

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖNGERİLMELİ KİRİŞLİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ HESAP VE TASARIMININ
İRDELENMESİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Barbaros ATMACA

**MART 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖNGERİLMELİ KİRİŞLİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ HESAP VE TASARIMININ
İRDELENMESİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ**

İnş. Yük. Müh. Barbaros ATMACA

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSİ)"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 02 / 2018

Tezin Savunma Tarihi : 06 / 03 / 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şevket ATEŞ

Trabzon 2018

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Barbaros ATMACA Tarafından Hazırlanan**

**ÖNGERİLMELİ KIRIŞLI KÖPRÜ ÜSTYAPISININ HESAP VE TASARIMININ
İRDELENMESİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 20 /02 /2018 gün ve 1741 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

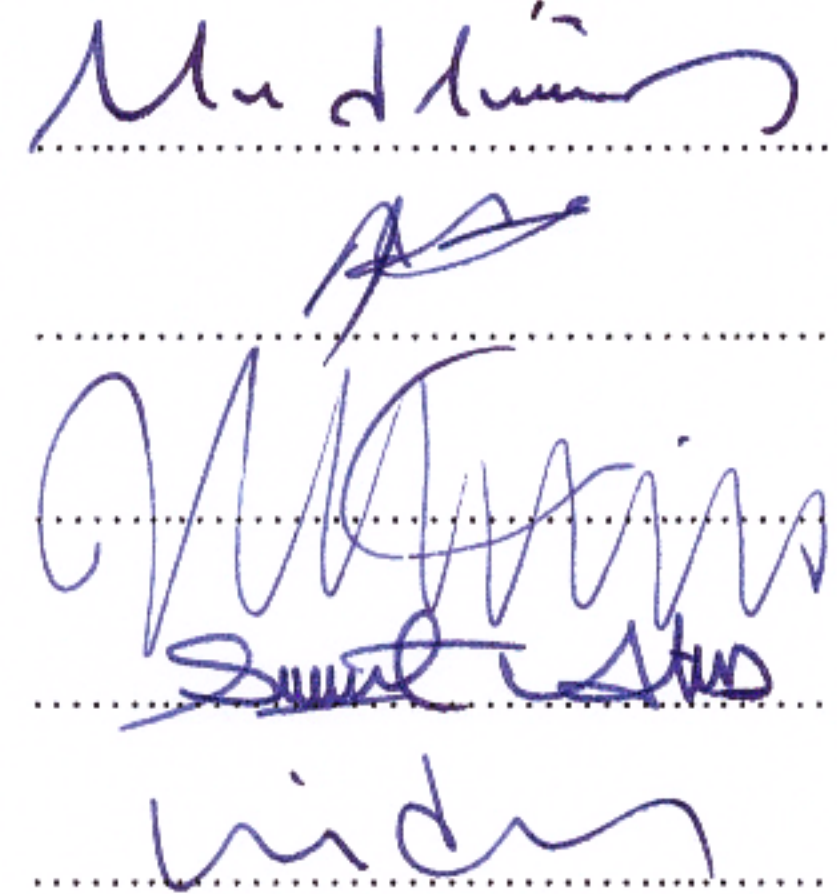
Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Üye : Prof. Dr. Şükrü YETGİN

Üye : Prof. Dr. Şevket ATEŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bekir DİZDAROĞLU



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

“Öngerilmeli Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımının İrdelenmesi ve Bilgisayar Programının Geliştirilmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Şevket ATEŞ’e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca ilgi, teşvik ve alakalarını esirgemeyen değerli Hocalarım Prof. Dr. Metin HÜSEM’e ve Yrd. Doç. Dr. Bekir DİZDAROĞLU’na çalışmalarımdeki katkılarından dolayı saygılarımı sunarım. Tez çalışmam sırasında, değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a ve Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA’ya da çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın bilgisayar programının oluşturulması kısmında hep yanımda olan değerleri dostlarım Yavuz Selim YILMAZ ve Erdem ÜÇÜNCÜ’ye şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın deneysel kısmını gerçekleştirmemde sahip oldukları önerilmeli kiriş üretim tesisinin tüm imkânlarından yararlanmamı sağlayan Sayın Yusuf BARAN’a ve İsmail BABUL’a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, Arman DOMANIÇ’e, Yrd. Doç. Dr. Erdal ÖNER’e, Yrd. Doç. Dr. Muhammet YURDAKUL’a, Yrd. Doç. Dr. Zeliha TONYALI’ya, Yrd. Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a, Arş. Gör. Mustafa ERGÜN’e, Arş. Gör. Dr. Muhittin TURAN’a ve adını sayamadığım tüm arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için destek sağlayan Üniversitemizin Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü imkân ve desteği sağlayan babam Şakir ATMACA ve annem Hesna Aydan ATMACA başta olmak üzere ailemin tüm fertlerine teşekkürlerimi sunar bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Barbaros ATMACA

Trabzon, 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Öngerilmeli Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımının İrdelenmesi ve Bilgisayar Programının Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. şevket ATEş’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel çalışma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2018.



Barbaros ATMACA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	6
1.2.1 Elastomer Mesnet ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	12
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	16
1.4. Öngerilmeli Beton.....	17
1.4.1 Öncekme Yöntemi	19
1.4.2. Ardçekme Yöntemi.....	19
1.5. Malzeme.....	20
1.5.1. Beton	20
1.5.2. Betonarme Donatısı	21
1.5.3. Öngerme Kablosu	21
1.6. Yükler	22
1.6.1. Sabit Yükler	22
1.6.2. Hareketli Yükler	23
1.6.2.1. H ₃₀ S ₂₄ Tasarım Kamyonu	23
1.6.2.2. HL93 Tasarım Kamyonu	24
1.6.3. Dinamik Yük Etkisi	25
1.6.4. Hareketli Yük Dağılım Katsayısı.....	25
1.7. Kiriş Enkesit Özellikleri	27
1.7.1. Aktarma Dönemi.....	27

1.7.2.	Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönem	28
1.7.3.	Servis Dönemi.....	28
1.7.4.	Prefabrike ve Kompozit Kiriş Kesiti	28
1.8.	Öngerilmeli Beton Kirişte Oluşan Kesit Kuvvetleri.....	30
1.8.1	Öngerilmeli Kirişli Köprülerde Gerilme Hesabı	30
1.8.1.1.	Aktarma Dönemi Gerilme Hesabı	31
1.8.1.2.	Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönemin Gerilme Hesabı.....	31
1.8.1.3.	Servis Dönemi Gerilme Hesabı	32
1.8.2.	Beton Emniyet Gerilmesi.....	33
1.8.2.1.	Aktarma Dönemi Beton Emniyet Gerilmesi.....	33
1.8.2.2.	Servis Döneminde Beton Emniyet Gerilmesi	34
1.8.3.	Öngerme Kablosunun Emniyet Gerilmesi	35
1.9.	Öngerilme Kayıpları	35
1.9.1.	Kısa Dönem Kayıplar	36
1.9.2.	Uzun Dönem Kayıplar	37
1.10.	Öngerme Kablo Sayısının Belirlenmesi	38
1.11.	Bağ Mekanizması	39
1.11.1.	Adezyon	39
1.11.2.	Hoyer Etkisi	39
1.11.3.	Mekanik Kenetlenme	40
1.12.	Kılıflama	41
1.12.1.	Kılıf Boyunun Tespiti	43
1.12.2.	Kılıflanacak Kablo Sayısının Tespiti	43
1.13.	Kompozit Kirişin Eğilme Taşıma Gücü Hesabı	43
1.14.	Donatı Sınırlandırmaları	46
1.14.1.	Minimum Donatı.....	46
1.15.	Kesme Anma Direnimi	47
1.15.1.	Minumum Enine Donatı	49
1.15.2.	Enine Donatının Maksimum Aralığı.....	50
1.15.3.	Öngerilme Betonda Ankraj Bölgeleri	50
1.15.3.1.	Yarılma Direnimi	50
1.15.3.2.	Sargılama Donatısı.....	51
1.16.	Boyuna Donatı Kontrolü.....	51
1.17.	Sehim Denetimi	51

1.17.1.	Ani Sehim	52
1.17.2.	Uzun Süreli Sehim	53
1.17.3.	Hareketli Yükün Neden Olduğu Sehim	54
1.18.	Tabliye Tasarımı	56
1.18.1.	Tabliye Kalınlığı	56
1.18.2.	Negatif Moment Hesabının Yapılacağı Tasarım Kesiti	56
1.18.3.	Tabliye Tasarımında Hareketli Yükün Etkisi	57
1.18.4.	Donatı Düzenlenmesi Suretiyle Tabliyede Çatlak Kontrolü	57
1.18.5.	Tabliye Boyuna Donatısı ile İlgili Koşullar	57
1.18.5.1.	Dağıtma Donatısı	57
1.18.5.2.	Büzülme ve Sıcaklık Değişim Donatısı	58
1.19.	Elastomer Mesnet	59
1.19.1.	Elastomer Mesnet Tasarımı	60
1.19.1.1.	Elastomer Mesnetin Boyutsal Özellikleri	61
1.19.1.2.	Elastomer Mesnetin Malzeme Özellikleri	62
1.19.1.3.	Elastomer Mesnetin Tasarım Gereksinimleri	63
1.19.1.3.1.	Kesme Deformasyonu	63
1.19.1.3.2.	Basınç, Dönme ve Kesme Birleşimi	63
1.19.1.3.3.	Elastomer Mesnetin Stabilitesi	65
1.19.1.3.4.	Çelik Plakalar	66
1.20.	Çevresel Titreşim Yöntemi	66
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	68
2.1.	Giriş	68
2.2.	Köprü Üstyapısı	69
2.3.	Yapıya Gelen Yükler	69
2.3.1.	Sabit Yüklerin Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri	69
2.3.2.	Hareketli Yüklerin Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri	72
2.3.2.1.	H ₃₀ S ₂₄ Tasarım Kamyonunun Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri	72
2.3.2.1.1.	H ₃₀ S ₂₄ Tasarım Kamyonunun Tek Başına Etki Etmesi Durumu	74
2.3.2.1.2.	H ₃₀ S ₂₄ Tasarım Kamyonunun Tasarım Şerit Yüküyle Birlikte Etki Etmesi Durumu	77
2.3.2.2.	HL93 Tasarım Kamyonunun Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri	78
2.3.2.2.1.	HL93 Tasarım Kamyonunun Tasarım Şerit Yüküyle Birlikte Etki Etmesi Durumu	79
2.3.2.2.2.	Tasarım Tandeminin Tasarım Şerit Yüküyle Birlikte Etki Etmesi Durumu	84

2.4	Kiriş Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi.....	88
2.4.1.	Kiriş Ağırlık Merkezi.....	88
2.4.2.	Kirişin Atalet Momenti.....	89
2.4.3.	Kirişin Mukavemet Momenti.....	91
2.5.	Öngerme Kablosunun Kiriş Kesitindeki Dağılımının Kirişe Etkisi	92
2.5.1.	Öngerilmeli Kiriş Modelleri	92
2.5.2.	Örnek Kirişlerin Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması	95
2.5.3.	Kirişlerin Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması	97
2.5.4.	Servis Dönemi Analiz Sonuçları.....	98
2.5.4.1.	Servis Döneminde Meydana Gelen Asal Gerilmeler.....	99
2.5.4.2.	Servis Döneminde Meydana Gelen Sehim	104
2.5.5.	Aktarma Dönemi Analiz Sonuçları.....	105
2.5.5.1.	Aktarma Döneminde Meydana Gelen Asal Gerilmeler.....	106
2.5.5.2.	Kılıf Boylarının ve Sayısının Belirlenmesi.....	111
2.5.5.3.	Aktarma Döneminde Meydana Gelen Sehim	118
2.6.	Aktarma Döneminde Öngerilmeli Kirişte Meydana Gelen Sehimin Hesabında P-Delta Etkisini Dikkate Alınması.....	120
2.6.1.	Öngerilmeli Kiriş Modeli.....	123
2.6.2.	Kirişin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	125
2.6.3.	Sehim Sonuçlarının Karşılaştırılması	126
2.7.	Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	129
2.7.1	Öngerilmeli Kiriş Modeli.....	130
2.7.2	Kirişin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	131
2.7.3.	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	131
2.7.4.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	132
2.7.5.	Öngerilmeli Kiriş İçin Belirlenen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	135
3.	BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ OLUŞTURULMASI	136
3.1.	I-CAD Programına Giriş.....	136
3.1.2.	Programlama Dili.....	136
3.1.3.	C# Programlama Dili Üzerinde Crystal Reports Kullanılarak Raporlama.....	137
3.1.4.	C# Programlama Dili ile AutoCAD Üzerinde Çizim	137
3.1.5.	I-CAD Programının Tanıtılması	139

3.1.5.1.	Menü 1: Proje.....	141
3.1.5.2.	Menü 2: Analiz Sonuçları	147
3.1.5.3.	Geliştirilen I-CAD Programıyla Öngerilmeli Prefabrike I Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımı	153
3.1.5.4.	Geliştirilen I-CAD Programının Kontrolü	168
3.2.	Geliştirilen SREI-CAD Programına Giriş	172
3.2.1.	SREI-CAD Programının Tanıtılması	173
3.2.2.	SREI-CAD ile Elastomer Mesnet Tasarımı	173
4.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	178
4.1.	Öngerilmeli I Kirişlerin Etkin Açıklıklarının Belirlenmesi	178
4.1.1.	Örnek Köprü Üstyapısı	178
4.1.2.	Analiz Sonuçları	181
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	193
6.	KAYNAKLAR	199
7.	EKLER.....	208
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

ÖNGERİLMELİ KİRİŞLİ KÖPRÜ ÜSTYAPISININ HESAP VE TASARIMININ İRDELENMESİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ

Barbaros ATMACA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2018, 207 Sayfa, 20 Ek Sayfalar

Bu doktora tez çalışmasında, öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapılmış, elde edilen bilgiler ışığında köprü üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Geliştirilen program ile farklı malzeme özelliklerine, açıklığa ve genişliğe sahip köprü üstyapısının farklı dış etkiler altındaki analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde tamamlanması ve bunlara ek olarak analiz sonucunda elde edilen; kesit özellikleri, kesit tesirleri, öngerme kablo sayısı ve yerleşimi planı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri, kiriş ve tabliyenin yapımında gerekli olan betonarme donatı sayısı ve yerleşimi gibi köprü üstyapısının inşasında gerekli bilgilerin raporlanması ve uygulama projelerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen program yardımıyla, köprü üstyapısında yapılan analizler ile köprü kirişlerinin etkin açıklıklarının belirlenmesi ve köprü üstyapı derinliğinin hesaplanmasında kullanılan bağıntıların önerilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışması başlıca beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; konu ile ilgili genel bilgiler, literatür çalışmaları, öngerilmeli kirişli köprülerin hesap ve tasarımı ile ilgili bilgiler ve bağıntılar sunulmaktadır. İkinci bölümde, sabit ve hareketli yüklerin kirişlerde oluşturduğu kesit tesirlerine, öngerme kabloların kirişe uygun şekilde yerleştirilmesini belirlemek için yapılan çalışmalara, kirişte aktarma dönemi sonunda meydana gelen sehim ile ilgili ve kirişin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, geliştirilen programın tanıtımı yapılmıştır. Dördüncü bölümde; köprü kirişlerinin etkin açıklıkları belirlenmesi ve en küçük köprü üstyapısı derinliğinin elde edilmesi için yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise, tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: AASHTO LRFD, C-Sharp, Deneysel Modal Analiz, Elastik-Stabilite, Elastomer Mesnet, I-CAD, Karayolu Köprüsü, Öngerilmeli Kiriş, Programlama, Sehim.

PhD. Thesis

SUMMARY

EXAMINATION OF THE CALCULATION AND DESIGN OF PRESTRESSED GİRDER BRIDGE's SUPERSTRUCTURE AND DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM

Barbaros ATMACA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2018, 207 Pages, 20 Pages Appendix

In this thesis, analytical and experimental studies were carried out on the superstructure of prestressed precast concrete girder bridges and in the light of obtained information from these studies are used to develop a computer program for the calculation and design of superstructures of the bridge. By means of the developed program, analyzes of bridge superstructures with different material properties, span and width under different external influences can be completed quickly and accurately. In addition, it is aimed to report necessary information and application projects of the bridge superstructure such as the section properties, internal forces, number of prestressing cable and their placement plan, debonding and deflection parameters, number of reinforcement and their placement on girder and deck. With the help of the developed program, it is aimed to determine the effective span of the bridge girders and to suggest the formulations used in calculation of the minimum depth of superstructure. This thesis consists of five main parts. In the first part; the general information and literature studies related to the topic, information about the calculation and design of prestressed girder bridges and formulations have been presented. In the second part, internal forces obtained from dead and moving loads, studies have been carried out to determine the proper placement of the prestressed cables in the prestressed girders and experimental work carried out in order to determine the deformation of the girder at the end of the transfer period and dynamic characteristics of the girder have been presented. In the third part, the program which created for the design and calculation of the bridge's superstructure is introduced. In the fourth chapter; the study was carried out to determine the effective spans of the bridge girders and to obtain the minimum depth of superstructure of bridge have been presented. The fifth part is devoted to conclusions and suggestions relating to the thesis. Lastly, references and autobiography have been presented.

Key Words: AASHTO LRFD, C-Sharp, Deflection (Camber), Elastic-Stability, Elastomeric Bearing, Experimental Modal Analysis, Highway Bridge, I-CAD, Prestressed Girder, Programing.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kervan Köprüsü.....	2
Şekil 1.2. Tipik bir kafes sistem.....	2
Şekil 1.3. Dünyanın ilk döküm demir köprüsü	3
Şekil 1.4. Eads Köprüsü.....	4
Şekil 1.5. Menai Strait Köprüsü.....	5
Şekil 1.6. Brooklyn Köprüsü	5
Şekil 1.7. Merkezden gerdirilen öngerilmeli basit kiriş.....	19
Şekil 1.8. Prefabrike kiriş üretim tesisi	20
Şekil 1.9. Ardçekme yöntemi.....	20
Şekil 1.10. H ₃₀ S ₂₄ tasarım kamyonu	23
Şekil 1.11. HL93 tasarım kamyonu	24
Şekil 1.12. Tasarım tandemi	24
Şekil 1.13. Prefabrike kiriş kesiti	29
Şekil 1.14. Kompozit kiriş kesiti.....	29
Şekil 1.15. Öngerilmeli bir kesitte dönemlere bağlı olarak gerilmelerin dağılımı.....	33
Şekil 1.16. Hoyer etkisi.....	40
Şekil 1.17. İdealleştirilmiş gerilme uzunluk ilişkisi.....	41
Şekil 1.18. Kılıf boru tipleri.....	42
Şekil 1.19. Eğilmeye maruz kesitteki şekil değiştirme, gerilme ve kuvvet durumu.....	45
Şekil 1.20. Minimum enine donatıya sahip kesitin kesme parametreleri	48
Şekil 1.21. Kiriş kendi ağırlığının etkisindeyken oluşan sehim.....	52
Şekil 1.22. Kiriş öngerilme kuvvetinin etkisindeyken oluşan sehim.....	52
Şekil 1.23. Kiriş tekil hareketli kuvvetin etkisindeyken oluşan sehim	54
Şekil 1.24. Etkili açıklık.....	58
Şekil 1.25. Elastomer mesnetin yapısı	60
Şekil 2.1. Öngerilmeli beton kirişli köprü üstyapısı.	69
Şekil 2.2. Sabit yüklerden dolayı kirişte oluşan yayılı yük dağılımı.....	72

Şekil 2.3.	$H_{30}S_{24}$ kamyonunun tek başına etki etkimesi durumu	73
Şekil 2.4.	$H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonu şerit yüklemesinin basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için, (b) kesme kuvveti için elverişsiz yerleşimi	73
Şekil 2.5.	En büyük eğilme momenti için $H_{30}S_{24}$ kamyonunun konumu	74
Şekil 2.6.	En büyük kesme kuvveti için $H_{30}S_{24}$ kamyonunun konumu.....	75
Şekil 2.7.	HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumu	79
Şekil 2.8.	Tasarım tandem yükünü tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumu	79
Şekil 2.9.	En büyük eğilme momenti için HL93 kamyonunun konumu.....	80
Şekil 2.10.	En büyük kesme kuvveti için HL93 kamyonunun konumu.....	81
Şekil 2.11.	En büyük eğilme momenti için tasarım tandem konumu	84
Şekil 2.12.	En büyük kesme kuvveti için tasarım tandem konumu	85
Şekil 2.13.	Seçilen kirişin enkesiti	92
Şekil 2.14.	Grup 1 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşimi düzeni	93
Şekil 2.15.	Grup 2 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşimi düzeni	94
Şekil 2.16.	Grup 3 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşimi düzeni	94
Şekil 2.17.	Grup 4 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşimi düzeni.....	95
Şekil 2.18.	Modellemede kullanılan eleman tipleri.....	96
Şekil 2.19.	Kirişin sonlu eleman modeli	96
Şekil 2.20.	Öngerme kuvvetinin kablolarına uygulanması	97
Şekil 2.21.	Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan çekme gerilmesi dağılımı	99
Şekil 2.22.	Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin alt lifinde oluşan çekme gerilmesi.....	101
Şekil 2.23.	Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan basınç gerilmesi dağılımı	102
Şekil 2.24.	Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan basınç gerilmesi.....	103
Şekil 2.25.	Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan sehimin dağılımı.....	104
Şekil 2.26.	Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinde meydana gelen sehim	105
Şekil 2.27.	Aktarma döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan basınç gerilmesi.....	107
Şekil 2.28.	Aktarma döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin alt lifinde oluşan basınç gerilmesi.....	108

Şekil 2.29.	Aktarma döneminde mesnet bölgesindeki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan çekme gerilmesi.....	109
Şekil 2.30.	Kirişin mesnet bölgesindeki kesitinin alt lifinde oluşan basınç gerilmesi	111
Şekil 2.31.	Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf boyları.....	113
Şekil 2.32.	Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf boyları.....	114
Şekil 2.33.	Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf sayısı	115
Şekil 2.34.	Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf sayısı	116
Şekil 2.35.	Aktarma döneminde kirişin ortasında meydana gelen sehim	118
Şekil 2.36.	Deforme olmuş kiriş kesiti.....	121
Şekil 2.37.	Kiriş enkesiti	123
Şekil 2.38.	Kiriş üretim hattı.....	124
Şekil 2.39.	Kirişin sonlu elaman modeli	125
Şekil 2.40.	Kirişin kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim	127
Şekil 2.41.	Öngerme kuvvetinde dolayı oluşan sehim.....	127
Şekil 2.42.	Aktarma döneminde oluşan sehim.....	127
Şekil 2.43.	Aktarma dönemi sonrası ölçülen toplam sehim.....	128
Şekil 2.44.	Modal analiz için seçilen örnek kirişin enkesiti.....	130
Şekil 2.45.	Kirişin sonlu elaman modeli.....	131
Şekil 2.46.	Kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen ilk dört mod şekli	132
Şekil 2.47.	Kirişte gerçekleştirilen çevresel titreşim testi.....	133
Şekil 2.48.	Spektral yoğunluk matrisinin tekil değerleri	134
Şekil 2.49.	Kirişin kararlılık diyagramı	134
Şekil 2.50.	Kararlılık diyagramına göre seçilen modlar	134
Şekil 2.51.	Kirişin çevresel titreşim yönteminden elde edilen mod şekilleri.....	135
Şekil 3.1.	C# aile ağacı.....	137
Şekil 3.2.	C#-AutoCAD ilişkisi.....	138
Şekil 3.3.	AutoCAD’de çizgi oluşturmak için kullanılan C# kod parçacığı	139

Şekil 3.4.	I-CAD programının genel akış diyagramı	140
Şekil 3.5.	Proje bilgileri alt menüsünün ara yüzü	142
Şekil 3.6.	Köprü özellikleri alt menüsünün ara yüzü	143
Şekil 3.7.	Kesit özellikleri alt menüsünün ara yüzü	145
Şekil 3.8.	Malzeme özellikleri alt menüsünün ara yüzü	145
Şekil 3.9.	Taşıt yükü alt menüsünün ara yüzü.....	146
Şekil 3.10.	Analiz alt menüsünün ara yüzü	146
Şekil 3.11.	Kiriş kesiti ve özellikleri alt menüsünün ara yüzü	147
Şekil 3.12.	Kesit tesiri I alt menüsünün ara yüzü.....	148
Şekil 3.13.	Kesit tesiri II alt menüsünün ara yüzü	148
Şekil 3.14.	Kesit tesiri III alt menüsünün ara yüzü.....	149
Şekil 3.15.	Kesit tesiri IV alt menüsünün ara yüzü.....	149
Şekil 3.16.	Kesit tesirleri özeti alt menüsünün ara yüzü	150
Şekil 3.17.	Öngerme kablo yerleşimi alt menüsünün ara yüzü.....	150
Şekil 3.18.	Kılıflama parametreleri alt menüsünün ara yüzü.....	151
Şekil 3.19.	Sehim parametreleri alt menüsünün ara yüzü	152
Şekil 3.20.	Betonarme donatı alt menüsünün ara yüzü.....	152
Şekil 3.21.	Örnek olarak seçilen köprü üstyapısı	153
Şekil 3.22.	Örnek seçilen köprü kirişi	153
Şekil 3.23.	Proje bilgileri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri	156
Şekil 3.24.	Köprü özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri	156
Şekil 3.25.	Kesit özellikleri alt menüsünün ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri	157
Şekil 3.26.	Malzeme özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri	158
Şekil 3.27.	Taşıt yükü alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri	158
Şekil 3.28.	Analiz alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri.....	159
Şekil 3.29.	Kiriş kesiti ve özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	160
Şekil 3.30.	Kesit tesiri I alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları	160
Şekil 3.31.	Kesit tesiri II alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	161
Şekil 3.32.	Kesit tesiri III alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	161
Şekil 3.33.	Kesit tesiri IV alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları	162

Şekil 3.34.	Kesit tesirleri özeti alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	162
Şekil 3.35.	Öngerme kablo yerleşimi alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	163
Şekil 3.36.	Kılıflama parametreleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	163
Şekil 3.37.	Sehim parametreleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	164
Şekil 3.38.	Betonarme donatı alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları.....	164
Şekil 3.39.	Proje raporu formu	165
Şekil 3.40.	Örnek köprü kirişinin kalıp çizim paftası	166
Şekil 3.41.	Örnek köprü kirişinin betonarme donatı çizim paftası.....	167
Şekil 3.34.	Örnek köprü tabliyesinin çizim paftası	167
Şekil 3.43.	Prefabrik kirişin sonlu eleman modeli	168
Şekil 3.44	Kompozit kirişin sonlu eleman modeli	168
Şekil 3.45.	Öngerilmeli prefabrike kirişin üst lifinde aktarma döneminde meydana gelen asal gerilmeler.....	169
Şekil 3.46.	Öngerilmeli prefabrike kirişin alt lifinde aktarma döneminde meydana gelen asal gerilmeler.....	169
Şekil 3.47.	Öngerilmeli prefabrike kirişin üst lifinde tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde meydana gelen asal gerilmeler.....	170
Şekil 3.48.	Öngerilmeli prefabrike kirişin alt lifinde tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde meydana gelen asal gerilmeler.....	170
Şekil 3.49.	Öngerilmeli kompozit kirişin üst lifinde servis döneminde meydana gelen asal gerilmeler.....	171
Şekil 3.50.	Öngerilmeli kompozit kirişin alt lifinde servis döneminde meydana gelen asal gerilmeler.....	171
Şekil 3.51.	SREI-CAD programın genel akış diyagramı	172
Şekil 3.52.	SREI-CAD programının açılış menüsünün ara yüzü.....	173
Şekil 3.53.	Elastomer mesnetlere ait geometrik özelliklerin girişi	175
Şekil 3.54.	Elastomer mesnetlere ait yük ve yer değiştirme verilerinin girişi	175
Şekil 3.55.	Elastomer mesnetlere ait malzeme özelliklerinin girişi	175
Şekil 3.56.	Elastomer mesnetlere ait stabilite kontrol sonuçları	176
Şekil 3.57.	Elastomer mesnetlere ait çelik plakaların kontrol sonuçları	176
Şekil 3.58.	Elastomer mesnetlere ait kesme deformasyonu kontrol sonuçları.....	176
Şekil 3.59.	Elastomer mesnetlere ait rijitlik değerleri	177

Şekil 4.1.	Örnek olarak seçilen köprü üstyapısı (I-60 kirişi kullanılmıştır).....	179
Şekil 4.2.	Köprü üstyapı açıklığı-derinlik ilişkisi (<i>İzin verilen kadar çekme gerilmesi oluşması durumu</i>)	191
Şekil 4.3.	Köprü üstyapı açıklığı-derinlik ilişkisi (<i>Çekme gerilmesi oluşmaması durumu</i>)	192



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Tip 270K düşük gevşemeli öngerme kablosunun mekanik özellikleri	22
Tablo 1.2. Uzun süreli sehım katsayıları	54
Tablo 1.3. Birim genişlik için en büyük hareketli yük momentleri.....	59
Tablo 2.1. Prefabrike ve kompozit kirişin enkesit alanı ve ağırlık merkezinin hesabı	90
Tablo 2.2. Kirişi oluşturan parçaların atalet momentleri	91
Tablo 2.3. Kirişin kesit ölçüleri	92
Tablo 2.4. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.....	93
Tablo 2.5. Oluşturulan kiriş gruplarının özellikleri	93
Tablo 2.6. Analizde kullanılan yük değerleri.....	97
Tablo 2.7. Asal gerilmelerin karşılaştırılması.....	98
Tablo 2.8. Kılıflanma bilgileri	117
Tablo 2.9. Analiz sonuçlarının yorumlanması	119
Tablo 2.10. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.....	125
Tablo 2.11. Aktarma döneminde oluşın sehım.....	129
Tablo 2.12. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.....	130
Tablo 2.13. GFOA ve SAB yöntemlerine göre belirlenen frekanslar.....	133
Tablo 2.14. Kirişe ait frekans değerleri.....	133
Tablo 3.1. Kirişin kesit ölçüleri	153
Tablo 3.2. Köprü özellikleri	154
Tablo 3.3. Diğer yapı malzemelerinin ağırlıkları.....	154
Tablo 3.4. Malzeme özellikleri	155
Tablo 3.5. Elastomer mesnetlerin geometrik ve malzeme özellikleri.....	174
Tablo 3.6. Yükler ve yer değiştirme verileri	174
Tablo 4.1. Köprü Tabliyesini Destekleyen kiriş sayısı ve kirişler arası mesafe	179
Tablo 4.2. Kirişlerinin kesit ölçüleri	180
Tablo 4.3. Öngerilmeli kirişte kullanılan malzemelerin birim fiyatları	181
Tablo 4.4. Kiriş boyu 15m için analiz sonuçları	182
Tablo 4.5. Kiriş boyu 18m için analiz sonuçları	184

Tablo 4.6.	Kiriş boyu 21m için analiz sonuçları	185
Tablo 4.7.	Kiriş boyu 24m için analiz sonuçları	186
Tablo 4.8.	Kiriş boyu 27m için analiz sonuçları	187
Tablo 4.9.	Kiriş boyu 30m için analiz sonuçları	188
Tablo 4.10.	Kiriş boyu 33m için analiz sonuçları	189
Tablo 4.11.	Kiriş boyu 35m için analiz sonuçları	189
Tablo 4.12.	rnek olaak seçilen köprü üstyapısı için öngerilmeli kirişlerin kullanılabildiği açıklıklar	190



SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Eşdeğer basınç bloğu derinliği
b_{tab}	: Dönüştürülmüş efektif tabliye genişliği
b_v	: Efektif gövde genişliği
b_w	: Kesitin gövde genişliği
d_b	: Öngerme kablo çapı
d_c	: Beton örtüsü
d_e	: Dış kirişin merkezinden bariyer duvarının dışına kadar olan mesafe
d_p	: En dış basınç lifinden öngerme kablolarının ağırlık merkezine olan mesafe
d_s	: Elastomer mesnet üzerinde bulunan deliğin çapını
d_v	: Efektif kesme derinliği
d_x	: y eksenin yi eksenine olan dik uzaklığını
d_y	: x eksenin xi eksenine olan dik uzaklığını
e_g	: Kirişin ağırlık merkezi ile tabliyenin ağırlık merkezi arasındaki mesafe
e_i	: Öngerme kablolarının eksantritesi
e_m	: Eğilme momenti için düzeltme katsayısı
e_v	: Kesme kuvveti için düzeltme katsayısı
f	: Doğal frekans
f_c	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cgp}	: Aktarmadan hemen sonra öngerilme kuvveti nedeniyle öngerme kablolarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesi
f_{ci}	: i günlük betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cpe}	: Dış yüklerin çekme gerilmesi oluşturduğu en dış liflerde (öngerilme kayıplarından sonra) betonda yalnız etkili öngerilme kuvvetlerinden oluşan basınç gerilmesi
f_{pbt}	: Transferden önce öngerme kablosundaki gerilme

f_{pu}	: Öngerme kablosunun karakteristik kopma dayanımı
f_{ps}	: Öngerme kablosundaki ortalama gerilmeyi
f_{py}	: Öngerme kablosunun akma dayanımı
f_r	: Betonun kopma dayanımı
f_s	: Enine donatıda meydana gelen gerilme
f_{ss}	: Kullanım servis durumunda betonarme donatısındaki gerilme
f_y	: Çekme donatısının akma gerilmesi
f_y'	: Basınç donatısının akma gerilmesi
$h_{cephe_elemanı}$	: Cephe elemanının yüksekliği
h_f	: Basınç tablasının yüksekliği
h_{ri}	: Elastomer mesnette bulunan her bir kauçuk tabakanın kalınlığı
k	: Öngerme kablo sınıfına bağlı bir sabit
k_s	: Köprü üstyapısında bulunan kiriş sayısı
l_d	: Gelişme uzunluğu
m	: Kirişin toplam kütlesi
$\bar{m}$	: Kirişin birim boyunun kütlesi
n	: Kirişte bulunan öngerme kablosu sayısı
$n_{kılıflanacak}$	: Kılıflanacak kablo sayısı
n_p	: Periyot sayısı
s	: Enine donatının aralığı
t_{asfalt}	: Asfalt kaplamanın kalınlığı
$t_{cephe_elemanı}$	: Cephe elemanının kalınlığı
t_s	: Tabliye kalınlığı
v_u	: Betonda oluşan kesme gerilmesi
y_{alt}	: Prefabrike kirişin ağırlık merkezinin kirişin en üst lifine olan mesafesi
$y_{alt_kompozit}$	: Kompozit kirişin ağırlık merkezinin kirişin alt üst lifine olan mesafesi
$y_{üst}$	: Prefabrik kirişin ağırlık merkezinin kirişin en üst lifine olan

	mesafesi
$y_{üst_kompozit}$	: Kompozit kirişin ağırlık merkezinin kirişin en üst lifine olan mesafesi
A	: Kirişin kesit alanı
$A_{bordür+kaldırım}$	: Bordür ve kaldırımın toplam enkesit alanı
$A_{elastomer}$	: Elastomer mesnetin plan alanını
$A_{prefabrik}$	: Prefabrik kirişin kesit alanı
A_{ps}	: Öngerme çeliğinin alanı
A_s	: Çekme donatısının alanı
A_s'	: Basınç donatısının alanı
$A_{tabliye}$	: Tabliyenin enkesit alanı
A_v	: Enine donatının aralığı
D	: Köprü tipine göre belirlenen katsayı
D_s	: Elastomer mesnetin çapı
E_{ci}	: Transfer anındaki betonun elastisite modülü
$E_{kiriş}$	: Kiriş betonunun elastisite modülü
E_p	: Öngerme kablosunun elastisite modülünü
E_s	: Elastomer mesnetin elastisite modülü
$E_{tabliye}$	: Tabliye betonunun elastisite modülü
F_y	: Elastomer mesnette kullanılan çeliğin akma dayanımını
G_s	: Elastomer mesnetin kayma modülü
H	: Bağıl nem oranı
I	: Kirişin atalet momenti
I_{cr}	: Çatlamış kesitin atalet momentini
I_e	: Kirişin efektif atalet momenti
$I_{kompozit}$	: Kompozit kirişin atalet momenti
$I_{prefabrik}$	: Prefabrik kirişin atalet momenti
I_s	: Elastomer mesnetin atalet momentini

I_{xi}	: Kesitin kütle merkezinden geçen xi eksene göre atalet momenti
I_{yi}	: Kesitin kütle merkezinden geçen yi eksene göre atalet momenti
K_g	: Boyuna rijitlik parametresi
K_H	: Kayma rijitliği
K_V	: Eksenel rijitlik
K_θ	: Dönme rijitliği
K_1	: Agregatipine bağlı düzeltme katsayısı
L	: Kiriş uzunluğu
$LLDF$	: Hareketli yük dağılım katsayısı
L_s	: Elastomer mesnetin köprü boyu doğrultusundaki uzunluğu
M_a	: Hareketli yükten oluşan maksimum moment
M_{cr}	: Çatlama momenti
M_{DC}	: Yapısal ve yapısal olmayan elemanların ölü yüklerinden meydana gelen eğilme momenti
M_{DW}	: Aşınma tabakası ve hizmet hatlarının ölü yüklerinden meydana gelen eğilme momenti
M_{dnc}	: Kirişin kendi ağırlığı ve tabliye ağırlığından oluşan eğilme momenti
M_{g1}	: Kirişin kendi ağırlığı altında meydana gelen eğilme momenti
M_{g2}	: Tabliyenin ağırlığından dolayı meydana gelen eğilme momentini
M_{g3}	: İlave kalıcı yüklerden dolayı meydana gelen eğilme momenti
M_{IM}	: Dinamik yük etkisinden meydana gelen eğilme momenti
M_{LL}	: Hareketli taşıt yükünden meydana gelen eğilme momenti
$MLLDF_{1-L}$	: Bir şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde eğilme momenti için hareketli yük dağılım katsayısı
$MLLDF_{2-L}$	: İki ya da daha fazla şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde eğilme momenti için hareketli yük dağılım katsayısı
M_n	: Anma eğilme direnimi
M_r	: Katsayılı anma eğilme direnimi
M_u	: Dayanım 1 elverişsiz yükleme durumu altında elde edilen eğilme momenti

M_q	: Hareketli yükten dolayı meydana gelen eğilme momenti
N	: Kirişe uygulanmakta olan toplam öngerme kuvveti
P	: Öngerme kablosu için germe aşamasında izin verilen öngerilme kuvveti
P_r	: Öngerilmeli kirişlerin ankraj bölgesinin yarılma direnimi
S	: Kirişler arası mesafe
S_c	: Kompozit kesitin alt lifi için hesaplanan mukavemet momenti
S_e	: Etkili açıklık
S_i	: Şekil faktörü
S_{nc}	: Prefabrik kesitin alt lifi için hesaplanan mukavemet momenti
V_c	: Betonun çatlamamış basınç bölgesinin taşıdığı kesme kuvveti
$VLLDF_{1-L}$	: Bir şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayısı
$VLLDF_{2-L}$	: İki ya da daha fazla şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayısı
V_n	: Kesme anma direnimi
V_p	: Eğik öngerme kablosu bulunması durumunda kablonun hesap düzlemindeki kesme kuvveti bileşeni
V_r	: Katsayılı anma direnimi
V_s	: Enine donatının çekme gerilmeleri ile karşıladığı kesme kuvveti
$q_{kiriş}$	: Kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan yayılı yük
w_{asfalt}	: Asfalt kaplamanın genişliği
w_n	: Doğal frekans
$w_{kaldırım}$	: Toplam kaldırım genişliği
W_{DL}	: Sabit yük
W_{ilave}	: İlave kalıcı yük
W_s	: Elastomer mesnetin köprü boyuna dik doğrultusundaki uzunluğu
α	: Enine donatının boyuna eksene göre açısını
β_1	: Gerilme bloğu katsayısı
γ_a	: Eksenel kuvvetten dolayı oluşan kesme şekil değiştirmesi

γ_{asfalt}	: Asfaltın birim hacim ağırlığı
$\gamma_{bordür+kaldırım}$	: Bordür ve kaldırım imalatında kullanılan betonun birim hacim ağırlığı
$\gamma_{cephe\ elemanı}$	: Cephe elemanının birim hacim ağırlığı
γ_e	: Çevre koşulları katsayısı
γ_h	: Ortamdaki bağıl nem için düzeltme faktörlerini
$\gamma_{korkuluk}$	: Korkuluğun birim uzunluğunun ağırlığı
$\gamma_{prefabrik}$	: Öngerilmeli kirişin birim hacim ağırlığı
γ_r	: Dönmeden dolayı oluşan kesme şekil değiştirmesi
γ_s	: Kesme deformasyonundan dolayı oluşan kesme şekil değiştirmesi
γ_{st}	: Öngerilme kuvvetinin beton elemana aktarılma anındaki beton dayanımı için düzeltme faktörlerini
$\gamma_{tabliye}$	: Tabliyenin birim hacim ağırlığı
γ_{yaya}	: Yaya yükü
δ_1	: Kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan sehim
δ_2	: Öngerilme kuvvetinden kaynaklanan sehim
$\delta_{aktarma}$	: Kirişte aktarma dönemi sonunda meydana gelen toplam sehim
ϵ_c	: Betonun birim kısalması
ϵ_{cu}	: En büyük birim kısalması
ϵ_s	: Çekme donatılarının merkezindeki net boyuna çekme şekil değiştirmesi
θ	: Kesme çatlağının açısı
κ	: Eleman derinliğine göre değişen bir katsayı
ξ_1	: Betonun elastik kısalmasından meydana gelen kayıp oranı
ξ_T	: Toplam öngerilme kayıp oranı
$\sigma_{1_üst}$	: Aktarma döneminde kirişin üst lifinde meydana gelen gerilme
σ_{1_alt}	: Aktarma döneminde kirişin alt lifinde meydana gelen gerilme
$\sigma_{2_üst}$	: Tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde kirişin üst lifinde meydana gelen gerilme

σ_{2_alt}	: Tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde kirişin alt lifinde meydana gelen gerilme
$\sigma_{3_üst}$	: Servis döneminde kirişin üst lifinde meydana gelen gerilme
σ_{3_alt}	: Servis döneminde kirişin alt lifinde meydana gelen gerilme
σ_{ci}	: Aktarma anında beton basınç emniyet gerilmesi
σ_{cs}	: Servis döneminde beton basınç emniyet gerilmesi
$\sigma_{gereken}$	: Kirişe verilmesi gereken basınç gerilmesi
$\sigma_{kapasite}$	: Kirişe yerleştirilecek olan öngerme kablolarının kirişin alt lifinde meydana getireceği gerilme
σ_{pe}	: Öngerme kablosunun efektif gerilmesi
σ_{ps}	: Öngerme kablosunun kopma gerilmesi
σ_{ti}	: Aktarma anında beton çekme emniyet gerilmesi
σ_{ts}	: Servis döneminde beton çekme emniyet gerilmesi
ϕ_f	: Moment direnimi için direnim katsayısı
ϕ_c	: Eksenel yük direnimi için direnim katsayısı
ϕ_v	: Kesme direnimi için direnim katsayısı
Δf_{pA}	: Ankraj oturmasından kaynaklanan kayıp
Δf_{pES}	: Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan kayıp
Δf_{pF}	: Sürtünmeden kaynaklanan kayıp
Δf_{pLT}	: Betonun sünmesi, rötresi ve çeliğin gevşemesinden kaynaklanan kayıp
Δf_{pR}	: Öngerme kablosunun gevşemesinin sebep olduğu kayıp
Δf_{pT}	: Toplam gerilme kaybı
ΔF_{TH}	: Sabit yorulma genliğini

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yüzyıllar boyunca karşılaştığı zorluklara çözüm bulmaya çalışan insanoğlu ulaşım ihtiyacını karşılariken karşısına çıkan akarsu, vadi ve benzeri engelleri aşmak için köprüyü keşfetmiştir. Zamanla artan ulaşım ihtiyacıyla birlikte, köprünün keşfinden günümüze kadar pek çok köprü inşa edilmiştir. Bu köprülerden bazıları yıkılmış bazıları ise günümüze kadar gelmeyi başarmıştır. Yapılan her köprü bir sonraki köprü için bir basamak diğer bir deyişle bilgi birikimi oluşturmıştır. Bu bilgi birikimi günümüze kadar farklı köprü türlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

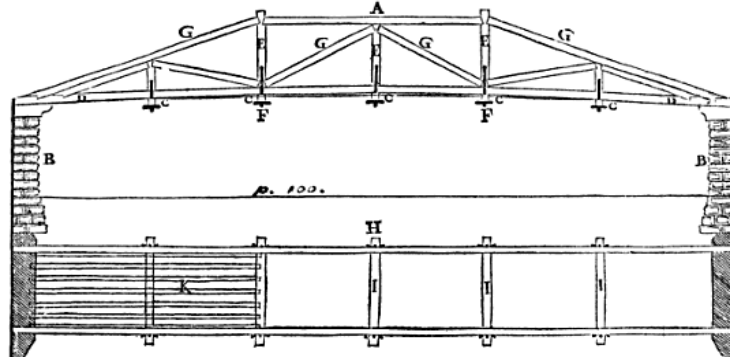
Köprülerin gelişim süreci incelendiğinde 17. yüzyıla kadar köprülerin yapısal çözümlemesi hakkında yeterli bilgi sahibi olunmaması nedeniyle sadece kirişli, kemer, asma ve konsol olmak üzere dört temel köprü türü inşa edilmiştir. Bu dönemlerde köprülerde yapı malzemesi olarak sadece doğadan elde edilen taş ve ahşap kullanılmıştır (Steinman ve Watson, 1957; Gies, 1963). Günümüze kadar gelmiş en eski köprü türlerinin kemer türü köprüler olduğu görülmektedir. Şekil 1.1’de görülmekte olan ve İzmir’de M.Ö. 9. yüzyılda yapıldığı düşünülen Kervan Köprüsü bilinen en eski kemer köprüdür (Gies, 1963). İnsanoğlunun yaşadığı coğrafya, köprü türünü ve inşasında kullanılan malzemeyi etkilemiştir. Roma imparatorluğu mühendisleri tarafından yapılan taş köprülerde taşları bir arada tutmak için puzolan adı verilen ve bugünkü çimentonun yapısına benzeyen bağlayıcı bir madde kullanılmıştır. Çinliler ise Romalıların aksine kemerleri bir arada tutmak için harcın yerine demir kelepçeler kullanmışlardır (Taly, 1998).

