t = 104,20 \text{ cm} \\
 b_w &= 22 \text{ cm} < b_b = 70 \text{ cm} \\
 t_{b,\min} &= 18 \text{ cm} < t_b = 20 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Yukarıdaki hesap detayları incelendiğinde eğilme emniyet gerilmeleri 4. denetim giriş alt ucunda oluşan gerilme emniyet gerilmesini aşmaktadır. Eğilme taşıma gücüne göre hesapta ise kompozit kesit direnme momenti kesitte oluşan hesap momentinin altında kalmaktadır. Bu iki ihlal nedeniyle bu çözüm dizisinin temsil ettiği çözüm geçerli bir çözüm değildir. Bu nedenle ihlal edilme fonksiyonunun değerine bağlı olarak bu çözüm dizisinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri artırılacaktır.

#### 2.4.1.1.3. Başlangıç Nesli Birinci Çözüm Dizisine ait Cezalandırılmış Amaç Fonksiyonu Değerinin Hesaplanması

Yukarıda da değinildiği gibi başlangıç nesli birinci çözüm dizisinin temsil ettiği çözüm iki sınırlayıcıyı ihlal etmektedir. Tüm sınırlayıcılara ait sınırlayıcı fonksiyonu ve ihlal edilme katsayısı değerleri Tablo 9'da verilmektedir.



Tablo 9. Uygulama-1'in birinci tasarım başlangıç nesli 1. çözüm dizisi sınırlayıcı fonksiyonu ve ihlal edilme katsayıları

Sınırlayıcı numarası (i)	Sınırlayıcı fonksiyonu (g <sub>i</sub> )	İhlal edilme katsayısı (p <sub>i</sub> )	Sınırlayıcı numarası (i)	Sınırlayıcı fonksiyonu (g <sub>i</sub> )	İhlal edilme katsayısı (p <sub>i</sub> )
1	-0,66	0	15	-0,17	0
2	-0,73	0	16	-0,15	0
3	-0,93	0	17	-1,19	0
4	-0,47	0	18	-0,93	0
5	-0,07	0	19	-0,53	0
6	-0,38	0	20	-0,34	0
7	-0,80	0	21	-0,20	0
8	3,59	3,59	22	-0,50	0
9	-0,20	0	23	-0,26	0
10	-0,37	0	24	-0,18	0
11	0,43	0,43	25	-0,10	0
12	-0,34	0	26	-0,33	0
13	-0,69	0	27	-0,69	0
14	-0,72	0	28	-0,71	0

Ceza fonksiyonu, ihlal edilme katsayıları toplanmak suretiyle  $P=4,02$  olarak hesaplanır.

Bu çözüme ait prefabrike kiriş beton hacmi  $163,89 \text{ m}^3$ , öngerme donatısı ağırlığı ise  $50,64 \text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır. Köprü üstyapı maliyetini ifade eden amaç fonksiyonu değeri ise prefabrike kiriş beton hacmine ve öngerme donatısı ağırlığına bağlı olarak

$$C = 650 \cdot 163,89 + 700 \cdot 50,64 \approx 141981$$

şeklinde hesaplanmıştır. Cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise, ceza katsayısı  $K=1,1$  alınarak

$$\Phi_{(x)} = 141981 \cdot [1 + 1,1 \cdot 4,02] \approx 769821$$

olarak hesaplanmıştır.

#### 2.4.1.1.4. Genetik Algoritmanın İşleyişi

Burada genetik algoritmanın işleyişinin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk iki iterasyona ait işleyiş detayları tablolar halinde verilmektedir. Bu tablolardan çözüm dizilerine ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerlerinin, uyum derecelerinin, uyum faktörlerinin belirlenmesi, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin nesle uygulanışı açık bir şekilde görülebilir. Bu kapsamda Tablo 10'da birinci iterasyona ve Tablo 11'de ise ikinci iterasyona ait genetik algoritma işleyiş detayları verilmektedir.

Bu tabloların ilk sütununda, ilgili çözüm dizisinin sıra numarası yer almaktadır. 2. sütunda iterasyon başlangıç nesli bulunmaktadır. Bu tasarımda önerilmeli kiriş sayısı, gövde genişliği, üst başlık kalınlığı, alt başlık kalınlığı, üst guse yüksekliği ve alt guse yüksekliği 3'er karakterden oluşan dizilerle, önerilmeli kiriş yüksekliği, alt başlık genişliği ve önerilme donatısı adedi 4'er adet karakterden oluşan dizilerle temsil edildiğinden başlangıç neslindeki her bir çözüm dizisi 30 adet karakterden oluşmaktadır. 3., 4., 5., 6., 7., 8., 9., 10. ve 11. sütunlarda tasarım değişkenlerinin sırasıyla kiriş sayısı, kiriş yüksekliği, alt başlık genişliği, gövde genişliği, üst başlık kalınlığı, alt başlık kalınlığı, üst guse yüksekliği, alt guse yüksekliği, önerilme donatısı adedi değerleri yer almaktadır. 12. sütunda amaç fonksiyonu, 13. sütunda ceza fonksiyonu ve 14. sütunda ise cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri verilmektedir. 15. ve 16. sütunlarda sırasıyla kopyalama operatörünün uygulanacağı çözüm dizilerinin belirlenmesinde kullanılan uyum fonksiyonu ve uyum faktörü değerleri, 17. sütunda çözüm dizilerinin çaprazlama havuzunda kaç kez yer alacağını gösteren rakamlar, 18. sütunda ise çaprazlama havuzu bulunmaktadır. 19. sütunda hangi bireylerin birbiriyle çaprazlanacağını gösteren eş değerleri ve 20. sütunda çaprazlama maskesi verilmektedir. 21. sütunda mutasyona uğrayacak genleri göstermek üzere, mutasyona uğrayacak gen sayısı kadar belirlenmiş olan, çözüm dizisi ve gen numaraları verilmektedir. 22. sütunda ise kopyalama, çaprazlama ve mutasyon operatörleri neticesinde belirlenmiş olan yeni nesil yer almaktadır.

Tablo 10. Uygulama-1'in birinci tasarım 1. iterasyon genetik algoritma işleyiş detayları

Dizi No	Başlangıç nesli	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C	P	$\Phi^{(s)}$	$F_i$	$F_{c,d}$
1	010110110000110010101010100101	9	135	70	22	10	20	17	10	16	141981	4,02	770008	3420145	1,28
2	10111010100001111011000010100	12	135	50	17	25	28	15	8	14	173030	3,71	879590	3310562	1,24
3	100010000100100010001010101001	11	90	40	20	10	15	17	10	24	152351	11,55	1950253	2239899	0,84
4	100001111010100111101010111011	11	85	95	20	15	30	17	12	28	210822	10,27	2593669	1596483	0,60
5	001110110100100001000010011000	8	135	80	20	8	25	8	8	22	136817	1,66	386195	3803957	1,42
6	010011110101011100100001011100	9	105	80	30	22	20	5	17	30	186145	3,03	807182	3382970	1,27
7	101110001110001110000110100010	12	130	65	15	25	15	12	10	10	150536	9,17	1668656	2521497	0,94
8	01101101100110010011100110110	10	100	100	22	10	18	20	12	18	158548	9,15	1753787	2436365	0,91
9	101110101000011011011000010100	12	135	50	17	20	28	15	8	14	165641	3,37	780046	3410107	1,28
10	10111010100001111010001010100	12	135	50	17	25	28	5	17	14	169347	3,45	811967	3378185	1,26
11	101110000101100010001010101001	12	130	40	35	10	15	17	10	24	205992	1,37	517521	3672631	1,37
12	100001111010100111101000111011	11	85	95	20	15	30	15	12	28	209362	10,23	2566560	1623592	0,61
13	11101001100110101010011001101	14	100	60	22	12	28	8	15	32	233302	2,44	858752	3331400	1,25
14	010011110101011100100000111100	9	105	80	30	22	20	5	12	30	183805	2,93	775860	3414292	1,28
15	100110001110001110000111000011	11	130	65	15	25	15	12	15	12	151682	7,51	1404029	2786123	1,04
16	11101001100110011001100110011001	14	100	60	22	10	25	20	12	12	164310	15,07	2887435	1302717	0,49
17	111110110100100001001011011000	14	135	80	20	8	25	17	17	22	234221	0,40	336449	3853703	1,44
18	000011110101011100110101011100	7	105	80	30	22	22	10	17	30	161513	6,72	1355979	2834174	1,06
19	101110001110001110000110100000	12	130	65	15	25	15	12	10	6	138719	21,52	3422388	767765	0,29
20	011011001100100011001100110010	10	100	60	20	10	25	20	12	10	122381	27,72	3853703	336449	0,13

Tablo 10. devam

Dizi No	Dizi ad.	Çaprazlama havuzu	Eş	Çaprazlama maskesi	Mutas. genleri	Yeni nesil
1	1	010110110000110010101010100101	13	1110110101101001000000110000100		101110100100110010101010101000001
2	1	101110101000011111011000010100	10	101001001010011100111101101110		101110101000011011011000010100
3	1	100010000100100010001010101001	11	000001000000011011100101110000		100010000100111011001011011001
4	1	100001111010100111101010111011	6	000111100100011101000000101000		100110111110000011101010011011
5	2	001110110100100001000010011000	14	110100001000000001111010101011		101010111100100001101000101011
6	1	001110110100100001000010011000	4	000111100100011101000000101000		001001110000100101000010111000
7	1	010011110101011100100001011100	15	00001000111011110001001110101		010011111101110100100001001101
8	1	101110001110001110000110100010	17	011000010101001111010100100000	4 - 13	100110001110001110000110000010
9	1	011011011100110010011100110110	18	011100110110110000111010001010		011111111100100010001110111100
10	1	101110101000011011011000010100	2	101001001010011100111101101110		101110101000011111011000010100
11	2	101110101000011111010000101000	3	000001000000011011100101110000	5 - 26	101110101000000110010000100100
12	1	101110000101100010001010101001	16	000011010000101111101011000010		101111010111001100100100000101001
13	1	101110000101100010001010101001	1	111011010110100100000110000100	12 - 11	010110010001100010001010101101
14	1	100001111010100111101000111011	5	110100001000000001111010101011		000101110010100111000010011000
15	1	111011001100110101010011001101	7	000010001110111110001001110101		111011000100011101010011011100
16	0	010011110101011100100000111100	12	000011010000101111101011000010		010010100101110010000101011100
17	2	100110001110001110000111000011	8	011000010101001111010100100000		101110001110001110000111100011
18	1	111110110100100001001011011000	9	011100110110110000111010001010		111010010100110001011001010010
19	0	111110110100100001001011011000	20	111011111000110000100011001001		0001111101010100001101001011000
20	0	000011110101011100110101011100	19	1110111110001100001000011001001		111010110100101100010111011100

Tablo 11. Uygulama-1'in birinci tasarım 2. iterasyon genetik algoritma işleyiş detayları

Dizi No	Başlangıç nesli	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$t_{ps}$ (ad.)	C	P	$\Phi(x)$	$F_i$	$F_{c,i}$
1	101110100100110010101010100001	12	135	40	22	10	20	17	10	8	134029	14,73	2305005	4428367	0,83
2	101110101000011011011000010100	12	135	50	17	20	28	15	8	14	165641	3,37	780046	5953327	1,11
3	100010000100111011001011011001	11	90	40	22	20	25	17	17	24	164418	12,52	2429344	4304029	0,81
4	10011011110000011101010011011	11	135	105	15	10	30	17	8	28	221308	0,73	399685	6333687	1,19
5	101010111100100001101000101011	12	95	100	20	8	30	15	10	28	221774	5,59	1585216	5148157	0,96
6	001001110000100101000010111000	8	85	70	20	12	25	8	12	22	123552	20,24	2874293	3859079	0,72
7	010011111011101000100001001101	9	105	100	40	12	20	5	15	32	197838	2,28	694472	6038901	1,13
8	100110001110001110000110000010	11	130	65	15	25	15	12	5	10	140546	11,28	1883890	4849483	0,91
9	011111111100100010001101111100	19	150	100	20	10	15	25	12	30	205364	0,28	267529	6465843	1,21
10	101110101000011111011000010100	12	135	50	17	25	28	15	8	14	173030	3,71	879590	5853782	1,10
11	101110101000000110010000100100	12	135	50	15	15	18	5	10	14	138731	2,44	511199	6222174	1,16
12	101111010111001100100000101001	12	140	85	25	22	20	5	10	24	227015	0,12	255814	6477558	1,21
13	010110010001100010000101010101	9	130	70	35	10	15	17	10	32	193146	0,60	320622	6412751	1,20
14	000101110010100111000010011000	7	125	75	20	15	25	8	8	22	129679	4,47	767913	5965460	1,12
15	111011000100011101010011011100	14	100	40	17	22	28	8	17	30	213091	2,06	695315	6038058	1,13
16	010010100101110010000101011100	9	95	40	40	10	15	17	12	30	159839	11,63	2205361	4528012	0,85
17	1011100011100011100000111100011	12	130	65	15	25	15	12	20	12	162684	6,20	1272017	5461356	1,02
18	1110100101001100001011000100010	14	90	80	22	8	28	15	17	10	172823	33,16	6477558	255814	0,05
19	0001111010101000011010001011000	7	150	80	30	8	30	15	17	22	155426	2,44	573064	6160308	1,15
20	111010110100101100001011011100	14	95	80	20	22	18	12	17	30	241073	1,59	663230	6070143	1,14