Romalılar zamanındaki bilgi birikiminin orta çağda unutulmasıyla bu dönemde Avrupa’da çok az sayıda köprü inşa edilmiştir. Rönesans dönemiyle birlikte Avrupa’nın zenginleşmesi inşa edilen köprü sayısının artmasını sağlamıştır. Unutulan kemer sanatı bu dönemde tekrar öğrenilmiş ve kemerlerin oranları deneysel olarak belirlenmiştir (Timoshenko, 1953). Bu dönemde yetişen bilim adamlarından Robert Hooke 1670’de kemer teorisini ve ünlü Hooke kanununu, Thomas Young ise elastisite modülünü bularak mühendislik alanına önemli katkılarda bulunmuşlardır (Hopkins, 1970). Rönesans döneminin inşaat teknolojisine en büyük katkısı, daha önceden geçilmesi oldukça zor olan açıklıkların geçilmesini sağlayan kafes sistem prensibinin keşfi olmuştur (Steinman ve Watson, 1957).



Şekil 1.1. Kervan Köprüsü (URL-1, 2014)

İtalyan mimar Andrea Palladio kafes sisteme sahip köprüyü inşa eden ilk kişi olmuştur (Timoshenko, 1953; Gies, 1963). Şekil 1.2’de Andrea Palladio’nun kafes köprüler üzerine yazmış olduğu kitabında yer almakta olan tipik bir kafes sistemin şematik şekli görülmektedir. Bu kitap sayesinde ahşap kafes köprülerin sayısı giderek artmaya başlamıştır (Taly, 1998).



Şekil 1.2. Tipik bir kafes sistem

Rönesans sonrası dönem köprü tarihinde önemli bir yere sahiptir. Bu dönemde Isaac Newton (1642-1727), James Bernoulli (1654-1705), Johann Bernoulli (1667-1748) ve Leonard Euler (1707-1783) gibi önemli bilim adamları yaşamıştır. Bu bilim adamlarının bilimsel keşifleri köprü inşası için temel teoriyi oluşturmuştur (Taly, 1998).

16. yüzyıl itibarıyla Avrupa nüfusunda meydana gelen hızlı artış kentlere göçü hızlandırmış ve büyük kentlerin oluşmasını sağlamıştır. 18. ve 19. yüzyılda sanayi devrimiyle birlikte gerek fabrikaların ham madde gerek fabrikalarda üretilen ürünlerin

pazarlanması gerekse de artan nüfusun ihtiyaçlarının karşılanması ulaşım ağlarına olan ihtiyacı arttırmıştır.

Sanayi devriminden önce yapılmış olan köprülerde de demir kullanılmış fakat bu dönemlerde üretilen demirin kalitesinin düşük olması demirin köprülerde kullanım oranını sınırlamıştır. Sanayi devrimiyle birlikte demir üretimindeki artış demirin köprülerde kullanılmasının önünü açmıştır. Dünyanın ilk döküm demir köprüsü 1777-1779 yılları arasında Abraham Darby tarafından İngiltere’de inşa edilmiştir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Dünyanın ilk döküm demir köprüsü (URL-2, 2012)

19. yüzyılda ABD’de artan demiryolu ağıyla birlikte döküm demir köprülerde önemli aksaklıklar meydana gelmiştir. Bu aksaklıklar üzerinde çalışmalar yapan Hodgkinson ve Fairbairn döküm demirin düşük çekme dayanımına sahip olduğunu göstermişler ve köprülerde döküm demirin yerine dövme demiri kullanmışlardır (Steinman ve Watson, 1957).

Çeliğin yetersiz miktarına, kanıtlanmamış performansına ve uygulanabilirliği hakkındaki şüphelere rağmen ilk çelik köprüyü inşa eden kişi James Eads olmuştur. 1874’de yapımını tamamladığı Eads Köprüsü çift tabliyeli olup alt tabliyesinde demiryolu üst tabliyesinde ise otoyol olarak halen hizmet vermektedir (Şekil 1.4). Eads Köprüsü, köprü tarihinin mihenk taşlarından biri olmuştur. Söz konusu köprü içi boş boru elemanların kullanıldığı ve 150m açıklığın geçildiği ilk köprü olmuştur. Günümüz modern dengeli konsol metodunun da kullanıldığı ilk köprü olarak kabul edilmektedir (Taly, 1998). Eads Köprüsü’nde çeliğin başarılı bir şekilde kullanılması köprü inşasında yeni bir dönemin başlamasını sağlamıştır.



Şekil 1.4. Eads Köprüsü (URL-3, 2009)

Çağımızda büyük açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak asma köprüler tercih edilmektedir. Asma köprü fikrinin günümüzden yüzyıllar öncesine dayandığı ünlü gezgin ve kaşiflerin günlüklerinden anlaşılmaktadır. Bu günlüklerden asma köprülerin 100m’yi aşan açıklığa sahip oldukları ve dünyanın farklı bölgelerinde var oldukları görülmektedir. Asma köprüler insanlık tarihi boyunca kullanılmış olmalarına rağmen modern anlamdaki asma köprülerin ortaya çıkışı 20. yüzyıldan sonra gelişen teknoloji sayesinde olmuştur. İlk büyük asma köprü İngiltere’de 1826 yılında tamamlanan Menai Strait Köprüsü olmuştur. Şekil 1.5’te görülmekte olan köprü 176m ana açıklığıyla zamanın en uzun köprüsü olarak kayıtlara geçmiştir. Köprü çeşitli değişiklikler ve bakımlar sayesinde günümüzde de hizmet vermektedir (Steinman ve Watson, 1957; Gies, 1963). Modern asma köprü tarihinde önemli yere sahip olan diğer iki köprü ise ABD’de 1849 yılında Charles Ellet tarafından inşa edilen 308m ana açıklıklı Wheeling Asma Köprüsü ile John Augustus Roebling tarafından yapımına 1867 yılında başlanan, 1883 yılında ise Washigton Roebling tarafından tamamlanan 486m uzunluğundaki Brooklyn Köprüsü’dür (Şekil 1.6). Dünyanın sekiz harikası arasında gösterilen Brooklyn Köprüsü çelik kabloların kullanıldığı ilk asma köprüdür.

Romalılar, Yunanlılar ve daha birçok eski medeniyet bağlayıcı maddeleri yapılarında kullanmıştır. Romalılar bağlayıcı madde olarak kullandıkları söndürülmüş kireci, volkanik küller ve pişirilmiş tuğla tozlarıyla karıştırarak bugünkü çimentonun yapısına benzeyen hidrolik bağlayıcıyı keşfetmişlerdir. Romalılar tarafından yüzyıllar önce kullanılmış olan bu hidrolik bağlayıcı (kireç harcı) zamanla unutulmuş ve 1796 yılında yeniden keşfedilebilmiştir. Çimento ise 1820 yılında Joseph Aspdin tarafından yapay olarak üretilmiştir. Aspdin 1824 yılında çimento üretim sürecinin patentini almıştır (Taly, 1998).



Şekil 1.5. Menai Strait Köprüsü (URL-4, 2014)



Şekil 1.6. Brooklyn Köprüsü (URL-5, 2014)

Aspdin tarafından geliştirilmiş olan üretim sürecinde ham maddeler yüksek sıcaklıklarda pişirilmemiş ve öğütme işlemi de uygun yapılmadığından elde edilen çimento bugün kullanılmakta olan çimentonun sahip olduğu özelliklere sahip olmamıştır. Isaac Johnson günümüzdeki çimento üretimine benzeyen, malzemelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi sürecinin patentini 1844 yılında almıştır (Hopkins, 1970; Erdoğan 2007). Çimentonun her yerde kolaylıkla temin edilebilen su, agrega ve kumla birlikte kullanılması betonun tercih edilen bir malzeme olmasını sağlamıştır. Beton maliyetinin ucuz, işçiliğinin kolay olması, istenilen mimarı şeklin rahatlıkla verilebilmesi, yüksek basınç mukavemeti ve yangına karşı dayanıklı olması gibi özellikleri sayesinde çok fazla yapıda kullanılmaya başlanmıştır. Fakat malzeme olarak betonun çekme gerilmeleri altındaki mukavemetinin, basınç gerilmeleri altındaki mukavemetine oranla oldukça düşük olması, betonun çekme gerilmesine maruz yapı elemanlarında kullanılmasını engellemiştir. Betonun bu kusuru beton içine belirli bir düzende demir veya çelik çubuklar

yerleştirilmesiyle giderilmiştir. Joseph Monier demirle betonu bir arada kullanarak çok sayıda patent almış ve ilk betonarme köprünün tasarımcısı olmuştur. Bu gelişmelerden sonra betonarme birçok yapının ana malzemesi olarak kullanılmıştır. Betonarme yapıların sayısının artmasıyla beraber betonarme konusundaki çalışmalar da hız kazanmıştır. Betonarme elemanların ağır olması, inşa süresinin uzun, kalıp maliyetlerinin fazla olması ve düşük gerilmeler altında elemanlarda çatlakların oluşması gibi zayıf yönlerinin giderilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar da öngerilmeli betonun ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Öngerilmeli beton fikri 1888 yılında P.H. Jackson tarafından ortaya koyulmuştur. P.H. Jackson öngerilmeli beton tekniğini kullanarak yapmış olduğu kaldırımlar için ilk patenti almıştır. Fakat bu yıllarda yüksek dayanımlı çeliğin olmayışı öngerilmeli betonun önemli mühendislik yapılarında kullanılmasına engel olmuştur. Gerçek anlamda öngerilme tekniğini köprülerde kullanan ilk kişi Eugene Freyssinet olmuştur. Freyssinet öngerilme tekniği ile 1920'lerde iki tane kemer köprü inşa etmiştir. Gustave Magnel, Freyssinet'in öngerilmeli beton hakkındaki fikirlerinden etkilenmiş ve bu konu üzerinde çalışmaya başlamıştır. Kurmuş olduğu laboratuvarında öngerilmeli kirişler üzerinde kapsamlı çalışmalar yapmış ve çalışmalarını sonucunda kendi öngerilme tekniği olan Magnel-Blaton tekniğini geliştirmiştir. Ulrich Finsterwalder I. ve II. Dünya Savaşı dönemlerinde öngerilmeli beton tekniğini kullanmış ve öngerilmeli beton köprüde dengeli konsol metodunu ilk uygulayan kişi olmuştur.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Öngerilmeli beton köprüler, 1950'den beri geniş açıklıkların geçilmesinde faydalanan, yüksek dayanımlı malzemelerin kullanıldığı cazip alternatiflerden biridir. Ülkemizde ve diğer ülkelerde bulunan öngerilmeli beton köprülerin diğer köprü türlerine oranı incelendiğinde öngerilmeli beton teknolojisinin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Öngerilmeli beton köprülerin artan kullanımı bu konu hakkında yapılan çalışmalarında artmasını sağlamıştır. Bu kısımda öngerilmeli beton ile ilgili son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

Carrasquillo vd. (1981), Castrodale vd. (1988), Russell ve Burns (1993) ve Mitchell vd. (1993) transfer ve gelişme uzunluğu konuları üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalar kablo çapının ve öngerme kablosunun yüzeyindeki pürüz miktarının artmasıyla transfer ve

gelişme uzunluğunun lineer olarak arttığını, yüksek dayanımlı beton kullanıldığında ve öngerme kablosunun yüzeyindeki kirlilik miktarı artığında ise azaldığını göstermişlerdir.

Oktar (1995), yüksek lisans tezinde öngerilmeli beton kirişlerin lineer olmayan programlamayla optimum tasarımı üzerinde çalışmıştır. Söz konusu tez çalışmasında, tek ve iki açıklıklı kirişleri ele almış ve üç tipik kesit; I, T ve dikdörtgen kesitleri incelemiştir. Problemin çözümünü matematiksel programlama teknikleri ile gerçekleştirmiş ve örnekler vermiştir. Tezde ayrıca, yapı optimizasyon metodlarını kısaca incelemiş ve öngerilmeli kirişlerin tipleri, karakteristikleri, davranışları ve bu kirişlerin optimum tasarımıyla ilgili detaylı araştırma yapmıştır.

Çağatay (1996), prizmatik ve prizmatik olmayan öngerilmeli beton kirişlerin optimum tasarımı için üç adet bilgisayar programı geliştirmiştir. İlk iki programında ağ araştırma yöntemini (grid search method) ve gradyan izdüşümü yöntemini (gradient projection method) kullanmıştır. Üçüncü program ile Magnel'in grafik yöntemini kullanarak minimum kuvvet tasarımı yapmıştır.

Nohutçu (1996), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde basit mesnetli kompozit otoyol köprü kirişlerinin analizinde ve projelendirilmesinde kullanılmak üzere bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Program 4 ana standart otoyol köprü üstyapı kiriş çeşidini ele almış ve bunlarında alt kesit tiplerine göre çözüm yapmıştır. Program bu kesit çözümlerini ve projelendirmesini farklı şartnamelere uygun olarak yapmıştır.

Aparicio vd. (1996), öngerilmeli beton köprülerin bilgisayar yardımıyla tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Hazırladıkları bilgisayar programı yardımıyla köprü elemanlarının hesabını gerçekleştirmişlerdir. Hesaplarda kullanılan hareketli yük modeli, malzeme özellikleri ve güvenlik faktörleri gibi tasarım parametrelerini İspanyol yönetmeliğinden almışlardır. Program ile köprünün bütün elemanları için öngerme kablosu, betonarme çeliği ve kullanılan diğer malzemelerin miktarı ve maliyetinin hesaplandığını belirtmişlerdir.

Tan ve Ng (1997), altı adet T kesitli betonarme kirişin dıştan öngerilmeli kablolar ile güçlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu kirişlerin güçlendirilmesi için kullanılan kabloların farklı dizilimlerinin kiriş davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, öngerme kablolarının eksantrisitesinin artmasıyla servis yükleri altında meydana gelen deformasyonların azaldığını göstermişlerdir.

Zokaie (2000), hareketli yük dağılımı için AASHTO (1996)'da verilen S/D denkleminin kirişler arası mesafenin 1,8m ve köprü açıklığının 18m civarında olduğu

durumlarda kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Fakat köprüye ait bu değerlerin farklılaştığı durumlarda enine hareketli yük dağılım katsayısının doğru sonuçlar vermeyebileceğini vurgulamıştır.

Araz (2000), öngerilmeli sürekli kirişlerin tasarımında öngerilme kuvveti ve eksantrisiteyi belirlemenin uzun işlemler gerektirdiğini vurgulamıştır. Bu nedenle tasarım için gerekli olan öngerilme kuvveti ve eksantrisiteyi belirleyecek bir bilgisayar programının zaman ve doğruluk açısından gerekli olduğunu savunmuştur. Çalışmasında öngerilmeli sürekli kirişlerin tasarımını yük-dengeleme yöntemiyle yapan bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Araştırmacı, programın kesite uygulanacak öngerilme kuvveti ve eksantrisite değerlerini doğru olarak bulduğunu literatürdeki mevcut örnekler ile karşılaştırarak göstermiştir.

Nowak vd. (2001), öngerilmeli beton köprülerin güvenilirlik seviyelerini Norma IAP-89, Eurocode 1 (1994) ve AASHTO LRFD (1998) koşullarını dikkate alarak belirlemişler ve elde ettikleri verileri karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. AASHTO LRFD koşulları dikkate alınarak elde edilen sonuçların daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Wagdy vd. (2003), öngerilmeli beton kirişli bir köprünün, kapsamlı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Üstyapıda iki basit açıklıktan oluşan sürekli hareketli yüklere maruz, altyapı ise tek parçadan ve çok kolonlu bir yapıyı örnek olarak kullanmışlardır. Köprü tasarımında AASHTO LRFD (2002) şartnamesinin özelliklerini kullanmışlar ve köprünün tüm elemanları için tasarım adımlarını özetleyerek ayrıntılı akış şemaları vermişlerdir.

Tuan vd. (2004), öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde meydana gelen çatlak oluşumunu incelemişlerdir. Öngerilmeli kirişler üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, kiriş mesnet bölgelerinde çatlak oluşumunun azaltılmasına yardımcı olan önerilerde bulunmuşlardır.

Du ve Au (2005), öngerilmeli beton kirişli köprülerin tasarımı için Hong Kong (1997), Çin (1991) ve AASHTO LRFD (1998) yönetmeliklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada 25-40 metre arası açıklığa sahip basit mesnetli ve T kesitli ardçekim beton kirişlerin, seçilen yönetmelikler çerçevesinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, bu üç yönetmelik kullanılarak yapılan tasarımlardan elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

Aydın (2006), prefabrik önçekim öngerilmeli beton bitişik I kirişlerden oluşan, kısa ve orta açıklıklı köprü üstyapılarının, genetik algoritma kullanarak, malzeme maliyetinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Standart kesitler yerine, köprü karakteristiklerine bağlı

olarak optimize edilmiş ve optimum sayıdaki öngerilmeli beton kirişlerin köprü enkesitinde kullanılması durumunda malzeme maliyetindeki değişimleri incelemiştir. Çalışmasında ülkemizde konuyla ilgili olarak yayınlanmış olan yönetmelik ve standartların yetersiz olduğunu vurgulamış ve gerilme, taşıma gücü, kullanılabilirlik sınırlayıcılarını AASHTO (2002) yönetmeliği uyarınca dikkate almıştır.

Gutierrez ve Ochoa (2007), betonarme, öngerilmeli ve kompozit kirişlerdeki kısa ve uzun dönemde meydana gelen sehim durumları üzerine çalışmışlardır. Enine doğrultuda moment etkisindeki bu tip kirişlerde meydana gelen kısa ve uzun dönem sehimlerin hesaplanması için model önermişlerdir.

Oflazoğlu (2007), tek eksenli eğilme ve eksenel basınç kuvveti etkisi altında poligonal kesitli öngerilmeli beton kolonların analiz ve tasarımını gerçekleştiren bilgisayar programı hazırlamıştır. Program eksenel yük-moment değerlerini bulmakta ve eksenel yük-moment etkileşim diyagramını çizmektedir. Hazırlanan bilgisayar programında beton basınç bölgesi için eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımını kullanmıştır. Öngerilmeli narin kolonların tasarımında ikinci mertebe momenti nedeniyle meydana gelen narinlik etkisini, ACI (1999) yönetmeliği tarafından önerilen “Moment Büyütme Yöntemini” temel alarak hesaplara yansıtmıştır. Yapılan bilgisayar programı ile literatürde bulunan bazı örnekler çözülmüş ve sonuçların uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Uluğ (2008), ülkemizde, karayolu köprü ve viyadüklerinin tasarımı için güncel bir yönetmelik bulunmadığını ve tasarımcıların yabancı yönetmelik kriterlerini, ülkemiz şartlarına göre uyarlayarak kullandığını belirtmiştir. AASTHO-LRFD (1998) yönetmeliğinin tasarım kriterleri hakkında detaylı bir özet sunmuştur. AASHTO (1996) yönetmelik kriterlerine göre tasarımı yapılmış mevcut bir köprünün, AASHTO-LRFD yönetmeliğine göre yeniden tasarlanmasını incelemiş ve tasarım sonucunda köprüde kullanılan öngerme kablo ve donatı miktarının arttığını belirtmiştir.

Sarsık (2008), köprü üstyapısında kullanılan 9 tip öngerilmeli prefabrik I kesitli köprü kirişinin değişen açıklıklarda hesabını yapmış ve tip kirişlerin hangi açıklıklarda efektif olarak kullanılacağını belirlemiştir. Çalışmada 22,50m genişlikli 4 şeritli bir köprü dikkate alınmıştır. Kirişlerin öngerme kablosu gereksinimlerini daha çok eğilme etkilerinin belirlediğini vurgulamıştır. Kirişlerde kullanılan öngerme kablolarında zamana bağlı öngerilme kayıplarını hesaplamış ve kayıplardan sonra dört farklı yükleme safhasında kesitlerde oluşan asal gerilmeleri emniyet gerilmeleriyle kontrol etmiştir. Çeşitli açıklıklar

için kirişlerde öngerme kablosu sayısının artmasıyla öngerme kayıplarının değişimini incelemiştir.

Akoğul (2008), Türkiye'deki betonarme köprü ve viyadüklerin AASHTO (2002) yönetmeliğine göre depreme dayanıklı tasarımına ilişkin koşulları incelemiştir. Özellikle depreme dayanıklı köprü tasarımı aşamalarındaki belirsizlikleri açıklamaya çalışmıştır. AASHTO koşullarının uygulanmasında karşılaşılan sorunlara çözümler geliştirmiştir. Çalışma, tasarım aşamasında elastomer mesnetlerin modellenme biçiminin deprem davranışına olan etkisine odaklanmıştır. Çalışmada, izolatörlü, izolatörsüz ve basit mesnetli olmak üzere üç ayrı model çözülerek elastomer mesnetlerin köprü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kang-Su vd. (2009), ardçekim metodunda öngerme kablo doğrultularının yapısal elemanlarda meydana getirdiği etkileri araştırmışlardır. Elemanların etkin sehim kontrolünü, farklı öngerme kablo yerleşimi altında incelemişler ve en uygun kablo yerleşimini belirlemişlerdir.

Rana vd. (2010), ardgermeli köprülerin orta açıklıklı köprülerde sıklıkla kullanıldığı için bu köprü türü için maliyet optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında sınır şartları olarak AASHTO (2002) yönetmeliği koşullarını dikkate almışlardır. Bu kapsamda Bangladeş'te bulunan Teesta Köprüsü üzerinde çalışmışlardır. Optimizasyon kriterleri olarak köprünün açıklığı, kesit boyutları, tabliye kalınlığı, öngerme kablosu miktarı ve öngerme kablolarının kiriş içerisindeki yerleşim düzenini dikkate almışlardır. Çalışmanın sonucunda seçilen örnek proje için daha uygun maliyetli bir tasarım önermişlerdir.

Tadros vd. (2010), öngerilmeli kirişlerde meydana gelen çatlakların oluşumunun sebepleri üzerine çalışmışlardır. İlk olarak konu ile ilgili geniş bir literatür taraması yapmışlar ve ABD'de bulunan farklı yönetmeliklerin bu konu hakkındaki önerilerini irdelemişlerdir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde çatlakların oluşmasına neden olan mekanizmaları açıklamışlardır. Bu mekanizmalardan bir tanesinin de kirişe yerleştirilen öngerme kablolarının düzeni olduğunu vurgulamışlardır.

Aktaş (2010), ülkemizde karayolu yapılarının tasarımı için kapsamlı bir yönetmelik bulunmadığını belirtmiştir. Son yıllarda Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından çıkarılan Yol Boyu Mühendislik Yapıları için Deprem Yönetmeliği (2006) ve Ulaştırma Bakanlığı tarafından yayınlanan Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Havameydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği'nin (2007) yabancı yönetmeliklerin adeta bir çevirisi gibi olduğunu belirtmiştir ve çalışmada kuvvete dayalı tasarım için AASHTO

(2002), performans bazlı tasarım için ise CALTRANS (2001) yönetmelikleri kullanılmıştır.

Hernandez vd. (2010), öngerilmeli beton kirişlerin optimizasyonunu yapan grafik ara yüze sahip VTOP adlı bir program geliştirmişlerdir. VTOP programının, analizleri İspanyol yönetmeliğine göre gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir.

Gündüz (2010), üstyapısı öngerilmeli prefabrik kirişlerden oluşan çift hatlı hızlı demiryolu köprüsünü, düşey yükler, trafik yükleri ve deprem yükleri altında analiz etmişlerdir. Köprü elemanlarının statik ve dinamik analizleri için oluşturulan bilgisayar modelleri SAP2000 (2006) ile hazırlanmıştır. Analizlerde köprü elemanlarına etki eden yüklerin belirlenmesinde ve işletme durumlarına ilişkin kriterlerde UIC (2001) ve Eurocode (1998) şartnamelerini dikkate almıştır.

Rizkalla vd. (2011), öngerilmeli kirişlerde meydana gelen sehim ve öngerilme kayıplarının doğru olarak belirlenmesinin önemini vurgulamışlardır. Öngerilme kayıplarının zamana bağlı oluşunun, değişken beton özelliklerinin ve üretimdeki değişkenlerin kirişlerde meydana gelen sehimin belirlenmesini zorlaştırdığını vurgulamıştır. Bu değişkenleri dikkate alarak kirişlerde meydana gelen sehimin belirlenmesi için bir yöntem önermişlerdir.

Erkek (2011), AASHTO Tip 1 kirişlerinin transfer uzunluğunu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmiş ve elde edilen verileri deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Yapılan analizler sonucunda kısa dönem transfer uzunluklarının, uzun dönem transfer uzunluklarından daha kısa olduğunu göstermiştir.

Vargas vd. (2012) yedi telli öngerme kablosunun transfer ve gelişme uzunluklarının deneysel olarak belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. 13mm çaplı öngerme kablosunun transfer ve gelişme uzunluklarının hesabı için denklem önermişlerdir. Öneride bulundukları denklemden elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Okumuş ve Olivia (2013), öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde meydana gelen istenmeyen çatlakların sebeplerini araştırmışlardır. Bu kapsamda 137cm yüksekliğe 39,3m açıklığa sahip kirişin lineer olmayan analizini yapmışlardır. Kirişin mesnet bölgelerinde meydana gelen çatlakların azaltılması için; öngerme kablolarının kesilme sırası, kaldırma kancasının konumu, kılıflanacak kablo miktarı ve konumu ile ilgili önerilerde bulunmuşlardır.

Moravcik (2013), Slovakya'daki karayolu köprülerinin önemli bir kısmının öngerilmeli beton teknolojisiyle üretildiğini ve son planlamalara göre yaklaşık 200km daha yeni köprünün öngerilmeli beton teknolojisi kullanılarak yapılacağını belirtmiştir.

Caro vd. (2013), öngerilmeli beton kirişlerde meydana gelen öngerilme kayıplarının deneysel olarak değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bir yıl süresince numunelerde meydana gelen elastik kısalma ve zamana bağlı olan sünme ve rötire kayıplarını takip etmişler ve elde ettikleri sonuçları yönetmeliklerde bulunan metodlar ile karşılaştırmışlardır.

Colajanni vd. (2014), eğilme ve kesme kuvveti etkisindeki öngerilmeli kirişler için betonarme donatısının dizilimi için önerilerde bulunmuşlardır. Bu kapsamda mevcut bir öngerilmeli köprü seçilmiştir. Bu köprünün mevcut betonarme donatısı diziliminin yerine daha uygun ve ucuz bir dizilim belirlemişlerdir.

Yapar vd. (2015), öngerilmeli kirişlerin lineer olmayan analizi üzerine çalışmışlardır. Bu tip kirişlerin lineer olmayan analizinde dikkat edilecek hususlar üzerinde durmuşlar ve kirişlerde meydana gelen çatlakları açıklamaya çalışmışlardır.

Bonopera vd. (2017), öngerilmeli kirişler üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında öngerilmeli kirişler üzerinde serbest titreşim testleri gerçekleştirmişler ve öngerilme kuvvetinin kirişin doğal frekansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Toyota vd. (2017), son yıllarda Japonya'da bulunan öngerilmeli beton köprülerde çatlakların raporlandığını ve bu durumun köprülerin yıkımına sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında örnek bir öngerilmeli kiriş üzerinde titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede öngerilme kuvvetindeki azalmanın kiriş titreşim karakteristiği üzerindeki etkisini ve köprü sağlığını belirlemeye çalışmışlardır.

1.2.1. Elastomer Mesnet ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Elastomer mesnetlerin artan kullanımıyla birlikte bu konuyla ilgili daha detaylı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur:

Constantinou ve Tadjbakhsh (1984a), sürtünmeli sarkaç ve elastomer mesnetlerden oluşan sismik izolasyonlu iki boyutlu kayma çerçevelerinin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada birinci titreşim modu için lineer olmayan hareket denklemlerini çözmüşlerdir.

Constantinou (1987), esnek bir zemin üzerine mesnetlenen sismik izolasyonlu yapıların analizi için basitleştirilmiş bir yöntem sunmuştur. Bu yöntemde yapı sistemi tek katlı üstyapıdan, rijit bir tabandan ve visko-elastik yarı homojen zemin üzerine oturan bir temelden oluşmaktadır. Sismik izolasyon sistemi olarak elastomer mesnet sistemi kullanılmıştır. Basitleştirilmiş bu yöntemde rijit zemin üzerinde bulunan sönümlü tek serbestlik dereceli sistem gerçek bir yapı sistemini temsil etmiştir. Yapının dinamik davranışları için gerekli olan doğal frekans ve sönüm faktörü tek serbestlik dereceli sistemden elde edilmiştir.

Karayolu köprülerinde sismik izolasyon sisteminin üstünlüğünü göstermek için sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü davranışlarının karşılaştırıldığı pek çok çalışma yapılmıştır (Tongaokar ve Jangid, 2000, 2002, 2003; Mutoke ve Cooper, 1999; Park vd., 2002; Chaudhary vd., 2001, 2002). Bu çalışmalarda karayolu köprülerinde sismik izolasyon kullanımının önemi vurgulanmıştır.

Li (1989), elastomer mesnet ve sönümleyici içeren sismik izolasyonlu bir köprünün dinamik davranışını incelemiştir. Lineer olmayan hareket denklemleri birinci mod titreşiminden elde edilmiştir. Çalışma sonuçları kullanılan sönümleyicilerin etkili olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte hesaplanan izolatör yer değiştirmesi ne kadar büyük olursa izolasyon sisteminin de o derece etkili çalıştığı vurgulanmıştır.

Koh ve Kelly (1990), elastomer mesnetlerin kuvvet-yer değiştirme davranışını tanımlamışlardır. Sismik izolasyonlu yapılara ait hareket denklemlerinin çözümü için sayısal integrasyon yöntemlerini kullanmışlar ve sayısal algoritma geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yaptıkları sayısal örneklerle geliştirdikleri algoritmanın iyi bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir.

Tsopelas vd. (1994), köprülerin sismik izolasyonunda sönümleyici sıvıları, düz kayıcı mesnetleri ve merkezlenmeyi sağlayan kauçukları kullanarak çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz köprü modelleri üzerinde deprem simülasyon testleri yapmışlardır. Bununla birlikte analitik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, sismik izolasyonlu köprünün deprem dayanımının arttığını ve analitik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermişlerdir.

Tuna (1998), yaptığı araştırmada köprülerin depreme dayanıklı olarak projelendirilmesinin can güvenliği esasına yönelik olduğunu vurgulamış ve hasar oluşumunun kabul edildiğini, ancak çökmenin oluşmamasının istendiğini belirtmiştir.

Deprem esnasında yapıda meydana gelen deprem kuvvetlerinin, elastomer mesnet kullanılarak kontrol edilebildiğini açıklamıştır. Bu mesnetlerin, köprünün doğal periyodunu büyüttüğünü ve yapıya aktarılacak olan deprem kuvvetlerinin düşük seviyede kalmasına yardımcı olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, elastomer mesnetler sayesinde köprü ayakları arasında kesme kuvvetlerinin dağılımını da kontrol etmenin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Yazdani vd. (2000), öngerilmeli beton köprülerde elastomer mesnetlerin sıklıkla kullanıldığını belirtmişler ve köprü kirişleri ile altyapı arasındaki bağlantıyı sağlayan bu elemanların köprü performansı üzerinde oldukça etkili olduklarını vurgulamışlardır. Çalışmalarında AASHTO'da elastomer mesnetlerin rijitliklerinin belirlenmesinde kullanılan formüllerin doğruluğunu araştırmışlardır. Bu kapsamda 27 adet köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Köprü modellerinin analizlerinden elde edilen verileri arazi ölçümlerinden elde edilen verilerle karşılaştırmışlar ve AASHTO'da elastomer mesnetlerin rijitliklerinin hesaplanmasında kullanılan formüllerin doğruluğunu göstermişlerdir.

Buckle vd. (2002), elastomer mesnetlerin kararlılığını belirlemek için analitik ve deneysel çözümleri karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma ile elastomer mesnetlerin kararlılığında etkili olan kritik eksenel yükü belirlemek ve bu eksenel yükü değiştirerek büyük şekil değiştirmeleri hesaba katacak yaklaşık bir düzeltme faktörü elde etmeyi amaçlamışlar ve bunu deneysel olarak test etmişlerdir. Yaptıkları deneysel ve analitik karşılaştırma sonucunda kritik yükleme üzerinde etkili olan yatay yer değiştirmenin doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermişlerdir.

Gerçek (2002), köprü ve viyadüklerde, deprem izolatör maliyetinin toplam inşaat maliyetinin etkili anakaya ivmesi $0,3g-0,4g$ olan bir bölgede %5-10 değerlerine kadar çıkabildiğini aktarmıştır. Deprem izolatörlerinin ilk bakışta yüksek gibi görülen bu maliyetlerine karşın sağladığı emniyet, can kaybı ve hasarların önlenmesi, bunlara ek olarak yapının deprem etkisine maruz kaldığı sürelerde ve sonrasında bütün fonksiyonlarını kesintisiz ve eksiksiz yerine getirmesi, yapının verdiği hizmetler ve üretimde sürekliliğin sağlanması, depremlerden sonra yapıda tamir ve kuvvetlendirme gereksinimini ortadan kalkması dikkate alındığında yanlış bir karar ve pahalı bir yatırım olmadığını belirtmiştir.

Murnal ve Sinha (2004), sismik izolasyon sistemlerinin depreme dayanıklı yapı tasarımı için etkili bir teknik olduğunu söylemişlerdir. Üstyapı ile temel arasına

yerleştirilmiş olan izolatörlerin periyodunun yapının periyoduna oranla nispeten daha uzun olduğunu ve izolatör periyodunun, izolatörlü yapının periyoduna hâkim olduğunu belirtmişlerdir.

Mum (2006), kauçuk esaslı mesnetler sahip betonarme bir köprüyü SAP2000 sonlu eleman yazılımı yardımıyla modelleyerek analiz etmiştir. Köprü kirişlerinin altında bulunan elastomer mesnetlerden dolayı deprem anında köprü ayaklarından üstyapıya herhangi bir momentin aktarılmadığını belirtmiştir.

Green vd. (2007), öngerilmeli kirişli karayolu köprülerinde elastomer mesnetlerin sıklıkla kullanıldığını ve köprü performansı üzerinde etkili olduğunu vurgulamışlardır. Elastomer mesnet rijitliğinin verevli köprü performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla 78 adet kirişin sonlu eleman modelini ANSYS (1999) programı yardımıyla oluşturmuşlar ve AASHTO (1999) yönetmeliğinde bulunan HL93 tasarım kamyonu altındaki davranışını incelemişlerdir. Analizler sonucunda yüksek elastomer rijitliğinin verev açısının fazla olduğu köprülerde faydalı olduğunu vurgulamışlardır.

Akoğlu ve Çelik (2008), Türkiye’deki betonarme köprü ve viyadüklerin AASHTO (2002)’ye göre depreme dayanıklı tasarımına ilişkin koşulları incelemişlerdir. Bu bağlamda, yurdumuzda sıkça kullanılan, elastomer mesnetlere serbestçe oturan prefabrik öngerilmeli kirişli köprü sistemini ele almışlardır. Tasarım aşamasında elastomer mesnetlerin modellenme biçiminin deprem davranışına olan etkisine odaklanmışlardır. Bu amaçla, değişik mekanik özelliklere sahip elastomer mesnetlerin mekanik özelliklerine bağlı olarak köprünün periyotları ve iç kuvvetleri üzerindeki etkisini, basitleştirilmiş modellerden elde edilen verilerle irdelemişlerdir.

Avşar vd. (2011), köprülerin bulunduğu yerin sismik tehlikesine bağlı olarak, köprülerin hasar görebilirliğini kırılgnlık eğrisiyle belirlendiğini belirtmişlerdir. Türkiye’deki tipik öngerilmeli karayolu köprülerinin kırılgnlık eğrilerinin analitik yöntemle belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında oluşturdukları modelde elastomer mesnetlerin analitik modelini ve bileşenlerini ayrıntılı olarak aktarmışlardır.

Harper ve Consolazio (2013), köprülerin tasarımı ve inşasında elastomer mesnetlerin rijitliklerinin doğru hesaplanmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Elastomer mesnetlerin karmaşık yer değiştirmelerinin, rijitliklerinin hesaplanmasını zorlaştırdıklarını belirtmişler ve çalışmalarında bu rijitliklerin belirlenmesinde kullanılan sayısal bir method sunmuşlardır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Öngerilmeli kirişlerle yapılan köprülerin dünyadaki ve ülkemizdeki sayısı göz önüne alındığında ne kadar önemli oldukları görülmektedir. Modern mühendisliğin en önemli gelişmelerinden biri olan öngerilmeli beton kısa bir zaman içerisinde, yapı malzemesi, ekonomi, hız, uzun ömürlülük, yangına dayanıklılık, enerji tasarrufu ve mimari esneklik gibi üstünlüklerinden ötürü geleceğin yapı malzemesi olarak süratle ön sırayı almış bulunmaktadır. Toplumların artan ulaşım ihtiyaçları da düşünüldüğünde öngerilmeli beton köprülerin inşasının artarak devam edeceği açıktır.

Bu doktora tez çalışmasında, öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında köprü üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile farklı malzeme özelliklerine, açıklığa ve genişliğe sahip öngerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısının farklı dış etkiler altındaki analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde tamamlanması ve bunlara ek olarak analiz sonucunda elde edilen; kesit özellikleri, kesit tesirleri, öngerme kablo sayısı ve yerleşimi planı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri, kiriş ve tabliyenin yapımında gerekli olan betonarme donatı sayısı ve yerleşimi gibi köprü üstyapısının inşasında gerekli bilgilerin raporlanması ve uygulama projelerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen program yardımıyla köprü üstyapısında yapılan analizler ile köprü kirişlerinin etkin açıklıkları belirlenmesi ve köprü üstyapı derinliğinin belirlenmesinde kullanılan bağıntıların önerilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan tez beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, ilk olarak konunun önemi ve konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalara yer verilmektedir. Daha sonra öngerilmeli beton hakkında genel bilgiler verilerek çeşitleri ve temel çalışma prensibinden bahsedilmektedir. Öngerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısının hesap ve tasarımda gerekli olan yük türleri, kesit bilgileri ve tesirleri, öngerilme kayıpları, öngerme kablo sayısının tespiti, kirişte farklı dönemlerde meydana gelen sehim, kılıflanma işlemleri, kiriş ve tabliyenin betonarme hesabı hakkında genel bilgilere yer verilmektedir. Öngerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısı ile altyapısı arasındaki bağlantıyı sağlayan elastomer mesnetlerin tasarım adımlarına da bu bölümde yer verilmektedir.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölümde ilk olarak öngerilmeli beton köprülerin maruz kaldığı

sabit ve hareketli yüklerin kirişlerde oluşturduğu kesit tesirleri belirlenmekte ve köprü üstyapısının hesabında gerekli olan kesit özellikleri incelenmektedir. Daha sonra öngerilmeli kirişlerde bulunan öngerme kablolarının kirişe uygun şekilde yerleştirilmesini belirlemek için yapılan çalışmadan bahsedilmektedir. Bu çalışmada hesap açıklığı, kesit ve malzeme özellikleri aynı fakat öngerme kablo sayısı ve yerleşimi birbirinden farklı olan öngerilmeli kirişler üzerinde yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara yer verilmektedir. Öngerilmeli kirişte aktarma dönemi sonunda kirişte meydana gelen sehim ile ilgili deneysel ölçümler yapılmış ve elde edilen veriler literatürde mevcut olan analitik yöntemler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu bölümde son olarak, öngerilmeli kirişin dinamik karakteristiklerinin deneysel ve analitik olarak belirlenmesi için yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak, öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprü üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren I-CAD programı ile köprü üstyapısı ile altyapısı arasındaki bağlantıyı sağlayan elastomer mesnetlerin analizini gerçekleştiren SREI-CAD programı geliştirilmiştir. Örnek olarak seçilen öngerilmeli prefabrik kirişli beton bir köprü üstyapısının hesap ve tasarımı I-CAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. I-CAD programının doğruluğunu kontrol etmek için hesap ve tasarımı gerçekleştirilen öngerilmeli kiriş, SAP2000 programında modellenerek, kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. SREI-CAD programı yardımıyla ise aynı malzeme özelliklerine sahip dikdörtgen ve dairesel kesitli elastomer mesnetler aynı yük koşulları dikkate alınarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde I-CAD programı kullanılarak öngerilmeli kirişlerin etkin açıklıkları belirlenmeye çalışılmış ve elde edilen veriler ışığında, köprü açıklığına bağlı olarak üstyapı derinliğinin belirlenmesi için bağıntılar önerilmiştir.

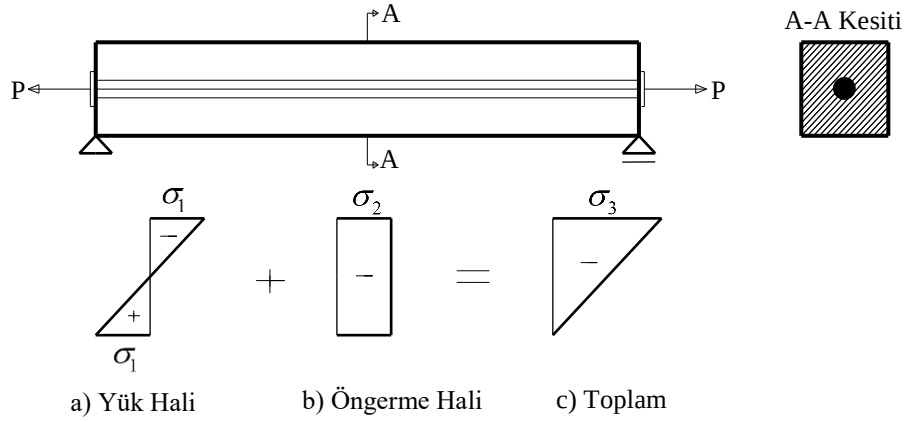
Beşinci bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Öngerilmeli Beton

Beton sahip olduğu üstün özelliklerinden dolayı mühendislik yapılarının ana yapı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak çekme dayanımının basınç dayanımına göre çok düşük olması betonun zayıf yanını oluşturmaktadır. Oysa yapı elemanlarının çoğunda büyük eğilme momentleri ve bunun sonucu olarak da çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu sebeple betonun zayıf tarafını ortadan kaldırmak için betonun çekme bölgesine donatılar yerleştirilerek, betonarme tekniği ortaya çıkmıştır. Her ne kadar betonarme elemanlar çekme gerilmelerine karşı koyabilseler de bu elemanlarda, betonun çatlaması önlenememiştir. Betonarmenin bu ve diğer sakıncalarını (ağırlıklarının fazla oluşu, büyük şekil değiştirme yapmaları, donatıların korozyona uğrama tehlikesi vb.) ortadan kaldırmak için betonun çekme bölgesine öngerilme kuvveti uygulanarak çekme gerilmelerinin oluşmadığı öngerilmeli beton tekniği ortaya çıkmıştır (Kozak, 2011).

Öngerilmeli beton yüksek dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı çeliğin aktif olarak çalışmasıyla oluşturulmaktadır. Yüksek dayanımlı çeliğin gerilmesi sonucunda öngerilmeli kirişte enerji depolanmakta ve bu enerji, yapı elemanının alt kesitinde sıkışma meydana getirerek ters sehim oluşturmaktadır. Öngerilme işlemiyle, betonun zayıf olan çekme kapasitesindeki eksiklik yok edilerek yüksek dayanımlı bu iki malzemenin ideal bir birleşimi sağlanmaktadır. Bu şekilde, kirişin kendi ağırlığını taşıma zorunluluğunu ortadan kaldıran yukarı doğru bir kuvvet meydana getirilmektedir. Kirişin uzunluğu boyunca ortaya çıkan bu kuvvet, kirişe uygulanan yüklere karşı koymaktadır (Kozak, 2011).

Öngerilmeli taşıyıcı bir elemanın davranışını en basit şekli ile tanımlamak için dikkate alınmış basit kiriş Şekil 1.7’de görülmektedir. Kiriş sadece kendi ağırlığı etkisindeyken kirişin A-A kesitinde meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 1.7.a’da görülmektedir. Burada kirişin üst lifi basınç, alt lifi ise çekme gerilmesi altındadır. Şekil 1.7 (b)’deki gerilme dağılımı ise P kuvveti ile gerilmiş ve düzgün bir gerilme dağılımı elde edilmiş olan öngerme kablosundaki gerilme dağılımı göstermektedir. Bu iki sistem birleştirilip toplandığında ise Şekil 1.7 (c)’deki gerilme dağılımı elde edilmektedir. Toplam gerilmeden de görüldüğü gibi kiriş kesiti sadece basınç gerilmesi altındadır. Kesitte çekme gerilmeleri yok edilerek kesitin çatlaması engellenmektedir (Topçu, 2006). Günümüzde birçok öngerilmeli beton sistemi ve tekniği geliştirilmiş olmakla birlikte bu teknikler önçekme ve ardçekme olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır (Aydın, 2006).



Şekil 1.7. Merkezden gerdirilen öngerilmeli basit kiriş

1.4.1. Önçekme Yöntemi

Önçekme yöntemi adından da anlaşılacağı gibi öngerme kablolarının beton dökümünden önce çekilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde, öngerme kabloları bir ucu sabit diğer ucu pistonlarla kontrol edilen kalıplar içerisinde gerdirilmektedir. Daha sonra taze beton, kalıplar içinde önceden gerilmiş olan öngerme kablolarının bulunduğu kalıplara dökülmekte ve bakımı yapılmaktadır. Beton yeterli dayanıma ulaştığında, öngerme kablolarının pistona bağlı ucu yavaşça bırakılarak öngerme kablolarındaki gerilme beton ile donatı arasındaki aderans sayesinde betona aktarılmaktadır. Böylece çekme gerilmesinin oluşmadığı eleman üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem yaygın olarak prefabrik elemanların üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.8’de prefabrik kiriş üretimi yapan bir tesis görülmektedir.

1.4.2. Ardçekme Yöntemi

Ardçekme yönteminde, beton dökülmeden önce kalıplar içerisine öngerme kablolarının geçmesine imkân tanıyan kılıflar yerleştirilmektedir. Beton döküm işlemi tamamlandıktan sonra kılıflar içerisine öngerme kabloları yerleştirilmektedir. Öngerme kabloları beton yeterli dayanıma ulaştıktan sonra gerilmekte ve elemanın uç noktalarına ankrajlanmaktadır. Öngerme kabloları gerildikten ve ankrajlandıktan sonra, kılıflar ile öngerme kabloları arasındaki boşluk sonradan sertleşen özel bir harç ile doldurulmaktadır.

Bu harç sayesinde, öngerme kablolarının korozyon riski azaltılmış olmaktadır. Bu yöntem özellikle boyutu itibariyle taşınması mümkün olmayan elemanların yerinde üretiminde kullanılmaktadır (Naaman, 1982). Şekil 1.9’da ardçekme tekniğinin kullanıldığı köprü üstyapısı görülmektedir.



Şekil 1.8. Prefabrik kiriş üretim tesisi



Şekil 1.9. Ardçekme yöntemi

1.5. Malzeme

Öngerilmeli kirişlerin imalatında; beton, öngerme kablosu ve betonarme donatısı kullanılan başlıca malzemelerdir. Öngerilmeli kirişlerden istenilen performansın sağlanması için yüksek dayanımlı beton ve öngerme kablusunun birlikte kullanılması gerekmektedir.

1.5.1. Beton

Beton bilindiği üzere çimento, agrega, su ve gerekli durumlarda beton katkılarının belirli oranlarda karışımından meydana gelmektedir. Öngerilmeli beton üretiminde katkı maddelerinin kullanılması genel olarak tavsiye edilmemektedir. Kalsiyum klorür içeren katkı maddelerinin kullanımına ise izin verilmemektedir. (TS 3233, 1979). Öngerilmeli kiriş üretiminde kullanılacak olan çimento, agrega ve su özellikleri sırasıyla TS EN 197-1, TS 706 EN 12620 ve TS EN 1008 standartlarına uygun olmalıdır. Öngerilmeli elemanlarda kullanılacak olan beton için en küçük karakteristik silindirik basınç dayanımı Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Teknik Şartnamesi, AASHTO LRFD ve TS 3233 için sırasıyla 40, 28 ve 25MPa olarak verilmektedir.

1.5.2. Betonarme Donatısı

Betonarme donatısı, öngerilmeli kirişlerde genellikle kesme ve eğilme gerilmelerini karşılamak amacıyla boyuna ve beton kesiti saran etriyelerde kullanılmaktadır. Beton ile daha kuvvetli bağ kurabilen yüzey çıkıntılarına sahip nervürlü betonarme donatısı tercih edilmektedir.

1.5.3. Öngerme Kablosu

Öngerme kablosu belirli sayıdaki telin helisel olarak sarılmasıyla elde edilmektedir. Öngerilmeli beton üretiminde kullanılan öngerme kablosunun dayanımı yüksek olmalıdır. Öngerme kabloları yüksek dayanımının yanı sıra yüksek gerilmelerde elastik sınırlar içinde kalabilme, dayanım sınırına kadar yeterli süneklik gösterebilme, beton ile iyi aderans yapabilme, düşük gevşeme kapasitesi, yorulmaya ve korozyona karşı dayanım gibi özelliklere de sahip olmalıdır (Aydın, 2006; Karaesmen, 2015). KGM Teknik Şartnamesinde, öngerilmeli köprü kirişi üretiminde, öngerme kablosu olarak ASTM ve AASHTO standartlarında belirtilen düşük gevşemeli Tip 270K kablolarının tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu standartlarda belirtilen mekanik özellikler ve öngerilmeli kiriş üretiminde kullanılacak halatların özellikleri Tablo 1.1’de verilmektedir. (KGM Teknik Şartnamesi, 2013).

Tablo 1.1. Tip 270K düşük gevşemeli öngerme kablusunun mekanik özellikleri

Nominal Halat Çapı		Kesit Alanı (mm ²)	Birim Ağırlık (kg/m)	Akma Dayanımı (kgf)	Kopma Dayanımı (kgf)
mm	in				
12,70	0,5	98,71	0,775	16.530	18.370
15,24	0,6	140,00	1,102	23.460	26.070

1.6. Yükler

Öngerilmeli kirişli köprüleri oluşturan başlıca yapı elemanları öngerilmeli kirişler, tabliye, kenar ayaklar, kolonlar ve temellerdir. Bilindiği gibi köprü üstyapısı öngerilmeli kirişler ve tabliyeden oluşmaktadır. Bu kısımda köprü üstyapı elemanlarının tasarımı için kullanılacak olan yükler açıklanacaktır. Köprü üstyapısını oluşturan elemanların tasarımında sabit ve hareketli yük olmak üzere temel iki yük tipi dikkate alınmaktadır.

1.6.1. Sabit Yükler

Sabit yükler üstyapıyı oluşturan elemanların öz ağırlığından dolayı oluşan yüklerdir. Hesaplanması için yapı elemanlarının boyutlarının ve birim hacim ağırlıklarının bilinmesi yeterli olmaktadır. Bu çalışmada köprü üstyapısının tasarımında sabit yük olarak,

- a) Öngerilmeli kiriş ağırlığı
- b) Tabliye ağırlığı
- c) İlave sabit yükler
 - Kaplama ağırlığı
 - Bordür ağırlığı
 - Korkuluk ağırlığı
 - Cephe elemanı ağırlığı

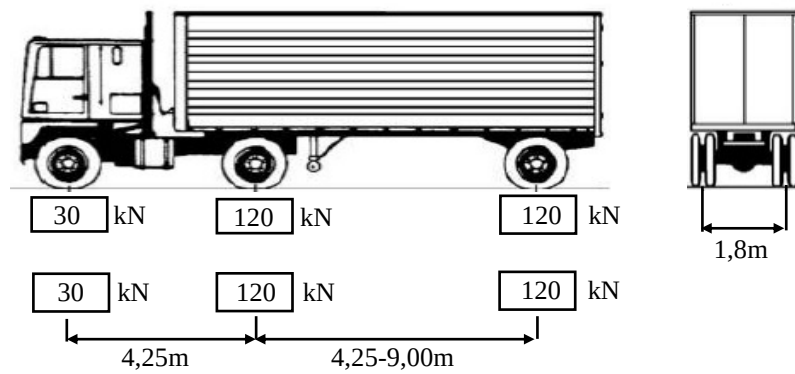
dikkate alınmaktadır.

1.6.2. Hareketli Yükler

Köprülerin en önemli görevlerinden birisi de üzerinden geçen taşıtların, köprüde oluşturduğu etkileri güvenlik sınırları içerisinde karşılamasıdır. Köprü tasarımında dikkate alınan taşıt yükleri ülkeden ülkeye değişiklik göstermekte ve her ülke kendi trafik koşullarını göz önüne alarak kendi hareketli yük modelini belirlemektedir. Ülkemizde köprü tasarımında dikkate alınacak yükleri “Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi” düzenlemektedir. Türkiye’de köprülerin tasarımında hareketli yük olarak $H_{30S_{24}}$ tasarım kamyonu kullanılmaktadır. ABD’de ise AASHTO LRFD yönetmeliğinde tanımlanan HL93 tasarım kamyonu kullanılmaktadır. Bu çalışmada hareketli araç yükü olarak $H_{30S_{24}}$ ve HL93 tasarım kamyonları dikkate alınmaktadır.

1.6.2.1. $H_{30S_{24}}$ Tasarım Kamyonu

Türkiye’de hareketli araç yükü için kullanılmakta olan $H_{30S_{24}}$ tasarım kamyonunun akslar arası mesafesi ve aks yükleri Şekil 1.10’da gösterilmektedir. Tasarım kamyonunun tanımlanmasında kullanılan H harfi iki dingilli bir kamyonu, S ise ona bağlı bir yarım treyleri temsil etmektedir. H harfinden sonra gelen sayı kamyonun iki dingilinden aktarılan yükü, S harfinden sonra gelen sayı ise yarım treylerin tek dingilinden aktarılan yükü göstermektedir.

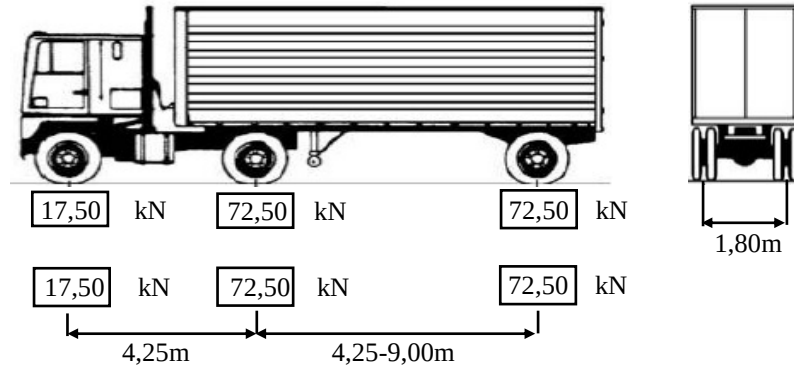


Şekil 1.10. $H_{30S_{24}}$ tasarım kamyonu

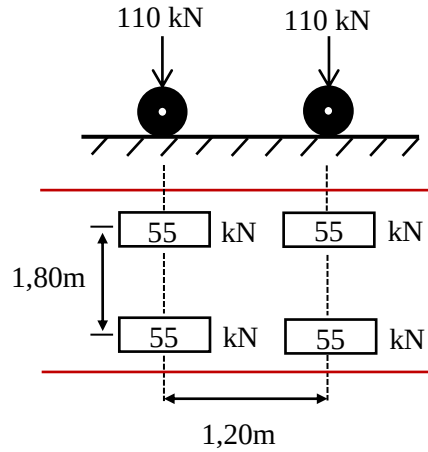
1.6.2.2. HL93 Tasarım Kamyonu

AASHTO LRFD (2012)'de hareketli araç yükü için kullanılmakta olan HL93 tasarım kamyonunun aksları arasındaki mesafe ve dingil yükleri Şekil 1.11'de görülmektedir. HL93 tasarım kamyonunun ön dingilindeki bir tekerlekten yola aktarılan yük değeri 17,50kN, orta ve arka dingildeki bir tekerlekten yola aktarılan yük değeri ise 72,50kN'dur.

AASHTO LRFD (2012)'de hareketli araç yükünün belirlenmesinde HL93 tasarım kamyonu dışında Şekil 1.12'de görülmekte olan tasarım tandemi de bulunmaktadır. Tasarım tandemi, aksları arası mesafesi 1,20m, aks yükleri 110kN ve tekerlekler arası enine mesafesi 1,80m olan aracı temsil etmektedir.



Şekil 1.11. HL93 tasarım kamyonu



Şekil 1.12. Tasarım tandemi

1.6.3. Dinamik Yük Etkisi

Köprü üzerinden geçen taşıtların köprüde oluşturduğu dinamik etkileri hesaba katmak için, kamyon yüklerinden elde edilen kesit tesirleri dinamik etki katsayısıyla çarpılmaktadır. AASHTO LRFD (2012)'de dinamik etki katsayısı, köprü açıklığından bağımsız olarak 1,33 olarak verilmektedir. Bu yük artırma katsayısı sadece kamyon yükü için kullanılmakta olup yaya yüklerine ve şerit yüklerine böyle bir artırma uygulanmamaktadır.

1.6.4. Hareketli Yük Dağılım Katsayısı

Öngerilmeli köprü kirişlerinin boyutlandırılması için en büyük kesit tesir değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için köprü tabliyesinden köprü kirişlerine aktarılan yükler belirlenmelidir. Köprüdeki sabit yüklerin kirişlere dağıtılması kolay olmakta fakat hareketli yüklerin dağılımının belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemi ve benzeri karmaşık analizlerin kullanılması gerekmektedir. Yönetmeliklerde karmaşık analizler yerine basitleştirilmiş yöntemler bulunmaktadır. Köprünün boyu doğrultusunda hareket eden taşıtların köprüde oluşturduğu yüklerin, köprünün eni doğrultusunda dağıtılması konusundaki çalışmalar çok eskilere kadar gitmektedir. AASHTO yönetmeliğinde hareketli yük dağılım katsayısı ise ilk olarak 1931 yılında kullanılmıştır (Dicleli ve Erhan, 2009). 90'lı yıllara kadar AASHTO yönetmeliğinde hareketli yük dağılım katsayısı

$$LLDF = \frac{S}{D} \quad (1.1)$$

şeklinde belirlenmekteydi. Burada S kirişler arası mesafeyi, D ise köprü tipine göre belirlenen katsayıyı göstermektedir. İlerleyen yıllarda hareketli yük dağılım katsayısı üzerine çalışmalar yapılmış ve hareketli yük dağılımının sadece kirişler arası mesafeye ve köprü tipine bağlı olmadığı anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda köprüye ait tabliye kalınlığı, köprü açıklığı ve kiriş rijitliği gibi özellikleri de kapsayan yeni bir hareketli yük dağılım katsayısı belirlenmiştir (AASHTO, 2012).

Bir şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde eğilme momenti ve kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayısı sırasıyla,

$$MLLDF_{1-L} = 0,06 + \left(\frac{S}{4300} \right)^{0,4} \left(\frac{S}{L} \right)^{0,3} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3} \right)^{0,1} \quad (1.2)$$

$$VLLDF_{1-L} = 0,36 + \left(\frac{S}{7600} \right) \quad (1.3)$$

şeklinde belirlenmektedir. İki ya da daha fazla şeridin yüklü olması durumunda iç kirişlerde eğilme momenti ve kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayısı sırasıyla,

$$MLLDF_{2-L} = 0,075 + \left(\frac{S}{2900} \right)^{0,6} \left(\frac{S}{L} \right)^{0,2} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3} \right)^{0,1} \quad (1.4)$$

$$VLLDF_{2-L} = 0,2 + \left(\frac{S}{3600} \right) - \left(\frac{S}{10700} \right)^2 \quad (1.5)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada L kiriş uzunluğu, K_g boyuna rijitlik parametresini ve t_s ise tabliye kalınlığını göstermektedir. Boyuna rijitlik parametresi,

$$K_g = n(I + Ae_g^2) \text{ ve } n = \frac{E_{kiriş}}{E_{tabliye}} \quad (1.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, $E_{kiriş}$ ve $E_{tabliye}$, sırasıyla, kirişin ve tabliyenin elastisite modülünü; I kirişin atalet momentini; e_g kirişin ağırlık merkezi ile tabliyenin ağırlık merkezi arasındaki mesafeyi ve A ise kirişin kesit alanını göstermektedir.

AASHTO LRFD (2012)'de dış kirişler için ayrı bir hareketli yük dağılım katsayısı belirlenmemiştir. İki ya da daha fazla şeridin yüklü olduğu durumda dış kirişlerde eğilme moment için hareketli yük dağılım katsayısı, iç kirişte eğilme momenti için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayısının düzeltme katsayısı (e_m) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Eğilme momenti için düzeltme katsayısı,

$$e_m = 0,77 + \frac{d_e}{2800} \quad (1.7)$$

şeklinde belirlenmektedir. İki ya da daha fazla şeridin yüklü olduğu durumda dış kirişlerde kesme kuvveti için hareketli yük dağılım katsayısı, iç kirişte kesme kuvveti için hesaplanan hareketli yük dağılım katsayısının düzeltme katsayısı (e_v) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Kesme kuvveti için düzeltme katsayısı,

$$e_v = 0,6 + \frac{d_e}{3000} \quad (1.8)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada; d_e mm cinsinden dış kirişin merkezinden bariyer duvarının dışına kadar olan mesafeyi göstermektedir.

1.7. Kiriş Enkesit Özellikleri

Öngerilmeli beton köprülerde kirişlerin enkesit özellikleri, köprünün yapım aşamalarına göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle öngerilmeli kirişlerin enkesit özelliklerinin belirlenmesi için öngerilmeli köprülerin yapım aşamalarının bilinmesi gerekmektedir. Bu kısımda öngerilmeli kirişli köprülerin yapım aşamaları hakkında genel bilgi verilmektedir. Öngerilmeli kirişli köprülerin yapım aşamaları genel olarak,

- Aktarma Dönemi
- Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönem
- Servis Dönemi

olmak üzere üç döneme ayrılmaktadır (Keyder, 2013).

1.7.1. Aktarma Dönemi

Aktarma döneminde, öngerme kabloları bir ucunda ankrajların diğer ucunda pistonların bulunduğu kalıplara yerleştirilerek gerilmektedir. Bu işlemin ardından kalıplara beton döküm işlemi tamamlanmakta ve daha sonra betonun kür işlemi yapılmaktadır. Betonun yeterli dayanıma ulaştığı belirlendikten sonra pistonlara bağlı bulunan öngerme kabloları yavaşça bırakılarak öngerilme kuvvetinin betona aktarılması sağlanmaktadır. Bu

dönemde maruz kalınan yükler sadece öngerilmeli beton kirişin kendi ağırlığı ve öngerilme kuvvetidir. Söz konusu yükler prefabrik kesit tarafından taşınmaktadır. Öngerilme kayıpları bu dönemde en düşük seviyede olup, zamana bağlı öngerilme kayıpları henüz oluşmamıştır. Genel olarak kiriş üretimini hızlandırmak için öngerilme kuvveti, betona 28 günden çok daha erken bir zamanda aktarıldığından dolayı henüz nihai dayanımına ulaşmamış olan betonda, betonun elastik kısalmasından kaynaklanan öngerilme kaybı oluşmaktadır.

1.7.2. Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönem

Prefabrik kirişlerin şantiyede yerlerine yerleştirildiği, üzerlerine tabliye betonunun döküldüğü fakat tabliye betonunun henüz prizini tamamlamadığı dönemdir. Bu dönemde öngerilmeli kirişler aktarma dönemindeki yüklere ek olarak tabliye betonunun ağırlığını da taşımaktadır. Bu dönemde de yükler aktarma döneminde olduğu gibi prefabrik kesit ile taşınmaktadır. Betonun elastik kısalmasından dolayı oluşan kayıplara, öngerme kablosunun gevşemesi, betonun sünmesi ve rötresinden meydana gelen uzun dönem kayıplarda eklenmektedir.

1.7.3. Servis Dönemi

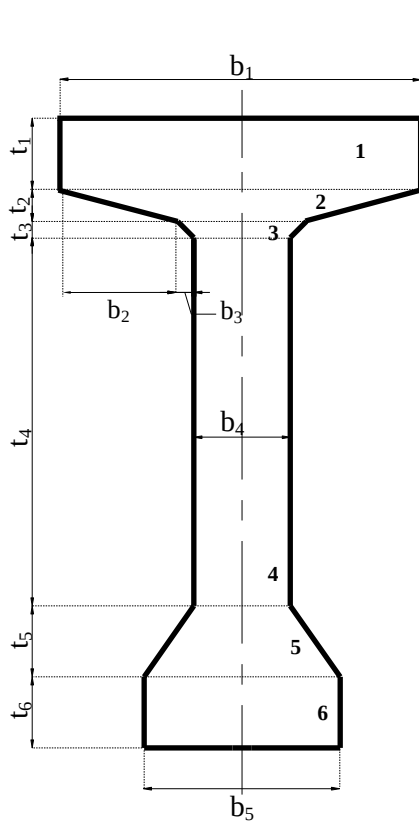
Servis dönemi, proje aşamasında köprünün maruz kalacağı düşünülen tüm yüklerin taşındığı dönemdir. Servis döneminde prizini tamamlayan tabliye betonunun bir kısmı prefabrik kirişle birlikte çalışarak kompozit kiriş enkesitini oluşturmaktadır. Bu dönemde öngerilme kayıplarının en yüksek düzeye ulaştığı ve bu dönemde maruz kalınan yüklerin kompozit kiriş tarafından taşındığı kabul edilmektedir.

1.7.4. Prefabrik ve Kompozit Kiriş Enkesiti

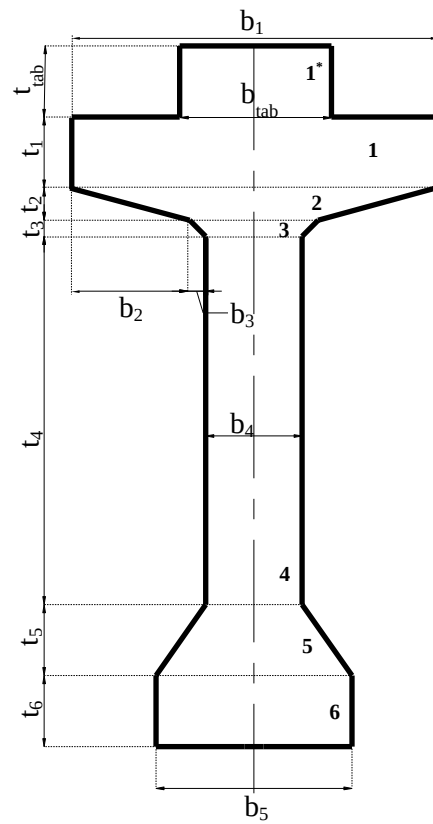
Prefabrik kiriş, aktarma ve tabliye betonunun prizini tamamlamadan önceki dönemlerde maruz kalınan yükleri taşıyan yapı elemanıdır. Şekil 1.13'te öngerilmeli prefabrik kirişin enkesiti görülmektedir.

Öngerilmeli kirişli beton köprülerin tabliyesi genellikle yerinde döküm olarak yapılmaktadır. Tabliye betonu prizini tamamladıktan sonra tabliye betonunun belirli bir kısmı prefabrik kiriş ile beraber çalışarak kompozit kiriş enkesitini oluşturmaktadır. Şekil 1.14 'de görülen kompozit kiriş, servis dönemindeki yükleri taşıyan yapı elemanıdır.

Tabliye, köprü enkesiti boyunca sürekli olduğundan tek bir prefabrik kiriş ile kompozit yapı oluşturan tabliye kısmı, tabliye efektif genişliği olarak ifade edilmektedir. AASHTO LRFD (2012)'de kompozit kirişler için efektif tabliye genişliği kirişler arası mesafenin yarısı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1.13. Prefabrik kiriş enkesiti



Şekil 1.14. Kompozit kiriş enkesiti

Kompozit kesitler farklı malzeme özelliklerine sahip olduğundan, hesaplarda bu kesitlerden biri diğerinin malzeme özelliklerine dönüştürülmektedir. Bu çalışmada prefabrik kiriş ve tabliyeden oluşan kompozit kiriş kesiti için tabliye betonunun özellikleri prefabrik kirişin özelliklerine dönüştürülmüştür. Bu dönüştürme, prefabrik kiriş ile tabliyenin birleşim bölgesinde oluşan birim uzamaların aynı olacağı kabulüne göre elastik modüler oranı kullanılarak yapılmıştır. Dönüştürülmüş efektif tabliye genişliği,

$$b_{tab} = \frac{S}{2} \times \frac{E_{tabliye}}{E_{kiriş}} \quad (1.9)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada b_{tab} dönüştürülmüş efektif tabliye genişliğini göstermektedir.

1.8. Öngerilmeli Beton Kirişte Oluşan Kesit Kuvvetleri

Öngerilmeli beton bir kirişte kesit kuvvetlerini meydana getiren yük etkileri genel olarak sabit (G), hareketli (Q) ve öngerilme (P) yükleri olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır. Öngerilmeli beton kirişlerin kesit kuvvetlerinin hesabında yapılan varsayımlara aşağıda kısaca değinilmektedir.

- Öngerilmeli beton elemanların, eğilme ve bileşik eğilme etkileri altında çatlamamış kesit olarak davrandıkları varsayılmaktadır.
- Şekil değiştirmeden önce düzlem ve çubuk eksenine dik olan kesitler, şekil değiştirdikten sonra da düzlem ve çubuk eksenine dik kalırlar. Her durumda kesitteki şekil değiştirmelerin kesit derinliği boyunca yayılışı, tarafsız eksenenden uzaklığı ile orantılıdır; yani “Bernoulli-Navier hipotezi” geçerlidir.
- İşletme limitine göre hesaplarda gerek beton, gerek çelik lineer elastik davranır; yani “Hooke kanunu” geçerlidir.

1.8.1. Öngerilmeli Kirişli Köprülerde Gerilme Hesabı

Öngerilmeli beton köprülerin yapım aşamalarını oluşturan aktarma, tabliye prizini tamamlamadan önceki dönem ve servis dönemlerinin her birinde öngerilmeli kirişlerin malzeme özellikleri, kesit ölçüleri, maruz kaldığı yükler ve meydana gelen öngerilme kayıpları değiştiği için, her aşamada öngerilmeli kirişlerde oluşan gerilmeler birbirinden farklı olmaktadır. Bu çalışmada, öngerilmeli kirişlerde oluşacak olan gerilmelerinin hesabı yukarıda bahsedilen üç dönem için ayrı ayrı yapılmaktadır.

1.8.1.1. Aktarma Dönemi Gerilme Hesabı

Aktarma döneminde prefabrik kiriş sadece kendi ağırlığı ve öngerilme kuvvetine maruz kalmaktadır. Bu dönemde öngerilme kayıpları en az seviyede olup, zamana bağlı öngerilme kayıpları henüz oluşmamakta ve sadece betonun elastik kısalmasının neden olduğu kayıp oluşmaktadır. Bu koşullar dikkate alındığında aktarma döneminde kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{1_üst} = \frac{P \times n \times (1 - \xi_1)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times n \times (1 - \xi_1) \times e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{üst} + \frac{M_{g1}}{I_{prefabrik}} \times y_{üst} \quad (1.10)$$

$$\sigma_{1_alt} = \frac{P \times n \times (1 - \xi_1)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times n \times (1 - \xi_1) \times e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} + \frac{M_{g1}}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} \quad (1.11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada ξ_1 betonun elastik kısalmasından meydana gelen kayıp oranını, n kirişte bulunan öngerme kablosu sayısını, e_i öngerme kablolarının eksantrisitesini, P bir tane öngerme kablosu için germe aşamasında izin verilen öngerilme kuvvetini göstermektedir. $A_{prefabrik}$, $I_{prefabrik}$, $y_{üst}$ ve y_{alt} sırasıyla prefabrik kirişin kesit alanını, atalet momentini, ağırlık merkezinden kirişin en üst ve en alt liflerine olan mesafeleri; M_{g1} ise kirişin kendi ağırlığının etkisi altında meydana gelen eğilme momentini göstermektedir.

1.8.1.2. Tabliye Betonunu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönemin Gerilme Hesabı

Prefabrik kirişlerin yerlerine yerleştirildiği ve tabliye betonunun dökümünün henüz tamamlandığı dönemdir. Bu dönemde öngerilmeli kirişler; kendi ağırlığını, öngerilme kuvvetini ve tabliye betonunun ağırlığını taşımaktadır. Tabliye betonu prizini tamamlamadığı için yüklerin, aktarma döneminde olduğu gibi prefabrik kesit ile taşındığı kabul edilmektedir. Betonun elastik kısalmasının neden olduğu kayıplara, öngerme kablusunun gevşemesi, betonun sünmesi ve rötresinden meydana gelen uzun dönem kayıplar da eklenmektedir. Bu koşullar dikkate alındığında tabliye betonu prizini

tamamlamadan önceki dönemde kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{2_üst} = \frac{P \times n \times (1 - \xi_T)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times n \times (1 - \xi_T) \times e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{üst} + \frac{M_{g1} + M_{g2}}{I_{prefabrik}} \times y_{üst} \quad (1.12)$$

$$\sigma_{2_alt} = \frac{P \times n \times (1 - \xi_T)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times n \times (1 - \xi_T) \times e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} + \frac{M_{g1} + M_{g2}}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} \quad (1.13)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada ξ_T toplam öngerilme kayıp oranını ve M_{g2} ise tabliyenin ağırlığından dolayı meydana gelen eğilme momentini göstermektedir.

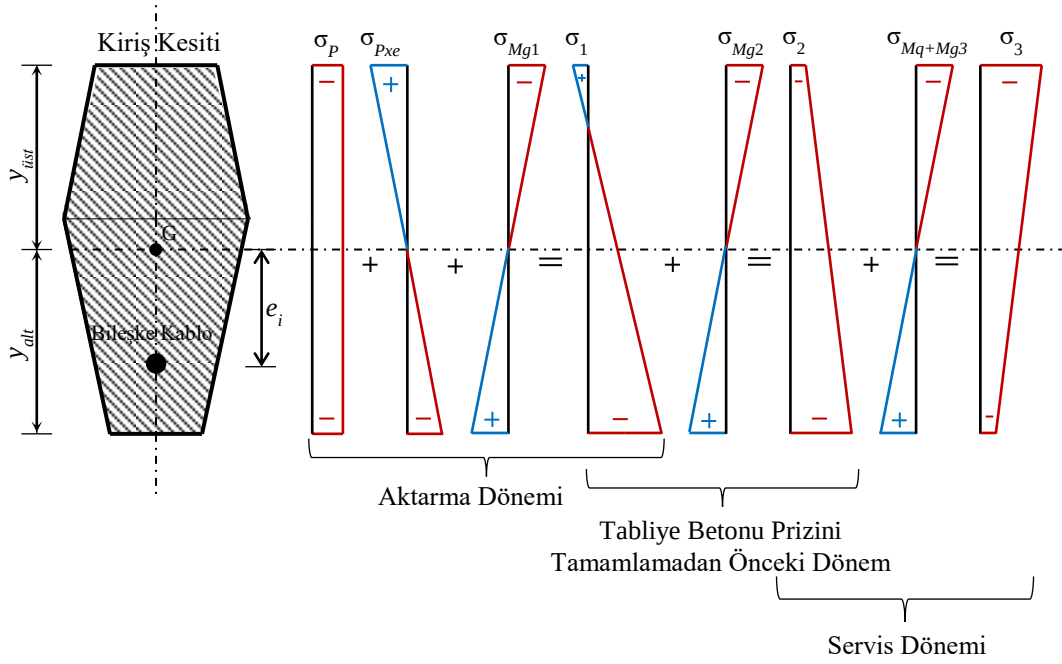
1.8.1.3. Servis Dönemi Gerilme Hesabı

Servis döneminde prizini tamamlayan tabliye betonunun bir kısmı prefabrik kirişle birlikte çalışarak kompozit kirişi oluşturmaktadır. Bundan dolayı servis döneminde köprünün maruz kalacağı yükler kompozit kiriş tarafından taşınmaktadır. Bu dönemde öngerilme kayıpları en yüksek seviyede olmaktadır. Bu koşullar dikkate alındığında servis döneminde kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen gerilmeler sırasıyla,

$$\sigma_{3_üst} = \sigma_{2_üst} + \frac{M_{g3} + M_q}{I_{kompozit}} \times y_{üst_kompozit} \quad (1.14)$$

$$\sigma_{3_alt} = \sigma_{2_alt} + \frac{M_{g3} + M_q}{I_{kompozit}} \times y_{alt_kompozit} \quad (1.15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $I_{kompozit}$, $y_{üst_kompozit}$, $y_{alt_kompozit}$, M_q ve M_{g3} sırasıyla, kompozit kirişin atalet momentini, ağırlık merkezinin kirişin en üst ve en alt liflerine olan mesafelerini, kirişte hareketli yükten ve ilave kalıcı yüklerden dolayı meydana gelen eğilme momentlerini göstermektedir. Öngerilmeli kirişte aktarma, tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde ve servis döneminde, kiriş kesitinin üst ve alt liflerinde oluşan gerilmeler Şekil 1.15'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Öngerilmeli kiriş kesitinde dönemlere bağlı olarak gerilmelerin dağılımı

1.8.2. Beton Emniyet Gerilmesi

Öngerilmeli kirişli köprülerin yapım aşamalarını oluşturan üç dönem için kesitin alt ve üst liflerinde oluşan gerilmeler, beton için belirlenmiş olan emniyet gerilme sınırları içinde kalmalıdır. Bu çalışmada aktarma ve servis dönemleri için betonun emniyet gerilme sınırları AASHTO LRFD (2012)'den alınmıştır.

1.8.2.1. Aktarma Dönemi Beton Emniyet Gerilmesi

Öngerilmeli elemanlardan beklenen performansı elde etmek için yüksek dayanımlı beton kullanılmaktadır. Öngerilmeli elemanlarda kullanılan beton için en düşük karakteristik basınç dayanımı, yönetmeliklere göre değişiklik göstermekte olup bu çalışmada 28MPa olarak dikkate alınmaktadır (AASHTO LRFD, 2012). Aktarma anında beton basınç emniyet gerilmesi,

$$\sigma_{ci} = 0.60 f_{ci} \quad (1.16)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada f_{ci} i günlük betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir.

Aktarma anında, Şekil 1.15'te görüldüğü gibi kesitin üst lifinde çekme gerilmesi meydana gelebilmektedir. Beton için çekme emniyet gerilmesi kesitte aderans donatısının kullanıp kullanılmamasına göre değişiklik göstermektedir. Aderans donatısı kullanılmayan kesitte beton çekme emniyet gerilmesi ve aderans donatısı kullanılan kesitler için ise sırasıyla

$$\sigma_{ti} = 0,25\sqrt{f_{ci}} \quad (1.17)$$

$$\sigma_{ti} = 0,63\sqrt{f_{ci}} \quad (1.18)$$

şeklinde belirlenmektedir.

1.8.2.2. Servis Döneminde Beton Emniyet Gerilmesi

Servis döneminde, öngerilmeli elamanlar sabit yüklerin ve hareketli yüklerin tamamına maruz kalmaktadır. Bu dönemde, öngerilmeli elemanları için beton basınç emniyet gerilmesi,

$$\sigma_{cs} = 0,45 f_c \quad (1.19)$$

şeklinde belirlenmektedir. Servis döneminde öngerilmeli elemanlarda beton çekme emniyet gerilmesi öngerme kablosu ve betonarme çeliğinin korozyon durumuna göre değişiklik göstermektedir. Korozyon durumu kötü olan elemanlarda çekme emniyet gerilmesi (1.20), korozyon durumu kötü olmayan elemanlarda ise (1.21) bağıntısı ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{ts} = 0,25\sqrt{f_c} \quad (1.20)$$

$$\sigma_{ts} = 0,50\sqrt{f_c} \quad (1.21)$$

1.8.3. Öngerme Kablosunun Emniyet Gerilmesi

Öngerme kablosu genel olarak düşük gevşemeli ve gerilmesi azaltılmış olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. AASHTO LRFD (2012)'de gerilmesi azaltılmış öngerme kablolarının özel durumlar dışında kullanılması tavsiye edilmemektedir. Düşük gevşemeli kablolar için emniyet gerilmesi aktarma dönemi için $0,75f_{pu}$, servis döneminde ise $0,80f_{py}$ olarak verilmektedir. Burada f_{pu} öngerme kablosunun karakteristik kopma dayanımını ve f_{py} ise akma dayanımını göstermektedir.

1.9. Öngerilme Kayıpları

Öngerilme kuvveti; sabit, hareketli ve diğer servis yükleri etkisindeki öngerilmeli elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin azaltılması ya da tamamen ortadan kaldırılması için kullanılmaktadır. Öngerilme kuvvetinde ani ya da zamana bağlı kayıplar meydana gelmektedir ve bu kayıplara; ankraj oturması, sürtünme kaybı, betonun elastik kısalması, rötresi, sünmesi ve öngerme kablosunun gevşemesi neden olmaktadır. Öngerilme kayıpları; malzeme özellikleri, kiriş boyutları, yükleme durumu, çevre koşulları ve öngerilme kuvveti gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Garber vd., 2013).

Tasarım aşamasında, servis yüklerine maruz elemandaki gerilmelerin betonun emniyet gerilmesini aşıp aşmadığını kontrol etmek için, öngerilme kayıplarının doğru hesaplanması oldukça önemli olmaktadır. Öngerilme kaybının, tasarım aşamasında gerçek kayıptan az olarak hesaplanması kirişte yetersiz öngerme kablosu kullanılmasına sebep olmakta ve kirişte istenmeyen çatlaklarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Aksi durumda yani öngerilme kaybının gerçekten fazla olarak hesaplanması, kiriş kesitlerinin büyümesine ve buna bağlı olarak maliyetlerin artmasına sebep olmaktadır (Garber vd., 2013). Bu kısımda öngerilme kayıplarının AASHTO LRFD (2012)'ye göre hesabı verilmektedir. Bu hesaplar karakteristik basınç dayanımı 100MPa'a kadar olan beton sınıfları için geçerli olmaktadır (Tadros vd., 2003).

Önçekim ve ardçekim öngerilmeli elemanların yapım aşamaları birbirinden farklı olduğu için bu elemanlarda meydana gelen kayıplar da birbirinden farklı olmaktadır. Önçekim elemanlarda meydana gelen kayıplara; betonun elastik kısalması, sünmesi, rötresi ve çeliğin gevşemesi neden olurken, ardçekim öngerilmeli elemanlarda; önçekim elemanlarda kayıplara neden olan durumlara ek olarak ankraj oturması ve sürtünme kaybı

da eklenmektedir. Öngerilmeli beton elemanlarda meydana gelen toplam gerilme kaybı, öñçekim ve ardçekim elemanlar için sırasıyla (1.22) ve (1.23) bağıntıları yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} \quad (1.22)$$

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} \quad (1.23)$$

Burada Δf_{pT} toplam gerilme kaybını, Δf_{pF} sürtünmeden, Δf_{pA} ankraj oturmasından, Δf_{pES} betonun elastik kısılmasından, Δf_{pLT} betonun sünmesi, rötresi ve çeliğin gevşemesinden kaynaklanan kayıpların toplamını göstermektedir.

Öngerilme kayıpları, genel olarak ani ya da kısa dönem kayıplar ve zamana bağılı ya da uzun dönem kayıplar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Keyder, 2013). Bu çalışma kapsamında öñçekim öngerilmeli elemanlarda meydana gelen kayıplar açıklanmaktadır.

1.9.1. Kısa Dönem Kayıplar

Öñçekim öngerilmeli elemanlarda kısa dönem kayıp, aktarma döneminde öngerilme kuvvetinin betona aktarılması sırasında meydana gelmektedir. Aktarma döneminde nihai dayanımına ulaşmamış olan betonda, aktarma işleminin başlamasıyla oluşan basınç kuvveti ile elastik kısılma meydana gelmekte bu durumda öngerme kablosunda gerilme kaybına neden olmaktadır. Betonun elastik kısılmasından meydana gelen kaybın hesaplanması için iki farklı bağıntı bulunmaktadır. Bunlar,

$$\Delta f_{pES} = \frac{A_{ps} f_{pbt} \left(I_{prefabrik} + e_m^2 A_{prefabrik} \right) - e_m M_{g1} A_{prefabrik}}{A_{ps} \left(I_{prefabrik} + e_m^2 A_{prefabrik} \right) + \frac{A_{prefabrik} I_{prefabrik} E_{ci}}{E_p}} \quad (1.24)$$

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \quad (1.25)$$

şeklindedir. Burada A_{ps} öngerme çeliğinin alanını, E_{ci} ve E_p sırasıyla transfer anındaki betonun ve öngerme kablosunun elastisite modülünü, e_m açıklık ortasındaki öngerme kablosunun eksantrisitesini, f_{pbt} transferden önce öngerme kablosundaki gerilmeyi ve f_{cgp} ise aktarmadan hemen sonra öngerilme kuvveti nedeniyle öngerme kablolarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesini göstermekte ve (1.26) bağıntısı ile belirlenmektedir.

$$f_{cgp} = \frac{P}{A_{prefabrik}} + \frac{P \cdot e_m^2}{I_{prefabrik}} - \frac{M_{g1} \cdot e_m}{I_{prefabrik}} \quad (1.26)$$

1.9.2. Uzun Dönem Kayıplar

Öngerilmeli beton elemanlarda, betonun sünmesi, rötresi ve öngerme kablosunun gevşemesinin sebep olduğu kayıplar uzun dönem veya zamana bağlı kayıplar olarak ifade edilmektedir. Betonda sünme sabit yük altında, rötre ise yük etkisi olmadan yaş betonun su kaybından dolayı meydana gelen deformasyonu ifade etmektedir. Betonun sünmesi ve rötresinden kaynaklanan öngerilme kaybı öngerilmeli elemanların servis ömrü boyunca devam etmektedir. Uzun dönem kayıpların önemli bir kısmı öngerilmeli elemanın servis ömrünün erken zamanlarında tamamlanmaktadır. Betonun sünmesi ve rötresinden meydana gelen kayıpların %70'lik kısmı tabliye yerleştirilmeden önce, %90'lık kısmı ise bir senenin sonunda oluşmaktadır (Garber vd., 2013). Öngerme kablosu, öngerilme kuvvetine maruz kaldığında, kablonun boyunda uzama meydana gelmekte ve bu durum öngerilme kuvvetinde azalmalara sebep olmaktadır. Öngerme kablosunun gevşemesinin sebep olduğu kayıp ise (Δf_{pR}); düşük gevşemeli çelikler için 17MPa, normal gevşemeli çelikler için 70MPa olarak dikkate alınmaktadır. Öngerilmeli elemanlarda oluşan toplam uzun dönem kayıp,

$$\Delta f_{pLT} = 10 \frac{f_{pbt} A_{ps}}{A} \gamma_h \gamma_{st} + 83 \gamma_h \gamma_{st} + \Delta f_{pR} \quad (1.27)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada γ_h ve γ_{st} ise sırasıyla, ortamdaki bağıl nem ve öngerilme kuvvetinin beton elemana aktarılma anındaki beton dayanımı için düzeltme faktörlerini göstermektedir. Ortamdaki bağıl nem için düzeltme faktörü,

$$\gamma_h = 1,7 - 0,01H \quad (1.28)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada H bağıl nem oranını göstermektedir. Öngerilme kuvvetinin beton elemana aktarılma anındaki beton dayanımı için düzeltme faktörü (1.29) bağıntısı ile belirlenmektedir.

$$\gamma_{st} = \frac{35}{(7 + f_{ci})} \quad (1.29)$$

1.10. Öngerme Kablo Sayısının Belirlenmesi

Öngerilme kuvveti gereksinimi en fazla servis döneminde kirişin ortasındaki kesitin en alt lifinde oluşmaktadır. Bu nedenle öngerilmeli kiriş için öngerme kablosu miktarı belirlenmesinde servis döneminde kirişin alt lifinde meydana gelen gerilmeler dikkate alınmaktadır. Kirişe yerleştirilecek olan öngerme kablo sayısı, kiriş kesitinde meydana gelen çekme gerilmesine, kablo çapına, kablo tipine, kablolar arası mesafeye, pas payına, kiriş kesitine, öngerilmeli kirişin beton sınıfına, betonarme çeliğinin korozyon durumuna ve öngerilme kayıplarına bağlı olarak değişmektedir. Kirişe yerleştirilecek olan öngerme kablolarının kirişin alt lifinde meydana getireceği gerilme

$$\sigma_{kapasite} = \frac{P \times n \times (1 - \xi_T)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times n \times (1 - \xi_T) \times e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} \quad (1.30)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada n yalnız bırakılacak olursa kirişte kullanılacak toplam öngerme kablosu sayısı

$$n = \frac{\sigma_{gerekten}}{P \times (1 - \xi_T) \times \left(\frac{1}{A_{prefabrik}} + \frac{e_i}{I_{prefabrik}} \times y_{alt} \right)} \quad (1.31)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada $\sigma_{gerekten}$ betonun çekme gerilmesi alıp almamasına göre değişiklik gösteren, kirişe verilmesi gereken basınç gerilmesini göstermektedir. Bu değer, kirişte çekme gerilmesinin oluşması istenmediği durumlarda, kirişin alt lifinde

servis döneminde oluşan en büyük gerilme değerine eşit olmaktadır. Kirişlerde öngerme kablo sayısını azaltmak ve kiriş kesitinde ekonomi sağlamak istendiği zaman kirişte yönetmeliklerde izin verilen kadar çekme gerilmesinin oluşmasına izin verilmektedir. Bu durumlarda kirişi oluşturan beton, yönetmeliklerde belirlenen çekme gerilmesi sınırına kadar zorlanmaktadır. Eğer öngerilmeli kiriş kesitinde çekme gerilmesi oluşması öngörülmüş ise, betonun çekme emniyet gerilmesi, servis döneminde oluşan en büyük çekme gerilmesi değerinden çıkarılarak gerekli olan gerilme değeri belirlenmektedir.