Tablo 11. devam

Dizi No	Dizi ad.	Çaprazlama havuzu	Eş	Çaprazlama maskesi	Mutas. genleri	Yeni nesil
1	1	10111010010011001010101010100001	9	00001010110101111010010001010		101110101100100010101010101001
2	1	101110101000011011011000010100	17	010110110011000001001101000011		111010101001011010011000010100
3	1	100010000100111011001011011001	12	100000011110001110011100010101		100010010110111101000011001001
4	1	10011011111000011101010011011	19	01011101100100100001001000101		100111110110000011101011011010
5	1	10101011110010001101000101011	11	101110110101100001111011101000		101110101000000001000100011
6	1	001001110000100101000010111000	7	10011110000001110000111011101		001011110000100101000001101101
7	1	0100111110110100100001001101	6	10011110000001110000111011101		01000111101110100100010011000
8	1	100110001110001110000110000010	15	000110110100111101101001100100	15 - 19	100100111010100111000110000010
9	1	01111111100100010001110111100	1	000010101101011111010010001010		01111110100110010001110110100
10	1	10111010100001111011000010100	14	110000111110111101001100010011	19 - 25	011110010000100010011000000101
11	1	10111010100000110010000100100	5	101110110101100001111011101000		101010111100100110101000101100
12	2	101111010111001100100000101001	3	100000011110001110011100010101		101111000101001010101000111001
13	1	101111010111001100100000101001	16	110111001001100111000110011011	11 - 18	111011010110001101100010111000
14	1	01011001000110001000101010101	10	110000111110111101001100010011		100110101001011111001010111100
15	1	000101110010100111000010011000	8	000110110100111101101001100100		000111000110001110100010011000
16	1	111011000100011101010011011100	13	110111001001100111000110011011		101111000101011100010001001101
17	1	01001010010110010001010111100	2	0101101100111000001001101000011		0001101001001100110010101011100
18	0	101110001110001110000111100011	20	000100101100010101010000010000		101010100110001110010111110011
19	1	00011110101010001101001011000	4	0101111011001001000001001000101		000110111101010001101000111001
20	1	11101010100101000010111011100	18	000100101100010101010000010000		111110011100101100000111001100

Tablo 10 ve Tablo 11'den görüldüğü gibi bir önceki iterasyondaki yeni nesil başlangıç nesli olarak alınarak optimum çözümü arama işlemine devam edilir. Bu iteratif işlem sırasında bir sonraki iterasyona geçmeden önce, çaprazlama işleminden hemen sonra optimum tasarım için gerekli yakınsamanın sağlanıp sağlanmadığı ve maksimum iterasyon sayısına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmektedir. Genetik algoritmanın işleyişi hakkında bundan önceki bölümlerde de detaylı bilgi verildiği için bu bölümde daha fazla ayrıntıya girilmeyecektir.

#### **2.4.1.1.5. Genetik Algoritmanın Yakınsama Performansı**

Bu şekilde devam eden iterasyonlar neticesinde 168. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmış ve optimum tasarım sonlandırılmıştır. Sonuç neslinde yer alan çözüm dizilerine ait değerler Tablo 12'de verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi sonuç neslindeki 12 çözüm dizisi birbirinin aynıdır. Bu durum optimum tasarımın sonuçlanması için gerekli yakınsama değeri olan %60'ın sağlandığını göstermektedir. Yine bu tablodan görüldüğü gibi optimum çözüme ait amaç fonksiyonu ve cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri aynı olmakta, bir başka deyişle ceza fonksiyonu değeri sıfır olmaktadır. Bu da, burada ulaşılan çözümün sınırlayıcıları ihlal etmeyen uygulanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Yine Tablo 12'den görüldüğü gibi bu çalışmada yapılan optimum tasarım neticesinde bulunan optimum çözüme ait önerilme donatısı ve önerilmeli kiriş betonu maliyeti 151204 br. dir. Burada dikkate alınan birim fiyatlar ile uygulama projesine ait üstyapı önerilme donatısı ve önerilmeli kiriş maliyeti ise 158215 br. olmaktadır. Bu çalışmada yapılan tasarım neticesinde bulunan sonuçlarla uygulama projesindeki değerler Tablo 13'de verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi, bu uygulama için yapılan bu tasarım neticesinde uygulama projesine oranla yaklaşık %5 daha ekonomik bir çözüm elde edilmektedir.

Tablo 12. Uygulama-1'in birinci tasarım sonuç (168. iterasyon) nesli

Dizi No	Sonuç nesli	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$P_t$ (cm)	$P_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C	P	$\Phi_{(s)}$
1	100110100100000011101000011000	11	135	40	15	10	30	15	8	22	152920	0,00	152920
2	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
3	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
4	101110000100000011101001011000	12	130	40	15	10	30	15	17	22	164423	0,15	191285
5	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
6	100110000100000001101000011000	11	130	40	15	8	30	15	8	22	148054	0,21	181454
7	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	20	8	22	155142	0,07	166251
8	100110000100000011101000011000	11	130	60	15	10	30	15	8	22	166763	0,00	166763
9	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
10	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
11	100110000110000011101000011000	11	130	45	15	10	30	15	8	22	155094	0,00	155094
12	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
13	100110000100010011101000011000	11	130	40	17	10	30	15	12	22	155849	0,16	183082
14	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
15	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
16	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
17	100111000010000001101000011000	11	140	40	15	10	30	20	8	22	158574	0,00	158574
18	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
19	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204
20	100110000100000011101000011000	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204	0,00	151204



Tablo 13. Uygulama-1'in birinci tasarım sonucu ile uygulama projesinin karşılaştırılması

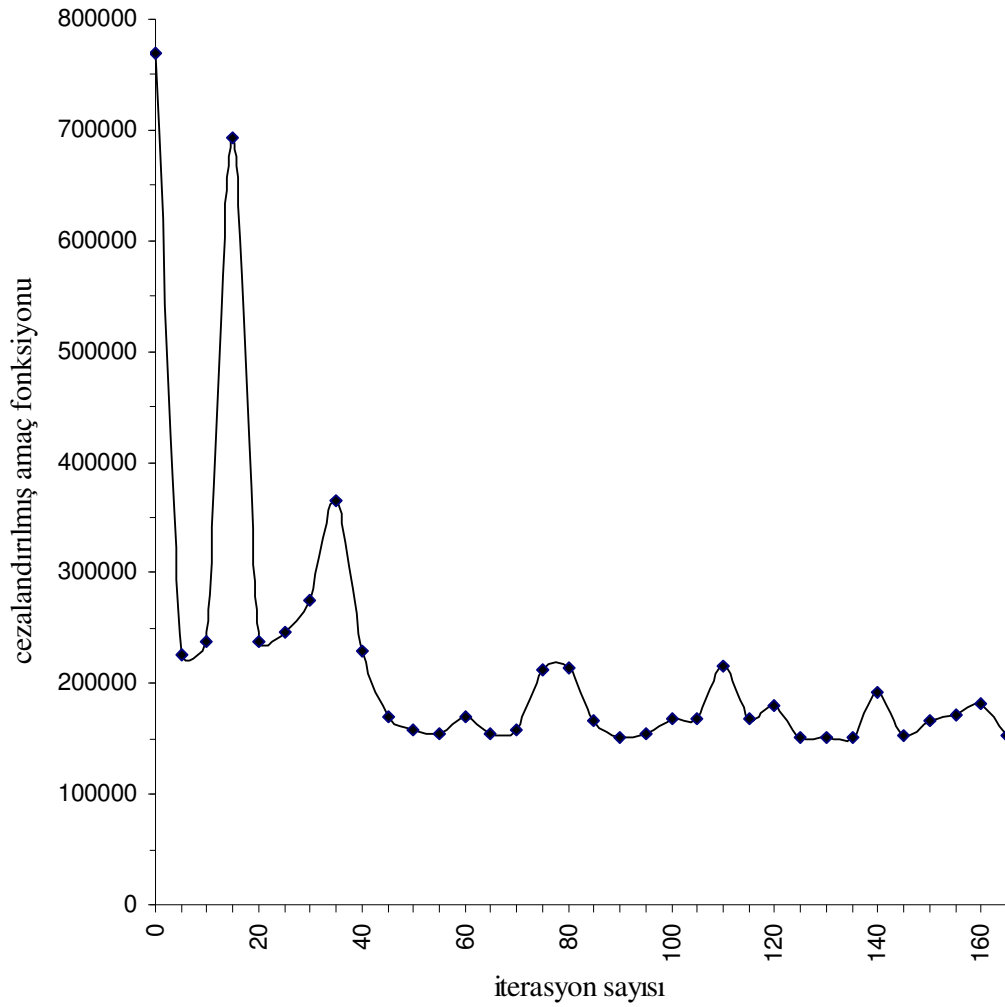
	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Bu çalışma	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204
Uygulama projesi (Emay, 2004)	10	125	75	20	10,7	16	7,3	8	25	158215

Yine Tablo 13'den görüldüğü gibi uygulama projesinde kullanılan kesit ölçüleri bu tasarımda kullanılan tasarım değişkeni kümelerindeki değerlere oranla daha hassas seçilmiştir. Dolayısıyla tasarım değişkeni kümelerindeki değerlerin sayısı artırıldıkça ulaşılabilecek sonucun kalitesi de o oranda artacaktır. Öte yandan bu tasarımda 20 adet çözüm dizisinden oluşan bir nesil kullanılmıştır. Oysa daha geniş bir nesil içinde çalışacak bir genetik algoritmanın daha verimli olacağı beklenmektedir. Burada ilk tasarım olması ve programa ilişkin detayların daha rahat verilebilmesi için tasarım değişkeni kümelerindeki değer sayıları ve nesildeki çözüm dizisi sayısı kısıtlı tutulmuştur. Bundan sonraki tasarımlarda daha fazla değere sahip tasarım değişkeni kümeleri, daha fazla çözüm dizisine sahip nesiller, farklı çaprazlama ve mutasyon türleri kullanılmak suretiyle bunların optimum çözümlere ulaşmaya etkileri araştırılacaktır.

Bu tasarım için seçilen tasarım değişkeni kümelerindeki değerler (bkz. Tablo 8) ile yaklaşık 1 milyar adet olası çözüm mevcuttur. Tasarım boyunca 168 iterasyonda sistem toplam 3360 kere çözülmüş ve olası 1 milyardan fazla çözüm içindeki en iyi birkaç çözümden biri bulunmuştur.

Genetik algoritmanın optimum çözüme yakınsama performansının daha iyi anlatılabilmesi için Şekil 14'de 1. çözüm dizisine ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi, Şekil 15'de ise nesle ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Bunlardan Şekil 14'de her beş iterasyonda bir değer verilirken Şekil 15'de her iterasyondaki cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri verilmektedir.

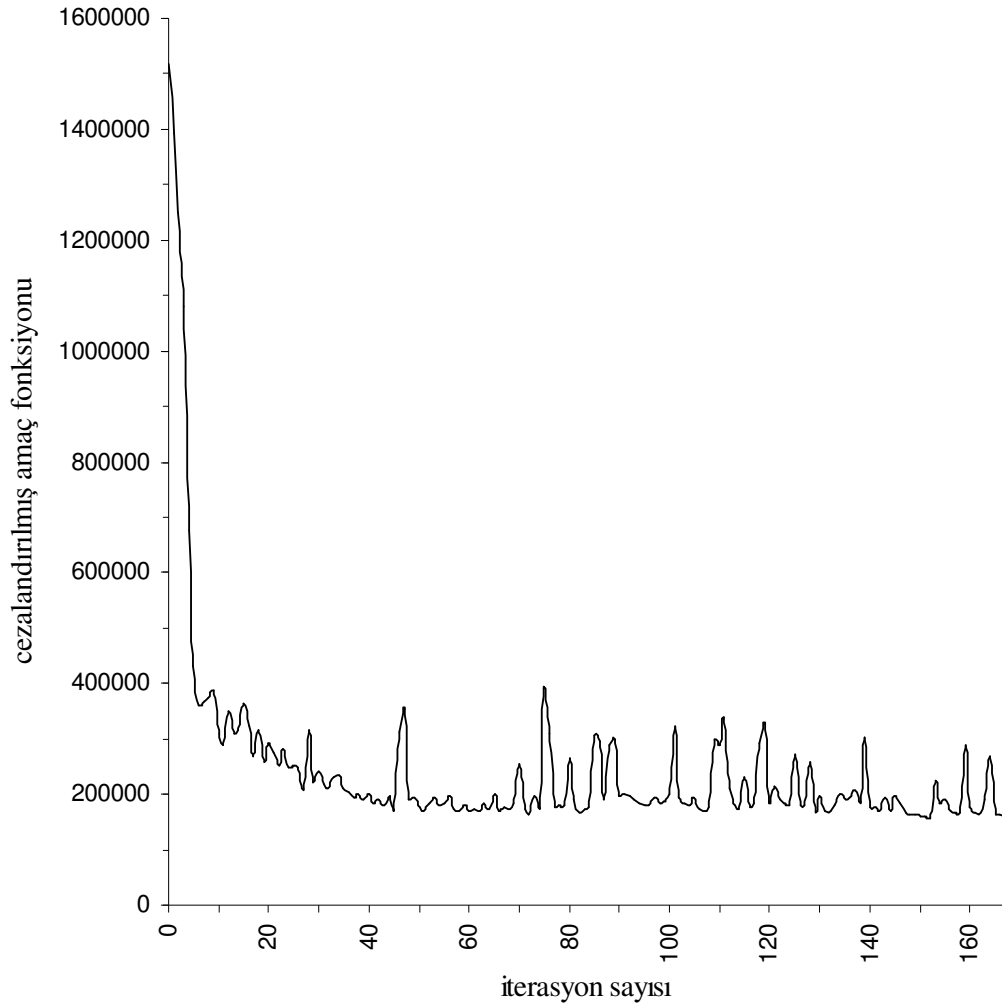
Bu grafikler incelendiğinde genelde bir yakınsama olmasına rağmen bazı bölümlerde grafikte ters yönde hareketler gözükmemektedir. Bu hareketler çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile oluşturulan yeni çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerlerinin bir önceki nesle oranla daha kötü olmasından kaynaklanmaktadır ve bu beklenen bir durumdur. Özellikle mutasyon operatörü ile cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri çok iyi olan çözüm dizileri bir anda cezalandırılmış amaç fonksiyonu çok kötü olan çözüm dizilerine dönüşebilmektedirler.



Şekil 14. Uygulama-1'in birinci tasarımı için 1 nolu çözüm dizisi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi

Yine Şekil 15'den görüldüğü gibi başlangıç neslinde 1519002 olan cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değeri optimum tasarım sonucunda 160006 ya inmektedir. Buradan genetik algoritmanın rasgele seçilmiş çözümleri genetik yasalara göre evrimleştirerek çok daha iyi çözümleri oluşturma yeteneğinin oldukça yüksek olduğunu anlamak mümkündür.

Şekil 16'da bu tasarım neticesinde ulaşılan optimum çözüme ait köprü üstyapı enkesiti, Şekil 17'de ise optimum çözüme ait önerilmeli giriş enkesiti görülmektedir.



Şekil 15. Uygulama-1'in birinci tasarımı için cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerlerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi



### 2.4.1.2. İkinci Tasarım

İkinci tasarımda tasarım parametreleri ve tasarım değişkeni değer kümeleri birinci tasarım ile aynı alınmıştır. Bu tasarımda dikkate alınan optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı	: 30
Çözüm dizisi karakter adedi	: 30
Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,5
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 500
Ceza katsayısı	: 1,1

Birinci tasarımdaki başlangıç nesline yine rasgele belirlenmiş karakterler ile oluşturulmuş 10 adet çözüm dizisi daha ilave edilmek suretiyle bu tasarıma ait başlangıç nesli oluşturulmuştur. Başlangıç neslindeki çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ortalamaları 2060159 dur. Başlangıç neslindeki çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 271990, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 8069940 dır.

Bu veriler ile yapılan tasarım neticesinde 283. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmıştır. İkinci tasarım sonucuna ait tasarım değişkeni değerlerinin birinci tasarım ve uygulama projesindeki değerler ile karşılaştırılabilmesi için bu üç çözüme ait tasarım değişkeni değerleri Tablo 14'de verilmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi, bu tasarım neticesinde bulunan cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 130036 dır. Ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla bulunan sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümü ifade etmektedir. Bu tasarım neticesinde ulaşılan sonuç birinci tasarıma göre yaklaşık %14 ve uygulama projesine göre de yaklaşık %18 daha iyi bir sonuçtur. Bu sonuçlardan hareketle başlangıç neslindeki çözüm dizisi sayısının yeterli düzeyde olmasının genetik algoritmanın performansı üzerine nedenli etkili olduğunu anlamak mümkündür.

Tablo 14. Uygulama-1'in ikinci tasarımı ile birinci tasarım sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması

	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
İkinci tasarım (Bu çalışma)	9	140	70	15	10	18	5	5	22	130036
Birinci tasarım (Bu çalışma)	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204
Uygulama projesi (Emay, 2004)	10	125	75	20	10,7	16	7,3	8	25	158215

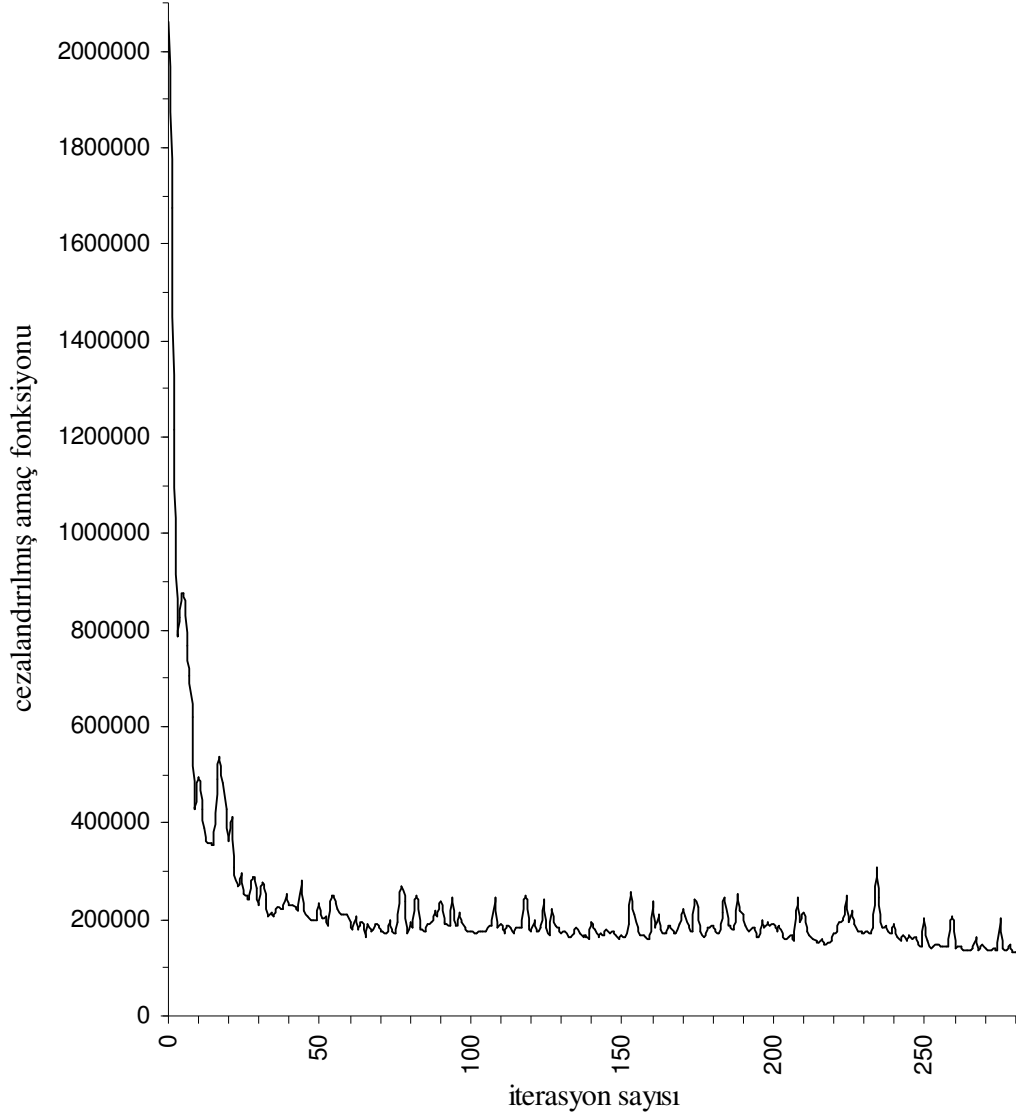
Bu tasarımda nesle ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 18'de, bu tasarıma ait köprü üstyapı enkesiti ve önerilmeli kiriş enkesiti ise sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20'de verilmektedir.

#### 2.4.1.3. Üçüncü Tasarım

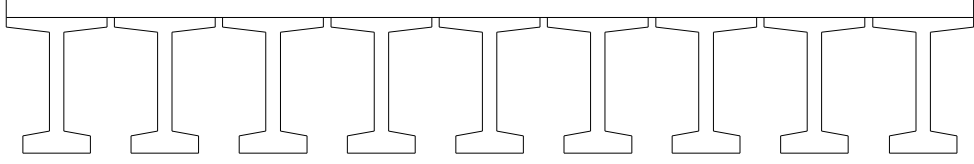
Bu tasarımda nesildeki çözüm dizisi sayısının genetik algoritmanın en iyi çözümü bulma performansına etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla, diğer tüm veriler birinci ve ikinci tasarım ile aynı alınarak, nesildeki çözüm dizisi sayısı sırasıyla 16, 20, 26, 30, 36, 40, 46 ve 50 alınarak optimum tasarım gerçekleştirilmektedir.

Bu tasarımlar için rasgele belirlenen başlangıç nesline ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değeri, en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ve en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri Tablo 15'de verilmektedir.

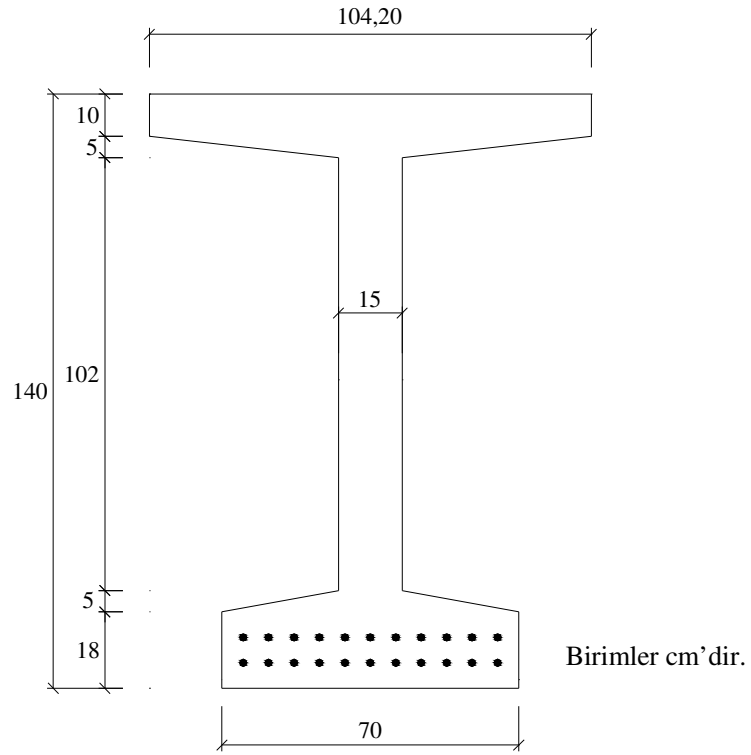
Başlangıç neslindeki çözüm dizisi sayısı birbirinden farklı olan sekiz adet optimum tasarım için yakınsamanın sağlandığı iterasyon sayısı, optimum çözüme ait tasarım değişkeni değerleri ve cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri Tablo 16'da verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi bazı tasarımlarda maksimum iterasyon sayısı içinde yakınsama sağlanamamıştır. Bu tasarımlar için son nesildeki ceza fonksiyonu sıfır olan çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine sahip olanı bu tabloda verilmiştir.