1.11. Bağ Mekanizması

Öngerme metodunda öngerilme kuvvetinin betona aktarılması öngerme kablosu ve beton arasındaki bağ yardımıyla sağlanmaktadır. Bu bağ adezyon, Hoyer etkisi ve mekanik kenetlenme olarak adlandırılan üç temel mekanizma oluşturmaktadır. (Gross ve Burns, 1995).

1.11.1. Adezyon

Beton ile öngerme kablosu yüzeyindeki mikroskobik pürüzler arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal bağ ya da öngerme kabloları ile bu kabloları çevreleyen beton arasında fiziko-kimyasal etkileşim ile meydana gelen yapışma tabakası olarak tanımlanmaktadır. Bu bağ mekanizması küçük gerilmelerde dahi etkisini kaybettiğinden genelde ihmal edilmektedir (Polat, 2016; Caro vd., 2013).

1.11.2. Hoyer Etkisi

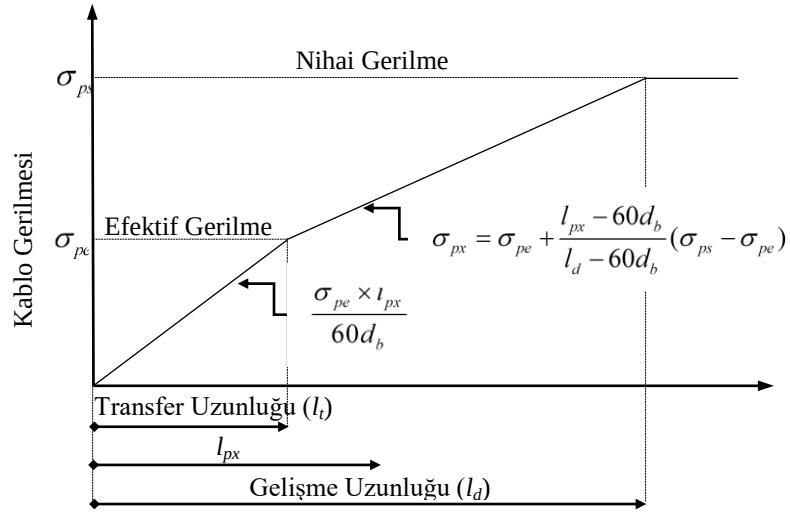
Aktarma döneminde beton dökülmeden önce gerilen öngerme kablolarının çapında gerilmemiş durumuna göre azalma meydana gelmektedir. Beton dökümü tamamlandı beton yeteri dayanıma ulaştığında öngerme kablolarındaki gerilme serbest bırakılarak gerilmenin betona aktarılması sağlanmaktadır. Bu sırada serbest bırakılan öngerme kablosunun betonla çevrili olmayan uç kısımları orijinal çapına dönerken öngerme kablosunun beton içinde kalan kısmında bu durum gerçekleşmemektedir. En son aşamada Şekil 1.16'da görülen formu alan öngerme kablosu kesiti kamalama etkisinin oluşmasını

kablosunun çapının 60 katı olarak alınmaktadır (AASHTO LRFD, 2012). Elemanın ucundan nihai gerilme değerine ulaşmış kesit arasındaki mesafe ise gelişme uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. Öngerme kablosunun uçlarından gelişme uzunluğunun sonuna kadar öngerme kablosundaki gerilme değeri artış göstermektedir.

Gelişme uzunluğu teorik olarak,

$$l_d \geq \kappa (0,15\sigma_{ps} - 0,097\sigma_{pe}) d_b \quad (1.32)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada d_b öngerme kablo çapını, σ_{ps} ve σ_{pe} sırasıyla kopma ve efektif gerilme değerlerini göstermektedir. κ değeri eleman derinliğine göre değişen bir katsayı olup eleman derinliği 60cm'ye eşit ya da daha küçük olduğu zaman 1,0, büyük olduğu durumlarda 1,6, kılıflanmış kablolarda ise 2,0 olarak alınmaktadır.



Şekil 1.17. İdealleştirilmiş gerilme uzunluk ilişkisi

1.12. Kılıflanma

Öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde, öngerme kablolarından aktarılan kuvvetlerden dolayı istenmeyen gerilmeler oluşabilmekte ve bu gerilmeler kirişin mesnet bölgesindeki betonun çatlamasına neden olmaktadır. Öngerilmeli kirişlerde oluşan bazı çatlaklar kabul edilebilir seviyelerde olup kapatılabilmektedir. Fakat çatlak genişliği arttıkça durabilite açısından kabul edilemez seviyelere ulaşmaktadır. Özellikle öngerme kablolarının etrafında oluşan çatlaklar öngerme kablolarının paslanmasına neden

olmaktadır. Kiriş mesnet bölgelerinde meydana gelen fazla gerilmeleri izin verilen seviyelere getirebilmek için yeterli sayıdaki öngerme kablosunun belirli mesafe boyunca kılıflanması tavsiye edilmektedir. Kılıflanma sayesinde beton ile donatı arasındaki bağ mekanizmasının oluşması engellenerek kılıflanmanın yapıldığı mesafe boyunca betona öngerilme kuvvetinin aktarılmasını sağlanmaktadır. Kılıflanma işleminde genel olarak yumuşak ve sert plastikten üretilmiş iki kılıf tipi kullanılmaktadır (Şekil 1.18).



(a) Yumuşak Plastik



(b) Sert Plastik

Şekil 1.18. Kılıf boru tipleri (Burgueno ve Sun, 2011)

Yumuşak plastikten üretilmiş olan kılıf betonun sertleşme aşamasında sert plastikten üretilen kılıfa oranla daha fazla deforme olmaktadır. Bundan dolayı yumuşak plastikten üretilmiş olan kılıf kullanıldığında beton ile öngerme kablosu arasındaki bağ mekanizmalarından mekanik kenetlenmenin oluşması tamamen engellenememektedir. Bu yüzden kılıflanma işleminin sert plastikten üretilmiş olan kılıf ile yapılması tavsiye edilmektedir (Burgueno ve Sun, 2011).

Kılıflanacak olan kabloların sayısı ve konumu ile ilgili AASHTO LRFD (2012)'de uyulması gereken kurallar aşağıdaki gibidir.

- Kılıflanacak kablo sayısı kirişte bulunan toplam kablo sayısının %25'inden fazla olamaz.
- Herhangi bir yatay sırada kılıflanacak olan kablo sayısı o sırada bulunan kablo sayısının %40'ı ya da 4 tane öngerme kablosundan büyük olanı kadar olacaktır.
- Kılıflanacak olan kablolar kiriş kesitinin simetri ekseninin her iki tarafında eşit sayıda ve boyda olacak şekilde yerleştirilmelidir.
- Yatay sıraların en dışında bulunan kablolarda kılıflanma yapılmamalıdır.

1.12.1. Kılıf Boyunun Tespiti

Öngerilmeli kirişte kullanılacak olan kılıfların boyları belirlenirken öngerilmenin en çok risk teşkil ettiği aktarma dönemindeki gerilmeler kontrol edilmektedir. Aktarma döneminde kirişin alt ve üst liflerinde oluşan gerilemeler aktarma dönemi için belirlenmiş olan emniyet gerilme değerlerini aşmamalıdır. Aktarma döneminde emniyet gerilemeleri genel olarak kiriş mesnet bölgesinde aşılmaktadır. Kirişin mesnet bölgesinde kılıflanma işlemi yapılarak oluşan gerilme değerleri emniyet gerilmelerine kadar düşürülmesi sağlanmaktadır. Kullanılacak olan kılıfların boyları en az, öngerilme kuvvetinden dolayı oluşan gerilmenin, kirişin kendi ağırlığında dolayı oluşan gerilmeyle emniyet gerilmesi seviyesine indirileceği mesafe kadar olmalıdır.

1.12.2. Kılıflanacak Öngerme Kablo Sayısının Tespiti

Kılıflanacak öngerme kablo sayısının tespiti, aktarma aşaması tamamlandıktan sonra mesnet bölgesindeki kiriş kesitinin üst ve alt lifindeki gerilmeler dikkate alınarak yapılmaktadır. Emniyet gerilmesi değerini karşılayacak olan kablo sayısı kirişte mevcut olan kablo sayısından çıkarılarak kılıflanacak olan kablo sayısı (1.33) ile belirlenmektedir.

$$n_{kılıflanacak} = n - \frac{\sigma_{izin\ verilen\ çekme}}{\frac{P \times (1 - \xi_1)}{A_{prefabrik}} + \frac{P \times (1 - \xi_1) \times e}{I_{prefabrik}}} \times y_{g-üst} \quad (1.33)$$

1.13. Kompozit Kirişin Eğilme Taşıma Gücü Hesabı

Eğilme taşıma gücü denetimi, prefabrik kiriş ile tabliye betonunun belirli bir kısmının birlikte çalışmasıyla oluşan kompozit kiriş kesiti için gerçekleştirilmektedir. Kompozit kirişin eğilme taşıma gücü bakımından yeterli olması için eğilmeye maruz elemanlarda hesaplanan katsayılı taşıma gücü momentinin (M_r), Dayanım 1 elverişsiz yükleme durumu altında elde edilen katsayılı eğilme momentinden büyük olması gerekmektedir. Dayanım 1 elverişsiz yükleme durumu altında elde edilen katsayılı eğilme momenti

$$M_u = 1,25M_{DC} + 1,5M_{DW} + 1,75(M_{LL} + M_{IM}) \quad (1.34)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada M_{DC} yapısal ve yapısal olmayan elemanların sabit yüklerinden, M_{DW} aşınma tabakası ve hizmet hatlarının sabit yüklerinden, M_{LL} hareketli taşıt yükünden ve M_{IM} ise dinamik yük etkisinden meydana gelen eğilme momentini göstermektedir. Eğilme etkisindeki bir kirişte, betonun birim kısalması en büyük birim kısalmaya ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$) ulaştığı anda kesitteki şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kuvvetlerin durumu Şekil 1.19'da görülmektedir. Şekilde, kirişin basınç bölgesinde betona uygulanan gerçek basınç gerilmesi yerine, aynı bileşke kuvveti ve aynı etkiye noktasını veren eşdeğer basınç bloğu dikkate alınmıştır. Eşdeğer basınç bloğu derinliği (a), tarafsız eksenenden basınç yüzüne olan mesafenin (c) beton basınç dayanımına bağlı olan gerilme bloğu katsayısı (β_1) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Gerilme bloğu katsayısı, beton basınç dayanımının 28MPa'dan küçük olduğu durumlarda 0,85 olarak, 28MPa'dan büyük olduğu durumlarda ise basınç dayanımındaki her 7MPa artış için 0,05 azaltılarak dikkate alınmaktadır. Fakat gerilme bloğu katsayısı hiçbir zaman 0,65'ten küçük olamaz. Şekil 1.19'da kesite etki eden kuvvetlerin denge denklemi

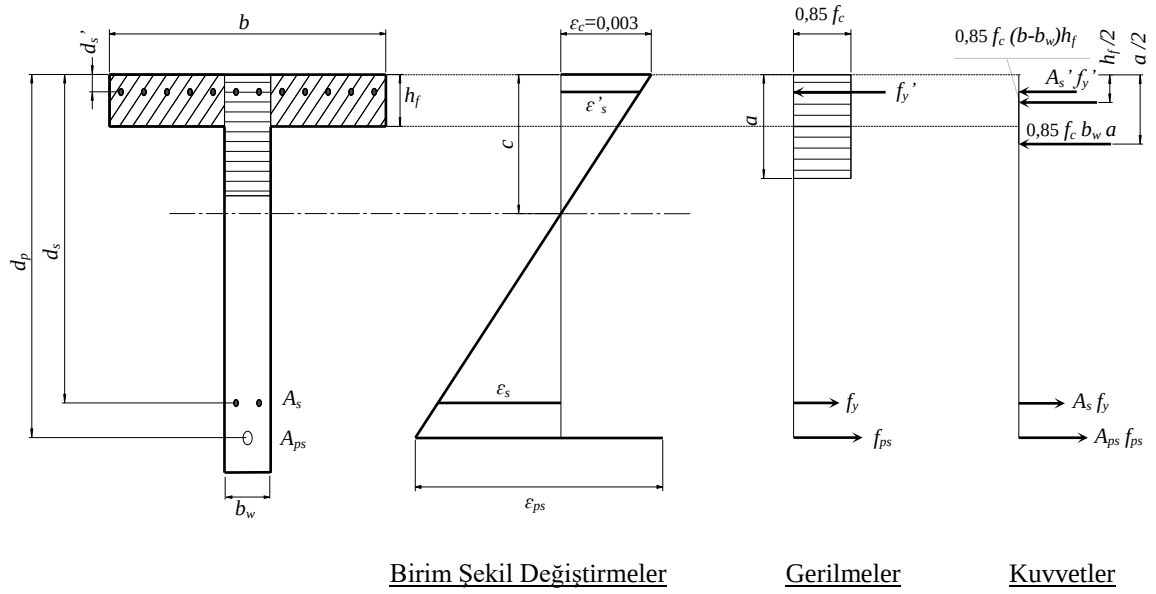
$$A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y' = 0,85 f_c b_w \beta_1 c + 0,85 f_c (b - b_w) \beta_1 h_f \quad (1.35)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada f_{ps} öngerme kablosundaki ortalama gerilmeyi, A_s çekme donatısının alanını, f_y çekme donatısının akma gerilmesini, A_s' basınç donatısının alanını, f_y' basınç donatısının akma gerilmesini, b_w kesitin gövde genişliğini ve h_f ise basınç tablasının yüksekliğini göstermektedir.

Öngerme kablosundaki ortalama gerilme

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - k \frac{c}{d_p} \right) \quad (1.36)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada f_{pu} öngerme kablosunun çekme gerilmesini, k öngerme kablo sınıfına bağlı bir sabiti ve d_p ise en dış basınç lifinden öngerme kablolarının ağırlık merkezine olan mesafeyi göstermektedir.



Şekil 1.19. Eğilmeye maruz kesitteki şekil değiştirme, gerilme ve kuvvet durumu

k sabiti

$$k = 2 \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (1.37)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada f_{py} öngerme kablosunun akma gerilmesini göstermektedir. (1.35)'te bulunan f_{ps} 'nin yerine (1.36) yazılır ve düzenlenirse

$$A_{ps} f_{pu} + A_{ps} f_{pu} k \frac{c}{d_p} + A_s f_y - A_s f'_y = 0,85 f_c b_w \beta_1 c + 0,85 f_c (b - b_w) \beta_1 h_f \quad (1.38)$$

$$A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A_s f'_y - 0,85 f_c (b - b_w) \beta_1 h_f = 0,85 f_c b_w \beta_1 c - A_{ps} f_{pu} k \frac{c}{d_p} \quad (1.39)$$

şeklinde elde edilir. (1.39)'da c yalnız bırakılırsa

$$c = \frac{A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A_s f'_y - 0,85 f_c (b - b_w) \beta_1 h_f}{0,85 f_c b_w \beta_1 - k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (1.40)$$

şeklinde elde edilir. Eğer basınç bloğu derinliği h_f içerisinde ise

$$c = \frac{A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0,85 f_c b \beta_1 + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (1.41)$$

şeklinde elde edilir. Kesit gövdesindeki basınç bölgesinin merkezine göre moment alınırsa taşıma gücü momenti

$$M_n = A_{ps} f_{pf} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_y \left(d'_s - \frac{a}{2} \right) + 0,85 f_c (b - b_w) h_f \left(\frac{a}{2} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (1.42)$$

şeklinde elde edilir. Katsayılı taşıma gücü momenti ise

$$M_r = \phi M_n \quad (1.43)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada ϕ direnim katsayısı olup öngerilmeli beton kesitlerde 1 olarak dikkate alınmaktadır.

1.14. Donatı Sınırlandırmaları

1.14.1. Minimum Donatı

Minimum donatı miktarı ile elemanın eğilme kapasitesinin çatlama momentinden büyük olması sağlanarak gevrek kırılma engellenmektedir. Elemanın herhangi bir kesitinde öngerme kablosunun ve çekme donatısının miktarı ile sağlanan katsayılı taşıma gücü momenti en az, Dayanım 1 elverişsiz yüklemeinden elde edilen hesap eğilme momentinin 1,33 katından ya da çatlama momentinden (M_{cr}) küçük olanına eşit olmalıdır. Çatlama momenti

$$M_{cr} = (1,2 f_r + 1,1 f_{cpe}) S_c - M_{dnc} \left(\frac{S_c}{S_{nc}} - 1 \right) \quad (1.44)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada f_r betonun kopma dayanımını, f_{cpe} dış yüklerin çekme gerilmesi oluşturduğu en dış liflerde (öngerilme kayıplarından sonra) betonda yalnız etkili öngerilme kuvvetlerinden oluşan basınç gerilmesini, M_{dnc} kirişin kendi ağırlığı ve tabliye ağırlığından oluşan eğilme momentini, S_c ve S_{nc} sırasıyla kompozit ve prefabrik kesitin alt lifi için hesaplanan mukavemet momentini göstermektedir. Karakteristik basınç dayanımı 105MPa'a kadar olan betonlar için kopma dayanımı,

$$f_r = 0,62 \times \sqrt{f_c} \quad (1.45)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

AASHTO yönetmeliğinde maksimum donatı ile ilgili koşullar 2005 yılında kaldırılmış olup maksimum donatı ile ilgili herhangi bir kontrol yapılmamaktadır.

1.15. Kesme Dayanımı

Öngerilmeli beton bir kirişin kesme dayanımının bileşenleri; betonun çatlamamış basınç bölgesinin taşıdığı (V_c) kesme kuvveti, enine donatının çekme gerilmeleri ile karşıladığı (V_s) kesme kuvveti ve eğik öngerme kablosu bulunması durumunda kablonun hesap düzlemindeki (V_p) kesme kuvveti bileşenidir. AASHTO LRFD yönetmeliğinde herhangi bir kesitteki kesme dayanımı

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (1.46)$$

$$V_n = 0,25 f_c b_v d_v + V_p \quad (1.47)$$

şeklinde belirlenip, bu ifadelerden küçüğü dikkate alınmaktadır. Katsayılı kesme dayanımı

$$V_r = \phi V_n \quad (1.48)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada ϕ kesme için direnir katsayısını göstermektedir. Katsayılı kesme anma direnir kesitte meydana gelen katsayılı kesme kuvvetinden büyük olmalıdır. Kesme dayanımına betonun ve enine donatının katkısı sırasıyla

$$V_c = 0,083\beta\sqrt{f_c}b_vd_v \quad (1.49)$$

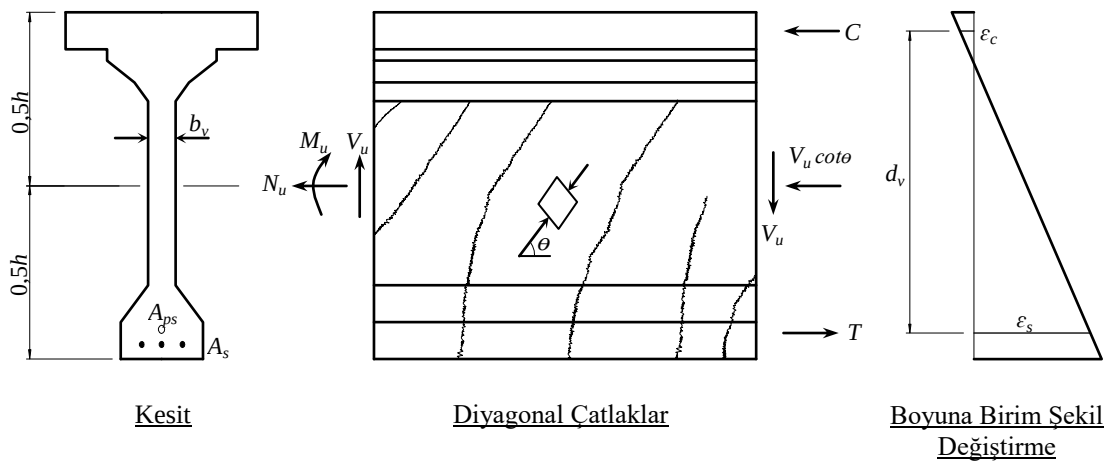
$$V_s = \frac{A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \quad (1.50)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada b_v efektif gövde genişliğini, d_v efektif kesme derinliğini, θ kesme çatlağının açısını, α enine donatının boyuna eksene göre açısını, s enine donatı aralığını ve A_v ise s mesafesi içindeki enine donatının alanını göstermektedir (Şekil 1.20).

Efektif kesme derinliği

$$d_v = \frac{M_n}{A_s f_y + A_{ps} f_{ps}} \quad (1.51)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kesme tasarımı için kritik kesit olarak mesnet iç yüzünden efektif kesme derinliğine kadar uzaklıktaki bölge dikkate alınmaktadır



Şekil 1.20. Minimum enine donatıya sahip kesitin kesme parametreleri

Minimum enine donatıya sahip olan kesitlerde kesme sabiti

$$\beta = \frac{4,8}{(1 + 750\varepsilon_s)} \quad (1.52)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kesme çatlağı açısı ise

$$\theta = 29 + 3500\varepsilon_s \quad (1.53)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada ε_s çekme donatılarının merkezindeki net boyuna çekme şekil değiştirmesini göstermekte olup

$$\varepsilon_s = \frac{\left(\frac{|M_u|}{d_v} + 0,5N_u + |V_u - V_p| - A_{ps} \times f_{po} \right)}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \quad (1.54)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada V_u kesitteki katsayılı kesme kuvvetini göstermektedir. f_{po} ise

$$f_{po} = 0,7 f_{pu} \quad (1.55)$$

şeklinde belirlenmektedir.

1.15.1. Minimum Enine Donatı

Enine donatı gereken yerlerde, minimum donatı alanı

$$A_v \geq 0,083 \sqrt{f_c} \frac{b_v s}{f_y} \quad (1.56)$$

koşulunu sağlamalıdır.

1.15.2. Enine Donatının Maksimum Aralığı

Enine donatı aralığı (s_x), betonda oluşan kesme gerilmesi (v_u) mertebesine bağlı olarak

- $v_u < 0,125 f_c$ olduğunda
 $s_x = 0,8d_v \leq 600\text{mm}$ (1.57)

- $v_u \geq 0,125 f_c$ olduğunda ise
 $s_x = 0,4d_v \leq 300\text{mm}$ (1.58)

şeklinde belirlenmektedir. Betonda oluşan kesme gerilmesi ise

$$v_u = \frac{|V_u - \phi V_p|}{\phi b_v d_v} \quad (1.59)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada ϕ kesme direnimini göstermekte olup 0,9 olarak dikkate alınmaktadır.

1.15.3. Öngerilmeli Betonda Ankraj Bölgeleri

1.15.3.1. Yarılma Dayanımı

Öngerilmeli kirişlerin ankraj bölgesinin yarılma dayanımı

$$P_r = f_s A_{se} \quad (1.60)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada f_s 140MPa'ı geçmeyecek şekilde enine donatı gerilmesini, A_{se} kirişin ucundan $0,25h$ uzaklığa kadar konulmuş olan toplam enine donatı alanını göstermektedir. Yarılma dayanımı, aktarma anındaki toplam öngerme kuvvetinin %4'ünden daha az olmamalıdır.

1.15.3.2. Sargılama Donatısı

Sargılama donatısı öngerme kablolarını sargılamak için kullanılmaktadır. Bu donatı kiriş ucundan, kiriş yüksekliğinin 1,5 katı mesafeye kadar en az 10mm çaplı donatı ile en az 150mm aralık olacak şekilde yerleştirilmektedir.

1.16. Boyuna Donatı Kontrolü

Boyuna donatıda meydana gelen kuvvetin oluşmasında katsayılı eğilme momenti, kesme kuvveti, normal kuvvet, öngerme kablosunun düşey bileşeni ve enine donatının kesme bileşeni etkili olmaktadır. Bu kuvvetler etkisindeki boyuna donatının çekme kapasitesi

$$A_s f_{ps} + A_s f_y \geq \frac{|M_u|}{d_v \phi_f} + 0,5 \frac{N_u}{\phi_c} + \left(\left| \frac{V_u}{\phi_v} - V_p \right| - 0,5V_s \right) \cot \theta \quad (1.61)$$

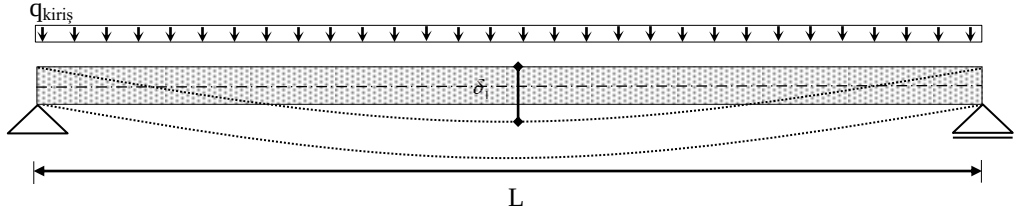
şeklinde belirlenmektedir. Burada θ , ϕ_f , ϕ_c ve ϕ_v sırasıyla diyagonal basınç gerilmesinin açısını, moment, eksenel ve kesme dayanımı için direnimsiz katsayılarını göstermektedir.

1.17. Sehim Denetimi

Betonarme kirişlere göre daha narin kesitlere sahip olan öngerilmeli kirişler, maruz kaldığı yüklerin etkisiyle sehime uğramaktadır. Öngerilmeli kirişli beton köprülerin yapım dönemleri incelendiğinde aktarma, tabliye prizini tamamlamadan önceki ve servis dönemlerinde meydana gelen sehim değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu farklılığın sebebi her dönem için kirişi oluşturan malzeme özelliklerinin, kirişe uygulanan yüklerin ve kirişte meydana gelen öngerilme kayıplarının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Öngerilmeli kirişlerde meydana gelen sehim genel olarak ani ve uzun süreli sehim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Keyder, 2013). Aktarma döneminde oluşan sehim ani diğer dönemlerde oluşan sehim ise uzun süreli sehim olarak adlandırılmaktadır.

1.17.1. Ani Sehim

Aktarma döneminde oluşan sehim ani sehim olarak adlandırılmaktadır. Aktarma döneminde kirişte öngerilme kuvveti ve öngerme kablolarının eksantrisitesine bağlı olarak ters sehim meydana gelmektedir. Aktarma döneminde kirişte meydana gelen ters sehim, öngerilmeli kirişin kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim ile öngerilme kuvvetinin etkisiyle oluşan ters sehimin toplamından oluşmaktadır. Kiriş sadece kendi ağırlığının etkisindeyken, kirişte Şekil 1.21’de görüldüğü gibi aşağı yönlü bir sehim meydana gelmektedir.



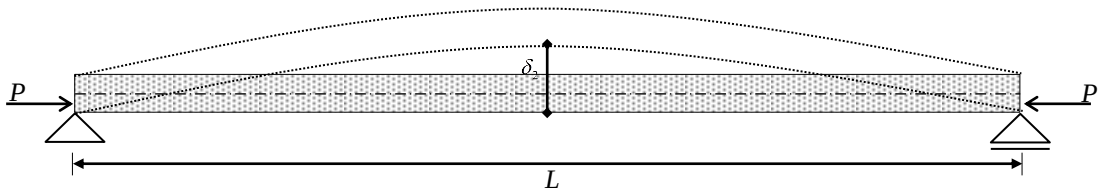
Şekil 1.21. Kiriş kendi ağırlığının etkisindeyken oluşan sehim

Kiriş kendi ağırlığının etkisindeyken, kirişte oluşan en büyük sehim birinci mertebe teorisiyle,

$$\delta_1 = \left(-\frac{5 \times q_{kiriş} \times L^4}{384 E_{ci} I_{prefabrik}} \right) \quad (1.62)$$

şeklinde belirlenmektedir.

Kiriş sadece öngerilme kuvveti etkisindeyken, kirişte Şekil 1.22’de görüldüğü gibi ters sehim meydana gelmektedir.



Şekil 1.22. Kiriş öngerilme kuvvetinin etkisindeyken oluşan sehim

Kiriş öngerilme kuvvetinin etkisindeyken, kirişte oluşan en büyük sehim birinci mertebe teorisi teoriyle

$$\delta_2 = \frac{P_i(1-\xi_1) \times e_i \times L^2}{8E_{ci} I_{prefabrik}} \quad (1.63)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kirişte aktarma dönemi sonunda meydana gelen toplam sehim,

$$\delta_{aktarma} = \delta_1 + \delta_2 \quad (1.64)$$

şeklinde, kirişin kendi ağırlığından ve öngerilme kuvvetinin etkisiyle meydana gelen sehimin toplanması ile elde edilmektedir.

1.17.2. Uzun Süreli Sehim

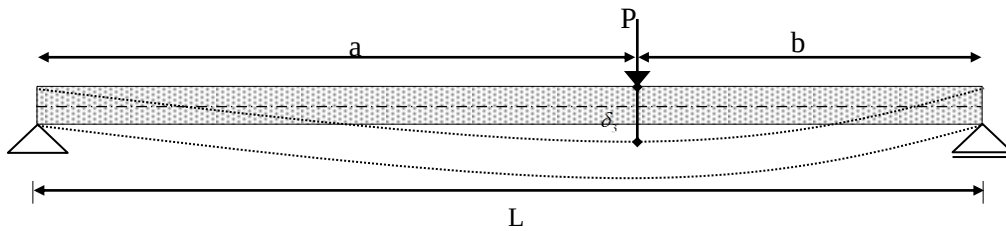
Öngerilmeli kirişte meydana gelen sehimde, aktarma dönemi tamamlandıktan sonra zamana bağlı olarak değişim meydana gelmektedir. Bu değişimin temel sebepleri betonda meydana gelen sünme ve rötire ile öngerme kablosunda meydana gelen gevşemedir (Martin, 1977). Öngerilmeli kirişte bu sebeplerden dolayı oluşan sehim uzun süreli sehim olarak adlandırılmaktadır. Uzun süreli sehim hesabı genellikle ani sehim için bulunan değerlerin belirli katsayılarla çarpımı ile elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında uzun süreli sehim hesabı, Amerikan Öngerilmeli Beton Enstitüsü (PCI) tarafından da kullanılan Martin'in (1977) belirlediği katsayılar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır (Tablo 1.2). Martin tarafından belirlenen katsayılar birinci mertebe teorisiyle hesaplanan ani sehimlerin sünme ve rötrenin etkisiyle ne kadar arttığını göstermektedir.

Tablo 1.2. Uzun süreli sehim katsayıları

Dikkate Alınacak Olan Sehim		Kompozit Başlıksız Kesit	Kompozit Başlıklı Kesit
Montaj'da	1- Sehim Çarpanı: Öngerme anında kirişin kendi ağırlığından oluşan sehim	1,85	1,85
	2- Ters Sehim Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden oluşan sehim	1,80	1,80
Servis'te	3- Sehim Çarpanı: Öngerme anında kirişin kendi ağırlığından oluşan sehim	2,70	2,70
	4- Ters Sehim Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden oluşan sehim	2,45	2,20
	5- Sehim Çarpanı: Kirişe gelen ilave yüklerden oluşan sehim	3,00	3,00
	6- Sehim Çarpanı: Kirişte kompozit başlıktan dolayı oluşan sehim	-	2,30

1.17.3. Hareketli Yükün Neden Olduğu Sehim

Hareketli yükten dolayı oluşan sehim hesabında kesitte en fazla tesiri oluşturan standart kamyon yükü kullanılmaktadır. Kamyonun tekerleklerinden kirişe aktarılan yükler tekil yük olarak dikkate alınarak tekil kuvvet etkisinde basit kirişte meydana gelen sehim belirlenmektedir. Tekil hareketli yük etkisindeki basit kirişte meydana gelen sehim şematik olarak Şekil 1.23'te gösterilmektedir.



Şekil 1.23. Kiriş tekil hareketli kuvvetin etkisindeyken oluşan sehim

Standart kamyon ağırlığının oluşturduğu en büyük sehim, kamyonun arka tekerleklerinden ilkinin kiriş orta noktasına geldiği anda oluşmaktadır. Bu durumda diğer tekerleklerin kiriş üzerindeki yerleri belirlenip her tekerlek yükünün kirişin orta noktasında meydana getirdiği sehim miktarı ayrı ayrı belirlenmekte ve elde edilen sehim değerlerinin toplamı kirişte standart kamyon yükünden dolayı meydana gelen en büyük sehim değerini vermektedir. Kamyonun arka tekerleklerinden ilkinin kirişin orta noktasına geldiğinde kirişin orta noktasında meydana gelen sehim,

$$a = b = \frac{L}{2} \rightarrow \delta_H = -\frac{PL^3}{48EI_e} \quad (1.65)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kamyonun diğer arka tekerleğinin kirişin orta noktasında meydana getirdiği sehim,

$$a < \frac{L}{2} \rightarrow \delta_H = -\frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI_e} - \frac{P(0,5L - a)^3}{6EI_e} \quad (1.66)$$

şeklinde belirlenmektedir. Kamyonun ön tekerleğinin kirişin orta noktasında meydana getirdiği sehim ise,

$$a > \frac{L}{2} \rightarrow \delta_H = -\frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI_e} \quad (1.67)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada P tekerlekten kirişe aktarılan tekil yükü, I_e ise kirişin efektif atalet momentini göstermektedir. Efektif atalet momenti,

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_{kompozit} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_{kompozit} \quad (1.68)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada M_{cr} ve M_a sırasıyla çatlama ve hareketli yükten oluşan maksimum momenti, $I_{kompozit}$ ve I_{cr} ise sırasıyla kompozit ve çatlamış kesitin atalet momentini göstermektedir. Eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlamış kesite ait atalet momenti çatlamamış kesitin atalet momentinin %40'ı olarak alınmaktadır (DBYBHY-2007).

AASHTO LRFD (2012)'de hareketli yükler ve bu yüklerin neden olduğu dinamik etki altında, köprü üstyapı kirişlerinde oluşan en büyük sehim, kiriş hesap açıklığının 1/800'ünden küçük olması tavsiye edilmektedir.

1.18. Tabliye Tasarımı

AASHTO LRFD yönetmeliğinde tabliyenin tasarlanmasında eşit şerit ve deneysel tasarım metodları kullanılmaktadır. Deneysel tasarım metodunun adından da anlaşılacağı gibi tabliyenin tasarımında laboratuvar testlerini kullanılmaktadır. Bu testlerde, tabliye üzerine gelen yüklerin taşıyıcı elemanlara kemerleme etkisi, kesme ve moment olarak aktarıldığı gösterilmektedir. Bu yöntemin kullanılması için tabliyenin yönetmelikte tanımlanmış olan belli geometrik koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu sınırlar içinde bulunan tabliyeler için herhangi bir hesap yapılmadan enine ve boyuna donatı oranları yönetmelikten alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında tabliye tasarımı, eşit şerit metodu dikkate alınarak yapılacaktır. Bu metotta köprü üst yapısında bulunan kirişler arasında kalan tabliye şeridinin iki yanında bulunan kirişlerin simetri eksenine mesnetlendiği kabulü yapılmaktadır. Bu kabul yardımıyla tabliyede sabit ve hareketli yüklerden meydana gelen kesit tesirleri belirlenmekte ve donatı hesabı yapılmaktadır.

1.18.1. Tabliye Kalınlığı

Köprülerde tabliye kalınlığı en az 17,5cm ya da $0,045L$ olacak şekilde seçilmelidir. Tasarım aşamasında tabliye üzerinde bulunan kaplama tabakasının dayanıma katkısı olmadığı kabul edilmekte ve sadece yük olarak dikkate alınmaktadır.

1.18.2. Negatif Moment Hesabının Yapılacağı Tasarım Kesiti

Öngerilmeli beton kirişlerde, kirişin simetri ekseninden negatif momentin hesabının yapılacağı tasarım kesiti arasındaki mesafe, kirişin üst başlık genişliğinin üçte biri olacak şekilde dikkate alınmaktadır. Fakat bu değer 38cm'i geçmemelidir (AASHTO LRFD, 2012).

1.18.3. Tabliye Tasarımında Hareketli Yükün Etkisi

Köprü tabliyesi üzerinden geçen taşıt etkilerinin meydana getirdiği pozitif ve negatif eğilme momentleri AASHTO LRFD yönetmeliğinde verilen tablolar yardımıyla belirlenebilmektedir (Tablo 1.3). Tabloda S kirişler arası mesafeyi göstermektedir.

1.18.4. Donatı Düzenlenmesi Suretiyle Tabliyede Çatlak Kontrolü

Betonarme tabliyelerde çatlakların kontrol altına alınabilmesi için çekme lifine en yakın betonarme donatısının aralığı

$$s \leq \frac{123000\gamma_e}{\beta_s f_{ss}} - 2d_c \quad (1.69)$$

koşulunu sağlamalıdır. Burada γ_e çevre koşulları katsayısını, f_{ss} kullanım servis durumunda betonarme donatısındaki gerilmeyi ve d_c beton örtüsünü göstermektedir. β_s ise

$$\beta_s = 1 + \frac{d_c}{0,7(h - d_c)} \quad (1.70)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada h elemanın tüm yüksekliğini göstermektedir.

1.18.5. Tabliye Boyuna Donatısı ile İlgili Koşullar

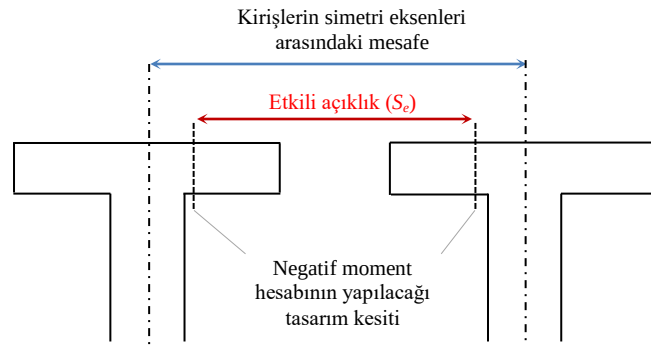
1.18.5.1. Dağıtma Donatısı

Pozitif moment dikkate alınarak köprü tabliyesinin altına yerleştirilmiş asal çekme donatısına dik olarak yerleştirilecek olan dağıtma donatısı, asal çekme donatısının belirli bir yüzdesi kadar konulacaktır. Bu yüzde asal çekme donatısının trafik yönüne paralel ve dik olmasına bağlı olarak sırasıyla

$$\frac{1750}{\sqrt{S_e}} \leq \%50 \quad (1.71)$$

$$\frac{3840}{\sqrt{S_e}} \leq \%67 \quad (1.72)$$

koşullarını sağlamalıdır. Burada S_e etkili açıklığı göstermektedir (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Etkili açıklık

1.18.5.2. Büzülme ve Sıcaklık Değişim Donatısı

Betonun günlük sıcaklık değişimlerine açık kalan yüzeylerinde ve yapısal kütle betonunda büzülme ve ısıl gerilmeler için donatı kullanılacaktır. Her bir yüzde bu amaçla kullanılacak donatı alanı

$$A_s \geq \frac{0,75bh}{2(b+h)f_y} \quad (1.73)$$

$$0,233 \leq A_s \leq 1,27 \quad (1.74)$$

koşullarını sağlamalıdır.

Tablo 1.3. Birim genişlik için en büyük hareketli yük momentleri

S (mm)	Pozitif Moment (Nmm)	Negatif Moment (Nmm)						
		Kirişin simetri eksenine göre negatif moment hesabının yapılacağı tasarım kesiti arasındaki mesafe						
		0.0mm	75mm	150mm	225mm	300mm	450mm	600mm
1300	21130	11720	10270	8940	7950	7150	6060	5470
1400	21010	14140	21210	10340	8940	7670	5960	5120
1500	21050	16320	14030	11720	9980	8240	5820	5250
1600	21190	18400	15780	13160	11030	8970	5910	4290
1700	21440	20140	17290	14450	12010	9710	6060	4510
1800	21790	21690	18660	15630	12930	10440	6270	4790
1900	22240	23050	19880	16710	13780	11130	6650	5130
2000	22780	24260	20960	17670	14550	11770	7030	5570
2100	23380	26780	23190	19580	16060	12870	7410	6080
2200	24040	27670	24020	20370	16740	13490	7360	6730
2300	24750	28450	24760	21070	17380	14570	9080	8050
2400	25500	29140	25420	21700	17980	15410	10870	9340
2500	26310	29720	25990	22250	18510	16050	12400	10630
2600	27220	30220	26470	22730	18980	16480	13660	11880
2700	28120	30680	26920	23170	19420	16760	14710	13110
2800	29020	31050	27300	23550	19990	17410	15540	14310
2900	29910	32490	28720	24940	21260	18410	16800	15480
3000	30800	34630	30790	26960	23120	19460	18030	16620
3100	31660	36630	32770	28890	23970	21150	19230	17780
3200	32500	38570	34670	30770	26880	22980	20380	18910
3300	33360	40440	36520	32600	28680	24770	21500	20010
3400	34210	42250	38340	34430	30520	26610	22600	21090
3500	35050	43970	40030	36090	32150	28210	23670	22130
3600	35870	45650	41700	37760	33810	29870	24700	23150
3700	36670	47250	43310	39370	35430	31490	25790	24140
3800	37450	48820	44880	40940	37010	33070	27080	25100
3900	38230	50320	46390	42460	38540	34600	28330	25550
4000	38970	51790	47870	43950	40030	36110	29570	26410
4100	39710	53190	49280	45370	41470	37570	30770	27850
4200	40420	54560	50670	46770	42880	38990	31960	28730
4300	41120	55880	52000	48130	44250	40380	33130	29570
4400	41800	57150	53290	49440	45580	41720	34250	30400
4500	42460	58420	54580	50740	46900	43060	35380	31290
4600	43110	59620	55800	51980	48160	44340	36700	32360

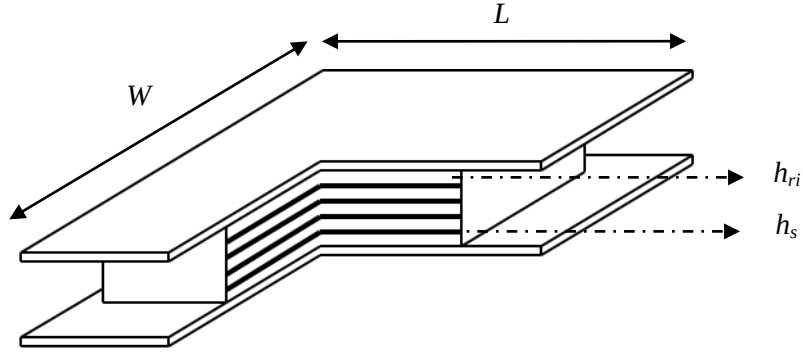
1.19. Elastomer Mesnet

Bu kısımda önerilmeli köprülerde yaygın olarak kullanılan elastomer mesnetlerin hesap ve tasarım konusu üzerinde durulmaktadır. Türkiye’de çoğunlukla kirişli betonarme köprülerin üstyapıları elastomer mesnetli olarak tasarlanmaktadır. Elastomer mesnetler, köprü tasarımında üstyapı ve köprü ayakları arasındaki bağlantıyı sağlayıp moment aktaracak biçimde ya da basit mesnetli olabilmektedir. Elastomer mesnetler, köprü kirişleri ile ona mesnetlik yapan yapı arasında yüklerin iletilmesi ve yer değiştirmelerin sınırlandırılmasını amacıyla kullanılmaktadır.