Şekil 18. Uygulama-1'in ikinci tasarımı için cezalandırılmış amaç fonksiyonu ortalama değerlerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi



Şekil 19. Uygulama-1'in ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 20. Uygulama-1'in ikinci tasarımına ait önerilmeli kiriş enkesiti



Tablo 15. Uygulama-1'in üçüncü tasarım için kullanılan başlangıç nesillerine ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri

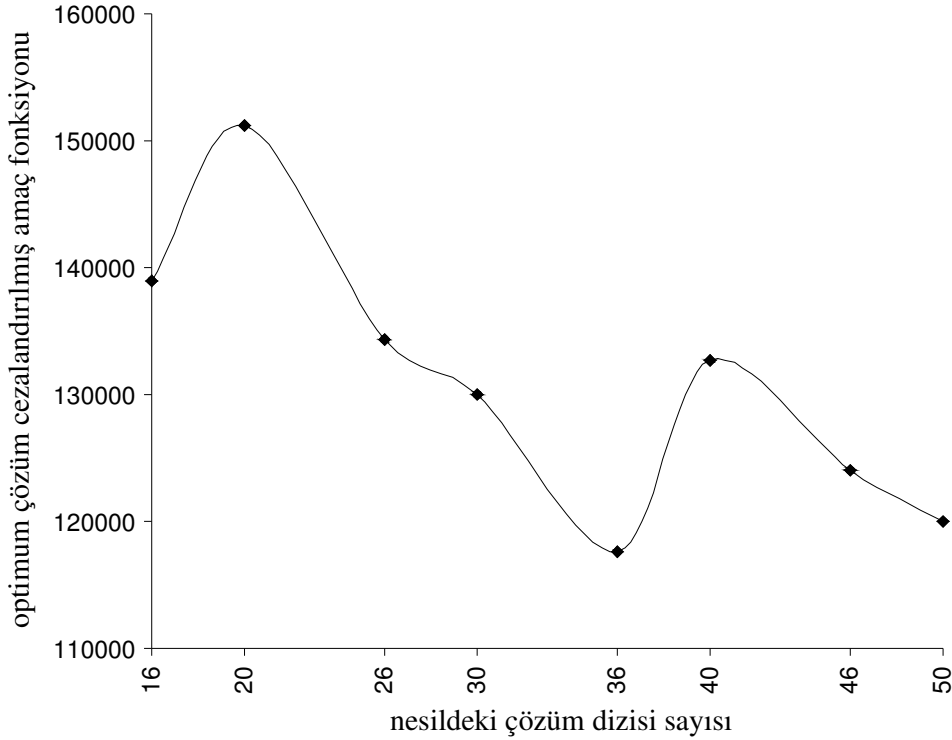
Çözüm No	Çözüm dizisi miktarı	Cezalandırılmış amaç fonksiyonu		
		En iyi değer	En kötü değer	Ortalama değer
1	16	386195	2887435	1338220
2	20	336449	3853703	1519002
3	26	271990	8069940	1910350
4	30	271990	8069940	2060159
5	36	271990	8069940	2158128
6	40	191128	9811941	2285164
7	46	191128	9811941	2360324
8	50	191128	9811941	2417156

Tablo 16. Uygulama-1'in üçüncü tasarımındaki sekiz farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması

Çözüm No	Çözüm dizisi miktarı	Yakın. iter. No	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
1	16	74	7	135	70	20	12	25	5	5	32	139007
2	20	168	11	130	40	15	10	30	15	8	22	151204
3	26	349	7	150	70	17	10	25	8	5	30	134343
4	30	283	9	140	70	15	10	18	5	5	22	130036
5	36	323	8	150	70	15	8	18	5	5	22	117560
6	40	Yakınsama yok	7	140	55	20	10	30	8	5	30	132713
7	46	Yakınsama yok	7	150	70	17	8	25	8	5	26	123980
8	50	Yakınsama yok	7	150	60	17	8	25	8	5	26	119975

Tablo 16'dan görüldüğü gibi üçüncü tasarım neticesinde ulaşılan en iyi çözüme ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 117560 dır. Bu sonuç uygulama projesine oranla yaklaşık %26 daha ekonomiktir.

Yine Tablo 16'dan görüldüğü gibi nesildeki çözüm dizisi sayısı arttığında buna bağlı olarak yakınsama sağlanması için gerekli iterasyon sayısı ve dolayısıyla çözüme ulaşma süresi artmaktadır. Nesildeki çözüm dizilerinin sayılarının artımıyla ulaşılan sonucun kalitesinde sürekli olmasa da genel bir iyileşme olmaktadır. Ancak nesildeki çözüm dizisi sayısının artımı aynı zamanda optimum çözüme ulaşmak için daha fazla iterasyon ve süre gerektirdiği de göz önüne alınırsa her problem için optimum çözüm dizisi sayısından söz edilebilmektedir. Bu problem için optimum çözüm dizisi sayısının ise 30 ~ 40 arasında olduğu görülmektedir. Nesildeki çözüm dizisinin sayısına bağlı olarak ulaşılan cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin değişiminin daha iyi ifade edilebilmesi için bu ilişki Şekil 21'de verilmektedir.



Şekil 21. Uygulama-1'in üçüncü tasarımı için optimum çözüm cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin çözüm dizisi sayısına bağlı olarak değişimi

#### 2.4.1.4. Dördüncü Tasarım

Bu tasarımda tasarım değişkeni değer kümelerindeki değer sayısı artırılarak ulaşılabilecek sonuçlarda bir değişme olup olmayacağı incelenmektedir. Gerekli tasarım parametreleri birinci tasarım ile aynı alınmıştır.

9 adet tasarım değişkeninin bu tasarım için seçilen değerlerini alabilecekleri kümeler Tablo 17’de verilmektedir.

Tablo 17. Uygulama-1’in dördüncü tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli kiriş sayısı ( $n_b$ )	8	7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14
Öngerilmeli kiriş yüksekliği ( $h_b$ )	32	70; 72,5; 75; 77,5; 80; 82,5; 85; 87,5; 90; 92,5; 95; 97,5; 100; 102,5; 105; 107,5; 110; 112,5; 115; 117,5; 120; 122,5; 125; 127,5; 130; 132,5; 135; 137,5; 140; 142,5; 145; 150
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	32	27,5; 30; 32,5; 35; 37,5; 40; 42,5; 45; 47,5; 50; 52,5; 55; 57,5; 60; 62,5; 65; 67,5; 70; 72,5; 75; 77,5; 80; 82,5; 85; 87,5; 90; 92,5; 95; 97,5; 100; 102,5; 105
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	16	8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25; 30
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	16	10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5; 25; 27,5; 30; 32,5; 35; 37,5; 40; 42,5; 45; 50
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	16	5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	32	6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37

Tablo 17’den görüldüğü gibi ilk üç tasarımdan farklı olarak bu tasarımda öngerilmeli kiriş yüksekliği, alt başlık genişliği, öngerilme donatısı adedi için 32 adet değer, üst başlık kalınlığı, alt başlık kalınlığı, üst guse yüksekliği için 16 adet değer içeren

tasarım değişkeni değer kümeleri kullanılmaktadır. Bunun yanısıra gövde genişliği ve alt guse yüksekliği için kullanılan değerlerde de, bundan önceki tasarımlarda bulunan değerler de göz önünde tutularak, değişiklikler yapılmıştır.

Uygulama-1'in dördüncü tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı	: 36
Çözüm dizisi karakter adedi	: 36
Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,4
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,1

Yakınsama için gerekli iterasyon sayısını biraz azaltabilmek için mutasyon oranı bu tasarım için %0,5 den %0,4 e indirilmiştir. Başlangıç neslindeki 36 çözüm dizisinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ortalaması 3016110 dur. Başlangıç neslindeki en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 294127, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 12133960 dır.

Bu veriler ile koşturulan program 796. iterasyon sonrasında yakınsamıştır. Bu tasarım neticesi ile ikinci tasarım neticesinde ulaşılan tasarım değişkeni değerleri ve cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri uygulama projesindekilerle karşılaştırmalı olarak Tablo 18'de verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi, elde edilen optimum sonuca ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 124637 dir. Ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla bulunan sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümü ifade etmektedir. Bu tasarımda elde edilen sonuç birinci tasarıma oranla %18 ve ikinci tasarıma oranla %4 daha ekonomiktir. Buradan hareketle tasarım değişkeni kümelerindeki değer miktarının artırılmasının faydalı olduğu söylenebilir. Üçüncü tasarım neticesinde elde edilen en iyi sonucun dördüncü tasarımda elde edilen sonuçtan daha iyi olduğu görülmektedir. Zira orada 8 farklı başlangıç nesli için çözüm yapılmıştır. Burada da farklı başlangıç nesilleri kullanılmak suretiyle çözümler çeşitlendirildiği takdirde ulaşılabilecek cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinin daha küçük olma olasılığı vardır.

Tablo 18. Uygulama-1'in dördüncü tasarım ve ikinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması

	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Dördüncü tasarım (Bu çalışma)	8	145	77,5	15	9	20	5	5	23	124637
İkinci tasarım (Bu çalışma)	9	140	70	15	10	18	5	5	22	130036
Uygulama projesi (Emay, 2004)	10	125	75	20	10,7	16	7,3	8	25	158215

#### 2.4.1.5. Beşinci Tasarım

Bu tasarımda farklı çaprazlama türlerinin genetik algoritmanın performansına etkisi incelenecektir. Bu amaçla bu tasarım için sırasıyla maskeli çaprazlama, tek noktalı çaprazlama ve iki noktalı çaprazlama operatörleri kullanılarak çözüm yapılacaktır. Diğer tüm veriler dördüncü tasarım ile aynı alınmış ancak, iki noktalı çaprazlama ile yapılan tasarımda yakınsama problemi yaşandığından, mutasyon oranı %0,3 alınmıştır.

Bu veriler ile yapılan üç farklı çözüme ait tasarım değişkeni değerleri, cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ve yakınsamanın sağlandığı iterasyon sayısı Tablo 19'da verilmektedir.

Tablo 19. Uygulama-1'in beşinci tasarımındaki üç farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması

Çaprazlama türü	Yakın. iter. No	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Maskeli çaprazlama	281	7	150	82,5	16	8	20	5	5	25	118186
Tek noktalı çaprazlama	300	7	150	47,5	18	8	30	7	10	27	120663
İki noktalı çaprazlama	456	8	150	70	15	8	20	5	5	22	119390

Bu tablodan görüldüğü gibi, en hızlı yakınsama maskeli çaprazlama ile sağlanmıştır. Yine elde edilen sonuçlar içindeki en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri maskeli çaprazlamanın kullanıldığı çözümde elde edilmiştir. Buradan hareketle bu tasarım için maskeli çaprazlamanın diğer çaprazlama türlerine oranla daha etkili olduğu söylenebilmektedir.

#### 2.4.1.6. Altıncı Tasarım

Bu tasarımda farklı mutasyon türlerinin genetik algoritmanın performansına etkisi incelenmektedir. Bu amaçla bu tasarım için sırasıyla standart mutasyon, kontrollü mutasyon, melez mutasyon kullanılarak ve mutasyon kullanılmadan çözüm yapılmaktadır. Tüm veriler beşinci tasarım ile aynı alınmakta, çaprazlama türü olarak maskeli çaprazlama kullanılmaktadır.

Bu veriler ile yapılan dört farklı çözüme ait tasarım değişkeni değerleri, cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ve yakınsamanın sağlandığı iterasyon sayısı Tablo 20’de verilmektedir.

Tablo 20. Uygulama-1’in altıncı tasarımındaki dört farklı çözüme ait sonuçların karşılaştırılması

Mutasyon türü	Yakın. iter. No	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Standart mutasyon	Yakınsama yok	7	150	82,5	16	8	20	5	5	25	118186
Kontrollü mutasyon	281	7	150	82,5	16	8	20	5	5	25	118186
Melez mutasyon	141	8	150	52,5	15	9	25	6	5	24	122473
Mutasyon yok	134	7	150	65	19	10	25	6	5	30	133794

Tablo 20’den görüldüğü gibi, standart mutasyon yakınsama için gerekli iterasyon sayısının çok artmasına sebep olmaktadır. Kontrollü mutasyon yakınsama için gerekli iterasyon sayısını oldukça azaltmaktadır. Ayrıca kontrollü mutasyon ile ulaşılan sonuçlar da diğerlerine oranla daha ekonomik olmaktadır. Melez mutasyon ile yakınsama için

gerekli iterasyon sayısı daha da aşağı düşmektedir. Ancak elde edilen sonuç daha az ekonomik olmaktadır. Elde edilen sonucun daha az ekonomik olmasının nedeninin melez mutasyonun diğer iki mutasyon türüne oranla daha az özgün olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mutasyon kullanılmadan yapılan çözümde ise yakınsama için gerekli iterasyon sayısının en aza inmesine rağmen belirlenen sonuç, mutasyon kullanılan çözümlere oranla, daha büyük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine sahip olmaktadır.

Bu tasarım neticesinde kontrollü mutasyonun diğer mutasyon türlerine ve mutasyonsuz çözüme oranla genetik algoritmanın performansını en iyi düzeye çıkardığı görülmektedir.

Böylece uygulama-1 için altı farklı tasarım altında toplam 15 farklı çözüm yapılmıştır. Bu çözümler için seçilen optimum tasarım parametreleri ve elde edilen optimum çözümlere ait sonuçlar Tablo 21’de verilmektedir.

#### **2.4.2. Uygulama-2 (O-1 Otoyolu Km:17+088 Üstgeçit Köprüsü)**

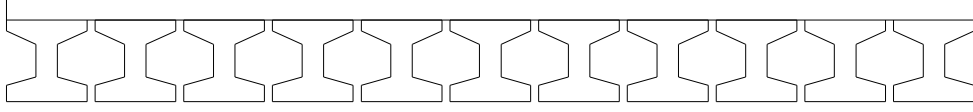
İkinci uygulama olarak T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı Altyapı Koordinasyon Müdürlüğü denetimi altında inşa edilen O-1 Otoyolu Km:17+088 Üstgeçit Köprüsü uygulana projesi seçilmiştir. Bu köprüye ait uygulama projesi ve hesapları Haytek Uluslararası Müh. Müş. Ltd. Şti. tarafından yapılmıştır (Haytek, 2004). Uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti ve öngörilmeli giriş enkesiti sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23’de verilmektedir.

Bu uygulamanın, farklı tasarım değişkeni değer kümeleri kullanılmak suretiyle, iki farklı optimum tasarımı yapılmaktadır.