Elastomer mesnetler çelik ve kauçuk tabakasının tek bir seferde yüksek basınç ve sıcaklık altında birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Sönüm oranları %4’den başlayarak %40’a kadar çıkmaktadır. Genellikle köprülerde sıklıkla kullanım alanı bulan elastomer mesnetler yapıda tek başına kullanıldığı gibi diğer izolatörlerle beraber de

kullanılabilmektedir (Keskin, 2007). Şekil 1.25'te elastomer mesnetin genel yapısı görülmektedir.

Öngerilmeli beton köprülerde yaygın olarak kullanılan elastomer mesnetlerin tasarımı için ülkemizde kapsamlı bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu kapsamda depremsellik açısından benzer özelliklere ve güncel tasarım kriterlerine sahip bir ülkenin yönetmeliğini kullanmak uygun olmaktadır. Bu koşullar göz önüne alındığında Türkiye'de köprü tasarımı için kullanılabilecek en kapsamlı yönetmeliklerden birisinin Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaştırma Kurumunun (AASHTO) yayınladığı yönetmeliktir; bu çalışmada elastomer mesnetlerin tasarımında bu yönetmelik kuralları izlenmektedir.



Şekil 1.25. Elastomer mesnetin yapısı

1.19.1. Elastomer Mesnetin Tasarımı

Elastomer mesnetlerin tasarımında AASTHO LRFD (2012)'de A ve B yöntemi olarak iki yöntemden bahsedilmektedir. Genellikle A yöntemi ile ilişkili gerilme sınırları B yönteminde elde edilen gerilme sınırlarından bir nebze daha düşük elde edildiği söz konusu yönetmelikte ifade edilmektedir. B yönteminde hesaplanan fazla gerilmelerden dolayı ek olarak test ve kalite kontrolü yapılması gerekli olmaktadır. Kalınlığı 20,32cm'den ya da yüzey alanı 6,45cm²'den büyük olan elastomer mesnetler, büyük elastomer mesnetler olarak tanımlanmakta ve bu mesnetlerin hesabında B yönteminin kullanılması tavsiye edilmektedir.

1.19.1.1. Elastomer Mesnetlerin Boyutsal Özellikleri

Elastomer mesnetlerin tasarımında en önemli parametre çelik plaklar ile kauçuk tabakaları arasında oluşan kesme şekil değiştirmesidir. Elastomer mesnetin boyutsal büyüklükleri kullanılarak, kauçuk malzemenin tek bir tabakasına ait boyutsuz, şekil faktörü olarak adlandırılan bir oran ölçüsü tanımlanmaktadır. Bu oran ölçüsünün hesabı elastomer mesnetin karesel ya da dairesel olmasına ve üzerinde delik olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Deliksiz karesel ve dairesel elastomer mesnet için şekil faktörü,

$$S_i = \frac{L_s W_s}{2h_{ri}(L_s + W_s)} \quad (1.75)$$

$$S_i = \frac{D_s}{4h_{ri}} \quad (1.76)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada L_s ve W_s sırasıyla elastomer mesnetin köprü boyu ve köprü boyuna dik doğrultusundaki kenarlarının uzunluğunu, h_{ri} elastomer mesnette bulunan her bir kauçuk tabakanın kalınlığını ve D_s elastomer mesnetin çapını göstermektedir.

Elastomer mesnetlerde delik kullanılması tavsiye edilmemekle birlikte kullanılması halinde karesel ve dairesel elastomer mesnet için şekil faktörü sırasıyla, toplam sembolü niye var

$$S_i = \frac{L_s W_s - \sum \frac{\pi}{4} d_s^2}{h_{ri}(2L_s + 2W_s + \sum \pi d_s)} \quad (1.77)$$

$$S_i = \frac{D_s^2 - \sum \pi d_s^2}{4h_{ri}(D_s + \sum \pi d_s)} \quad (1.78)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada d_s elastomer mesnet üzerinde bulunan deliğin çapını göstermektedir.

Elastomer mesnetler kauçuk ve çelik levhaların bir arada kullanılmasıyla meydana geldiği için, yüksek eksenel rijitlik (K_V) ve düşük kayma rijitliğe (K_H) sahip olmaktadır. Kauçuğun ve çelik levhaların davranışı elastik kabul edildiğinde elastomer mesnetin eksenel ve kayma rijitlikleri sırasıyla,

$$K_H = \frac{G_s A_{elastomer}}{h_{rt}} \quad (1.79)$$

$$K_V = \frac{E_s A_s}{h_{rt}} \quad (1.80)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $A_{elastomer}$ elastomer mesnetin plan alanını; G_s ve E_s sırasıyla elastomer mesnetin kayma ve elastisite modülünü, h_{rt} ise kauçuk tabakaların toplam kalınlığını göstermektedir. Basit kiriş davranışı sonucu elastomer mesnette oluşan dönme rijitliği ise,

$$K_\theta = \frac{1,6(0,5E_c I_s)}{h_{rt}} \quad (1.81)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada I_s elastomer mesnetin atalet momentini göstermektedir.

1.19.1.2. Elastomer Mesnetin Malzeme Özellikleri

Elastomer mesnetin tasarımında kullanılan en önemli malzeme özelliklerinden birisi kesme modülüdür. Kesme modülü değeri için 0,552-1,21MPa aralığı tavsiye edilmekte olup kesme modülünü 1,21MPa'dan büyük olmasının istenmemesinin sebebi elastomer mesnetin düşük uzama kapasitesine sahip olmasıdır.

Elastomer mesnetin tasarımında kullanılan diğer bir malzeme özelliği ise elastomer mesnetin elastisite modülüdür. Elastisite modülünün değeri deneyler sonucunda hesaplanabilmekte olup bu deneyler uzun ve zahmetli olmaktadır. Elastomer mesnetin elastisite modülünün hesaplanması için AASHTO LRFD (2012)'de amprik bir formül verilmektedir. Bu amprik formül,

$$E_s = 4,8 G_s S^2 \quad (1.82)$$

şeklindedir.

1.19.1.3. Elastomer Mesnetin Tasarım Gereksinimleri

1.19.1.3.1. Kesme Deformasyonu

Elastomer mesnette, yorulma ve kauçuk köşelerinde yuvarlanma gibi problemlerin oluşmaması için kesme deformasyonu $\pm 0,5 h_t$ ile sınırlanması tavsiye edilmektedir. Yeterli bilginin olmadığı durumlarda ise tekrarlı yükler sonucunda oluşan en büyük kesme deformasyonu $\pm 0,1 h_t$ den fazla olmamalıdır.

1.19.1.3.2. Basınç, Dönme ve Kesme Birleşimi

Elastomer mesnetler genellikle sıkıştırılmaz olarak kabul edilmektedir. Fakat poisson etkisiyle bir miktar genişleme meydana gelmektedir. Meydana gelen genişleme kauçuk tabakaları arasında bulunan çelik levhalar tarafından sınırlanmaya çalışılmaktadır. Bu durum da kauçuk tabaka ile çelik levhalar arasındaki yüzeyde kesme gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Kesme gerilmesinin belirli bir değeri aşması kesme kırılmasının oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür kırılmalara elastomer mesnetlerde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu yüzden kesme şekil değiştirmesi tasarımda dikkate alınmaktadır. Eksenel kuvvet, dönme ve kesmenin servis sınır durumunda birlikte etkimesi sonucunda

$$(\gamma_{a,st} + \gamma_{r,st} + \gamma_{s,st}) + 1,75(\gamma_{a,cy} + \gamma_{r,cy} + \gamma_{s,cy}) \leq 5,0 \quad (1.83)$$

$$\gamma_{a,st} \leq 3,0 \quad (1.84)$$

eşitsizliklerinin sağlanması gerekmektedir. Burada, γ_a , γ_r ve γ_s sırasıyla eksenel kuvvetten, dönmeden ve kesme deformasyonundan dolayı oluşan kesme şekil

değiştirmesini göstermektedir. Eşitsizliklerde kullanılan st ve cy indisleri sırayla statik ve tekrarlı yükü göstermektedir. Tekrarlı yükler trafikten kaynaklı yükleri ifade etmektedir. Diğer tüm yükler statik olarak dikkate alınmaktadır. Eksenel kuvvetten dolayı oluşan kesme şekil değiştirmesi,

$$\gamma_a = D_a \frac{\sigma_s}{G_s S_i} \quad (1.85)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada, D_a eksenel kuvvetten oluşan kesme şekil değiştirmesinin belirlenmesinde kullanılan birimsiz bir katsayı olup karesel elastomer mesnet için 1,4 dairesel elastomer mesnet için 1,0 olarak alınmaktadır. σ_s ise statik ya da tekrarlı yüklerden meydana gelen ortalama basınç gerilmesini göstermektedir.

Dönmeden dolayı elastomer mesnette meydana gelen kesme şekil değiştirmesi karesel ve dairesel elastomer mesnet için sırasıyla (1.86) ve (1.87) bağıntıları yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\gamma_r = D_r \left(\frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n} \quad (1.86)$$

$$\gamma_r = D_r \left(\frac{D_s}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n} \quad (1.87)$$

Burada, D_r dönmeden dolayı oluşan kesme şekil değiştirmesinin belirlenmesinde kullanılan bir katsayı olup karesel elastomer mesnet için 0,5; dairesel elastomer mesnet için ise 0,375 olarak alınmaktadır. n elastomer mesnetin içinde bulunan iç tabaka sayısını; θ_s servis limit durumundaki maksimum statik ya da tekrarlı dönüş açısını göstermektedir. Kesme deformasyonundan oluşan kesme şekil değiştirmesi,

$$\gamma_s = \left(\frac{\Delta_s}{h_{rt}} \right) \quad (1.88)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada Δ_s uygun yük kombinasyonu altında maksimum statik ya da tekrarlı kesme deformasyonunu göstermektedir.

1.19.1.3.3. Elastomer Mesnetin Stabilitesi

Elastomer mesnetlerin stabiliteleri yük kombinasyonları altında incelenmektedir. $2A \leq B$ koşulu sağlandığında elastomer mesnetin stabil olduğu ve daha fazla araştırmaya gerek olmadığı kabul edilmektedir. A ve B değerleri,

$$A = \frac{1,92 \frac{h_{rt}}{L_s}}{\sqrt{1 + \frac{2,0L_s}{W_s}}} \quad (1.89)$$

$$B = \frac{2,67}{(S_i + 2,0) \left(1 + \frac{L_s}{4,0W_s} \right)} \quad (1.90)$$

şeklinde belirlenmektedir. Dairesel elastomer mesnette A ve B değerleri hesaplanırken $W=L=0,8D$ alınarak stabilite kontrolü yapılmaktadır.

Karesel elastomer mesnet için $2A \leq B$ şartı sağlanmaz ise köprünün yatay yer değiştirmesine bağlı olarak belirlenmiş koşulların kontrolü yapılmaktadır. Bu koşullar köprünün yatay yer değiştirmesi serbest ve tutulu olması için sırasıyla,

$$\sigma_s \leq \frac{G_s S_i}{2A - B} \quad (1.91)$$

$$\sigma_s \leq \frac{GS_i}{A - B} \quad (1.92)$$

şeklinde yapılmaktadır. (1.92)'de bulunan $A - B$ değerinin sıfır ya da eksi değer alması elastomer mesnetin stabil ve gerilmeden bağımsız olduğunu göstermektedir.

1.19.1.3.4. Çelik Plakalar

Elastomer mesnetlerin yatay rijitliğini artırmak için kullanılan çelik levhaların kalınlığı (h_s) 1,60mm den az olmamalı ve servis sınırı ve yorulma sınırı durumları için sırasıyla,

$$h_s \geq \frac{3h_{ri}\sigma_s}{F_y} \quad (1.93)$$

$$h_s \geq \frac{2h_{ri}\sigma_L}{\Delta F_{TH}} \quad (1.94)$$

koşullarını sağlamalıdır. Burada ΔF_{TH} sabit yorulma genliğini, σ_L hareketli yüklerden meydana gelen ortalama basınç gerilmesini, F_y çeliğin akma dayanımını göstermektedir.

1.20. Çevresel Titreşim Yöntemi

Deneysel modal analiz (DMA) yöntemi son yıllarda birçok araştırmacı tarafından mühendislik yapıların dinamik karakteristiklerinin (frekanslar, sönüm oranları ve modal şekilleri) belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. DMA ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde genel olarak iki titreşim yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar çevresel ve zorlanmış titreşim yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Zorlanmış titreşim yönteminde (ZTY), yapıya özellikleri bilinen bir etki uygulanmakta ve bu etkiye karşı yapının gösterdiği tepki ölçülmektedir. Ölçümler sayesinde elde edilen veriler işlenerek yapıya ait dinamik karakteristikler belirlenmektedir. Çevresel titreşim yönteminde (ÇTY) ise yapının bulunduğu konum itibarıyla yapıda titreşimlere neden olan rüzgâr, taşıt yükü ve yaya hareketleri gibi çevresel etkiler dikkate alınmaktadır.

ÇTY’de çevresel etkiler kullanıldığı için yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve periyodu gibi özellikleri bilinmemektedir. Yapıya ait dinamik karakteristikler, yapının çevresel titreşime karşı oluşturduğu tepki verilerinin zaman veya frekans tanım alanlarında işlenmesi ile elde edilen tepki davranış fonksiyonu yardımıyla belirlenmektedir. ÇTY’de tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde, frekans tanım alanında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi ve zaman tanım alanında ise Stokastik Altalan

Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmaktadır. GFOA yönteminde, dinamik karakteristikler, elde edilen sinyallerin işlenmesinde sonra belirlenen güç spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayrıştırma grafiğindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. (Jacobsen vd., 2006; Altunışık, 2010; Sevim, 2010; Günaydın, 2016). SAB yönteminde ise; durum-uzay modelinden elde edilen sistem davranış matrisinin tekil değer ayrıştırılmasıyla dinamik karakteristikler elde edilmektedir. (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000; Peeters, 2000; Yu ve Ren, 2005; Altunışık, 2010; Sevim, 2010; Günaydın, 2016).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

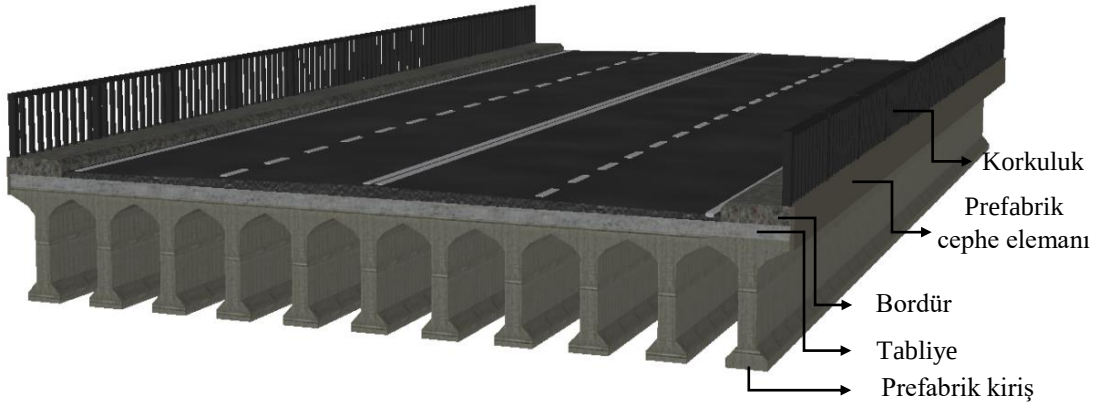
Bu tez çalışmasında, önerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bir bilgisayar programının oluşturulması amaçlanmıştır. Bilgisayar programının oluşturulmasında gerekli olan bilgilerin elde edilmesi için deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde önerilmeli kirişli beton köprülerin tasarımı için TSE tarafından hazırlanmış olan TS3233 (1979) standardı ve Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yayımlanmış olan Karayolu Teknik Şartnamesi (2013) bulunmasına rağmen bu yayınlar bir köprünün boyutlandırılmasında yetersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle bu çalışmada köprü üstyapısının boyutlandırılması aşamasında, “American Association of State Highway and Transportation Officials” tarafından yayımlanmış olan “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” (2012) adlı yönetmelik hükümleri büyük ölçüde dikkate alınmıştır. Ülkemizde önerilmeli kirişli köprü üstyapı projeleri hazırlayan firmalar ve bu projelerin denetimini yapan resmi kurumlar tarafından da bu yönetmelik esas kaynak olarak kabul edilmektedir.

Bu bölümde ilk olarak önerilmeli kirişlere sahip köprü üstyapısının boyutlandırılması için dikkate alınması gereken yükler ve bu yüklerin kirişlerde meydana getirdiği kesit tesirlerinin hesabına yer verilmiştir. Bunun ardından kirişlerin kesit özelliklerinin belirlenmesi ve hesabı açıklanmıştır. Daha sonra kirişteki öngerme kablolarının kirişin alt başlığındaki dağılımının kirişte meydana gelen gerilme, sehim ve kılıflanma parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca aktarma döneminde kirişte oluşan sehim üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Literatürde mevcut olan birinci mertebe ve elastik-stabilite teorileri ile elde edilen veriler deneysel ölçümlerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Son olarak ise önerilmeli kirişin dinamik karakteristiklerinin deneysel ve analitik olarak belirlenmesi için yapılan çalışmalara da yer verilmiştir.

2.2. Köprü Üstyapısı

Öngerilmeli beton kirişlere sahip bir köprünün başlıca yapı elemanları; temeller, ayaklar, öngerilmeli kirişler ve tabliye dir. Bu elemanlardan öngerilmeli kirişler ve tabliye köprü üstyapısını oluşturmaktadır (Şekil 2.1). Bu çalışmada iki ayak arasındaki köprü üstyapısı üzerinde durulmuştur.



Şekil 2.1. Öngerilmeli beton kirişli köprü üstyapısı

2.3. Yapıya Gelen Yükler

Bu kısımda, köprü üstyapısını oluşturan öngerilmeli kirişler ve tabliyenin tasarımında dikkate alınan sabit ve hareketli yüklerin kirişlerde meydana getirdiği kesit tesirleri incelenmektedir.

2.3.1. Sabit Yüklerin Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri

Köprü üstyapısı, kendisini oluşturan öngerilmeli kirişler ve tabliye ile yapı üzerinde bulunan asfalt kaplama, bordür-kaldırım, korkuluk ve cephe elemanı ağırlıklarından meydana gelen sabit yükler etkisinde kalmaktadır. Bu yüklerin kirişlere eşit olarak dağıldığı kabulü ile her bir eleman için elde edilen sabit yük tabliyeyi destekleyen kiriş sayısına bölünerek bir kirişe gelen yayılı yük değeri belirlenmektedir.

Öngerilmeli kirişin kendi ağırlığından dolayı meydana gelen sabit yük

$$W_{DL1} = \gamma_{prefabrik} \times A_{prefabrik} \quad (2.1)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $\gamma_{prefabrik}$ ve $A_{prefabrik}$ sırasıyla öngerilmeli prefabrik kirişin birim hacim ağırlığını ve enkesit alanını göstermektedir.

Köprü üstyapısını oluşturan diğer yapı elemanlarından olan tabliyenin ağırlığından bir kirişe aktarılan sabit yük değeri,

$$W_{DL2} = \frac{\gamma_{tabliye} \times A_{tabliye}}{k_s} \quad (2.2)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $\gamma_{tabliye}$ tabliyenin birim hacim ağırlığını, $A_{tabliye}$ tabliyenin enkesit alanını ve k_s ise köprü üstyapısında bulunan toplam kiriş sayısını göstermektedir. Tabliye üzerine yapılan asfalt kaplamanın ağırlığından dolayı bir kirişe aktarılan sabit yük,

$$W_{DL3} = \frac{\gamma_{asfalt} \times w_{asfalt} \times t_{asfalt}}{k_s} \quad (2.3)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada γ_{asfalt} , w_{asfalt} ve t_{asfalt} , sırasıyla asfalt kaplamanın birim hacim ağırlığını, genişliğini ve kalınlığını göstermektedir. Bordür taşlarının kaldırım dâhil ağırlığından dolayı bir kirişe aktarılan sabit yük,

$$W_{DL4} = \frac{\gamma_{bordür+kaldırım} \times A_{bordür+kaldırım}}{k_s} \quad (2.4)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $\gamma_{bordür+kaldırım}$ bordür ve kaldırım imalatında kullanılan betonun birim hacim ağırlığını ve $A_{bordür+kaldırım}$ ise bordür ve kaldırımın toplam enkesit alanını göstermektedir.

Korkuluğun ağırlığından dolayı bir kirişe aktarılan sabit yük,

$$W_{DL5} = \frac{\gamma_{korkuluk} \times 2}{k_s} \quad (2.5)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $\gamma_{korkuluk}$ korkuluğun birim uzunluğunun ağırlığını göstermektedir. Cephe elemanın ağırlığından dolayı bir kirişe aktarılan sabit yük,

$$W_{DL6} = \frac{\gamma_{cephe_elemanı} \times h_{cephe_elemanı} \times t_{cephe_elemanı} \times 2}{k_s} \quad (2.6)$$

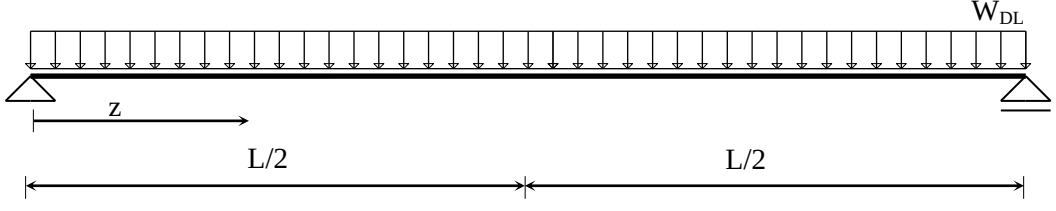
şeklinde belirlenmektedir. Burada, $\gamma_{cephe_elemanı}$ cephe elemanının birim hacim ağırlığını, $h_{cephe_elemanı}$ cephe elemanının yüksekliğini ve $t_{cephe_elemanı}$ ise cephe elemanının kalınlığını göstermektedir. Bu çalışmada yaya yükleri, hesaplarda kolaylık sağlanması açısından sabit yük olarak dikkate alınmıştır. Yaya yükünden dolayı bir kirişe aktarılan sabit yük,

$$W_{DL7} = \frac{\gamma_{yaya} \times w_{kaldırım}}{k_s} \quad (2.7)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada, γ_{yaya} yaya yükü değerini ve $w_{kaldırım}$ ise toplam kaldırım genişliğini göstermektedir. Asfalt kaplama, bordür, korkuluk, cephe elemanları ve yaya yüklerinin toplamı ilave kalıcı yük olarak adlandırılıp W_{ilave} olarak gösterilmektedir. Bir kirişe etki eden toplam ilave kalıcı yük,

$$W_{ilave} = W_{DL3} + W_{DL4} + W_{DL5} + W_{DL6} + W_{DL7} \quad (2.8)$$

şeklinde belirlenmektedir. Sabit yüklerden dolayı bir kirişte meydana gelen yük dağılımı Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sabit yüklerden dolayı kirişte oluşan yayılı yük dağılımı

Basit kiriş kabulü ile sabit yüklerden dolayı kirişte meydana gelen eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla,

$$M = \frac{W_{DL} \times z \times (L - z)}{2} \quad (2.9)$$

$$V = \frac{W_{DL}(L - 2z)}{2} \quad (2.10)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada, L kiriş boyunu, z köprü mesnedinden eğilme momenti veya kesme kuvveti istenilen kesite olan mesafeyi, W_{DL} ise sabit yükün değerini göstermektedir.

2.3.2. Hareketli Yüklerin Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri

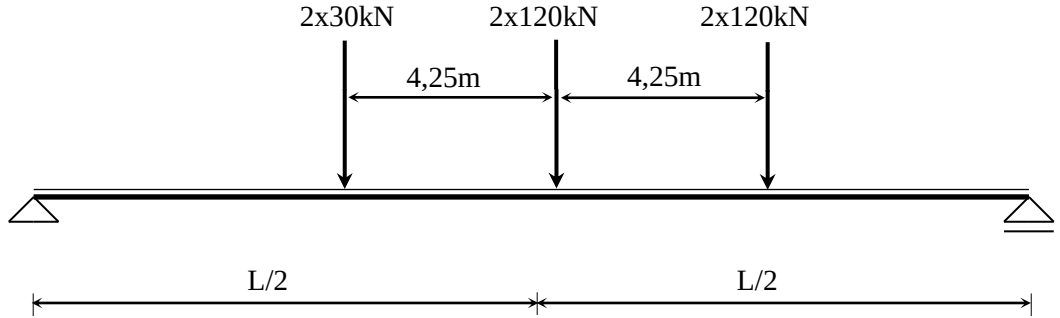
Bu çalışmada hareketli yük modeli olarak ülkemizde kullanılmakta olan $H_{30}S_{24}$ ve AASHTO LRFD (2012)'de tanımlanan HL93 tasarım kamyonları dikkate alınmıştır. Bu kamyonların etkisi altında köprü kirişlerinde meydana gelen kesit tesirleri ayrı ayrı belirlenmiş olup kesme kuvvetlerinin birimi kN, eğilme momentlerinin birimi ise kNm cinsindendir. Burada belirlenen kesit tesirleri hareketli yük dağılım katsayısı ile çarpılmamış değerleri göstermektedir.

2.3.2.1. $H_{30}S_{24}$ Tasarım Kamyonunun Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri

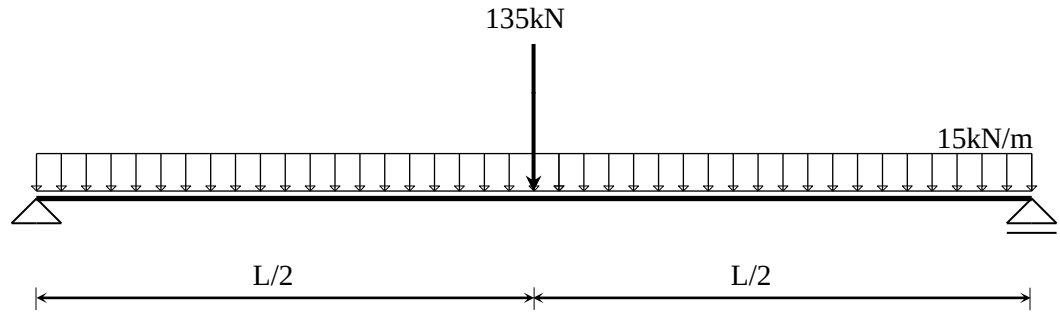
Ülkemizde hareketli araç yükü için kullanılmakta olan $H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonu için iki tane elverişsiz yükleme durumu bulunmaktadır. Bunlar,

- Tasarım kamyonunun tek başına etki etmesi (Şekil 2.3)
- Tasarım kamyonunun tasarım şerit yükü ile birlikte etki etmesi (Şekil 2.4)

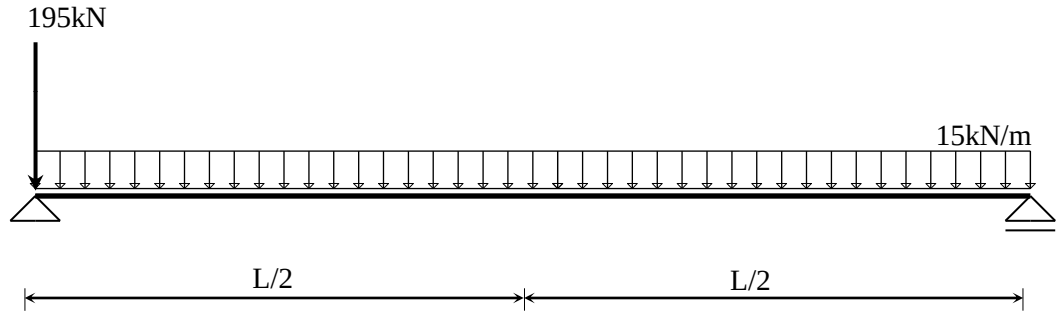
durumlarını kapsamaktadır.



Şekil 2.3. $H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonunun tek başına etki etkimesi durumu



(a) Eğilme momenti için



(b) Kesme kuvveti için

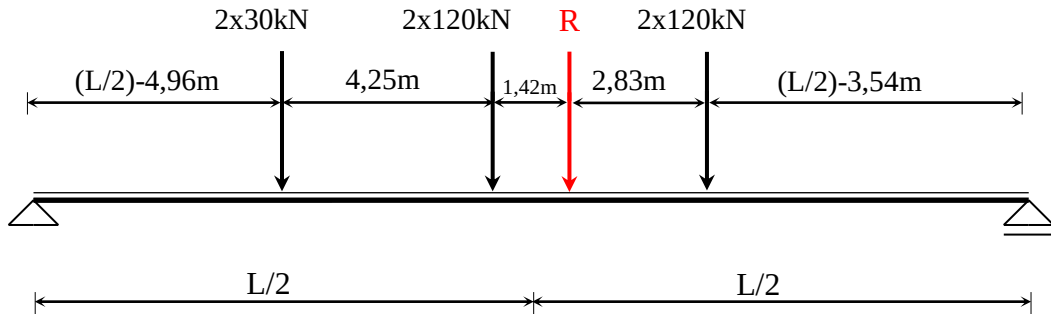
Şekil 2.4. $H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonu şerit yükleme için basit kiriş üzerine (a) eğilme momenti için, (b) kesme kuvveti için elverişsiz yerleşimi

Tasarım kamyonunun tasarım şerit yükü ile birlikte etkimesi durumunda eğilme momenti ve kesme kuvveti için iki farklı yükleme durumu söz konusu olmaktadır. Bu yükleme durumları için kullanılan tekil yükün değeri ve konumu eğilme momenti ve

kesme kuvveti için farklılık göstermekte olup iki durum için de kullanılan tasarım şerit yükü aynıdır. Tasarım şerit yükünün düzgün yayılı olarak köprü boyunca dağılmış olduğu ve 3,00m'lik bir genişliği kapladığı kabul edilmektedir. Köprü üstyapısının tasarımında, tasarım kamyonunun tek başına ve tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumlarından elde edilen en büyük kesit tesirleri kullanılmaktadır.

2.3.2.1.1. H₃₀S₂₄ Tasarım Kamyonunun Tek Başına Etki Etmesi Durumu

H₃₀S₂₄ tasarım kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda en büyük eğilme momentini meydana getiren H₃₀S₂₄ kamyonunun kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekilde R, H₃₀S₂₄ kamyonu dingil yüklerinin bileşkesini göstermektedir. R bileşke kuvveti ile bu kuvvetin solundaki 120kN'luk dingil yükü arasındaki mesafenin orta noktası, kirişin orta noktasına denk gelecek şekilde H₃₀S₂₄ kamyonu yerleştirildiğinde, en büyük eğilme momentini bileşke kuvvetin solundaki 120kN'luk dingil yükünün altındaki kesitte meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. En büyük eğilme momentini için H₃₀S₂₄ kamyonunun konumu

Kiriş boyu 9,92m'den büyük ya da eşit olduğunda kirişte meydana gelen en büyük eğilme momentini,

$$M_{\text{maks-H}_{30}\text{S}_{24}} = \frac{67,5L^2 - 318,75L + 135,47}{L} \quad (L \geq 9,92\text{m}) \quad (2.11)$$

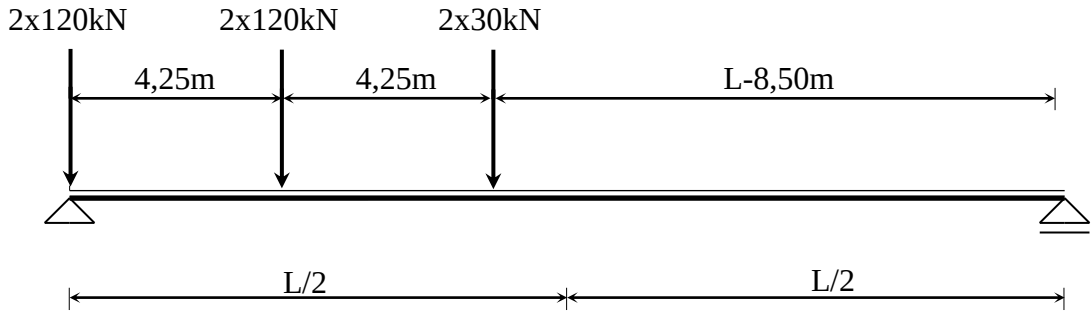
şeklinde belirlenmektedir.

Kiriş boyu 9,92m'den küçük olduğu zaman $H_{30}S_{24}$ kamyonunun ön dingili kirişin dışına çıkmaktadır. Bu durumda kirişte meydana gelen en büyük eğilme momenti ise,

$$M_{\text{maks-}H_{30}S_{24}} = \frac{60L^2 - 255L + 241,12}{L} \quad (L < 9,92\text{m}) \quad (2.12)$$

şeklinde belirlenmektedir.

$H_{30}S_{24}$ kamyonunun tek başına etki etkimesi durumunda en büyük kesme kuvvetini meydana getiren $H_{30}S_{24}$ kamyonunun kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.6'da görülmektedir. $H_{30}S_{24}$ kamyonu bu konumda iken en büyük kesme kuvveti, kirişin sol mesnet hizasında bulunan 120kN'luk dingil yükünün altındaki kesitte meydana gelmektedir.



Şekil 2.6. En büyük kesme kuvveti için $H_{30}S_{24}$ kamyonunun konumu

Farklı kiriş boyları için kirişte oluşan en büyük kesme kuvveti,

$$V_{\text{maks}} = 120 + 120 \times \left(\frac{L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 8,50\text{m})$$

$$V_{\text{maks}} = 120 + 120 \times \left(\frac{L - 4,25}{L} \right) \quad (4,25\text{m} \leq L < 8,50\text{m}) \quad (2.13)$$

$$V_{\text{maks}} = 120 \quad (L < 4,25\text{m})$$

şeklinde belirlenmektedir.

Kirişte oluşan kesme kuvveti dağılımını elde etmek için kirişin 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L kesitleri dikkate alınmıştır. H₃₀S₂₄ kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda, farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,1L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
 V_{0,1L} &= 108 + 120 \times \left(\frac{0,9L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{0,9L - 8,50}{L} \right) & (L \geq 9,44\text{m}) \\
 V_{0,1L} &= 108 + 120 \times \left(\frac{0,9L - 4,25}{L} \right) & (4,72\text{m} \leq L < 9,44\text{m}) \\
 V_{0,1L} &= 108 & (L < 4,72\text{m})
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

şeklinde belirlenmektedir. H₃₀S₂₄ kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda, farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,2L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
 V_{0,2L} &= 96 + 120 \times \left(\frac{0,8L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{0,8L - 8,50}{L} \right) & (L \geq 10,63\text{m}) \\
 V_{0,2L} &= 96 + 120 \times \left(\frac{0,8L - 4,25}{L} \right) & (5,31\text{m} \leq L < 10,63\text{m}) \\
 V_{0,2L} &= 96 & (L < 5,31\text{m})
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

şeklinde belirlenmektedir. H₃₀S₂₄ kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda, farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,3L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
 V_{0,3L} &= 84 + 120 \times \left(\frac{0,7L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{0,7L - 8,50}{L} \right) & (L \geq 12,14\text{m}) \\
 V_{0,3L} &= 84 + 120 \times \left(\frac{0,7L - 4,25}{L} \right) & (6,07\text{m} \leq L < 12,14\text{m}) \\
 V_{0,3L} &= 84 & (L < 6,07\text{m})
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

şeklinde belirlenmektedir. H₃₀S₂₄ kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda, farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,4L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,4L} = 72 + 120 \times \left(\frac{0,6L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{0,6L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 14,17\text{m})$$

$$V_{0,4L} = 72 + 120 \times \left(\frac{0,6L - 4,25}{L} \right) \quad (7,08\text{m} \leq L < 14,17\text{m}) \quad (2.17)$$

$$V_{0,4L} = 72 \quad (L < 7,08\text{m})$$

şeklinde belirlenmektedir. H₃₀S₂₄ kamyonunun tek başına etki etmesi durumunda, farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,5L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,5L} = 60 + 120 \times \left(\frac{0,5L - 4,25}{L} \right) + 30 \times \left(\frac{0,5L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 17,00\text{m})$$

$$V_{0,5L} = 60 + 120 \times \left(\frac{0,5L - 4,25}{L} \right) \quad (8,50\text{m} \leq L < 17,00\text{m}) \quad (2.18)$$

$$V_{0,5L} = 60 \quad (L < 8,50\text{m})$$

şeklinde belirlenmektedir.

2.3.2.1.2. H₃₀S₂₄ Tasarım Kamyonunun Tasarım Şerit Yüğüyle Birlikte Etki Etmesi Durumu

H₃₀S₂₄ tasarım kamyonunun tasarım şerit yüğüyle birlikte etki etmesi durumu dikkate alındığında kirişte en büyük eğilme momentini veren yükleme durumu Şekil 2.4a'da gösterilmektedir. Bu yükleme durumu altında kirişte oluşan en büyük eğilme momenti,

$$M_{maks} = 33,75L + 1,88L^2 \quad (2.19)$$

şeklinde belirlenmektedir. $H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumu dikkate alındığında kirişteki en büyük kesme kuvvetini veren yükleme durumu Şekil 2.4b’de gösterilmektedir. Bu yükleme durumu altında kirişte oluşan en büyük kesme kuvveti,

$$V_{maks} = 195 + 7,50L \quad (2.20)$$

şeklinde belirlenmektedir. $H_{30}S_{24}$ kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnedinden 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L uzaklıktaki kesitlerde oluşan kesme kuvvetleri sırasıyla,

$$V_{0,1L} = 175,50 + 6,08L \quad (2.21)$$

$$V_{0,2L} = 156 + 4,80L \quad (2.22)$$

$$V_{0,3L} = 136,50 + 3,68L \quad (2.23)$$

$$V_{0,4L} = 117,00 + 2,70L \quad (2.24)$$

$$V_{0,5L} = 97,50 + 1,88L \quad (2.25)$$

şeklinde belirlenmektedir.

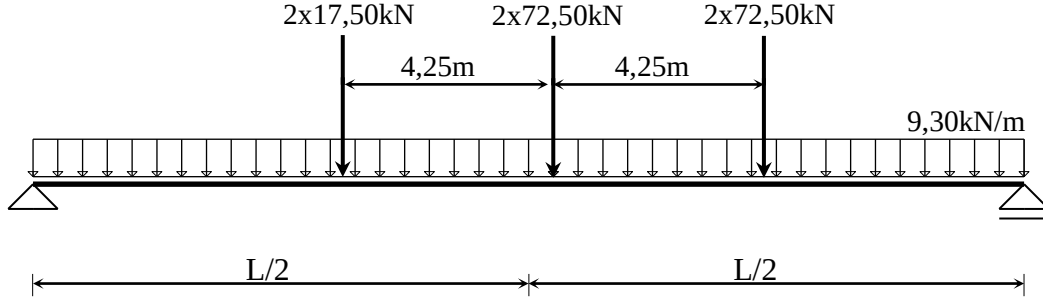
2.3.2.2. HL93 Tasarım Kamyonunun Kirişte Oluşturduğu Kesit Tesirleri

AASHTO LRFD (2012)’de hareketli araç yükü için iki tane elverişsiz yükleme durumu bulunmaktadır. Bunlar,

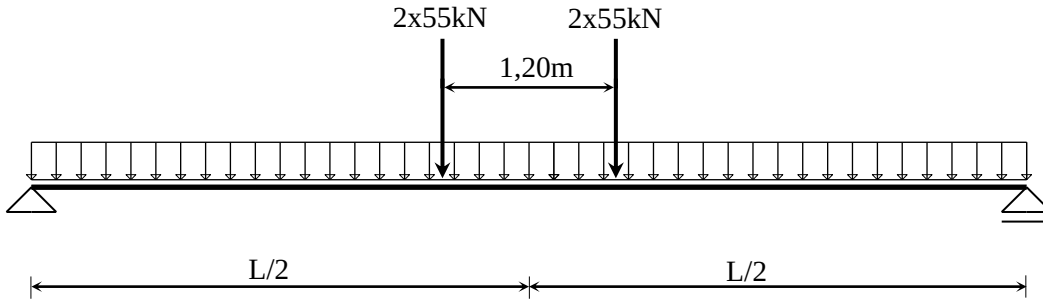
- Tasarım kamyonu HL93’ün tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi (Şekil 2.7)
- Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi (Şekil 2.8)

şeklindedir. Tasarım şerit yükünün düzgün yayılı olarak köprü boyunca dağılmış olduğu ve 3,00m’lik bir genişliği kapladığı kabul edilmektedir. Köprü üstyapısının tasarımında,

tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle ve tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumlarından elde edilen en büyük kesit tesirleri kullanılmaktadır.



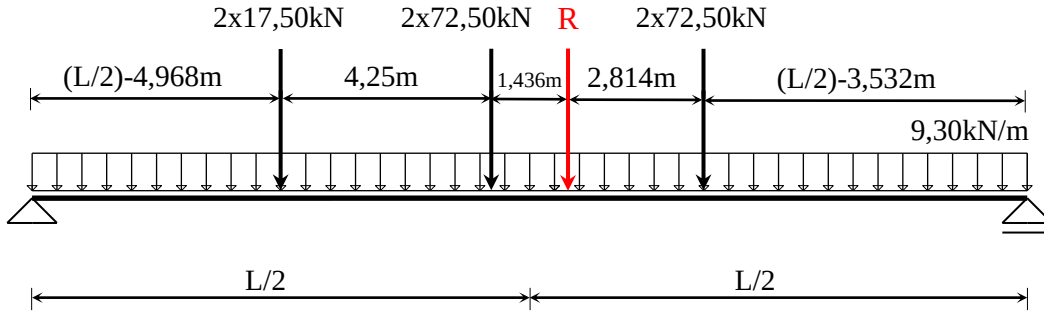
Şekil 2.7. HL93 tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumu



Şekil 2.8. Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumu

2.3.2.2.1. HL93 Tasarım Kamyonunun Tasarım Şerit Yüküyle Birlikte Etki Etmesi Durumu

HL93 tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda en büyük eğilme momenti meydana getiren HL93 kamyonunun kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Şekilde R, HL93 kamyonunun dingil yüklerinin bileşkesini göstermektedir. En büyük eğilme momenti, R bileşke kuvveti ile bu kuvvetin solundaki 72,50kN’luk dingil yükü arasındaki mesafenin orta noktası, kirişin orta noktasına denk gelecek şekilde HL93 kamyonu yerleştirildiğinde bileşke kuvvetin solundaki 72,50kN’luk dingil yükünün altındaki kesitte meydana gelmektedir.



Şekil 2.9. En büyük eğilme momenti için HL93 kamyonunun konumu

Kiriş boyu 9,936m'den büyük ya da eşit olması durumunda kirişte meydana gelen en büyük eğilme momenti,

$$M_{\text{maks-HL93}} = \frac{40,625L^2 - 191,25L + 84,062}{L}$$

$$M_{\text{maks-şerit}} = 1,1625L^2 - 2,397 \quad (L \geq 9,936\text{m}) \quad (2.26)$$

$$M_{\text{maks}} = M_{\text{maks-HL93}} + M_{\text{maks-şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. Kiriş boyu 9,936m'den küçük olduğu zaman HL93 kamyonunun ön dingili kirişin dışına çıkmaktadır. Bu durumda ise kirişte meydana gelen en büyük eğilme momenti,

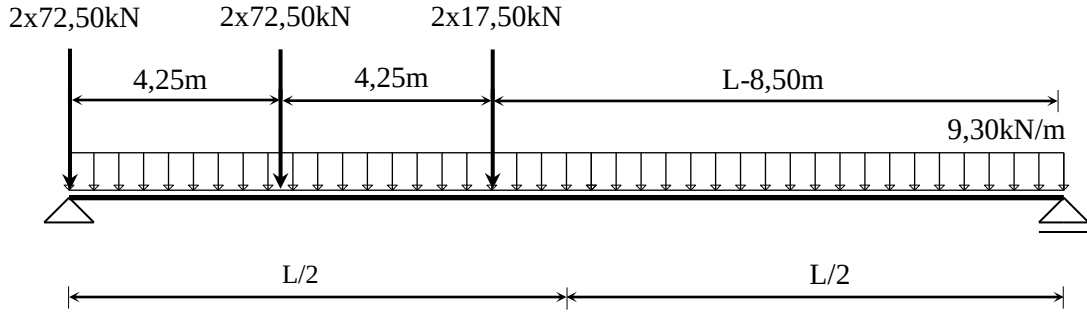
$$M_{\text{maks-HL93}} = \frac{36,25L^2 - 154,0625L + 146,4844}{L}$$

$$M_{\text{maks-şerit}} = 1,1625L^2 - 2,397 \quad (L < 9,936\text{m}) \quad (2.27)$$

$$M_{\text{maks}} = M_{\text{maks-HL93}} + M_{\text{maks-şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $M_{\text{maks-HL93}}$ HL93 tasarım kamyonundan, $M_{\text{maks-şerit}}$ tasarım şerit yükünden, M_{maks} HL93 tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumu dikkate alındığında oluşan en büyük eğilme momentini göstermektedir.

HL93 tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda en büyük kesme kuvveti meydana getiren HL93 kamyonunun kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.10'da gösterilmektedir. HL93 kamyonu Şekil 2.10'daki gibi yerleşmesi durumunda en büyük kesme kuvveti kirişin sol mesnet hizasında bulunan 72,50kN'luk dingil yükünün altındaki kesitte meydana gelmektedir.



Şekil 2.10. En büyük kesme kuvveti için HL93 kamyonunun konumu

Farklı kiriş boyları için kirişte oluşan en büyük kesme kuvveti,

$$V_{\text{maks-HL93}} = 72,5 + 72,5 \times \left(\frac{L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 8,50 \text{ m})$$

$$V_{\text{maks-HL93}} = 72,5 + 72,5 \times \left(\frac{L - 4,25}{L} \right) \quad (4,25 \text{ m} \leq L < 8,50 \text{ m})$$

$$V_{\text{maks-HL93}} = 72,5 \quad (L < 4,25 \text{ m}) \quad (2.28)$$

$$V_{\text{maks-şerit}} = 4,65L$$

$$V_{\text{maks}} = V_{\text{maks-HL93}} + V_{\text{maks-şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $V_{\text{maks-HL93}}$ HL93 tasarım kamyonundan, $V_{\text{maks-şerit}}$ tasarım şerit yükünden, V_{maks} HL93 tasarım kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda oluşan en büyük kesme kuvvetini göstermektedir.

Kirişte oluşan kesme kuvveti dağılımını elde etmek için kiriş mesnetinden 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L uzaklıktaki kesitler dikkate alınmıştır. HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,1L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,1L-HL93} = 65,25 + 72,5 \times \left(\frac{0,9L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{0,9L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 9,44\text{m})$$

$$V_{0,1L-HL93} = 65,25 + 72,5 \times \left(\frac{0,9L - 4,25}{L} \right) \quad (4,72\text{m} \leq L < 9,44\text{m})$$

$$V_{0,1L-HL93} = 65,25 \quad (L < 4,72 \text{ m}) \quad (2.29)$$

$$V_{0,1L-\text{şerit}} = 3,77L$$

$$V_{0,1L} = V_{0,1L-HL93} + V_{0,1L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,2L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,2L-HL93} = 58 + 72,5 \times \left(\frac{0,8L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{0,8L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 10,625\text{m})$$

$$V_{0,2L-HL93} = 58 + 72,5 \times \left(\frac{0,8L - 4,25}{L} \right) \quad (5,3125 \text{ m} \leq L < 10,625\text{m})$$

$$V_{0,2L-HL93} = 58 \quad (L < 5,3125\text{m}) \quad (2.30)$$

$$V_{0,2L-\text{şerit}} = 2,976L$$

$$V_{0,2L} = V_{0,2L-HL93} + V_{0,2L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir.

HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı giriş boyları için giriş mesnetinden 0,3L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,3L-HL93} = 50,75 + 72,5 \times \left(\frac{0,7L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{0,7L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 12,142\text{m})$$

$$V_{0,3L-HL93} = 50,75 + 72,5 \times \left(\frac{0,7L - 4,25}{L} \right) \quad (6,071\text{m} \leq L < 12,142\text{m})$$

$$V_{0,3L-HL93} = 50,75 \quad (L < 6,071 \text{ m}) \quad (2.31)$$

$$V_{0,3L-\text{şerit}} = 2,2785L$$

$$V_{0,3L} = V_{0,3L-HL93} + V_{0,3L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı giriş boyları için giriş mesnetinden 0,4L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,4L-HL93} = 43,5 + 72,5 \times \left(\frac{0,6L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{0,6L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 14,167\text{m})$$

$$V_{0,4L-HL93} = 43,5 + 72,5 \times \left(\frac{0,6L - 4,25}{L} \right) \quad (7,083\text{m} \leq L < 14,167\text{m})$$

$$V_{0,4L-HL93} = 43,5 \quad (L < 7,083\text{m}) \quad (2.32)$$

$$V_{0,4L-\text{şerit}} = 1,674L$$

$$V_{0,4L} = V_{0,4L-HL93} + V_{0,4L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir.

HL93 kamyonunun tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,5L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,5L-HL93} = 36,25 + 72,5 \times \left(\frac{0,5L - 4,25}{L} \right) + 17,5 \times \left(\frac{0,5L - 8,50}{L} \right) \quad (L \geq 17m)$$

$$V_{0,5L-HL93} = 36,25 + 72,5 \times \left(\frac{0,5L - 4,25}{L} \right) \quad (8,50m \leq L < 17m)$$

$$V_{0,5L-HL93} = 36,25 \quad (L < 8,50m) \quad (2.33)$$

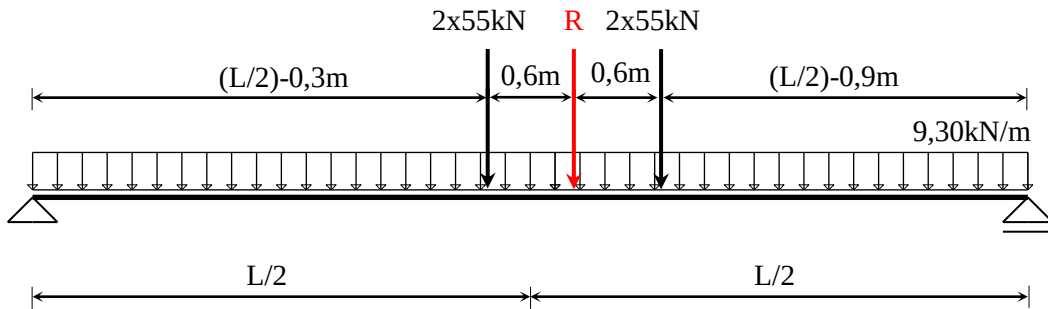
$$V_{0,5L-\text{şerit}} = 1,1625L$$

$$V_{0,5L} = V_{0,5L-HL93} + V_{0,5L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir

2.3.2.2.2. Tasarım Tandeminin Tasarım Şerit Yüküyle Birlikte Etki Etmesi Durumu

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda en büyük eğilme momentini meydana getiren tasarım tandeminin kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. En büyük eğilme momenti için tasarım tandem konumu

Şekilde R, tasarım tandeminin dingil yüklerinin bileşkesini göstermektedir. R bileşke kuvveti ile bu kuvvetin solundaki 55 kN'lık dingil yükü arasındaki mesafenin orta noktası,

kirişin orta noktasına denk gelecek şekilde tasarım tandemi yerleştirildiğinde bileşke kuvvetin solundaki 55kN’luk dingil yükünün altındaki kesitte en büyük eğilme momenti meydana gelmektedir. Kirişte oluşan en büyük eğilme momenti,

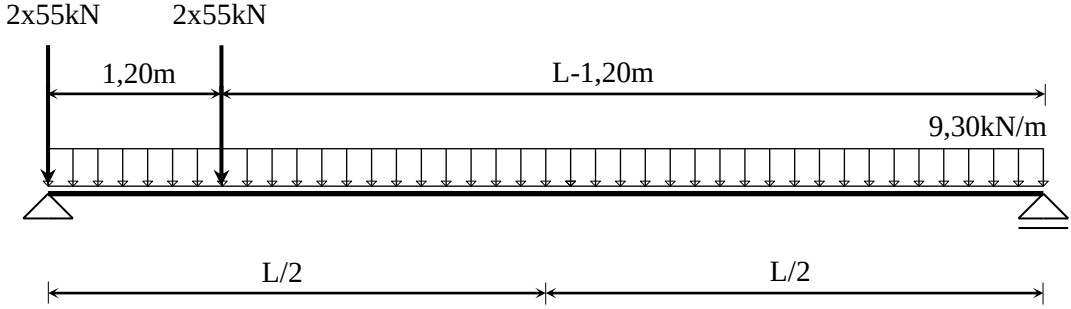
$$M_{\text{maks-tandem}} = \frac{27,5L^2 - 33L + 9,9}{L}$$

$$M_{\text{maks-şerit}} = 1,1625L^2 - 0,4185 \quad (L \geq 1,2\text{m}) \quad (2.34)$$

$$M_{\text{maks}} = M_{\text{maks-tandem}} + M_{\text{maks-şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $M_{\text{maks-tandem}}$ tasarım tandeminden, $M_{\text{maks-şerit}}$ tasarım şerit yükünden, M_{maks} tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda meydana gelen en büyük eğilme momentini göstermektedir.

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda en büyük kesme kuvvetini meydana getiren tasarım tandeminin kiriş üzerindeki konumu Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12. En büyük kesme kuvveti için tasarım tandeminin konumu

Tasarım tandemi Şekil 2.12’deki gibi yerleştirildiğinde en büyük kesme kuvveti, kirişin sol mesnet hizasında bulunan 55kN’luk dingil yükünün altındaki kesitte meydana gelmektedir.

Kirişte oluşan en büyük kesme kuvveti,

$$V_{\text{maks-tandem}} = 55 + 55 \times \left(\frac{L-1,2}{L} \right) \quad (L \geq 1,20\text{m})$$

$$V_{\text{maks-tandem}} = 55 \quad (L < 1,20\text{m})$$
(2.35)

$$V_{\text{maks-şerit}} = 4,65L$$

$$V_{\text{maks}} = V_{\text{maks-tandem}} + V_{\text{maks-şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada $V_{\text{maks-tandem}}$, $V_{\text{maks-şerit}}$ ve V_{maks} sırasıyla tasarım tandemi, tasarım şerit yükü ve tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etkimesi durumunda oluşan en büyük kesme kuvvetini göstermektedir.

Kirişte oluşan kesme kuvveti dağılımını elde etmek için kirişin mesnetinden 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L uzaklıktaki kesitleri dikkate alınmıştır. Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,1L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,1L\text{-tandem}} = 49,5 + 55 \times \left(\frac{0,9L-1,2}{L} \right) \quad (L \geq 1,33\text{m})$$

$$V_{0,1L\text{-tandem}} = 49,5 \quad (L < 1,33\text{m})$$
(2.36)

$$V_{0,1L\text{-şerit}} = 3,7665L$$

$$V_{0,1L} = V_{0,1L\text{-tandem}} + V_{0,1L\text{-şerit}}$$

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,2L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
V_{0,2L\text{-tandem}} &= 44 + 55 \times \left(\frac{0,8L - 1,2}{L} \right) & (L \geq 1,5\text{m}) \\
V_{0,2L\text{-tandem}} &= 44 & (L < 1,5\text{m}) \\
V_{0,2L\text{-şerit}} &= 2,976L \\
V_{0,2L} &= V_{0,2L\text{-tandem}} + V_{0,2L\text{-şerit}}
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için, kiriş mesnetinden 0,3L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
V_{0,3L\text{-tandem}} &= 38,5 + 55 \times \left(\frac{0,7L - 1,2}{L} \right) & (L \geq 1,714\text{m}) \\
V_{0,3L\text{-tandem}} &= 38,5 & (L < 1,714\text{m}) \\
V_{0,3L\text{-şerit}} &= 2,2785L \\
V_{0,3L} &= V_{0,3L\text{-tandem}} + V_{0,3L\text{-şerit}}
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,4L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$\begin{aligned}
V_{0,4L\text{-tandem}} &= 33 + 55 \times \left(\frac{0,6L - 1,2}{L} \right) & (L \geq 2,0\text{m}) \\
V_{0,4L\text{-tandem}} &= 33 & (L < 2,0\text{m}) \\
V_{0,4L\text{-şerit}} &= 1,674L \\
V_{0,4L} &= V_{0,4L\text{-tandem}} + V_{0,4L\text{-şerit}}
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Tasarım tandeminin tasarım şerit yüküyle birlikte etki etmesi durumunda farklı kiriş boyları için kiriş mesnetinden 0,5L uzaklıktaki kesitte oluşan kesme kuvveti,

$$V_{0,5L-tandem} = 27,5 + 55 \times \left(\frac{0,5L - 1,2}{L} \right) \quad (L \geq 2,4\text{m})$$

$$V_{0,5L-tandem} = 27,5 \quad (L < 2,4\text{m})$$
(2.40)

$$V_{0,5L-\text{şerit}} = 1,1625L$$

$$V_{0,5L} = V_{0,5L-tandem} + V_{0,5L-\text{şerit}}$$

şeklinde belirlenmektedir.

2.4. Kiriş Enkesit Özelliklerinin Belirlenmesi

2.4.1. Kiriş Ağırlık Merkezi

Ağırlık, bir cisme uygulanan kütle çekim kuvvetidir. Ağırlık merkezi ise cismi oluşturan parçacıkların üzerine etki eden yerçekimi kuvvetlerinin bileşkesinin uygulama noktası olarak tanımlanmaktadır. Bir cismin ağırlık merkezinin x ve y eksenlerine olan mesafeleri sırasıyla,

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.41)$$

$$y_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.42)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Burada A_i , x_i ve y_i sırasıyla i nolu parçanın kesit alanını, ağırlık merkezinin x ve y eksenine olan mesafesini göstermektedir. Şekil 1.13 ve 1.14'te

verilen prefabrik ve kompozit kiriş kesitlerinin ağırlık merkezleri ve enkesitleri için gerekli hesaplamalar Tablo 2.1’de gösterilmektedir. Ağırlık merkezi ve enkesit alanı hesabı yapılırken 1* ile adlandırılmış olan parça ile ilgili değerler sadece kompozit kesitin ağırlık merkezinin hesabında dikkate alınmaktadır.

2.4.2. Kirişin Atalet Momenti

Eylemsizlik kuvveti, kuvvet uygulanan cismin hareket yönüne ters yönde verdiği tepki kuvvetidir. Eylemsizlik momenti veya atalet momenti ise dönme hareketi yapan bir cismin dönme eylemsizliğini ifade etmektedir. Bu çalışmada önerilmeli beton kirişin atalet momentinin hesaplanmasında paralel eksenler teoreminden yararlanılmıştır. Paralel eksenler teoremi; kütle merkezinden geçen eksene göre atalet momenti bilinen bir cismin bu eksenenden d uzaklıktaki eksene göre atalet momentini belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu doğrultuda prefabrik ve kompozit kiriş kesiti, hesaplarda kolaylık sağlaması için şekil geometrisi bilinen parçalara ayrılmıştır (Şekil 1.13 ve Şekil 1.14). Bu parçaların kütle merkezinden geçen eksenlere göre atalet momentleri Tablo 2.2’de verilmektedir. Atalet momenti hesabı yapılırken 1* ile adlandırılmış olan parça ile ilgili değerler sadece kompozit kesitin atalet momentinin hesabında dikkate alınmaktadır. Paralel eksenler teoremiyle kesitin x ve y eksenine göre atalet momentleri sırasıyla,

$$I_x = I_{xi} + A_i d_y^2 \quad (2.43)$$

$$I_y = I_{yi} + A_i d_x^2 \quad (2.44)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada I_{xi} , I_{yi} , A_i , d_y ve d_x sırasıyla kesitin kütle merkezinden geçen xi eksene göre atalet momentini, kütle merkezinden geçen yi eksene göre atalet momentini, A_i kesitin toplam alanını, x eksenin xi eksenine olan dik uzaklığını ve y eksenin yi eksenine olan dik uzaklığını göstermektedir.

Tablo 2.1 Prefabrik ve kompozit kirişin enkesit alanı ve ağırlık merkezinin hesabı

Parça No	x_i	y_i	A_i	$A_i x_i$	$A_i y_i$
1*	$\frac{b_1}{2}$	$h_{kompozit} - \frac{t_{tab}}{2}$	$b_{tab} \times t_{tab}$	$(b_{tab} \times t_{tab}) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$(b_{tab} \times t_{tab}) \times \left(h_{kompozit} - \frac{t_{tab}}{2}\right)$
1	$\frac{b_1}{2}$	$h_{prefabrik} - \frac{t_1}{2}$	$b_1 \times t_1$	$(b_1 \times t_1) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$(b_1 \times t_1) \times \left(h_{prefabrik} - \frac{t_1}{2}\right)$
2	$\frac{b_1}{2}$	$h_{prefabrik} - t_1 - \frac{t_2(3b_1 - 4b_2)}{6(b_1 - b_2)}$	$(b_1 - b_2) \times t_2$	$(b_1 - b_2) \times t_2 \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$(b_1 - b_2) \times t_2 \times \left(h_{prefabrik} - t_1 - \frac{t_2(3b_1 - 4b_2)}{6(b_1 - b_2)}\right)$
3	$\frac{b_1}{2}$	$h_{prefabrik} - t_1 - t_2 - \frac{t_3(3b_4 + 2b_3)}{6(b_4 + b_3)}$	$\frac{((b_1 - 2 \times b_2) + b_4) \times t_3}{2}$	$\left(\frac{(b_1 - 2 \times b_2) + b_4}{2} \times t_3\right) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$\left(\frac{(b_1 - 2 \times b_2) + b_4}{2} \times t_3\right) \times \left(h_{prefabrik} - t_1 - t_2 - \frac{t_3(3b_4 + 2b_3)}{6(b_4 + b_3)}\right)$
4	$\frac{b_1}{2}$	$t_6 + t_5 + \frac{t_4}{2}$	$b_4 \times t_4$	$(b_4 \times t_4) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$(b_4 \times t_4) \times \left(t_6 + t_5 + \frac{t_4}{2}\right)$
5	$\frac{b_1}{2}$	$t_6 + \frac{t_5(2b_4 + b_3)}{3(b_4 + b_3)}$	$\frac{(b_4 + b_3) \times t_5}{2}$	$\left(\frac{(b_4 + b_3) \times t_5}{2}\right) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$\left(\frac{(b_4 + b_3) \times t_5}{2}\right) \times \left(t_6 + \frac{t_5(2b_4 + b_3)}{3(b_4 + b_3)}\right)$
6	$\frac{b_1}{2}$	$\frac{t_6}{2}$	$b_5 \times t_6$	$(b_5 \times t_6) \times \left(\frac{b_1}{2}\right)$	$(b_5 \times t_6) \times \left(\frac{t_6}{2}\right)$
Toplam			ΣA_i	$\Sigma A_i x_i$	$\Sigma A_i y_i$

Tablo 2.2 Kirişi oluşturan parçaların atalet momentleri

Parça No	I_{xi}	I_{yi}
1*	$\frac{b_{tab} \times t_{tab}^3}{12}$	$\frac{b_{tab}^3 \times t_{tab}}{12}$
1	$\frac{b_1 \times t_1^3}{12}$	$\frac{b_1^3 \times t_1}{12}$
2	$\frac{t_2^3((2b_3 + b_4)^2 + 4b_1(2b_3 + b_4) + b_1^2)}{36(b_1 + 2b_3 + b_4)}$	$\frac{t_2(2b_3 + b_4 + b_1) \times ((2b_3 + b_4)^2 + b_1^2)}{48}$
3	$\frac{t_3^3((2b_3 + b_4)^2 + 4b_4(2b_3 + b_4) + b_1^2)}{72(b_3 + b_4)}$	$\frac{t_3(2b_3 + 2b_4) \times (b_4^2 + (2b_3 + b_4)^2)}{48}$
4	$\frac{b_4 \times t_4^3}{12}$	$\frac{b_4^3 \times t_4}{12}$
5	$\frac{t_5^3(b_4^2 + 4b_4b_5 + b_5^2)}{36(b_4 + b_5)}$	$\frac{t_5(b_4 + b_5) \times (b_4^2 + b_5^2)}{48}$
6	$\frac{b_5 \times t_6^3}{12}$	$\frac{b_5^3 \times t_6}{12}$

2.4.3. Kirişin Mukavemet Momenti

Kirişin atalet momentinin tarafsız eksen ile en uzak lif arasındaki mesafeye olan oranı mukavemet momenti olarak tanımlanmaktadır. Kirişin x ve y eksenine göre mukavemet momenti,

$$W_x = \frac{I_x}{y_g} \quad (2.45)$$

$$W_y = \frac{I_y}{x_g} \quad (2.46)$$

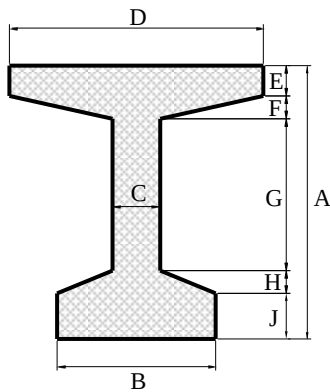
şeklinde belirlenmektedir.

2.5. Öngerme Kablosunun Kiriş Kesitindeki Dağılımının Kirişe Etkisi

Öngerilmeli kirişlerde, kirişin alt başlığına yerleştirilecek olan kablo sayısının belirlenmesi kadar, bu kabloların nasıl yerleştirileceği de oldukça önemli olmaktadır. Öngerme kablosu yerleşim düzeninin kirişe olan etkilerinin belirlenmesi için farklı öngerme kablosu yerleşim düzenine sahip on sekiz adet öngerilmeli I kiriş, ANSYS (2015) sonlu eleman programı ile modellenmiştir. Servis ve aktarma dönemleri için modellerde meydana gelen gerilme, sehim ve kılıflanma parametreleri ayrı ayrı incelenerek en uygun öngerme kablosu yerleşimi belirlenmeye çalışılmıştır.

2.5.1. Öngerilmeli Kiriş Modelleri

Çalışmada, hesap açıklığı 24,8m, yüksekliği 90cm olan basit mesnetli I kiriş örnek olarak seçilmiştir. Kirişin kesiti ve ölçüleri ile ilgili bilgiler sırasıyla Şekil 2.13'te ve Tablo 2.3'te verilmektedir. Örnek olarak seçilen kirişin, karakteristik basınç dayanımı 45MPa olan yüksek dayanımlı beton ile düşük gevşemeli, karakteristik çekme dayanımı 1862MPa olan 1,524cm çaplı öngerme kablosundan oluştuğu varsayılmıştır. Öngerme kabloları kirişin alt başlığına merkezleri arasında 5cm mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir (AASHTO LRFD, 2012). Ayrıca öngerme kablolarının kiriş kesiti boyunca doğrusal olarak yerleştirildiği kabul edilmiştir. Kirişi oluşturan beton ve öngerme kablosu için analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

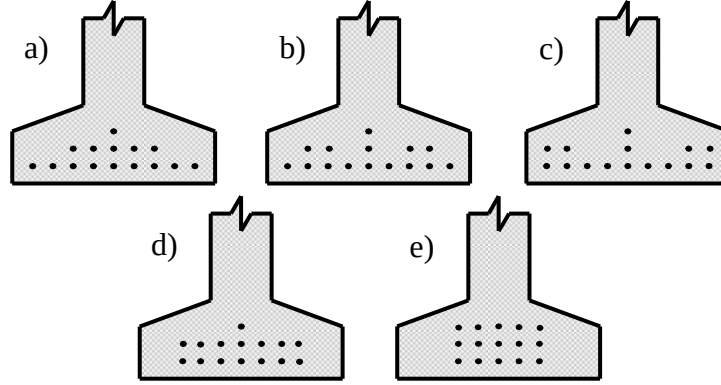


Tablo 2.3.Kirişin kesit ölçüleri

Kesit Ölçüleri (cm)								
A	B	C	D	E	F	G	H	J
90	50	15	80	10	7,5	50	7,5	15

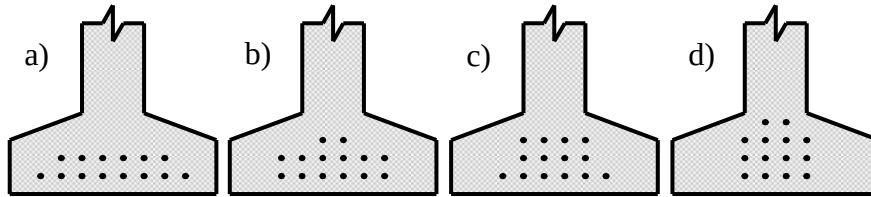
Şekil 2.13. Seçilen kirişin enkesiti

Grup 2’de on beş öngerme kablosuna sahip beş tane kiriş bulunmaktadır. Öngerme kabloları, kirişin her bir sırasında tek sayıda kablo olacak şekilde yerleştirilmiş olup öngerme kabloları düşey doğrultuda aynı hizada bulunmaktadır (Şekil 2.15).



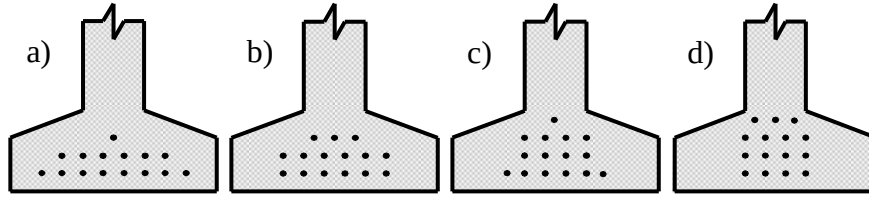
Şekil 2.15. Grup 2 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşim düzeni

Grup 3’te on dört öngerme kablosuna sahip dört adet kiriş bulunmaktadır. Bu gruptaki kirişlerin birinci sırasında en fazla sekiz tane öngerme kablosu bulunmaktadır. Bu grupta bulunan kirişlerin alt başlığının tüm sıralarında çift sayıda öngerme kablosu bulunmaktadır. Ayrıca tüm kablolar düşey doğrultuda aynı hizada olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Grup 3 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşim düzeni

Grup 4’te bulunan kirişler ve kirişlerdeki öngerme kablolarının yerleşim düzeni Şekil 2.17’de görülmektedir. Grup 4’e ait kirişlerde bulunan öngerme kablo sayısı, Grup 3’teki kirişlerde bulunan öngerme kablo sayısından bir fazladır. Bu grupta bulunan tüm kirişlerin en üst sırasındaki öngerme kabloları şaşırtmalı olarak yerleştirilmiştir (Şekil 2.17).

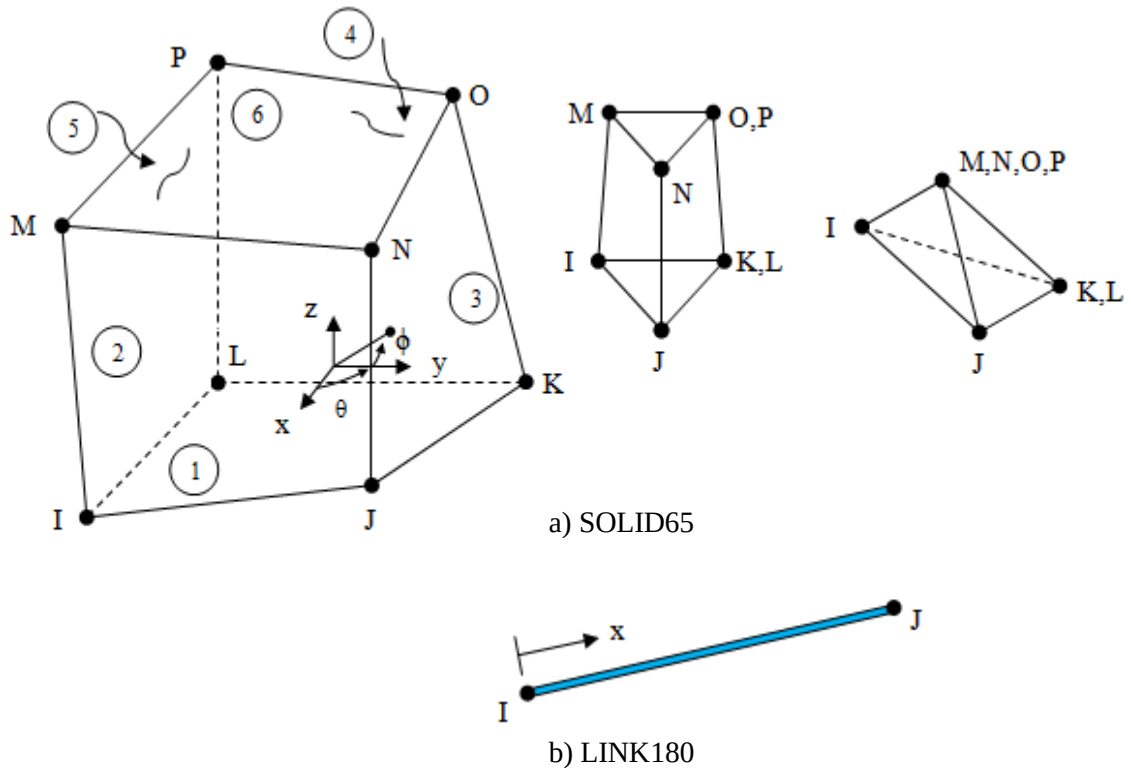


Şekil 2.17. Grup 4 kirişlerindeki öngerme kablolarının yerleşim düzeni

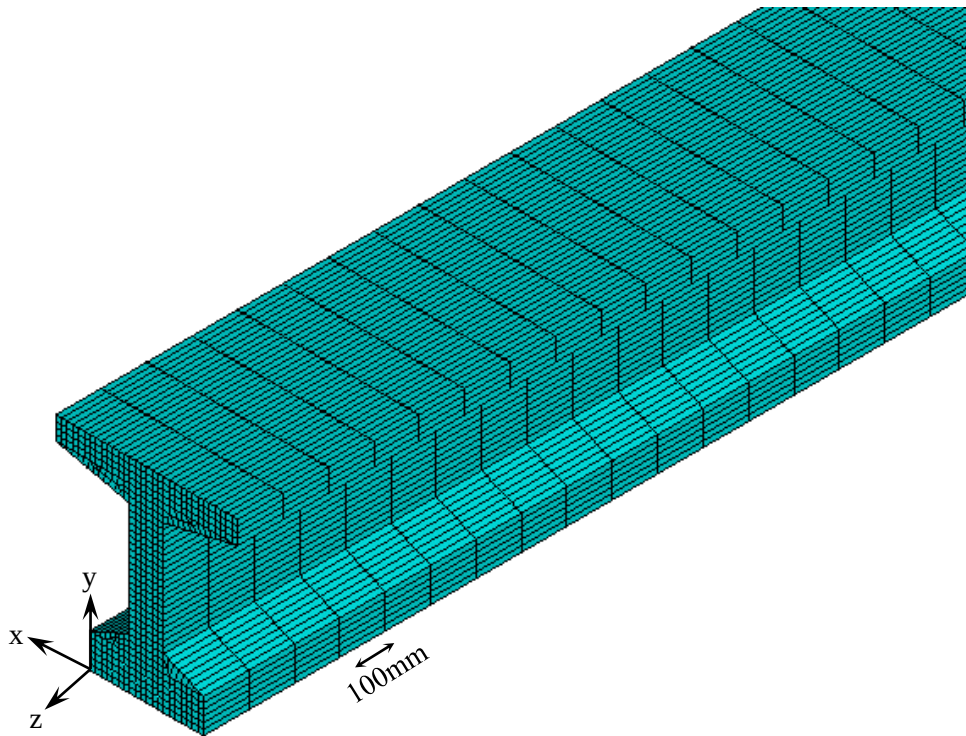
2.5.2. Örnek Kirişlerin Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Örnek olarak seçilen kirişlerin sonlu eleman modelleri ANSYS (2015) programında oluşturulmuştur. Modellemede, ANSYS programının eleman kütüphanesinde bulunan SOLID65 hacimsel elemanı donatısız betonu, LINK180 çubuk elemanı ise beton içerisindeki öngerme kablosunu modellemek için kullanılmıştır (Şekil 2.18). SOLID65 elemanı sekiz düğüm noktasına sahip olup her düğüm noktası üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. SOLID65 elemanı beton ve betonarme elemanların modellenmesinde kullanılan çekmede çatlama, basınçta ezilme, sünme ve plastik deformasyon yapabilme özelliklerini barındıran katı bir elemandır. SOLID65 elemanı, içerisine öngerme kablosu tanımlanmasına izin vermektedir. LINK180 çubuk elemanı ise, iki düğüm noktalı ve her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahip tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır. Çalışma kapsamında oluşturulan model kirişlerdeki öngerme kabloları ile beton arasında tam aderansın olduğu yani beton ve öngerme kablosunun birim şekil değiştirme oranlarının birbirine eşit olduğu kabulü yapılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin önemli aşamalarından biri de sonlu eleman ağının seçilmesidir. Çünkü sonlu eleman ağının seçimi sonuçların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. ANSYS’de sonlu elemanlara ayrılmış beton elemanların düğüm noktaları ile öngerme kablo elemanlarının düğüm noktalarının üst üste çakıştırılması gerekmektedir. Sadece bu şekilde beton ve öngerme kablosunun birlikte çalışması sağlanmaktadır. Beton ve öngerme kablo elemanların düğüm noktalarının üst üste çakıştırılması ancak kontrollü bir ağ seçimi ile mümkün olmaktadır. Bu kapsamda model kirişleri oluşturan elemanlar 25x25x100mm’lik dikdörtgen prizmalara ayrılmıştır. Öngerilmeli kirişin üç boyutlu modelinin sonlu elemanlara ayrılmış hali Şekil 2.19’da görülmektedir. Kirişler, bir tarafı sabit diğer tarafı ise hareketli mesnete sahiptir.



Şekil 2.18. Modellemede kullanılan eleman tipleri

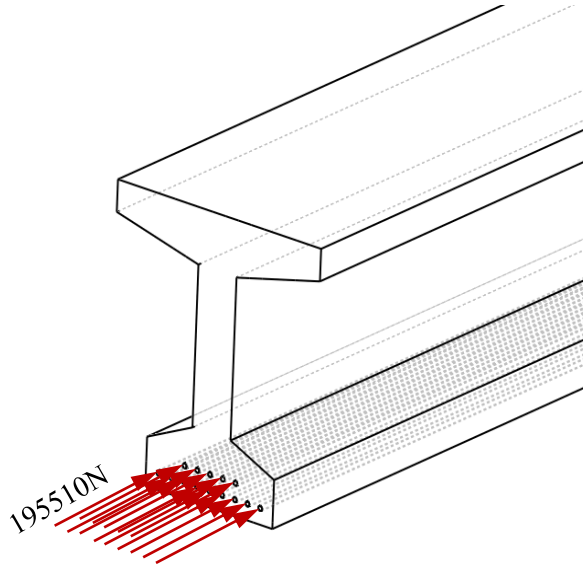


Şekil 2.19. Kirişin sonlu eleman modeli

Kirişlerin analizi servis ve aktarma dönemleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Aktarma dönemi için analizlerde kirişin kendi ağırlığı ve öngerme kuvveti dikkate alınırken servis dönemi için aktarma dönemindeki yüklere ek olarak Tablo 2.6’da verilen yükler de dikkate alınmıştır. Öngerme kablolarına uygulanan öngerme kuvveti ise 195510N ($0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$) olarak dikkate alınmıştır. Bu kuvvetin öngerme kablolarının her iki ucuna aynı anda etki ettiği varsayılmıştır. Şekil 2.20’de öngerme kuvvetinin öngerme kablolarına bir ucundan uygulanma hali görülmektedir. Analizler sırasında öngerme kayıpları dikkate alınmamıştır.

Tablo 2.6 Analizde kullanılan yük değerleri.

Yükler (N/m)	
Yapısal elemanlarda meydana gelen sabit yükler	13700
Yapısal olmayan elemanlarda meydana gelen sabit yükler	5730
Eşdeğer şerit yükü	5670



Şekil 2.20. Öngerme kuvvetinin kablolarına uygulanması

2.5.3. Kirişlerin Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması

Hesap açıklığı, kesit ve malzeme özellikleri aynı öngerme kablosu sayısı ve yerleşim düzeni birbirinden farklı olan on sekiz kirişin sonlu eleman modellerinin doğruluğunu teyit etmek için dört grupta bulunan (a) kirişlerinde, servis dönemi yükleri altında açıklık

ortasındaki kesitin alt ve üst liflerinde ANSYS (2015) programından elde edilen asal gerilmeler birinci mertebe teorisinden elde edilen gerilmeler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2.7).

Tablo 2.7. Asal gerilmelerin karşılaştırılması

Kiriş	Beton Lifi	Gerilme, MPa		Hata %
		Birinci Mertebe Teorisi	ANSYS	
Grup 1 (a)	Üst	-19,723	-19,853	0,65
	Alt	2,690	2,794	3,72
Grup 2 (a)	Üst	-19,491	-19,678	0,95
	Alt	1,150	1,255	8,36
Grup 3 (a)	Üst	-19,995	-19,986	0,05
	Alt	3,009	2,947	2,06
Grup 4 (a)	Üst	-19,771	-19,810	0,08
	Alt	1,291	1,405	8,11

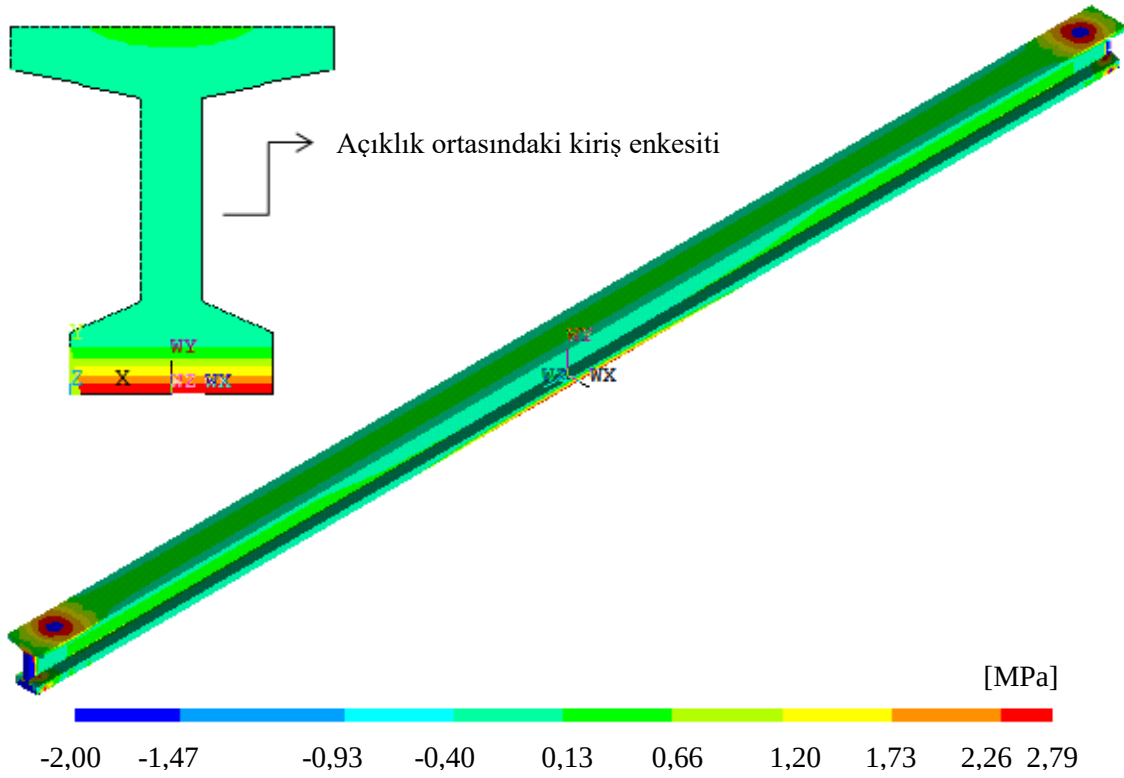
Tablo 2.7 incelendiğinde kirişin üst lifinde sonlu elemanlar yönteminden ve birinci mertebe teorisinden elde edilen asal gerilme değerlerinin uyumlu olduğu ve hata oranının %1'in altında olduğu görülmektedir. Kirişin alt lifindeki gerilme değerleri incelendiğinde ise hata oranının üst life göre arttığı görülmektedir. Kirişin alt lifinde sonlu elemanlar yönteminden ve birinci mertebe teorisinden elde edilen asal gerilmelerin de birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Fakat gerilme değerlerinin küçük olması hata oranını artırmaktadır.

2.5.4. Servis Dönemi Analiz Sonuçları

Bu bölümde, ANSYS (2015) programında sonlu eleman modeli oluşturulmuş on sekiz adet öngerilmeli kirişin sabit, eşdeğer şerit ve öngerme yükleri dikkate alınarak yapılan lineer-statik analizleri sonucunda elde edilen asal gerilme ve sehim değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Servis dönemi yükleri altında kirişin açıklık ortasındaki kesitinde meydana gelen gerilme ve sehim kritik olduğundan bu bölümde kirişlerin açıklık ortasındaki kesitleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.5.4.1. Servis Döneminde Meydana Gelen Asal Gerilmeler

Servis dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, Grup 1 (a) kirişinde meydana gelen asal çekme gerilmelerinin kiriş boyunca ve açıklık ortasındaki kiriş kesitindeki dağılımı Şekil 2.21’de gösterilmektedir. Şekil 2.21 incelendiğinde kirişte meydana gelen asal çekme gerilmelerinin, kirişin açıklık ortasındaki kesitin alt lifinde en büyük değere ulaştığı görülmektedir. Bu kirişte açıklık ortasında meydana gelen en büyük çekme gerilmesi 2,7939MPa olarak elde edilmiştir. Diğer kirişlerin açıklık ortasındaki kesitlerinin alt lifinde meydana gelen çekme gerilmeleri ise Şekil 2.22’de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan çekme gerilmesi dağılımı

Öngerilmeli kirişlerin betonunda çatlak oluşumu istenilmeyen bir durumdur. Çünkü çatlaklar zamanla öngerme kablosu ve yapı çeliğinde korozyon oluşumuna neden olmakta ve bu durum kirişin ömrünü azaltmaktadır. Öngerilmeli kirişlerde çatlak oluşumunu önlemek amacıyla yönetmeliklerde beton için çekme emniyet gerilmesi belirlenmiştir. Bu çalışmada çekme emniyet gerilmesinin belirlenmesinde AASHTO LRFD (2012) yönetmeliği dikkate alınmıştır. Bu yönetmelikte servis dönemi için beton çekme emniyet gerilmesi, öngerme kablosu ve betonarme çeliğinin korozyon durumuna göre

belirlenmektedir. Bu çalışmada öngerme kablolarının korozyon durumunun kötü olmadığı kabulü yapılmış ve belirlenmiş olan çekme emniyet gerilmesi Şekil 2.22’de bulunan grafiklere eklenerek hangi kirişlerin çekme emniyet gerilmesini aştığı belirlenmeye çalışılmıştır.