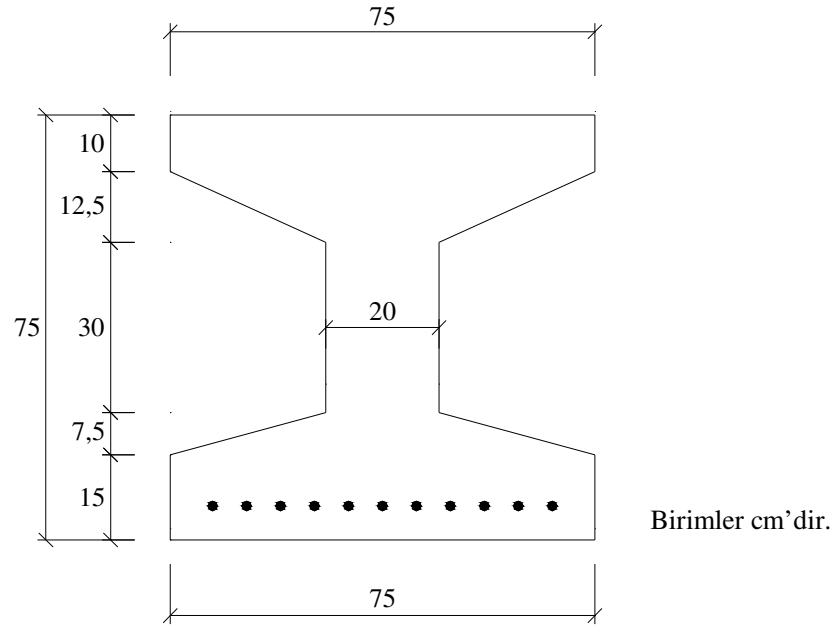
Tablo 21. Uygulama-1'in 15 farklı çözümüne ait optimum tasarım parametreleri ve optimum çözüme ait sonuçlar

Çözüm No	Çözüm dizisi sayısı	Çözüm dizisi karakter sayısı	Çaprazlama türü	Mutasyon türü	Mutasyon oranı	Yakınsama kriteri	Maksimum iterasyon sayısı	Ceza katsayısı	Yakınsama iterasyon numarası	$\Phi(x)$
1	20	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	168	151204
2	30	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	283	130036
3	16	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	74	139007
4	26	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	349	134343
5	36	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	323	117560
6	40	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	Yakınsama yok	132713
7	46	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	Yakınsama yok	123980
8	50	30	Maskeli	Kontrollü	%0,5	%60	1000	1,1	Yakınsama yok	119975
9	36	36	Maskeli	Kontrollü	%0,4	%60	1000	1,1	796	124637
10	36	36	Maskeli	Kontrollü	%0,3	%60	1000	1,1	281	118186
11	36	36	Tek noktalı	Kontrollü	%0,3	%60	1000	1,1	300	120663
12	36	36	İki noktalı	Kontrollü	%0,3	%60	1000	1,1	456	119390
13	36	36	Maskeli	Standart	%0,3	%60	1000	1,1	Yakınsama yok	118186
14	36	36	Maskeli	Melez	%0,3	%60	1000	1,1	141	122473
15	36	36	Maskeli	Mutasyon yok	-	%60	1000	1,1	134	133794





Şekil 22. Uygulama-2'nin uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 23. Uygulama-2'nin uygulama projesine ait öngerilmeli kiriş enkesiti

### 2.4.2.1. Birinci Tasarım

Bu köprü üst yapısına ait üstyapı tasarım parametreleri ilk tasarım için uygulama projesiyle aynı olacak şekilde seçilmekte ve seçilen bu değerler aşağıda verilmektedir.

Köprü ayak aks aralığı (L) .....	: 14,725 m
Köprü tabliye genişliği (W) .....	: 9,00 m
Taşıt yolu genişliği .....	: 7,00 m
Trafik şeridi sayısı ( $N_L$ ) .....	: 2
Tabliye kalınlığı .....	: 0,20 m
Tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı ( $f_{cs}$ ) .....	: 25 MPa
Tabliye betonu elastisite modülü ( $E_{cs}$ ) .....	: 30250 MPa
Prefabrike beton karakteristik basınç dayanımı ( $f'_c$ ) .....	: 40 MPa
Prefabrike beton elastisite modülü ( $E_c$ ) .....	: 34550 MPa
Öngerilme donatısı karakteristik kopma dayanımı ( $f'_s$ ) ...	: 1898 MPa
Öngerme çeliği elastisite modülü ( $E_s$ ) .....	: 207300 MPa
Betonarme çeliği karakteristik dayanımı ( $f_{sy}$ ) .....	: 420 MPa
Prefabrike beton birim fiyatı ( $UC_{pc}$ ) .....	: 650 br/m <sup>3</sup>
Öngerilme donatısı birim fiyatı ( $UC_{ps}$ ) .....	: 700 br/kN
Kiriş üst başlıkları ara mesafesi (F) .....	: 7,5 cm
Tabliye-kiriş ara mesafesi .....	: 0
Kullanılacak öngerilme donatısı anma çapı ( $d_{ps}$ ) .....	: 15,24 mm
Beton birim hacim ağırlığı .....	: 25 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama birim hacim ağırlığı .....	: 22 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama kalınlığı .....	: 10 cm
Bordür kalınlığı .....	: 30 cm
Korkuluk ve prekast yükü .....	: 30 N/cm
Yaya yükü .....	: 0,003 MPa
Yıllık ortalama nem oranı (RH) .....	: % 40
Hareketli yük vasıta sınıfı .....	: H30-S24
Öngerilme donatıları minimum ara mesafesi .....	: 6 cm
Kesme donatısı çapı .....	: 10 mm
Kesme donatısı aralığı .....	: 10 cm

Optimum tasarım probleminin 9 adet tasarım değişkeni için seçilen değerlerini alabilecekleri kümeler Tablo 22’de verilmektedir.

Tablo 22. Uygulama-2’nin birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli kiriş sayısı ( $n_b$ )	16	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19
Öngerilmeli kiriş yüksekliği ( $h_b$ )	16	50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	16	25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	8	10; 11; 12 ; 13; 14; 15; 17,5; 20
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	8	15; 17,5; 20; 22,5; 25; 27,5; 30; 35
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	32	2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33

Uygulama-2’nin birinci tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı	: 30
Çözüm dizisi karakter adedi	: 32
Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,4
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,6

Bu tasarım için rasgele seçilen başlangıç neslindeki çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ortalaması 411367 dir. Başlangıç neslindeki çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 69788, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 1290749 dur.

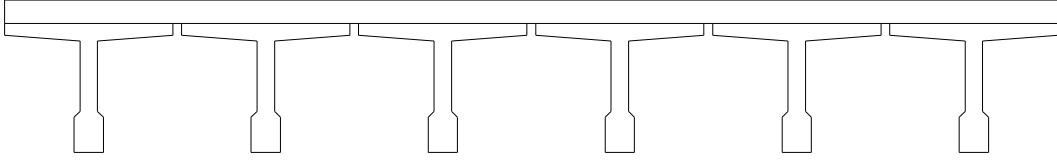
Bu veriler ile yapılan tasarım neticesinde 284. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmıştır. Bu tasarım sonucunda ulaşılan optimum çözüme ait sonuçlar ile uygulama projesine ait değerler Tablo 23’de verilmektedir.

Bu tabloda görüldüğü gibi, bu tasarım neticesinde optimum cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 27381 olarak bulunmuştur. Optimum çözüme ait ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla elde edilen sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümdür. Burada kullanılan birim fiyatlar ile uygulama projesine ait köprü üstyapı maliyeti ise 46028 br. olmaktadır. Bu tasarım neticesinde ulaşılan sonuç uygulama projesine göre yaklaşık %40 daha ekonomiktir.

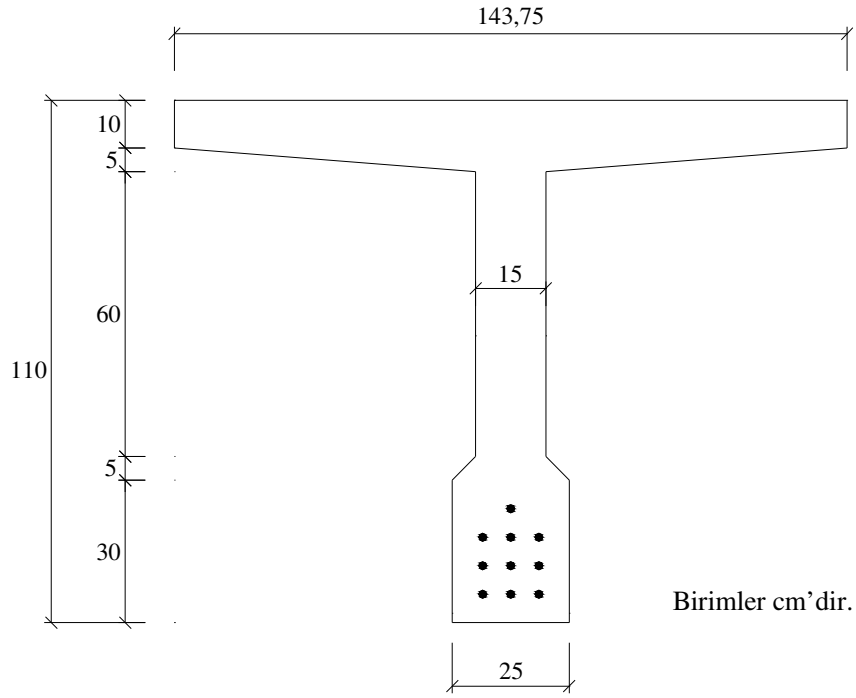
Tablo 23. Uygulama-2’nin birinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması

	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Birinci tasarım (Bu çalışma)	6	110	25	15	10	30	5	5	10	27381
Uygulama projesi (Haytek, 2004)	11	75	75	20	10	15	12,5	7,5	8	46028

Bu tasarım neticesinde ulaşılan optimum çözüme ait köprü üstyapı enkesiti ve önerilmeli giriş enkesiti ise sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25’de verilmektedir.



Şekil 24. Uygulama-2'nin birinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 25. Uygulama-2'nin birinci tasarımına ait önerilmeli kiriş enkesiti

### 2.4.2.2. İkinci Tasarım

Şehir içinde yapılan ve üstgeçit niteliği taşıyan bazı köprülerde bazen köprü kiriş yüksekliğinin belli sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Bu köprü içinde kiriş yüksekliğinin maksimum 75 cm olarak sınırlandırıldığı kabulü ile ikinci tasarım gerçekleştirilmektedir. İkinci tasarım için köprü üstyapı tasarım parametreleri birinci tasarım ile aynı alınmıştır. Bu tasarım için tasarım değişkeni değer kümeleri Tablo 24’de verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi, kiriş için tasarım sonucunda seçilebilecek maksimum değer 75 cm dir.

Tablo 24. Uygulama-2’nin ikinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli kiriş sayısı ( $n_b$ )	8	6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13
Öngerilmeli kiriş yüksekliği ( $h_b$ )	8	40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	16	25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	8	10; 11; 12 ; 13; 14; 15; 17,5; 20
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	8	15; 17,5; 20; 22,5; 25; 27,5; 30; 35
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	32	2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33

Uygulama-2’nin ikinci tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı : 30

Çözüm dizisi karakter adedi : 30

Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,4
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,5

İkinci tasarım başlangıç neslindeki çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ortalaması 311391 dir. Başlangıç neslindeki çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 101424, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 1288330 dur.

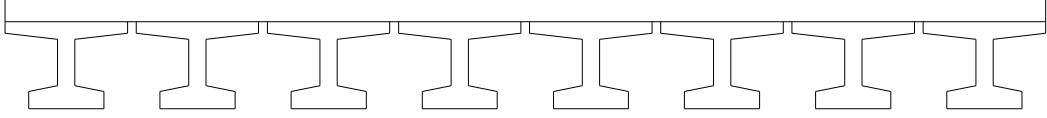
Yukarda verilen üstyapı tasarım parametreleri, tasarım değişkeni değer kümeleri, optimum tasarım parametreleri ve başlangıç nesli ile yapılan tasarım neticesinde 342. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmıştır. Bu tasarım ve ilk tasarım neticesinde ulaşılan tasarım değişkeni değerleri ile uygulama projesine ait değerler Tablo 25’de verilmektedir.

Bu tablodan görüldüğü gibi, bu tasarım neticesinde optimum cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 33080 olarak bulunmuştur. Optimum çözüme ait ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla elde edilen sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümdür. Bu tasarım neticesinde elde edilen sonuç, aynı yükseklikte kirişler kullanılmasına rağmen uygulama projesine oranla yaklaşık %28 daha ekonomiktir.

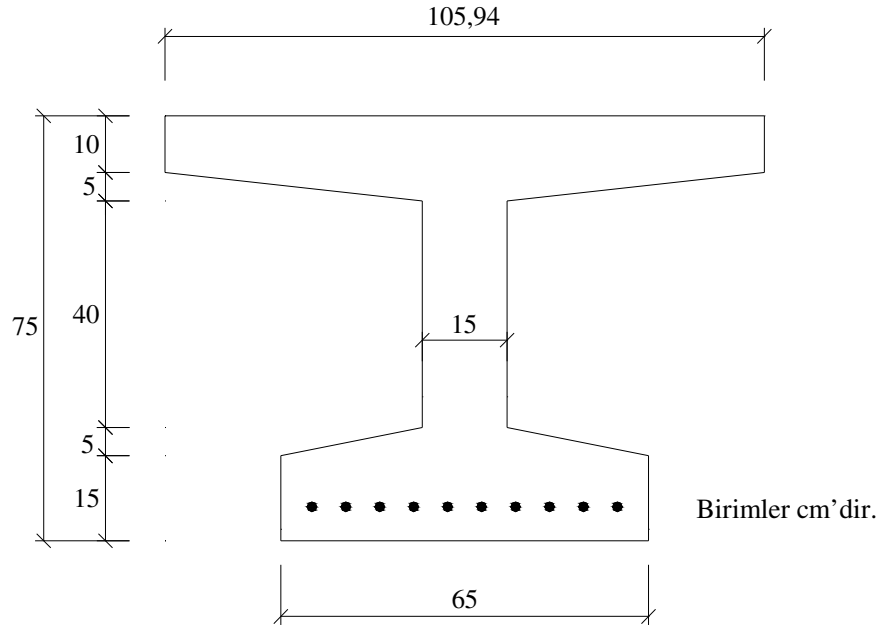
Tablo 25. Uygulama-2’nin ikinci tasarımı ile birinci tasarımı sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması

	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
İkinci tasarım (Bu çalışma)	8	75	65	15	10	15	5	5	10	33080
Birinci tasarım (Bu çalışma)	6	110	25	15	10	30	5	5	10	27381
Uygulama projesi (Haytek, 2004)	11	75	75	20	10	15	12,5	7,5	8	46028

İkinci tasarım neticesinde ulaşılan optimum çözüme ait köprü üstyapı enkesiti ve önerilmeli kiriş enkesiti sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27’de verilmektedir.