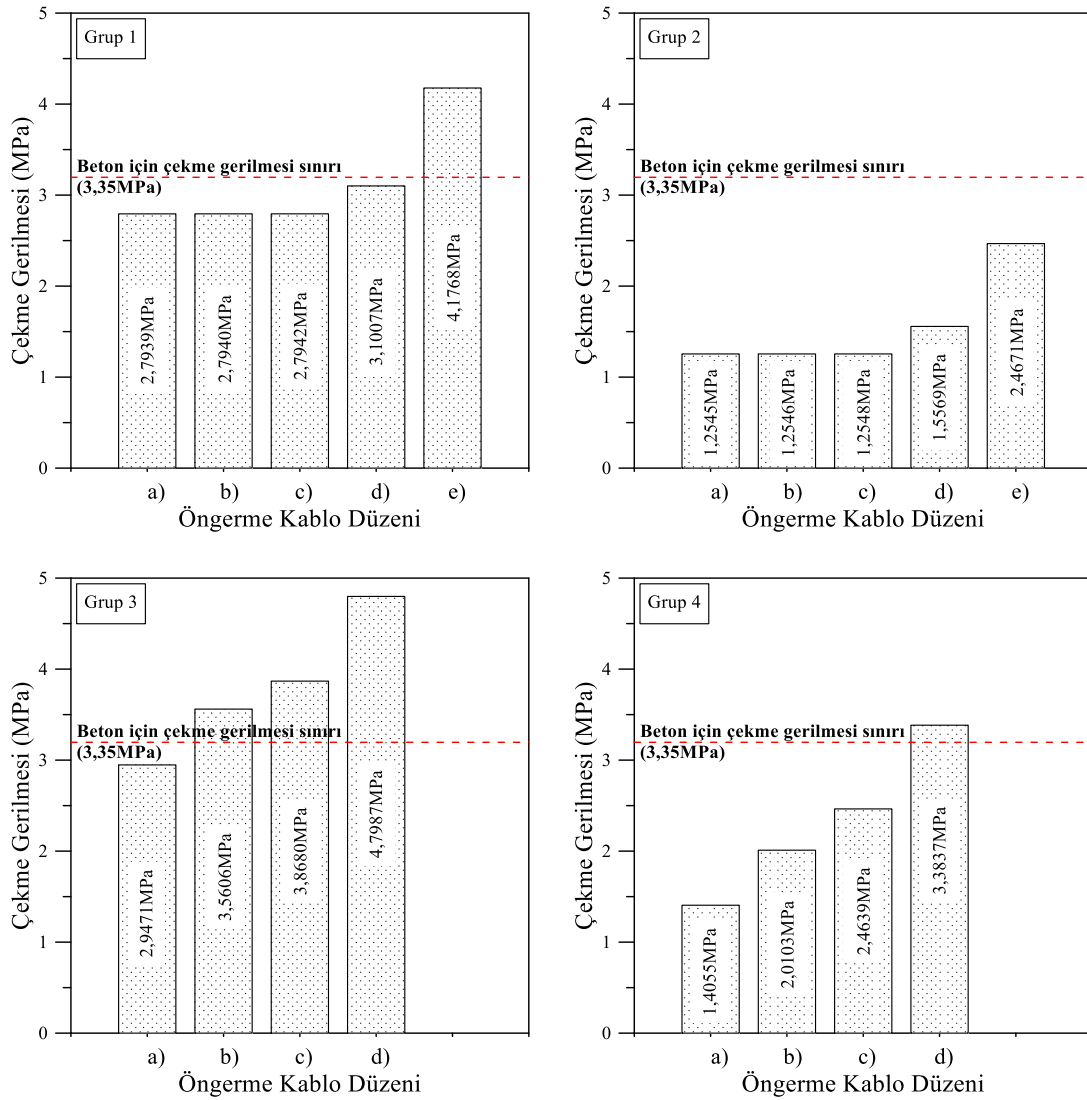
Grup 1 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük çekme gerilmeleri sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde 2,7939MPa ve 4,1768MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan (a), (b) ve (c) kirişlerinde iki sıra öngerme kablosu bulunmaktadır. Bu sıralarda bulunan öngerme kablo sayısı üç kiriş için de aynı olup sadece ikinci sıradaki öngerme kablo dizilimleri birbirinden farklıdır. Bu kirişlerde meydana gelen gerilme değerlerinin küçükte olsa birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Grup 1’de bulunan kirişlerden sadece (e) kirişinde meydana gelen çekme gerilmesinin, beton için belirlenen çekme emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir. Bu sebeple (e) kirişinde çekme çatlağı oluşması beklenmektedir.

Grup 2 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük çekme gerilmeleri sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde 1,2545MPa ve 2,4671MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan (a), (b) ve (c) kirişlerinde üç sıra öngerme kablosu bulunmaktadır. Bu sıralarda bulunan öngerme kablo sayısı üç kiriş için de aynı olup sadece ikinci sıradaki öngerme kablo dizilimleri birbirinden farklıdır. İkinci sırada (a) kirişinde bulunan öngerme kabloları kirişin simetri eksenine en yakın, (c) kirişinde ise en uzak şekilde yerleştirilmiştir. İki kirişte meydana gelen gerilme değerleri incelendiğinde (a) kirişinde oluşan çekme gerilmesinin, (c) kirişinde oluşan çekme gerilmesinden daha az olduğu görülmektedir. Bu grupta bulunan bütün kirişlerde meydana gelen çekme gerilmeleri, betonun çekme emniyet gerilmesinden küçüktür. Bu sebeple bu gruptaki kirişlerin hiçbirinde çekme çatlağı oluşması beklenmemektedir.

Grup 3 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük çekme gerilmeleri sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde 2,9471MPa ve 4,7987MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan (b), (c) ve (d) kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmelerinin, betonun çekme emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir. Bu sebeple (b), (c) ve (d) kirişlerinde çekme çatlağı oluşması beklenmektedir.

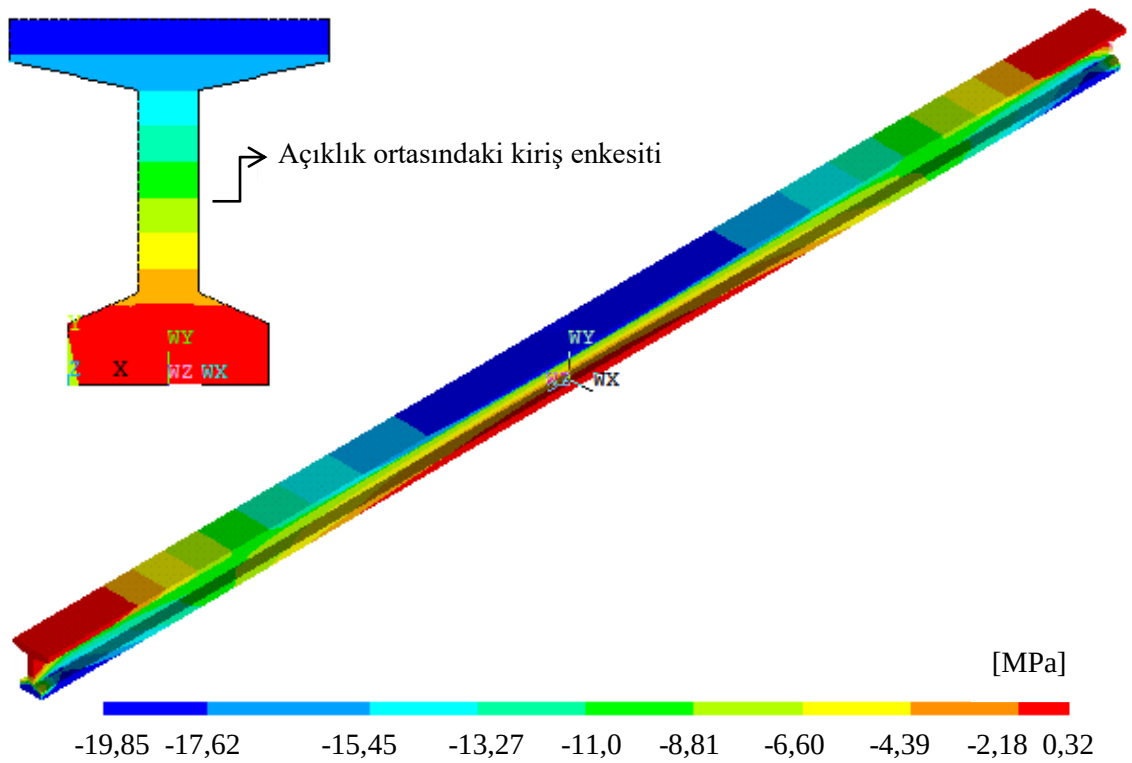
Grup 4 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük çekme gerilmeleri sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde 1,4055MPa ve 3,3837MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan kirişlerden sadece (d) kirişinde meydana gelen çekme gerilmesinin, betonun çekme emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir. Bu sebeple (d) kirişinde çekme çatlağı oluşması beklenmektedir.

Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişin açıklık ortasındaki kesitlerinin alt lifinde oluşan asal gerilmeler incelendiğinde tüm kirişlerin alt lifinin çekme gerilmesine maruz kaldığı ve beş kirişte meydana gelen gerilmelerin, çekme emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin alt lifinde oluşan çekme gerilmesi

Analizler sonucunda, Grup 1 (a) kirişinde meydana gelen asal basınç gerilmelerinin kiriş boyunca ve açıklık ortasındaki kiriş kesitindeki dağılımı Şekil 2.23'te görülmektedir. Şekil 2.23 incelendiğinde kirişte meydana gelen asal basınç gerilmelerinin kirişin açıklık ortasındaki kesitin üst lifinde en büyük değere ulaştığı görülmektedir. Bu kirişte açıklık ortasında meydana gelen en büyük basınç gerilmesi kesitin üst lifinde -19,85MPa olarak elde edilmiştir. Diğer kirişlerin açıklık ortasındaki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen basınç gerilmeleri ise Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



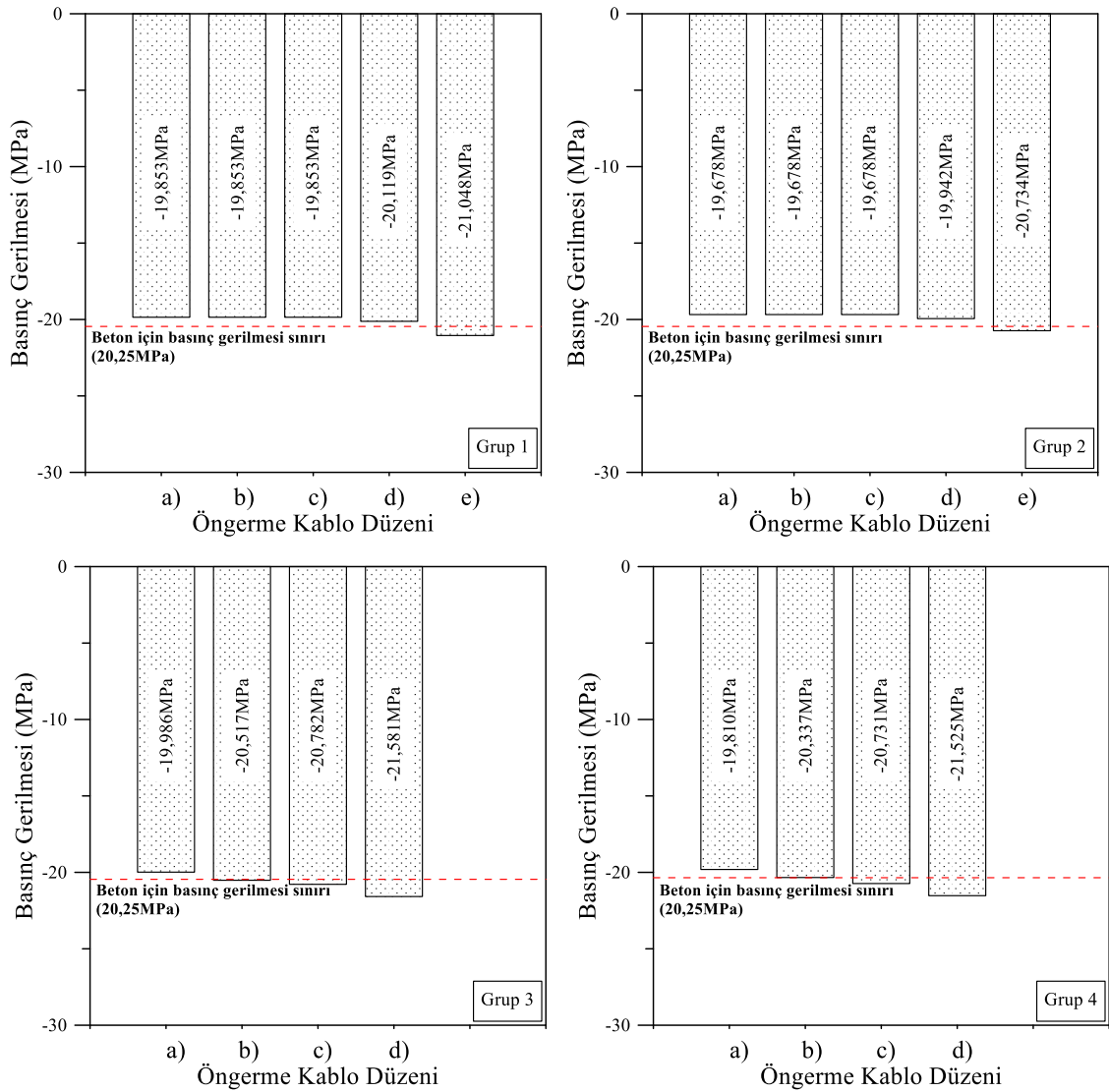
Şekil 2.23. Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan basınç gerilmesi dağılımı

Öngerilmeli kirişlerde kullanılan beton için servis döneminde dikkate alınan basınç emniyet gerilmesinin belirlenmesinde AASHTO LRFD (2012) yönetmeliği koşulları dikkate alınmıştır. Belirlenmiş olan basınç gerilmesi sınırı Şekil 2.24'te bulunan grafiklere eklenerek hangi kirişlerin basınç emniyet gerilmesini aştığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, gerilmelerin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri Grup 1'de -19,85MPa ve -21,048MPa olarak Grup 2'de ise -19,678MPa ve -20,734MPa olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, gerilmelerin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri Grup 3'te -19,986MPa ve -21,581MPa olarak Grup 4'te ise -19,810MPa ve -21,525MPa olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişin açıklık ortasındaki kesitlerin üst lifinde meydana gelen gerilme değerleri incelendiğinde tüm kirişlerin üst lifinin basınç gerilmesine maruz kaldığı ve sekiz kirişte meydana gelen gerilmelerin, basınç emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir. Bu sekiz kirişin hesap açıklığının ortasındaki kesitlerinin üst lifindeki betonda ezilme meydana gelmesi beklenmektedir.



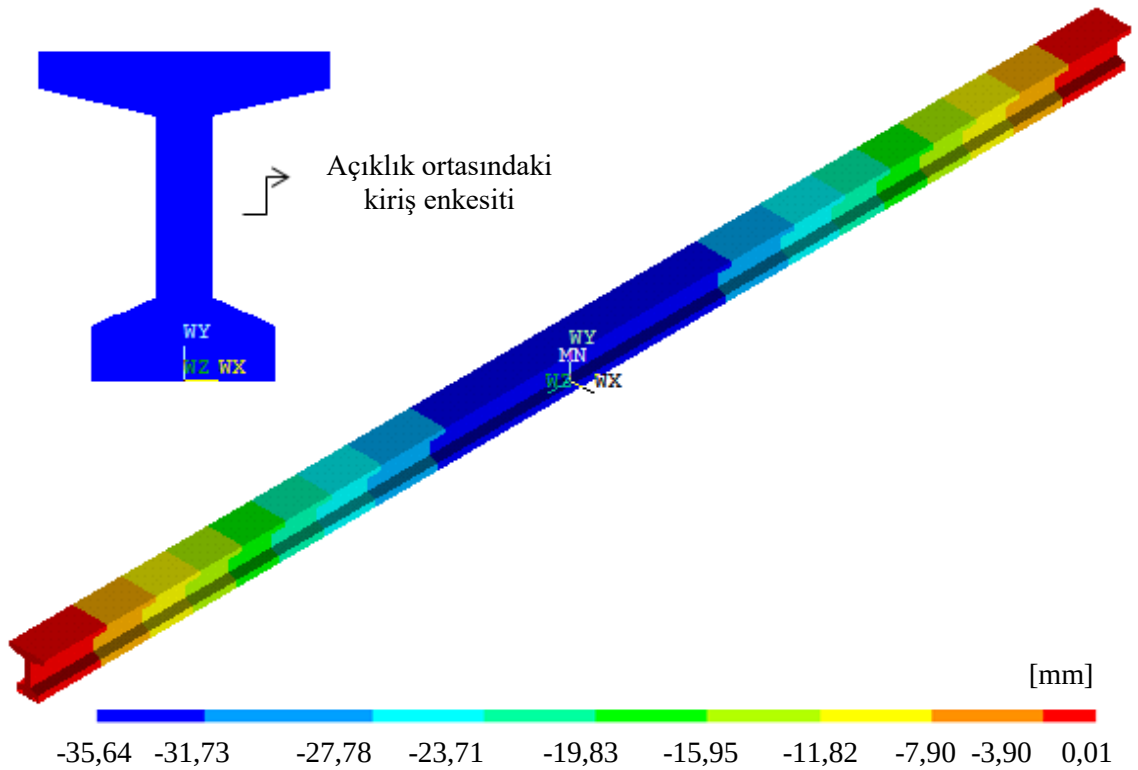
Şekil 2.24. Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan basınç gerilmesi

2.5.4.2. Servis Döneminde Meydana Gelen Sehim

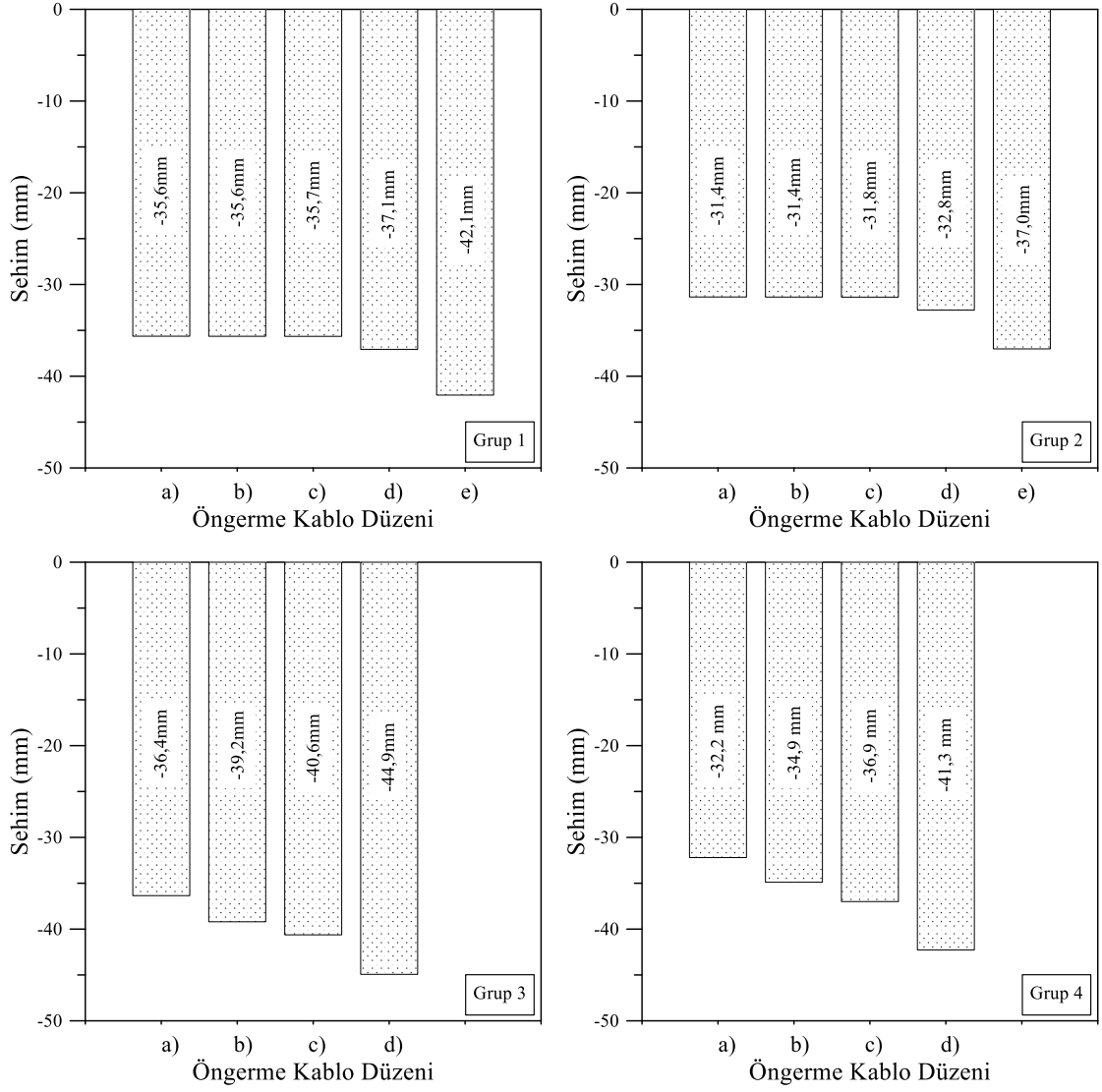
Servis dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan lineer-statik analizler sonucunda, Grup 1 (a) kirişinde meydana gelen sehimin kiriş boyunca ve açıklık ortasındaki kiriş kesitindeki dağılımı Şekil 2.25'te gösterilmektedir. Bu kirişte meydana gelen en büyük sehim, açıklık ortasındaki kesitte -35,6mm olarak elde edilmiştir. Diğer kirişlerde açıklığın ortasında meydana gelen sehimler ise Şekil 2.26'da gösterilmektedir.

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinde meydana gelen sehim değerleri incelendiğinde, sehim değerlerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük sehim Grup 1'de -35,6mm ve -42,1mm olarak Grup 2'de ise -31,4mm ve -37,0mm olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinde meydana gelen sehim değerleri incelendiğinde, sehim değerlerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük sehim Grup 3'te -36,4mm ve -44,9mm olarak Grup 4'te ise -32,2mm ve -41,3mm olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.



Şekil 2.25. Servis döneminde Grup 1 (a) kirişinde oluşan sehimin dağılımı



Şekil 2.26. Servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinde meydana gelen sehim

2.5.5. Aktarma Dönemi Analiz Sonuçları

Bu bölümde, ANSYS (2015) programında sonlu eleman modeli oluşturulmuş on sekiz adet öngerilmeli kirişin, aktarma dönemindeki yükler dikkate alınarak yapılan lineer-statik analizleri sonucunda elde edilen asal gerilme ve sehim değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Aktarma döneminde kirişler sadece öngerme kuvveti ve kendi ağırlığı etkisi altında olduğu için kirişlerin mesnet bölgelerinde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu bölümde servis dönemindeki analiz sonuçlarından farklı olarak mesnet bölgelerinde oluşan gerilmeler ve bu gerilmeleri emniyet gerilme sınırlarının altına indirmek için gerekli olan kılıf sayısı ve boyu ile ilgili bilgilere de yer verilmiştir.

2.5.5.1. Aktarma Döneminde Meydana Gelen Asal Gerilmeler

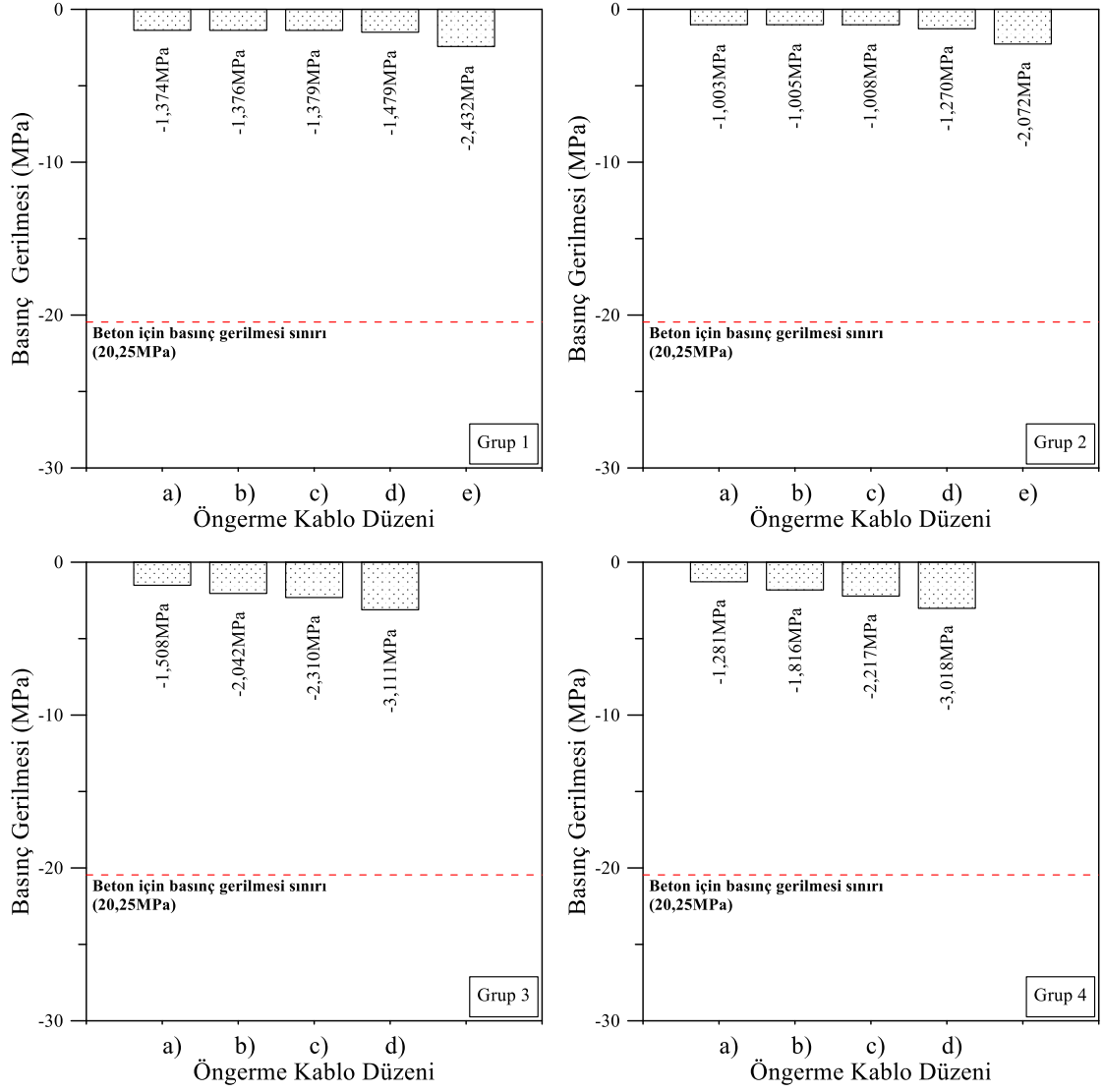
Aktarma dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, gruplarda bulunan kirişlerin açıklık ortasındaki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen gerilmeler Şekil 2.27’de gösterilmektedir.

Grup 1 kirişlerinde meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde -1,374MPa ve -2,432MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan (a), (b) ve (c) kirişlerinde iki sıra öngerme kablosu bulunmaktadır. Bu sıralarda bulunan öngerme kablosu sayısı üç kiriş için de aynı olup sadece ikinci sıradaki öngerme kablo dizilimleri birbirinden farklıdır. Bu kirişlerde meydana gelen gerilme değerlerinin küçüktü olsa birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Grup 2 kirişlerinde meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde -1,003MPa ve -2,072MPa olarak elde edilmiştir. Bu grupta bulunan (a), (b) ve (c) kirişlerinde üç sıra öngerme kablosu bulunmaktadır. Bu sıralarda bulunan öngerme kablo sayısı üç kiriş için de aynı olup sadece ikinci sıradaki öngerme kablo dizilimleri birbirinden farklıdır. İkinci sırada (a) kirişinde bulunan öngerme kabloları kirişin simetri eksenine en yakın, (c) kirişinde ise en uzak şekilde yerleştirilmiştir. İki kirişte meydana gelen gerilme değerleri incelendiğinde (a) kirişinde oluşan basınç gerilmesinin, (c) kirişinde oluşan basınç gerilmesinden az olduğu görülmektedir.

Grup 3 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde -1,508MPa ve -3,111MPa olarak elde edilmiştir.

Grup 4 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. En küçük ve en büyük basınç gerilmeleri sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde -1,281MPa ve -3,018MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.27. Aktarma döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan basınç gerilmesi

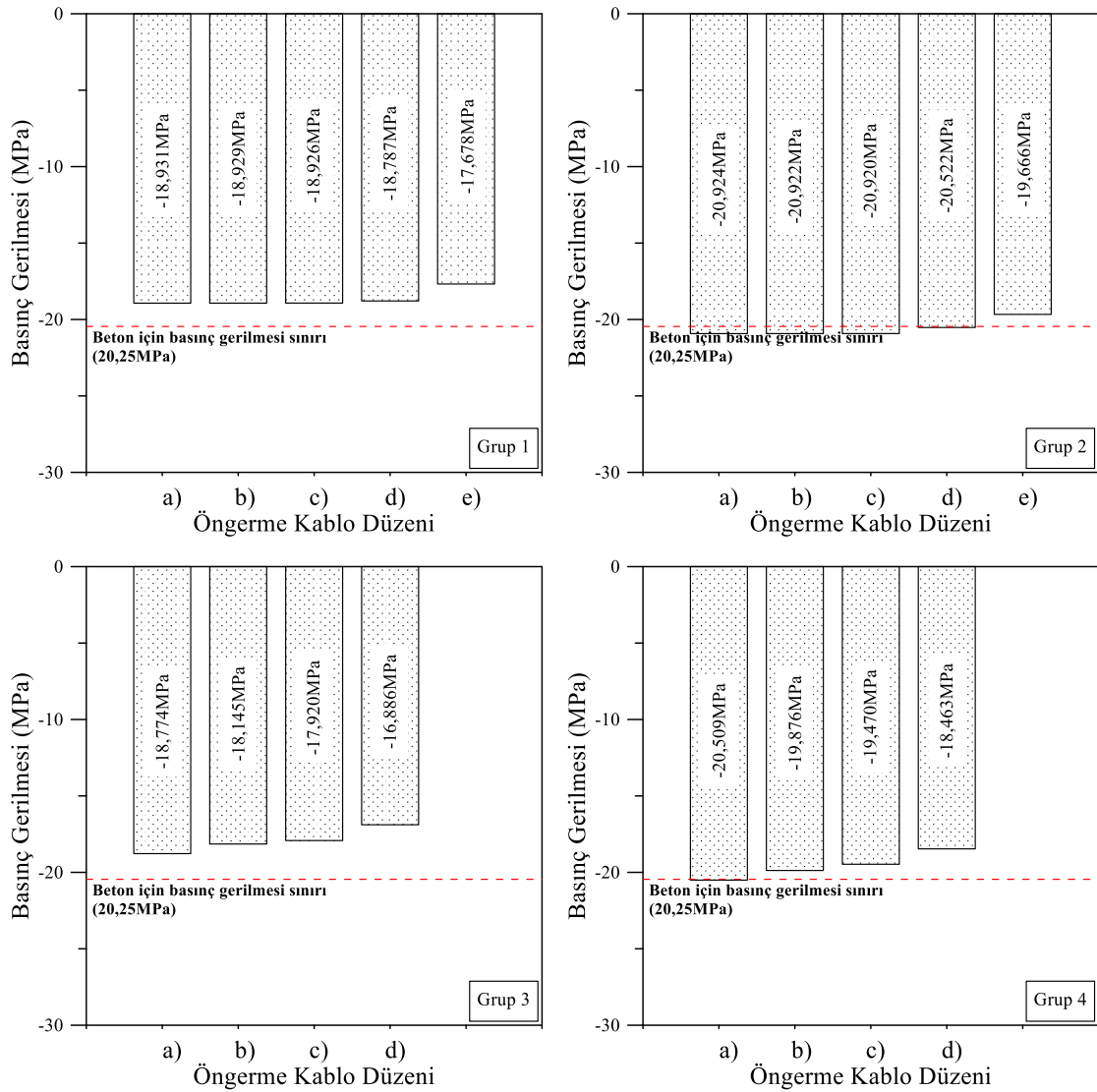
Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişin açıklık ortasındaki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen gerilmeler incelendiğinde tüm kirişlerin üst lifinin basınç gerilmesine maruz kaldığı ve kirişlerde oluşan gerilmelerin, beton basınç emniyet gerilmesinin altında olduğu görülmektedir.

Aktarma dönemi yükleri altında yapılan analizler sonucunda gruptaki kirişlerin açıklık ortasındaki kesitlerin alt lifinde meydana gelen gerilmeler Şekil 2.28’de gösterilmektedir.

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük basınç gerilmeleri Grup 1’de -18,931MPa ve -17,678MPa olarak Grup

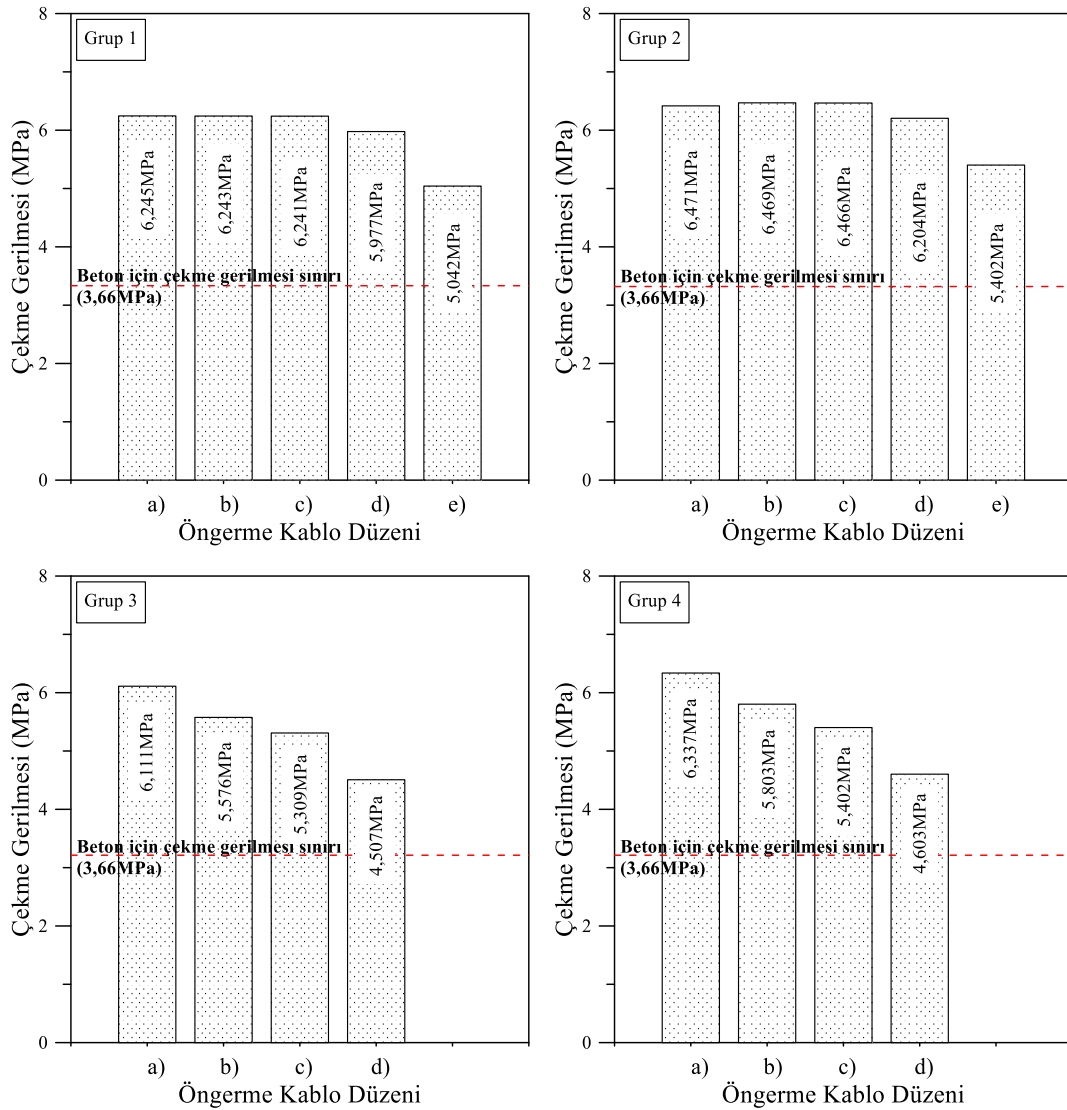
2’de ise -20,924MPa ve -19,666MPa olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir. Grup 1’de bulunan bütün kirişlerde, Grup 2’de bulunan kirişlerden ise sadece (e) kirişinde meydana gelen gerilme, basınç emniyet gerilmesinin altındadır.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinde meydana gelen basınç gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük basınç gerilmeleri Grup 3’te -18,774MPa ve -16,886MPa olarak Grup 4’te ise -20,509MPa ve -18,463MPa olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir. Grup 3’te bulunan bütün kirişlerde, Grup 4’te bulunan kirişlerden ise (b), (c) ve (d) kirişlerinde meydana gelen gerilmeler, beton basınç emniyet gerilmesinin altındadır.



Şekil 2.28. Aktarma döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin alt lifinde oluşan basınç gerilmesi

Aktarma dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda gruptaki kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen gerilmeler Şekil 2.29’da gösterilmektedir. AASHTO LRFD (2012)’ye göre aktarma dönemi için beton çekme emniyet gerilmesinin kirişte aderans donatısı kullanılıp kullanılmamasına göre belirlenmektedir. Bu çalışmada kirişte aderans donatısı kullanıldığı varsayılmış ve bu duruma göre belirlenmiş olan çekme emniyet gerilmesi Şekil 2.29’daki grafiklere eklenmiştir.



Şekil 2.29. Aktarma döneminde mesnet bölgesindeki kiriş kesitinin üst lifinde oluşan çekme gerilmesi

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük çekme gerilmeleri Grup 1’de 6,245MPa ve 5,042MPa olarak Grup 2’de ise 6,471MPa ve 5,402MPa olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinde meydana gelen çekme gerilmeleri incelendiğinde, çekme gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük çekme gerilmeleri Grup 3’te 6,111MPa ve 4,507MPa olarak Grup 4’te ise 6,337MPa ve 4,603MPa olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

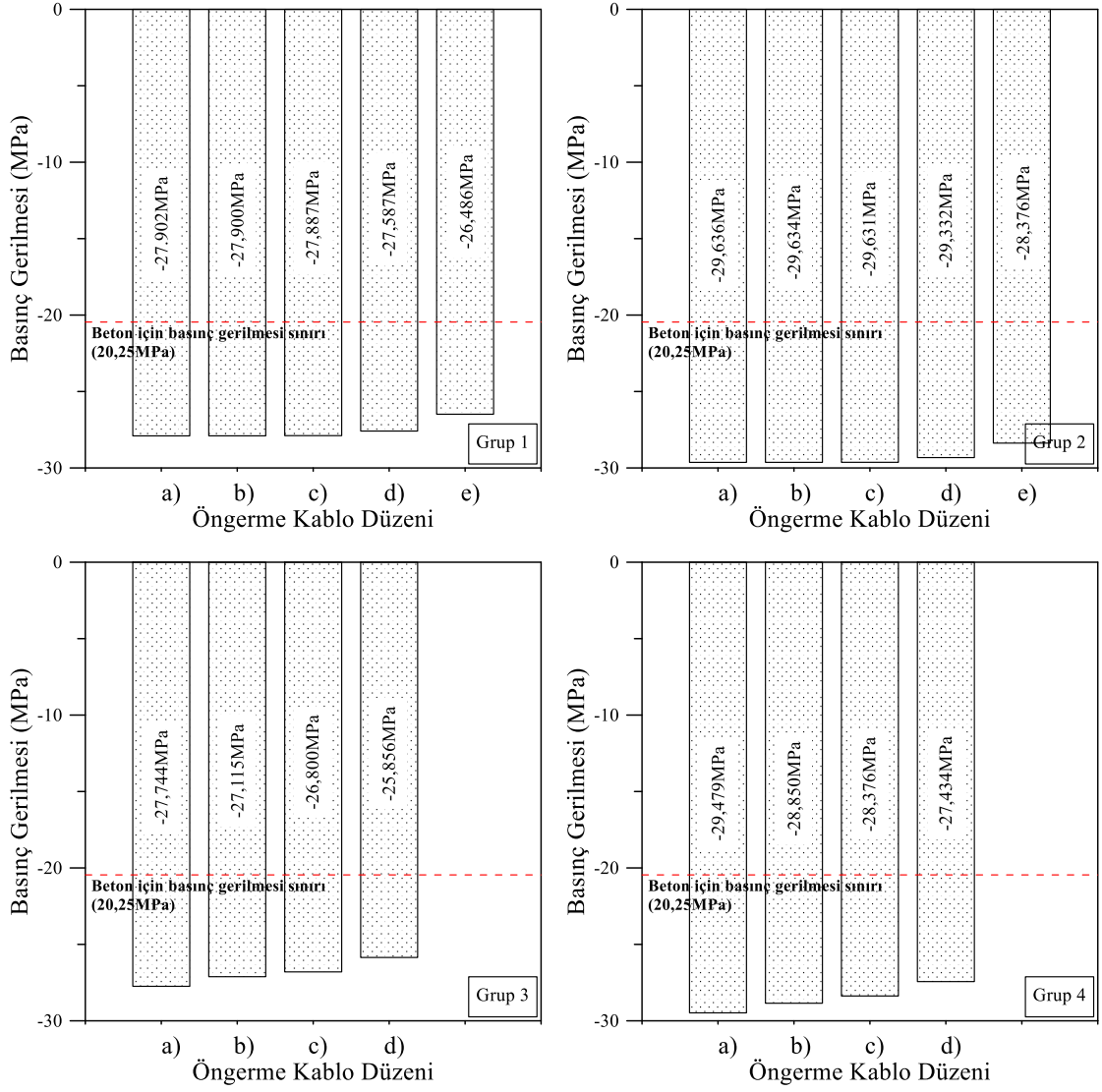
Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen gerilme değerleri incelendiğinde tüm kirişlerin üst lifinin çekme gerilmesine maruz kaldığı ve tüm kirişlerde meydana gelen gerilmelerin, aktarma dönemi için belirlenmiş olan çekme emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir.

Aktarma dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda gruplardaki kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitlerin alt lifinde meydana gelen gerilmeler Şekil 2.30’da gösterilmektedir

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, gerilmelerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük basınç gerilmeleri Grup 1’de -27,902MPa ve -26,486MPa olarak Grup 2’de ise -29,636MPa ve -28,376MPa olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, gerilmelerinin (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük basınç gerilmeleri Grup 3’te -27,744MPa ve -25,856MPa olarak Grup 4’te ise -29,479MPa ve -27,434MPa olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilme değerleri incelendiğinde tüm kirişlerin alt lifinin basınç gerilmesine maruz kaldığı ve tüm kirişlerde meydana gelen gerilmelerin, aktarma dönemi için belirlenmiş olan basınç emniyet gerilmesini aştığı görülmektedir.



Şekil 2.30. Aktarma döneminde mesnet bölgesindeki kiriş kesitinin alt lifinde oluşan basınç gerilmesi

Şekil 2.29 ve Şekil 2.30 incelendiğinde, aktarma döneminde kirişin mesnet bölgesindeki kesitin hem üst hem de alt lifinde meydana gelen gerilmelerin tüm kirişlerde aktarma dönemi için belirlenen çekme ve basınç emniyet gerilmelerinin oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Kirişlerde meydana gelen aşırı gerilmelerin emniyet gerilmelerinin altına indirilmesi için kılıflanma işleminin yapılması gerekmektedir.

2.5.5.2. Kılıf Boylarının ve Sayısının Belirlenmesi

Aktarma dönemi yükleri altında özellikle öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde meydana gelen gerilmeler beton için belirlenmiş olan çekme ve basınç emniyet

gerilmelerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde meydana gelen aşırı gerilmeler, belirli sayıda kılıfın belirli boylarda kullanılmasıyla istenilen seviyelere indirilebilmektedir. Bu kısımda örnek olarak seçilmiş olan on sekiz kirişte aktarma döneminde oluşan gerilmeler dikkate alınmış ve bu gerilmeleri emniyet gerilme seviyelerinin altında indirmek için gerekli olan kılıf boyları ve sayıları belirlenmiştir. Bu bölümde en büyük kılıf boyu, kiriş boyunun yarısı olarak dikkate alınmıştır. Çünkü bu değerden büyük kılıf boyunun kullanılması mümkün değildir. Burada verilen kılıf boyları, kirişin iki mesnet bölgesine ayrı ayrı uygulanacak olan değeri göstermektedir.