Şekil 26. Uygulama-2'nin ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 27. Uygulama-2'nin ikinci tasarımına ait önerilmeli kiriş enkesiti



### 2.4.3. Uygulama-3 (Dinar Köprüsü)

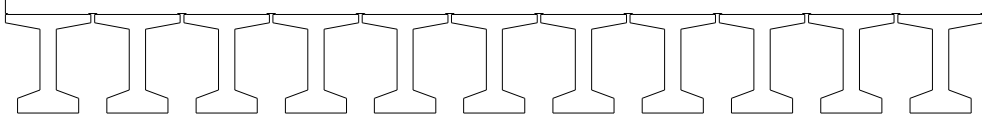
Üçüncü uygulama olarak T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü denetimi altında inşa edilen Uzunçayır Barajı Varyantı Yolu Dinar Köprüsü uygulana projesi seçilmiştir. Bu köprüye ait uygulama projesi ve hesapları Emay Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından yapılmıştır (Emay, 1998). Uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti ve öngerilmeli kiriş enkesiti sırasıyla Şekil 28 ve Şekil 29'da verilmektedir.

Bu uygulamanın, birinde kiriş sayısını sabit tutmak suretiyle, iki farklı optimum tasarımı yapılmaktadır.

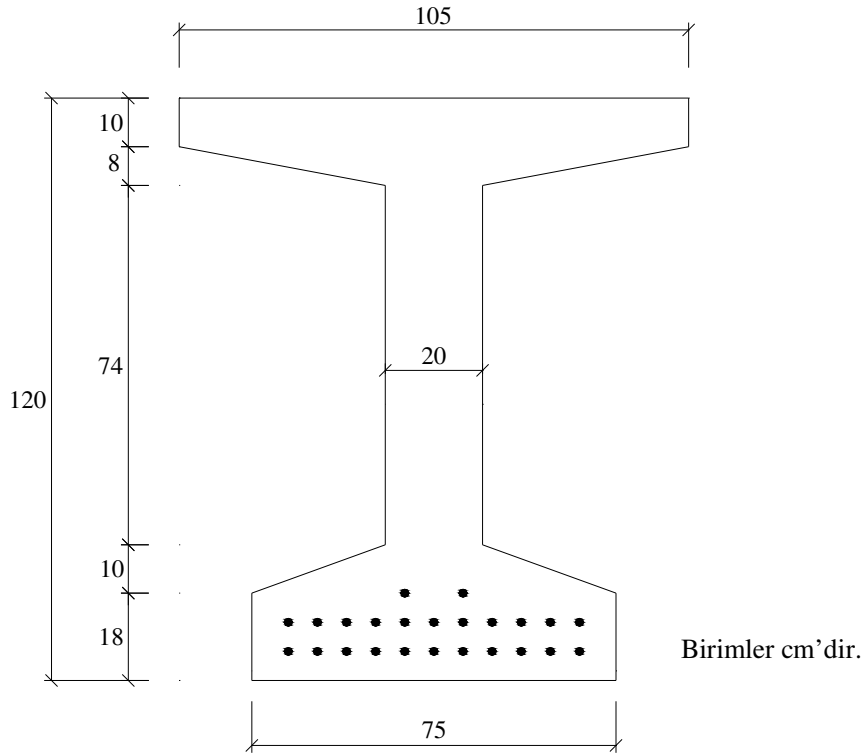
#### 2.4.3.1. Birinci Tasarım

Uygulama-3'ün birinci tasarımı için köprü üst yapısına ait üstyapı tasarım parametreleri uygulama projesiyle aynı olacak şekilde seçilmekte ve seçilen bu değerler aşağıda verilmektedir.

Köprü ayak aks aralığı (L) .....	: 27,70 m
Köprü tabliye genişliği (W) .....	: 12,00 m
Taşıt yolu genişliği .....	: 9,50 m
Trafik şeridi sayısı ( $N_L$ ) .....	: 3
Tabliye kalınlığı .....	: 0,21 m
Tabliye betonu karakteristik basınç dayanımı ( $f_{cs}$ ) .....	: 25 MPa
Tabliye betonu elastisite modülü ( $E_{cs}$ ) .....	: 30250 MPa
Prefabrike beton karakteristik basınç dayanımı ( $f'_c$ ) .....	: 40 MPa
Prefabrike beton elastisite modülü ( $E_c$ ) .....	: 34550 MPa
Öngerilme donatısı karakteristik kopma dayanımı ( $f'_s$ ) ...	: 1898 MPa
Öngerme çeliği elastisite modülü ( $E_s$ ) .....	: 207300 MPa
Betonarme çeliği karakteristik dayanımı ( $f_{sy}$ ) .....	: 420 MPa
Prefabrike beton birim fiyatı ( $UC_{pc}$ ) .....	: 650 br/m <sup>3</sup>
Öngerilme donatısı birim fiyatı ( $UC_{ps}$ ) .....	: 700 br/kN
Kiriş üst başlıkları ara mesafesi (F) .....	: 4,5 cm



Şekil 28. Uygulama-3'ün uygulama projesine ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 29. Uygulama-3'ün uygulama projesine ait önerilmeli kiriş enkesiti

Tabliye-kiriş ara mesafesi .....	: 0,01 m
Kullanılacak öngerilme donatısı anma çapı ( $d_{ps}$ ) .....	: 15,24 mm
Beton birim hacim ağırlığı .....	: 25 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama birim hacim ağırlığı .....	: 20 kN/m <sup>3</sup>
Kaplama kalınlığı .....	: 10 cm
Bordür kalınlığı .....	: 30 cm
Korkuluk ve prekast yükü .....	: 30 N/cm
Yaya yükü .....	: 0,003 MPa
Yıllık ortalama nem oranı (RH) .....	: % 40
Hareketli yük vasıta sınıfı .....	: H30-S24
Öngerilme donatıları minimum ara mesafesi .....	: 6 cm
Kesme donatısı çapı .....	: 10 mm
Kesme donatısı ara mesafesi .....	: 10 cm

Bu tasarımda optimum tasarım probleminin 9 adet tasarım değişkeni için seçilen değerlerini alabilecekleri kümeler Tablo 26’da verilmektedir.

Tablo 26. Uygulama-3’ün birinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli kiriş sayısı ( $n_b$ )	16	5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20
Öngerilmeli kiriş yüksekliği ( $h_b$ )	16	80; 85; 90; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125; 130; 135; 140; 150; 155; 160
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	16	25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	8	10; 11; 12 ; 13; 14; 15; 17,5; 20
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	8	15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	32	5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36

Uygulama-3'ün birinci tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı	: 30
Çözüm dizisi karakter adedi	: 32
Çaprazlama türü	: Maskeli çaprazlama
Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,4
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,5

Bu tasarım için rasgele seçilen başlangıç neslindeki çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ortalaması 1085481 dir. Başlangıç neslindeki çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 120230, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 8648684 dür.

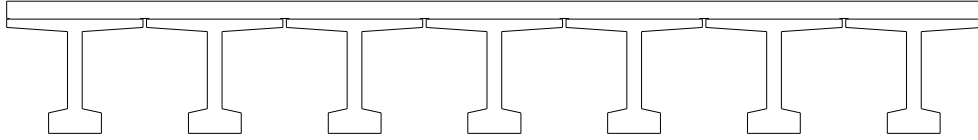
Bu veriler ile program koşturulduğunda 435. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmıştır. Bu tasarım sonucunda elde edilen optimum çözüme ait sonuçlar ile uygulama projesine ait değerler Tablo 27'de verilmektedir.

Bu tablodan görüldüğü gibi, bu tasarım neticesinde bulunan optimum çözüme ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 75941 olmuştur. Optimum çözüme ait ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla elde edilen sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümdür. Burada kullanılan birim fiyatlar ile uygulama projesine ait köprü üstyapı maliyeti 101781 br. olmaktadır. Bu tasarım neticesinde elde edilen sonuç uygulama projesine göre yaklaşık %25 daha ekonomiktir.

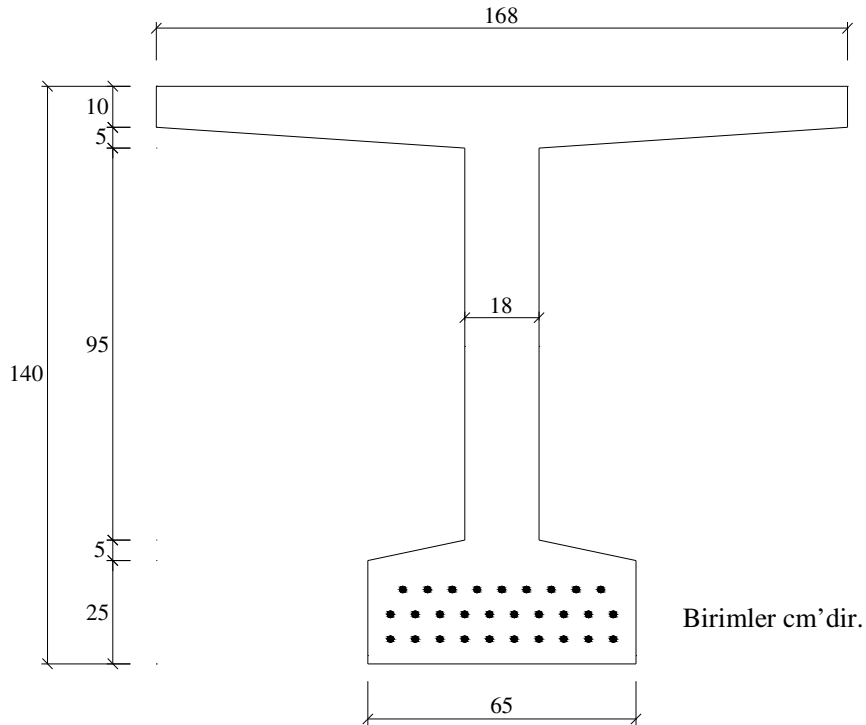
Bu tasarım neticesinde ulaşılan optimum çözüme ait köprü üstyapı enkesiti ve öngörülen maliyet enkesiti sırasıyla Şekil 30 ve Şekil 31'de verilmektedir.

Tablo 27. Uygulama-3'ün birinci tasarım sonuçları ve uygulama projesinin karşılaştırılması

	$n_b$ (ad.)	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
Birinci tasarım (Bu çalışma)	7	140	65	18	10	25	5	5	29	75941
Uygulama projesi (Emay, 1998)	11	120	75	20	10	18	8	10	24	101781



Şekil 30. Uygulama-3'ün birinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 31. Uygulama-3'ün birinci tasarımına ait öngerilmeli kiriş enkesiti

### 2.4.3.2. İkinci Tasarım

Buraya kadar yapılan tasarımlarda köprü üstyapısının komple optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda köprü üstyapısındaki kiriş sayısı uygulama projesindeki ile aynı alınmak suretiyle sadece kiriş boyutları ve kiriş içine yerleştirilecek öngerilme donatısı adeti tasarım değişkeni olarak alınarak öngerilmeli kiriş şeklinin optimum tasarımı yapılmaktadır. Bu tasarım için köprü üstyapı tasarım parametreleri birinci tasarım ile aynı alınmaktadır. Köprü üstyapı enkesitindeki kiriş sayısı tasarım değişkeni olmaktan çıktığı için tasarım değişkeni sayısı 8 e inmiştir. Bu 8 adet tasarım değişkeni için seçilen tasarım değişkeni değer kümeleri Tablo 28’de verilmektedir.

Tablo 28. Uygulama-3’ün ikinci tasarımı için tasarım değişkeni değer kümeleri

Tasarım değişkeni	Değer sayısı	Değişkenler
Öngerilmeli kiriş yüksekliği ( $h_b$ )	16	80; 85; 90; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125; 130; 135; 140; 150; 155; 160
Alt başlık genişliği ( $b_b$ )	16	25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100
Gövde genişliği ( $b_w$ )	8	15; 16; 17; 18; 19; 20; 22,5; 25
Üst başlık kalınlığı ( $t_t$ )	8	10; 11; 12 ; 13; 14; 15; 17,5; 20
Alt başlık kalınlığı ( $t_b$ )	8	15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50
Üst guse yüksekliği ( $p_t$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Alt guse yüksekliği ( $p_b$ )	8	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12,5; 15
Öngerilme donatısı adedi ( $n_{ps}$ )	32	5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36

Uygulama-3’ün ikinci tasarımı için seçilen optimum tasarım parametreleri ise aşağıda verilmektedir.

Nesildeki çözüm dizisi sayısı : 30  
Çözüm dizisi karakter adedi : 28  
Çaprazlama türü : Maskeli çaprazlama

Mutasyon türü	: Kontrollü mutasyon
Mutasyon oranı	: % 0,4
Yakınsama kriteri	: % 60
Maksimum iterasyon sayısı	: 1000
Ceza katsayısı	: 1,5

İkinci tasarım başlangıç neslindeki çözüm dizilerinin cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri ortalaması 865201 dir. Başlangıç neslindeki çözüm dizileri içinde en iyi cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 117723, en kötü cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ise 8436988 dir.

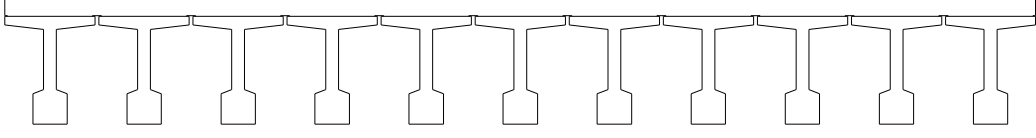
Yukarda verilen üstyapı tasarım parametreleri, tasarım değişkeni değer kümeleri, optimum tasarım parametreleri ve başlangıç nesli ile yapılan tasarım neticesinde 356. iterasyonda gerekli yakınsama sağlanmıştır. Bu tasarım sonuçları ile uygulama projesine ait değerler Tablo 29’da verilmektedir.

Tablo 29’da görüldüğü gibi, bu tasarım neticesinde optimum cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri 82907 olarak bulunmuştur. Optimum çözüme ait ceza fonksiyonu değeri sıfırdır. Dolayısıyla elde edilen sonuç geçerli ve uygulanabilir bir çözümdür. Bu tasarım neticesinde elde edilen sonuç, üstyapıda aynı sayıda kiriş kullanılmasına rağmen uygulama projesine oranla yaklaşık %19 daha ekonomiktir.

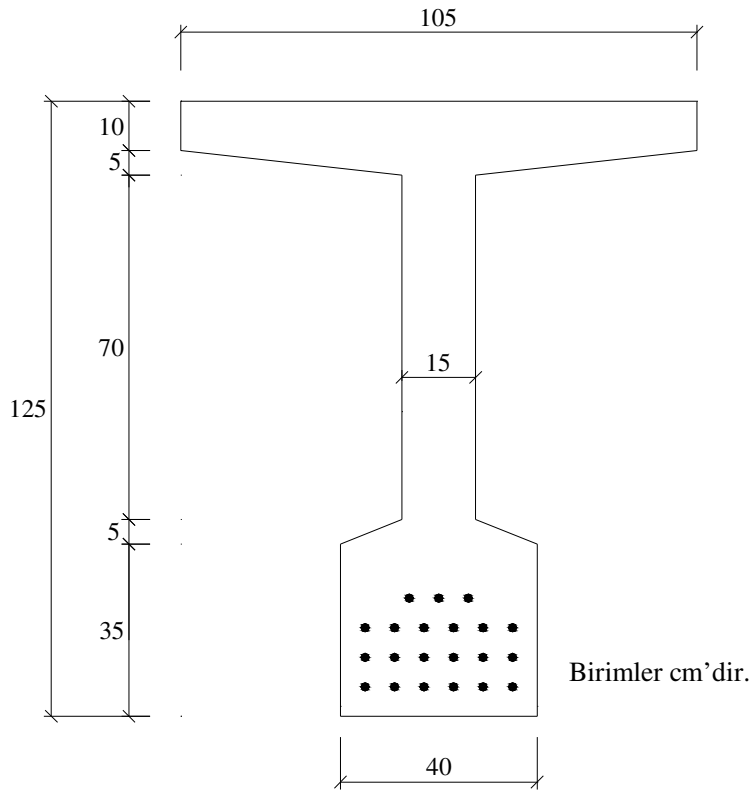
Tablo 29. Uygulama-3’ün ikinci tasarım sonuçları ile uygulama projesinin karşılaştırılması

	$h_b$ (cm)	$b_b$ (cm)	$b_w$ (cm)	$t_t$ (cm)	$t_b$ (cm)	$p_t$ (cm)	$p_b$ (cm)	$n_{ps}$ (ad.)	C
İkinci tasarım (Bu çalışma)	125	40	15	10	35	5	5	21	82907
Uygulama projesi (Emay, 1998)	120	75	20	10	18	8	10	24	101781

İkinci tasarımda elde edilen optimum çözüme ait köprü üstyapı enkesiti ve önerilmeli kiriş enkesiti sırasıyla Şekil 32 ve Şekil 33’de verilmektedir.



Şekil 32. Uygulama-3'ün ikinci tasarımına ait köprü üstyapı enkesiti



Şekil 33. Uygulama-3'ün ikinci tasarımına ait öngerilmeli kiriş enkesiti



### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, prefabrike önçekim önerilmeli beton bitişik I kirişli köprü üstyapılarının, genetik algoritma ile maliyet optimizasyonu incelenmiştir. Bu problemin çözümünün bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesini sağlamak üzere bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla uygulanmış köprü üstyapı projelerinin optimum tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Genetik algoritma kullanılmak suretiyle önerilmeli beton kirişli köprü üstyapılarının maliyet yönünden optimum tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Optimum tasarım neticesinde, dikkate alınan malzeme maliyetleri uygulama projelerine göre %40 varan oranlarda daha ekonomik olmaktadır.

- Genetik algoritmanın başlangıç nesli için seçilen çözüm dizisi sayısının miktarı optimum çözüme ulaşmayı sağlayacak kadar çok ve aynı zamanda optimum çözüme ulaşma süresini fazla uzatmayacak kadar da az olmalıdır. Yapılan irdelemeler neticesinde başlangıç neslindeki çözüm dizisi miktarının, çözüm dizilerindeki karakter adedine yakın sayıda olması, ulaşılan sonucun optimum çözüme yakınlığı ve çözüm süresi açısından en iyi sonuçları vermektedir.

- Çalışmada kullanılan üç farklı çaprazlama operatöründen, maskeli çaprazlamanın elde edilen sonuçların kalitesi ve optimum çözüme ulaşma süresi açısından en verimli çaprazlama türü olduğu belirlenmiştir.

- Kullanılan mutasyon türleri arasında ise en iyi sonuçlara kontrollü mutasyon ile ulaşılmaktadır. Standart mutasyon kullanılması durumunda mutasyon oranı küçük tutulsa bile optimum çözüme ulaşma süresi çok uzun olmaktadır. Melez mutasyon optimum çözüme ulaşma süresini çok kısaltmakla birlikte, ulaşılan sonuçlar kontrollü mutasyonla ulaşılan sonuçların biraz gerisinde kalmaktadır. Mutasyon operatörü kullanılmadan optimum tasarım ile çözüme ulaşma süresi en kısa olmasına rağmen ulaşılan sonuç mutasyon kullanılan çözümlere oranla daha başarısızdır.

- Çalışma topoloji ve şekil optimizasyonunu içermektedir. Topoloji ve şekil optimizasyonlarının elde edilen sonuçlar üzerindeki ayrı ayrı etkilerini görebilmek için bir uygulamada önce topoloji ve şekil optimizasyonu bir arada ardından ise sadece şekil

optimizasyonu yapılmıştır. Topoloji ve şekil optimizasyonun bir arada kullanılması suretiyle uygulama projesine oranla %25 daha ekonomik bir sonuç bulunmuşken sadece şekil optimizasyonu yapılması durumunda bu oran %19 olmuştur. Bu sonuçtan hareketle her iki optimizasyonun da ulaşılan sonuçlar üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu söylenebilmektedir.

- Tasarım değişkeni değer kümelerinin içindeki değer miktarı artırıldıkça ulaşılan çözümün kalitesi de artmaktadır. Ancak buna bağlı olarak çözüm dizilerinin uzunluğu ve dolayısıyla optimum çözüme ulaşma süresi de artmaktadır. Optimum tasarımı yapmadan önce bir ön tasarım yaparak muhtemel sonuçların yaklaşık olarak belirlenmesi ve tasarım değişkeni kümelerindeki değerlerin böylece seçilmesi verimliliği artırmaktadır.

- Optimum tasarım için genetik algoritma kullanılması durumunda, ceza fonksiyonları ve tasarım değişkeni için muhtemel değerlerin tasarım öncesinde belirlenmesi sayesinde, tasarım ile ilgili sınırlayıcılar probleme kolaylıkla adapte edilebilmektedirler.

- Problemin, köprü enkesitindeki kiriş sayısı ve öngerilme donatısı adeti gibi ayrık tasarım değişkenlerini içeriyor olması, ayrık tasarım değişkenlerini kullanan genetik algoritmanın problemin çözümünde etkili olmasını sağlamıştır.

- Topoloji ve şekil optimizasyonun bir arada yapılıyor olması problemi oldukça karmaşık hale getirmektedir. Böyle bir problemin klasik optimizasyon yöntemleriyle formüle edilmesinin son derece güç olmasına rağmen, türev bilgisine ihtiyaç duymadığı için, genetik algoritma ile çok daha kolaylıkla çözülebilmektedir.

- Genetik algoritma ile yapılan optimum tasarım neticesinde elde edilen sonuçların, tasarım değişkenlerinin sürekliliği esasına dayanan optimum tasarım yöntemleri ile bulunanların aksine, üzerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın uygulamada kullanılabilir durumda olduğu, bu çalışma ile bir kez daha görülmektedir.

- Öngerilmeli kiriş sayısı ve kiriş yüksekliği gibi önemli tasarım değişkenlerinin değerleri sabit tutulduğu takdirde bile uygulama projesine oranla daha ekonomik sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmadan çıkarılan bu sonuçların yanısıra konuyla ilgili olarak ileride yapılacak çalışmalar için bazı öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Burada yapılan çalışma bitişik kirişli kısa ve orta açıklıklı köprüleri içermektedir. Çalışmanın ayık kirişli köprüleri de kapsayacak şekilde genişletilmesi faydalı olacaktır.

- Ceza fonksiyonunun hesaplanmasında bulanık küme teorisinden faydalanılarak geliştirilecek bir yaklaşımın programa adapte edilmesinin, genetik algoritmanın performansını artırması muhtemeldir.

- Çalışmanın köprü üstyapısının yanısıra, köprüye ait diğer yapı elemanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmesinin, dolayısıyla optimum açıklık sayısının, açıklık uzunluklarının köprü boyunca dağılımının belirlenmesinin, köprü toplam maliyetini daha da azaltacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın da yapılmasında fayda bulunmaktadır.

#### 4. KAYNAKLAR

- AASHTO, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Ahlawat, A. S. ve Ramaswamy, A., 2001. Multiobjective Optimal Structural Vibration Control using Fuzzy Logic Control System, Journal of Structural Engineering, 127, 11, 1330-1337.
- Akgül, F. ve Frangopol, D. M., 2004. Lifetime Performance Analysis of Existing Prestressed Concrete Bridge Superstructures, Journal of Structural Engineering, 130, 2, 1889-1903.
- Armutçu, M., 1997. Genetik Algoritma ile Çelik Çerçevelerin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Trabzon.
- Atabay, Ş., 2004. Perdeli Betonarme Yapı Sistemlerinin Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, Z., 2000. Uzay Kafes Sistemlerin Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ayvaz, Y. ve Aydın, Z., 2000. Optimum Design of Trusses Using A Genetic Algorithm, Proceedings of the Second International Conference on Engineering Using Metaphors from Nature, Leuven, Belgium, 159-168.
- Balakrishnan, P. V., Gupta, R. ve Jacob, V. S., 2004. Development of Hybrid Genetic Algorithms for Product Line Designs, IEEE Transactions on Systems, Man. and Cybernetics – Part B: Cybernetics, 34, 1, 468-483.
- Barr, P. J., Eberhard, M. O. ve Stanton, J. F., 2001. Live-Load Distribution Factors in Prestressed Concrete Bridges, Journal of Bridge Engineering, 6, 5, 298-306.
- Basheer, I. A., 1996. Predicting Dynamic Response of Adsorption Columns with Neural Nets, Journal of Computing in Civil Engineering, 10, 1, 31-39.
- Bilge, M. R., 1981. Öngerilmeli Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Brown, A. S. ve Yang, T. Y., 2001. Neural Networks for Multiobjective Adaptive Structural Control, Journal of Structural Engineering, 127, 2, 203-210.
- Brown, R. H., 1975. Minimum Cost Selection of One-Way Slab Thickness, Journal of Structural Division, 101, 12, 2585-2590.

- Camp, C., Pezeshk, S. ve Cao, G., 1998. Optimized Design of Two-Dimensional Structures Using a Genetic Algorithm, Journal of Structural Engineering, 124, 5, 551-559.
- Chang, C. C. ve Zhou, L., 2002. Neural Network Emulation of Inverse Dynamics for a Magnetorheological Damper, Journal of Structural Engineering, 128, 2, 231-239.
- Chen, S. Y. ve Rajan, S. D., 2000. A Robust Genetic Algorithm for Structural Optimization, Structural Engineering and Mechanics, 10, 4, 313-336.
- Chiang, W., Liu, K. F. R. ve Lee, J., 2000. Bridge Damage Assesment through Fuzzy Petri Net Based Expert System, Journal of Computing in Civil Engineering, 14, 2, 141-149.
- Daloğlu, A. ve Armutçu, M., 1997. Kafes Sistemlerin Genetik Algoritma ile TS 648'e Uygun Olarak Optimum Tasarımı, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik Kongre, ODTÜ, Ankara.
- Daloğlu, A. ve Aydın, Z., 1999. Kafes Sistemlerin Uygulamaya Yönelik Optimum Tasarımı, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5, 1, 951-957.
- Deng, L., Ghosn, M. ve Shao, S., 2004. Development of A Shredding Genetic Algorithm for Structural Reliability, Structural Safety, 27, 113-131.
- Du, J. S. ve Au, F. T. K., 2005. Deterministic and Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of the Chinese, Hong Kong and AASHTO LRFD Codes, Structural Safety, 27, 230-245.
- Emay Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti., 1998. Uzunçayır Barajı Varyantı Yolu Dinar Köprüsü Uygulama Projesi Hesapları, İstanbul.
- Emay Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti., 2004. Edirnekapı Kavşak Köprüleri Köprü-4 Uygulama Projesi Hesapları, İstanbul.
- Erbatur, F. ve Hasaңebi, O., 1997. Uygulamaya Dönük Yapı Optimizasyonu, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik Kongre, ODTÜ, Ankara.
- Espinoza, F. P., Minsker, B. S. ve Goldberg, D. E., 2005. Adaptive Hybrid Genetic Algorithm for Groundwater Remediation Design, Journal of Water Resources Planning and Management, 131, 1, 14-24.
- Friel, L. L., 1974. Optimum Singly Reinforced Concrete Sections, ACI Journal, 71, 11, 556-558.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T. ve Garvey, S. D., 1998. A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures, Computers and Structures, 69, 547-556.

- Gilbert, R. I. ve Micklebrough, N. C., 1990. Design of Prestressed Concrete, Unwin Hyman, London.
- Goldberg, D. E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., New York, N. Y.
- Goldberg, D. E. ve Samtani, M. P., 1986. Engineering Optimization via Genetic Algorithm, Proc. 9th Conf. Electronic Computation, ASCE, 471-482.
- Grierson, D. E. ve Pak, W. H., 1993. Optimal Sizing, Geometrical and Topological Design Using Genetic Algorithms, Structural Optimization, 6, 151-159.
- Hadi, M. N. S. ve Arfiadi, Y., 2001. Optimum Rigid Pavement Design by Genetic Algorithms, Computers and Structures, 79, 1617-1624.
- Hayalioğlu, M. S., 2001. Optimum Load and Resistance Factor Design of Steel Space Frames Using Genetic Algorithm, Structural and Multidisciplinary Optimization, 21, 4, 292-299.
- Haytek Uluslararası Müh. Müş. Ltd. Şti., 2004. O-1 Otoyolu KM:17+088.000 Üst Geçit Köprüsü Üst Yapı Uygulama Projesi Hesapları, İstanbul.
- Heinloo, M. ve Kaliszky, S., 1981. Optimal Design of Dynamically Loaded Rijit-Plastic Structures. Application: Thick Walled Concrete Tube, Journal of Structural Mechanics, 9, 3, 235-251.
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.
- Jenkins, W. M., 1992. Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithm, Journal of Structural Engineering, 118, 11, 3103-3112.
- Joghataie, A. ve Ghasemi, M., 2001. Fuzzy Multistage Optimization of Large-Scale Trusses, Journal of Structural Engineering, 127, 11, 1338-1347.
- John, M. Z. ve Lounis, Z., 1994. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems, Journal of Structural Engineering, 120, 9, 2653-2674.
- Jones, H. L., 1985. Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design, Journal of Structural Engineering, 111, 11, 2464-2478.
- Kamat, M. P., 1993. Structural Optimization Status and Promise, American Institute of Aeronautics and Astronautics, United States of America.
- Kameshki, E. S. ve Saka, M. P., 2001. Optimal Design of Nonlinear Steel Frames with Semi-Rigid Connections using a Genetic Algorithm, Computers and Structures, 79, 1593-1604.

- Kirsch, U., 1983. Multilevel Optimal Design of Reinforced Concrete Structures, Engineering Optimization, 6, 4, 207-212.
- Kocer, F. Y. ve Arora, J. S., 1996. Design of Prestressed Concrete Transmission Poles: Optimization Approach, Journal of Structural Engineering, 123, 3, 804-814.
- Kocer, F. Y. ve Arora, J. S., 2002. Optimal Design of Latticed Towers Subjected to Earthquake Loading, Journal of Structural Engineering, 128, 2, 197-204.
- Komendant, A. E., 1952. Prestressed Concrete Structures, McGraw-Hill, New York.
- Koza, J. R., 1992. Genetic Programming: on the Programming of Computers by Means of Natural Selection, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Krishnamoorthy, C. S., 2001. Structural Optimization in Practice: Potential Applications of Genetic Algorithms, Structural Engineering and Mechanics, 11, 2, 151-170.
- Lakshmy, T. K. ve Bhavikatti, S. S., 1995. Optimum Design of Trough Type Folded Plate Roofs, Computers and Structures, 57, 1, 125-130.
- Leu, S. S., Chen, A. T. ve Yang, C. H., 1999. Fuzzy Optimal Model for Resource-Constrained Construction Scheduling, Journal of Computing in Civil Engineering, 13, 3, 207-216.
- Li, Q. S., Liu, D. K., Zhang, N., Tam, C. M. ve Yang, L. F., 2001. Multi-Level Design Model and Genetic Algorithm for Structural Control System Optimization, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 927-942.
- Lin, C. Y. ve Hajela, P., 1992. Genetic Algorithms in Optimization Problems with Discrete and Integer Design Variables, Engineering Optimization, 19, 309-327.
- Lin, K. Y. ve Frangopol D. M., 1996. Reliability-Based Optimum Design Of Reinforced Concrete Girders, Structural Safety, 18, 2-3, 239-258.
- Lounis, Z. ve Cohn, M. Z., 1993. Optimization of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Systems, PCI Journal, 38, 4, 60-78.
- Lounis, Z., Mirza, M. S. ve Cohn, M. Z., 1997. Segmental and Conventional Precast Prestressed Concrete I-Bridge Girders, Journal of Bridge Engineering, 2, 3, 73-82.
- Mohammad, K. S. ve Al-Dmour, A. S., 2002. Vibration Control of Unknown Flexible Beam Structures, Journal of Vibration & Control, 8, 1, 69-86.
- Moharrami, H. ve Grierson, D. E., 1993. Computer-Automated Design of Reinforced Concrete Frameworks. Journal of Structural Engineering, 119, 7, 2036-2058.
- Naaman, A. E., 1982, Prestressed Concrete Analysis and Design Fundamentals, McGraw-Hill Publishing Company, USA.

- Nanakorn, P. ve Meesomklin, K., 2001. An Adaptive Penalty Function in Genetic Algorithms for Structural Design Optimization, Computers and Structures, 79, 2527-2539.
- Nawy, E. G., 1996. Prestressed Concrete: a Fundamental Approach, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Nilson, A. H., 1987. Design of Prestressed Concrete, John Wiley, New York.
- Onyemelukwe, O. U., Moussa Issa, P. E. ve Mills, C. S., 2003. Field Measured Pre-Stress Concrete Losses Versus Design Codes Estimates, Society for Experimental Mechanics, 201-215.
- Özden, K., Eren, İ., Trupia, A. L. ve Öztürk, T., 1994. Öngerilmeli Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Pezeshk, S., Camp, C. V. ve Chen, D., 2000. Design of Nonlinear Framed Structures using Genetic Optimization, Journal of Structural Engineering, 126, 3, 382-388.
- Preston, H. K., 1964. Prestressed Concrete for Architects and Engineers, McGraw-Hill, New York.
- Rajaev, S. ve Krishnamoorthy, C. S., 1992. Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms, Journal of Structural Engineering, 118, 5, 1233-1250.
- Rajaev, S. ve Krishnamoorthy, C. S., 1998. Genetic Algorithm-Based Methodology for Design of Reinforced Concrete Frames, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13, 63-74.
- Rajan, S. D., 1995. Sizing, Shape, and Topology Design Optimization of Trusses Using Genetic Algorithms, Journal of Structural Engineering, 121, 10, 1480-1487.
- Raju, N. K., 1986. Prestressed Concrete, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Ramasamy J. V. ve Rajasekaran S., 1996. Artificial Neural Network and Genetic Algorithm for the Design Optimization of Industrial Roofs – a Comparison, Computers and Structures, 58, 4, 747-755.
- Saka, M. P., 1980. Çelik Kafes Sistemlerin Şekil Optimizasyonu, Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Trabzon.
- Sanad, A. ve Saka, M. P., 2001. Prediction of Ultimate Shear Strength of Reinforced-Concrete Deep Beams using Neural Networks, Journal of Structural Engineering, 127, 7, 818-828.
- Sarma, K. C. ve Adeli, H., 2000a. Fuzzy Discrete Multicriteria Cost Optimization of Steel Structures, Journal of Structural Engineering, 126, 11, 1339-1347.



- Sarma, K. C. ve Adeli, H., 2000b. Fuzzy Genetic Algorithm for Optimization of Steel Structures, Journal of Structural Engineering, 126, 5, 596-604.
- Simoës, L. M. C. ve Negro, J. H. O., 1994. Sizing and Geometry Optimization of Cable-Stayed Bridges, Computers and Structures, 52, 2, 309-321.
- Sirca, G. F. ve Adeli, H., 2001. Neural Network Model for Uplift Load Capacity of Metal Roof Panels, Journal of Structural Engineering, 127, 11, 1276-1285.
- Sirca, G. F. ve Adeli, H., 2005. Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges, Journal of Structural Engineering, 131, 3, 380-388.
- Sivakumar, P., Rajaraman, A., Knight, G. M. S. ve Ramachandramurthy, D. S., 2004, Object-Oriented Optimization Approach using Genetic Algorithms for Lattice Towers, Journal of Computing in Civil Engineering, 18, 2, 162-171.
- Sunar, M., Gurain, A. M. A. ve Mohandes, M., 2000. Substructural Neural Network Controller, Computers and Structures, 78, 575-581.
- Tan, G. H., Thevendran, V., Das Gupta, N. C. ve Thambiratnam, D. P., 1993. Design of Reinforced Concrete Cylindrical Water Tanks for Minimum Material Cost, Computers and Structures, 48, 5, 803-810.
- Totres, G. G. B., Brotchie, J. F. ve Cornell, C. A., 1966. A Program for the Optimum Design of Prestressed Concrete Highway Bridges, PCI Journal, 11, 3, 63-71.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3233, 1979. Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsai, C. H. ve Hsu, D. S., 2002. Diagnosis of Reinforced Concrete Structural Damage Base on Displacement Time History using the Back-Propagation Neural Network Technique, Journal of Computing in Civil Engineering, 16, 1, 49-58.
- Turan, A., 2002. Betonarme Döşemelerin Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Serbest Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Wilby, C. B., 1969. Prestressed Concrete Beams: Design and Logical Analysis, Elsevier Pub. Co., Amsterdam.
- Yang, Y. ve Soh, C. K., 2000. Fuzzy Logic Integrated Genetic Programming for Optimization and Design, Journal of Computing in Civil Engineering, 14, 4, 249-254.
- Yeh, C., 1999. Design of High-Performance Concrete Mixture using Neural Networks and Nonlinear Programming, Journal of Computing in Civil Engineering, 13, 1, 36-42.

- Yol, Köprü, Bitümlü Kaplamalar ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi, 2005. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, 1982. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Yayın No: 207, Ankara.
- Yu, C. H., Das Gupta, N. C. ve Paul, H., 1986. Optimization of Prestressed Concrete Bridge Girders, Engineering Optimization, 10, 1, 13-24.
- Yun, C. B. ve Bahng, E. U., 2000. Substructural Identification using Neural Networks, Computers and Structures, 77, 41-52.
- Zalzala, A. M. S. ve Fleming, P. J., 1997. Genetic Algorithms in Engineering Systems, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- Zielinski, Z. A., Long, W. ve Troitsky, M S., 1995. Designing Reinforced Concrete Short-Tied Columns Using Optimization Technique, ACI Structural Journal, 92, 5, 619-626.

## ÖZGEÇMİŞ

Zekeriya AYDIN 1976 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. Lisans öğrenimini 1993-1997 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamladı. Mezun olduktan sonra bir yıl süreyle özel bir şirkette proje mühendisi olarak ve iki yıl süreyle Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. Yüksek lisans öğrenimini 1997-2000 yılları arasında yine aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı ve aynı Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimi boyunca da özel bir şirkette proje mühendisi olarak çalışmış ve çok sayıda betonarme, çelik ve güçlendirme projesinin tasarımını yapmıştır. Bekar olan AYDIN, İngilizce bilmekte ve halen özel bir şirkette proje mühendisi olarak çalışmaktadır.