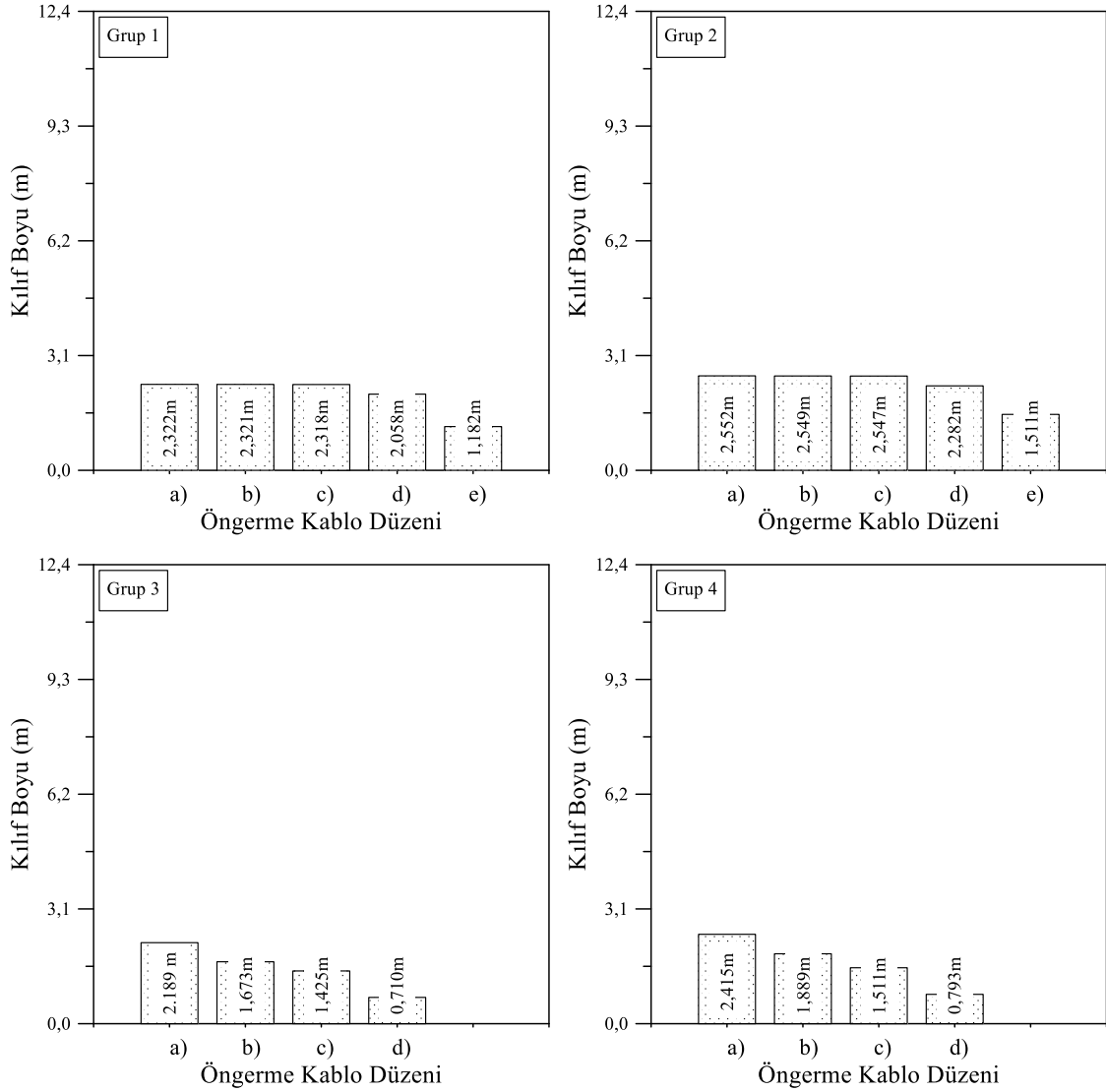
Aktarma döneminde öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen çekme gerilmelerini, çekme emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları Şekil 2.31’de gösterilmektedir.

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen çekme gerilmelerini, çekme emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları incelendiğinde, kılıf boylarının (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük kılıf boyu Grup 1’de 2,322m ve 1,182m olarak Grup 2’de ise 2,552m ve 1,511m olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen çekme gerilmelerini, çekme emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları incelendiğinde, kılıf boylarının (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük kılıf boyu Grup 3’te 2,189m ve 0,710m olarak Grup 4’te ise 2,415m ve 0,793m olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

Aktarma döneminde öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmelerini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları Şekil 2.32’de gösterilmektedir.

Grup 1’de bulunan kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmelerini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları incelendiğinde, kılıf boylarının (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük kılıf boyu 7,635m ve 5,548m olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.



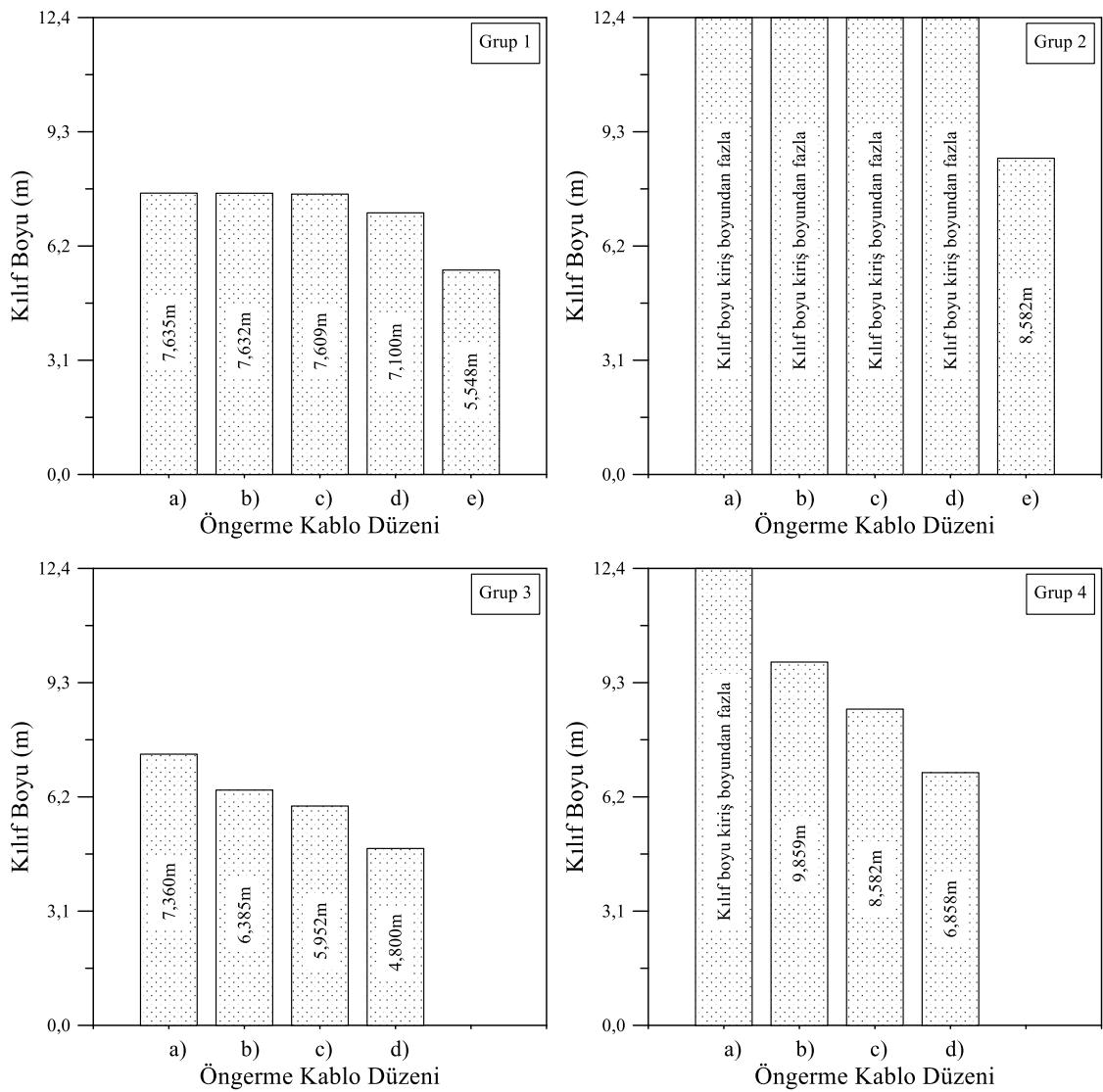
Şekil 2.31. Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf boyları

Grup 2’de bulunan (a), (b), (c) ve (d) kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmelerini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boylarının kiriş boyundan fazla olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu kirişlerde meydana gelen aşırı gerilmelerin, emniyet gerilmelerinin altına indirilmesinin mümkün olmadığını göstermektedir. Bu grupta bulunan (e) kirişi için kılıf boyu 8,582m olarak belirlenmiştir.

Grup 3’te bulunan kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmelerini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyları incelendiğinde, kılıf boylarının (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı

görülmektedir. En büyük ve en küçük kılıf boyu 7,360m ve 4,800m olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

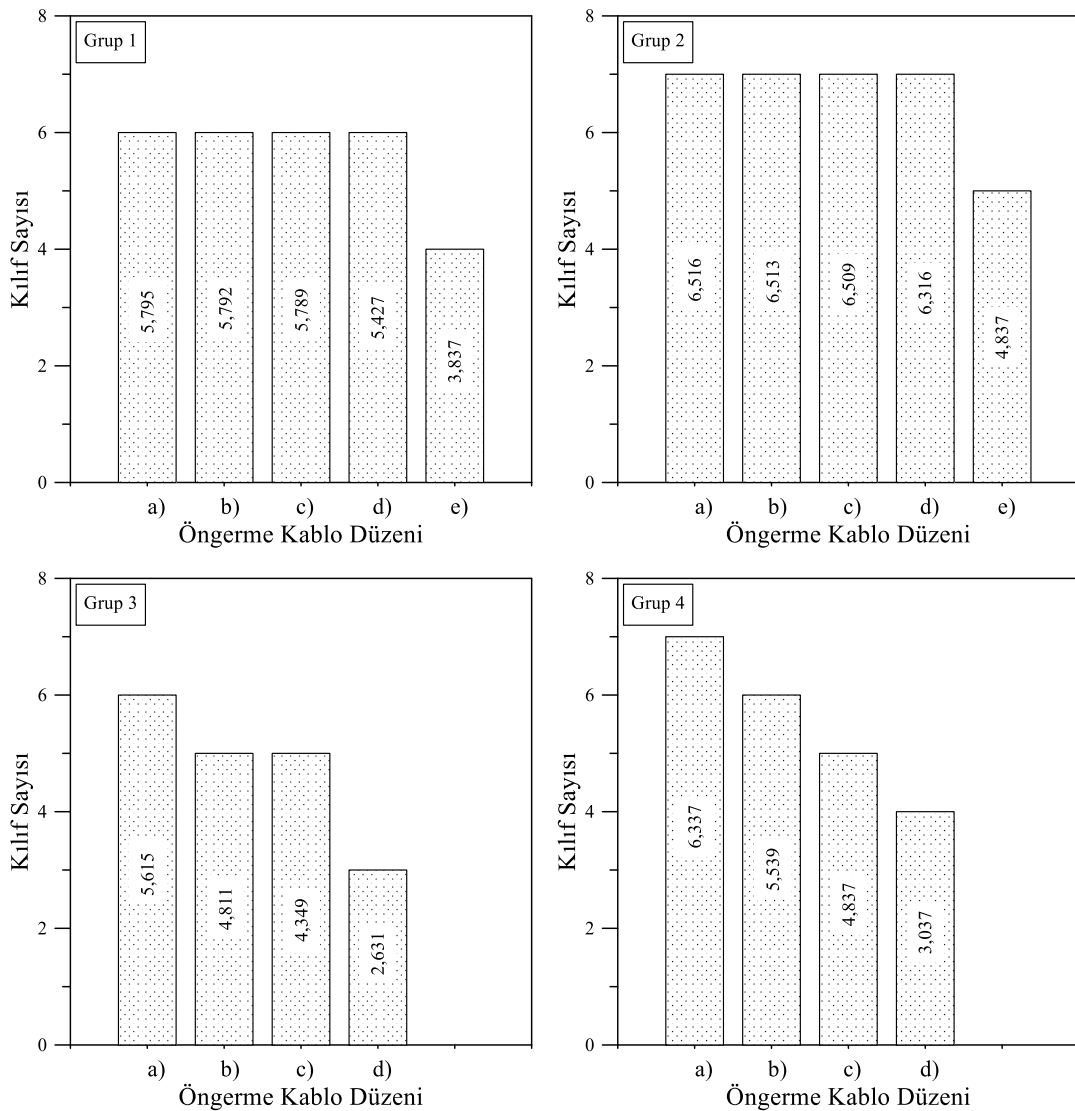
Grup 4'te bulunan (a) kirişinin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmesini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf boyu kiriş boyundan fazla olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu kirişte meydana gelen aşırı gerilmenin, emniyet gerilmesinin altına indirilmesinin mümkün olmadığını göstermektedir. Bu grupta bulunan (b), (c) ve (d) kirişleri için kılıf boyları sırasıyla 9,859m, 8,582m ve 6,858m olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.32. Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf boyları

Dört grupta bulunan on sekiz adet kirişten beş tanesi için belirlenen kılıf boyunun kiriş boyundan fazla olduğu görülmüş ve bu kirişlerde meydana gelen aşırı gerilmelerin, emniyet gerilmesinin altına indirilmesi mümkün olmamaktadır.

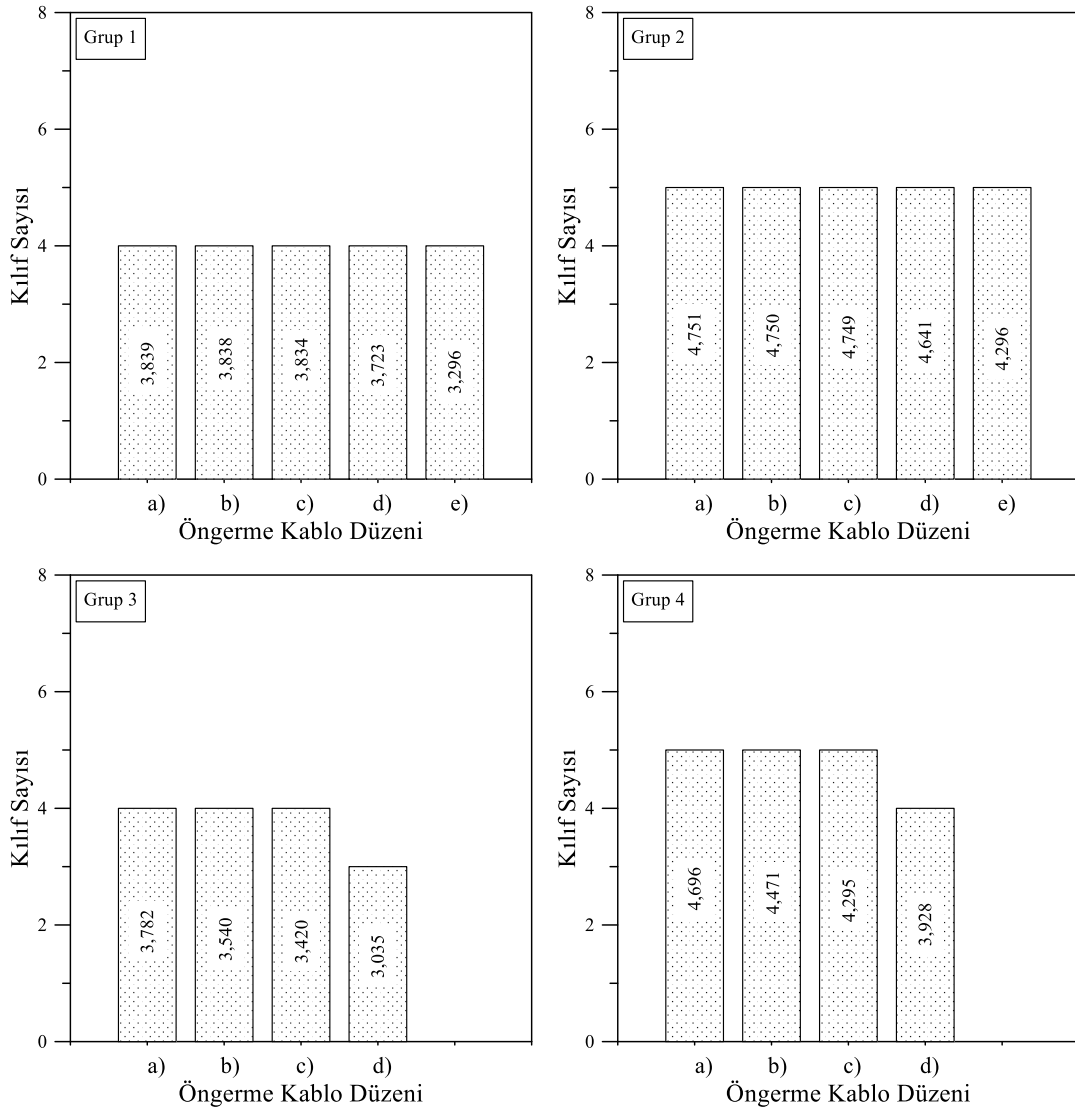
On sekiz öngerilmeli kiriş için belirlenmiş olan kılıf sayıları Şekil 2.33 ve 2.34’te gösterilmektedir. Şekillerde sütunların içerisinde bulunan değerler hesap sonucu elde edilen kılıf sayılarını göstermektedir. Fakat kılıf sayısı tam değer olmalıdır. Bu sebepten ötürü kılıf sayısı, hesap sonucu bulunan ondalıklı değerlerin bir üst tam sayıya yuvarlanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 2.33. Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin üst lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf sayısı

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinin mesnet bölgesindeki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen çekme gerilmelerini, çekme emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf sayıları incelendiğinde, (a), (b), (c) ve (d) kirişleri için hesaplanan kılıf sayısının birbirinden farklı olduğu fakat seçilen kılıf sayısının dört kiriş için eşit olduğu görülmektedir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinin mesnet bölgesindeki kesitlerinin üst lifinde meydana gelen çekme gerilmelerini, çekme emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf sayıları incelendiğinde, kılıf sayılarının (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En fazla ve en az kılıf sayısı Grup 3'te 6 ve 3 olarak Grup 4'te ise 7 ve 4 olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.



Şekil 2.34. Kirişin mesnet bölgesindeki kesitin alt lifinde meydana gelen gerilmeleri emniyet gerilmesine indirmek için gerekli olan kılıf sayısı

Kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitinin alt lifinde meydana gelen basınç gerilmelerini, basınç emniyet gerilmesinin altına indirmek için gerekli olan kılıf sayıları incelendiğinde, Grup 1 ve Grup 2'deki tüm kirişler için sırasıyla 4 ve 5 tane kılıfa ihtiyaç olduğu görülmektedir. Grup 3 ve Grup 4'ün (a), (b) ve (c) kirişlerinde sırasıyla 4 ve 5, (d) kirişinde ise 3 ve 4 kılıfa ihtiyaç olduğu görülmektedir.

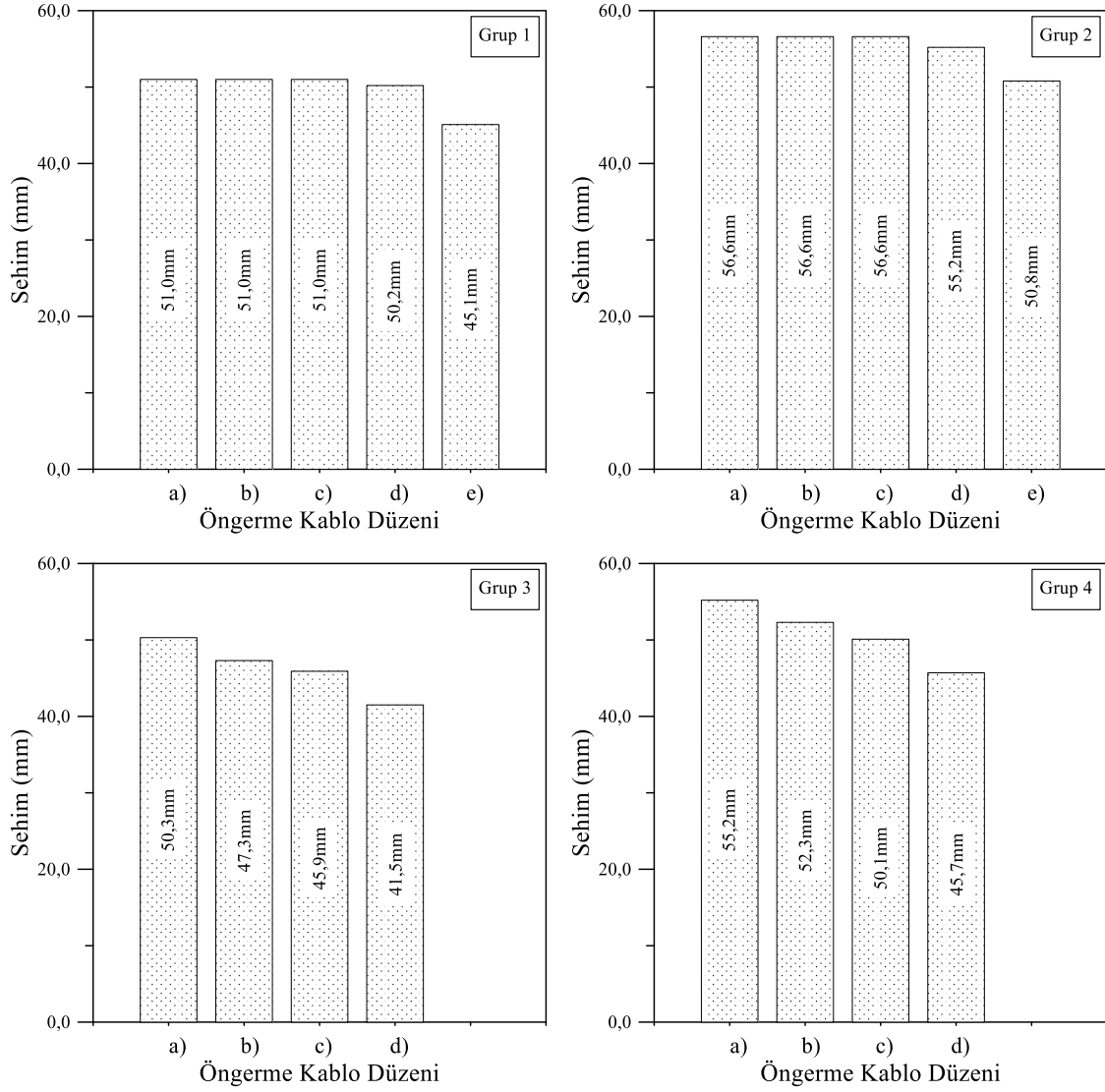
Örnek olarak seçilen kirişlerin mesnet bölgesindeki kesitlerinin alt ve üst lifinde belirlenen kılıf boyu ve sayısı ilgili veriler göz önüne alınıp kirişler için karar verilen toplam kılıf sayısı ve bu kılıfların uzunlukları Tablo 2.8'de verilmektedir. Bazı kirişlerin kılıflanma işlemi yapılmasına uygun olmadığı, bazı kirişlerde tek tip, bazılarında ise iki tip kılıf sayısı ve boyuna gerek olduğu görülmektedir.

Tablo 2.8. Kılıflanma bilgileri

Grup	Kılıflanma Bilgileri			
	Kılıf Sayısı	Kılıf Boyu (m)	Kılıf Sayısı	Kılıf Boyu (m)
Grup 1 (a)	2	2,322	4	7,635
Grup 1 (b)	2	2,321	4	7,632
Grup 1 (c)	2	2,318	4	7,609
Grup 1 (d)	2	2,058	4	7,100
Grup 1 (e)	-	-	4	5,548
Grup 2 (a)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır.			
Grup 2 (b)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır.			
Grup 2 (c)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır.			
Grup 2 (d)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır.			
Grup 2 (e)	-	-	5	8,582
Grup 3 (a)	2	2,189	4	7,360
Grup 3 (b)	1	1,673	4	6,385
Grup 3 (c)	1	1,425	4	5,952
Grup 3 (d)	-	-	3	4,800
Grup 4 (a)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır.			
Grup 4 (b)	1	1,889	5	9,859
Grup 4 (c)	-	-	5	8,582
Grup 4 (d)	-	-	4	6,858

2.5.5.3. Aktarma Döneminde Meydana Gelen Sehim

Aktarma dönemi yükleri dikkate alınarak yapılan lineer-statik analizler sonucunda, gruplarda bulunan kirişlerin açıklık ortasındaki kesitlerinde meydana gelen sehim Şekil 2.35'te gösterilmektedir.



Şekil 2.35. Aktarma döneminde kirişin ortasında meydana gelen sehim

Grup 1 ve Grup 2 kirişlerinde meydana gelen sehim değerleri incelendiğinde, sehim değerlerinin (a) kirişinden (e) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük sehim Grup 1'de 51,0mm ve 45,1mm olarak Grup 2'de ise 56,6mm ve 50,8 mm olarak sırasıyla (a) ve (e) kirişlerinde elde edilmiştir.

Grup 3 ve Grup 4 kirişlerinde meydana gelen sehîm değeri incelenildiğinde, sehîm değeri (a) kirişinden (d) kirişine doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. En büyük ve en küçük sehîm Grup 3'te 50,3mm ve 41,5mm olarak Grup 4'te ise 55,2mm ve 45,7mm olarak sırasıyla (a) ve (d) kirişlerinde elde edilmiştir.

Hesap açıklığı, kesit ve malzeme özellikleri aynı fakat öngerme kablo sayısı ve yerleşim düzeni birbirinden farklı on sekiz öngerilmeli I kirişin, aktarma ve servis yükleri altında yapılan analizlerinden elde edilen sonuçların yorumlanması özet olarak Tablo 2.9'da gösterilmektedir.

Tablo 2.9. Analiz sonuçlarının yorumlanması

Grup	Açıklama
Grup 1 (a)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 1 (b)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 1 (c)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 1 (d)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 1 (e)	Servis döneminde kirişin alt lifinde çekme emniyet gerilmesi aşılmaktadır. Servis döneminde kirişin üst lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır.
Grup 2 (a)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır. Aktarma döneminde kirişin alt lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 2 (b)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır. Aktarma döneminde kirişin alt lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 2 (c)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır. Aktarma döneminde kirişin alt lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 2 (d)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır. Aktarma döneminde kirişin alt lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 2 (e)	Servis döneminde kirişin üst lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 3 (a)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 3 (b)	Servis döneminde kirişin alt lifinde çekme emniyet gerilmesi aşılmaktadır. Servis döneminde kirişin üst lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır.
Grup 3 (c)	Servis döneminde kirişin alt lifinde çekme emniyet gerilmesi aşılmaktadır. Servis döneminde kirişin üst lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır.
Grup 3 (d)	Servis döneminde kirişin alt lifinde çekme emniyet gerilmesi aşılmaktadır. Servis döneminde kirişin üst lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır.
Grup 4 (a)	Kılıflanma işlemi uygulanamamaktadır. Aktarma döneminde kirişin alt lifinde basınç emniyet gerilmesi aşılmaktadır
Grup 4 (b)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 4 (c)	Kiriş tasarım için uygundur.
Grup 4 (d)	Servis döneminde kirişin alt lifinde çekme emniyet gerilmesi aşılmaktadır.

2.6. Aktarma Döneminde Öngerilmeli Kirişte Meydana Gelen Sehimin Hesabında P-Delta Etkisinin Dikkate Alınması

Öngerilmeli kirişlerde meydana gelen sehim ani ve uzun süreli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ani sehim aktarma sonrası meydana gelen, uzun süreli sehim ise aktarma döneminden sonra zamanla değişen sehim ifade etmektedir. Uzun süreli sehim genellikle ani sehim için hesaplanan değerin belirli katsayılarla çarpımı ile elde edilmektedir. Bu nedenle aktarma döneminde oluşan ani sehimin doğru olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Kirişlerin sehim hesabında birinci mertebe ve elastik-stabilite teorilerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada aktarma döneminde öngerilmeli kirişlerde meydana gelen sehimin hesaplanmasında kullanılan teorilerden en uygun olanı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda Habay İnşaat tesislerinde üretimi yapılan öngerilmeli kiriş örnek olarak seçilmiş ve kirişte öngerme kuvvetinin aktarılması işlemi tamamlandıktan sonra meydana gelen sehim ölçülmüştür. Ölçümden elde edilen veriler birinci mertebe ve elastik-stabilite teorilerinden ve kirişin SAP2000 (2016) programında oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen lineer ve lineer-olmayan statik analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin artan mukavemetleri yapı elemanlarını narinleştirmiş ve bu durum stabilite şartının ön plana çıkmasına sebep olmuştur (İnan, 1970). Öngerilmeli beton kirişler, yapımında kullanılan yüksek dayanımlı beton ve çelik sayesinde betonarme kirişlere oranla daha narin yapıya sahip olduğundan sehim açısından betonarme kirişlere göre daha hassastırlar. Betonarme kirişlerde meydana gelen sehim deforme olmamış sistemi dikkate alan birinci mertebe teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Çünkü betonarme kirişlerde, kirişin sehim yönüne dik herhangi bir kuvvetin olmaması deforme olmamış sistem üzerinden hesap yapılmasına olanak sağlamaktadır. Fakat öngerilmeli kirişler betonarme kirişlerin aksine boyları doğrultusunda öngerme kuvvetine maruz kalmaktadırlar. Başka bir deyişle öngerilmeli kirişlerde sehim yönüne dik kuvvet bulunmaktadır. Deforme olmamış sistem dikkate alınarak hesap yapıldığı takdirde öngerme kuvvetinin kirişte oluşan sehime etkisi tam olarak hesaplanamamaktadır. Bu etkiyi tam olarak hesaplayabilmek için denge denklemlerinin deforme olmuş sistem üzerinden yazıldığı elastik-stabilite teorisi kullanılmalıdır. Şekil 2.36'da eksantrik yük etkisindeki kirişin deforme olmuş halinin belirli bir mesafesinde alınan kesitinin durumu gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 x = 0 \text{ iken } y &= 0 \\
 x = L \text{ iken } y &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.51}$$

denklem sabitleri

$$\begin{aligned}
 A &= e \\
 B &= e \left(\frac{1 - \cos kL}{\sin kL} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.52}$$

şeklinde elde edilir. Bunlar (2.50) ifadesinde yerine yazılırsa sehim

$$y = e \left(\cos kx + \frac{1 - \cos kL}{\sin kL} \sin kx - 1 \right)
 \tag{2.53}$$

şeklinde elde edilir. (2.53)' te 'x' yerine $L/2$ yazılırsa kirişte meydana gelen en büyük sehim değeri

$$\delta_2 = e \left(\cos \frac{kL}{2} + \frac{1 - \cos kL}{\sin kL} \sin \frac{kL}{2} - 1 \right)
 \tag{2.54}$$

şeklinde elde edilir.

$$\cos kL = 1 - 2 \sin^2 \frac{kL}{2}, \quad \sin kL = 2 \sin \frac{kL}{2} \cos \frac{kL}{2}
 \tag{2.55}$$

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}, \quad k^2 = \frac{P}{EI}$$

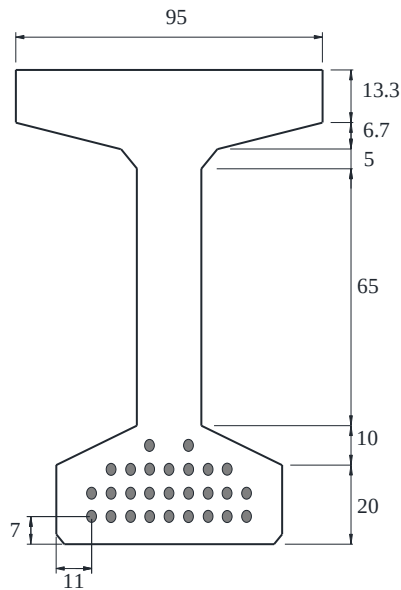
(2.55)' te verilen ifadeler (2.54)'te yerine yazılarak kirişte öngerme kuvveti etkisinde meydana gelen en büyük sehim

$$\delta_2 = e \left(\frac{1}{\cos \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right)} - 1 \right) \quad (2.55)$$

şeklinde elde edilir.

2.6.1. Öngerilmeli Kiriş Modeli

Çalışma kapsamında Habay İnşaat tesislerinde üretilen 31,5m uzunluğundaki öngerilmeli kiriş örnek olarak seçilmiştir. Kiriş enkesitine ait geometrik ölçüler cm cinsinden Şekil 2.37’de verilmektedir. Kirişte 1,524cm çaplı, 27 adet düşük gevşemeli, karakteristik çekme dayanımı 1862MPa olan öngerme kablosu kullanılmış olup kabloların merkezinden merkezine mesafesi 6cm olacak şekilde kirişe yerleştirilmiştir. Kiriş yapımında kullanılan beton, tesis içinde bulunan beton santralinden temin edilmekte olup örnek olarak seçilen kirişte C40/45 sınıfı beton kullanılmıştır. Kirişin sonlu elemanlar yöntemine göre yapısal analizlerini gerçekleştirmek için kirişte kullanılan öngerme kablosu ve betona ait elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Öngerme kablosu için üretici firma tarafından belirlenmiş olan malzeme özellikleri dikkate alınmıştır.



Şekil 2.37. Kiriş enkesiti

Aktarma dönemindeki betonun birim hacim ağırlığı ve dayanımını belirlemek için kiriş üretiminde kullanılan betondan 15x15x15cm'lik küp numuneler alınmıştır. Küp numuneler TS EN 12390-3'e göre hazırlandıktan sonra üretim hattında üstü hava geçirmeyen bezlerle örtülmüş kirişin yanında bekletilerek numunelerin, buhar kürü uygulanan kiriş ile aynı şartlara maruz kalması sağlanmıştır. Üretim hattında bulunan üzeri bezle örtülü ve örtüsüz kiriş Şekil 2.38'de görülmektedir. Buhar kürü tamamlandıktan sonra üretim hattından alınan numuneler laboratuvarında teste tabi tutularak kiriş betonunun aktarma anındaki birim hacim ağırlığı ve dayanımı belirlenmektedir.



Şekil 2.38. Kiriş üretim hattı

Betona ait elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan birçok amprik formül bulunmaktadır (Pauw, 1960; Carrasquillo vd., 1981; Ahmad ve Shah, 1985; CEB-FIP 1990; Tomowasa ve Noguchi, 1993; Gardner ve Lockman, 2001). Aktarma dönemindeki betonun elastisite modülünün en iyi şekilde Pauw (1960) tarafından önerilmiş olan formül ile belirlendiği deneysel çalışmalarda gösterilmiştir (French, 2012). Bu çalışma kapsamında betonun elastisite modülünün belirlenmesinde Pauw tarafından önerilmiş olan

$$E_{ci} = 0,043K_1\gamma_c^{1,5}\sqrt{f_{ci}} \quad (2.56)$$

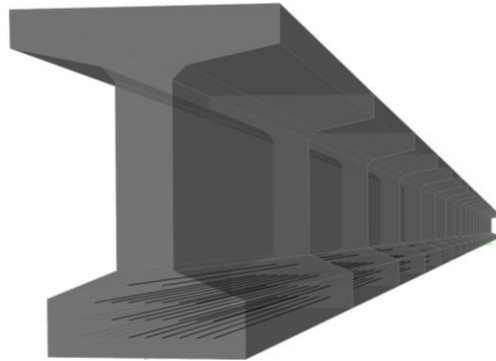
şeklindeki formül kullanılmıştır. Burada γ_c betonun birim hacim ağırlığını, f_{ci} i günlük betonun dayanımını ve K_1 ’de agrega tipine bağlı düzeltme katsayısını göstermekte olup genel olarak 1,0 alınmaktadır. Kirişin sonlu elemanlar yöntemine göre yapısal analizlerinde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.10’da görülmektedir.

Tablo 2.10. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Beton	31095	0,2	2440
Öngerme Kablosu	201605	0,3	7850

2.6.2. Kirişin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Örnek olarak seçilen kirişin sonlu eleman modeli SAP2000 (2016) programı yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 2.39). Kirişin modellenmesinde 20 adet *çubuk*, 27 adet *tendon* eleman kullanılmış olup kiriş *çubuk*, öngerme kabloları ise *tendon* elemanlar ile temsil edilmiştir. Sonlu eleman modelinde kirişin aktarma dönemimde maruz kaldığı, kiriş öz ağırlığından kaynaklanan sabit yük ile öngerme kuvveti dikkate alınmıştır. Betonun elastik kısılmasından kaynaklanan ilk öngerme kaybı hesaplarda dikkate alınmış olup zamana bağlı olan betonun sünme ve rötresi ile öngerme kablosunun gevşemesi dikkate alınmamıştır. Kirişte oluşan sehim hem lineer-statik hem de lineer olmayan-statik yöntemleri ile belirlenmiştir. Lineer olmayan-statik yöntemde sadece P-Delta etkileri dikkate alınmıştır.



Şekil 2.39. Kirişin sonlu eleman modeli

2.6.3. Sehim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonlu eleman modeli oluşturulmuş kirişin kendi ağırlığı, öngerme kuvveti ve aktarma dönemindeki tüm yükler dikkate alınarak gerçekleştirilen lineer-statik ve lineer olmayan-statik analizleri sonucunda kirişte meydana gelen sehim karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

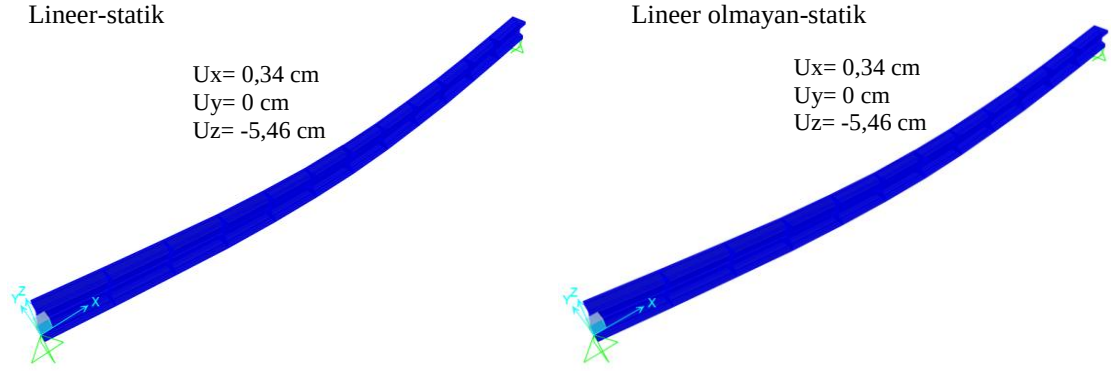
Kiriş sadece kendi ağırlığının etkisindeyken kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen en büyük sehim hem lineer-statik hem de lineer olmayan-statik analiz sonucunda -5,46cm olarak elde edilmiştir (Şekil 2.40). Kirişte, kendi ağırlığından dolayı oluşan sehimin analiz tipinden etkilenmediği görülmektedir.

Kiriş sadece öngerme kuvvetinin etkisindeyken kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen en büyük sehim lineer-statik analiz sonucunda 10,11cm, lineer olmayan-statik analiz sonucunda ise 12,26cm olarak elde edilmiştir (Şekil 2.41). P-Delta etkisinin dikkate alındığı lineer olmayan-statik analiz sonucunda elde edilen sehim değeri lineer-statik analiz sonucunda elde edilen değerden yaklaşık olarak %21 daha fazladır.

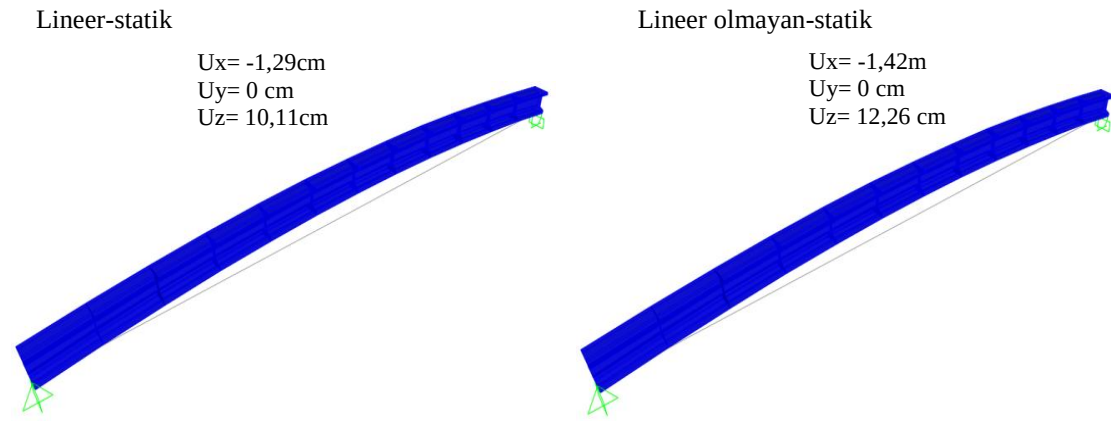
Aktarma dönemi sonunda lineer-statik ve lineer olmayan-statik analizleri sonucunda elde edilen sehim Şekil 2.42’de görülmektedir. Bu dönemde meydana gelen toplam sehim kirişin kendi ağırlığından ve öngerme kuvvetinden dolayı meydana gelen sehimlerin toplamına eşittir.

Habay İnşaat tesislerinde üretimi yapılan ve çalışma için örnek olarak seçilen kirişte meydana gelen sehim misina kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümde misinanın kullanılmasının sebebi misina öz ağırlığının çok küçük olması ve çekme esnasında boyunda uzama meydana gelmemesidir.

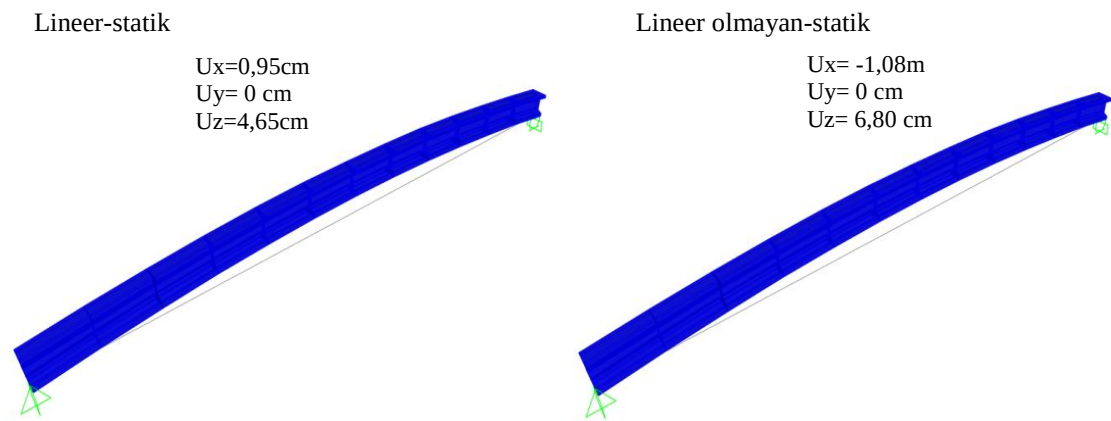
Misinin öz ağırlığının küçük olması ölçüm sırasında misinada meydana gelen sarkmaların çok küçük mertebelerde kalmasını sağlamaktadır. Ölçüm alınırken misinanın bir ucu kiriş üst başlığının ucuna sabitlenmiş diğer ucu ise misinanın sarkmasını alacak şekilde gerilmiştir. Bu şartlar dikkate alınarak kiriş ortasında yapılan ölçüm Şekil 2.43’te görülmektedir.



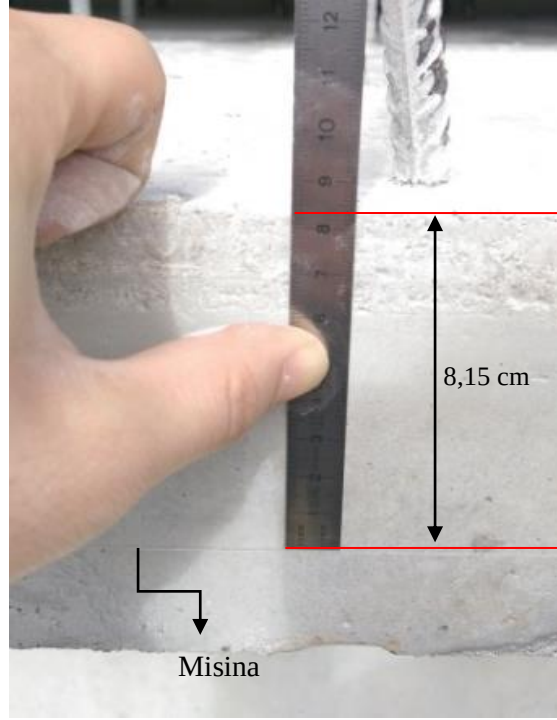
Şekil 2.40. Kirişin kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim



Şekil 2.41. Öngerme kuvvetinde dolayı oluşan sehim



Şekil 2.42. Aktarma döneminde oluşan sehim



Şekil 2.43. Aktarma dönemi sonrası ölçülen toplam sehim

Birinci mertebe ve elastik-stabilite teorileriyle hesaplanan sehim, kirişin sonlu eleman modeli üzerinde yapılan lineer ve lineer olmayan-statik analizlerinden elde edilen sonuçlar ve kiriş üzerinde yapılan ölçüm sonuçları Tablo 2.11’de verilmektedir. Aktarma dönemi sonunda kirişin sonlu eleman modelinin orta noktasındaki sehim değerleri incelendiğinde lineer-statik yöntemle hesaplanan sehim ile deneysel olarak ölçülen sehim arasındaki farkın %42 olduğu görülmüştür. Lineer olmayan-statik yöntemde bu farkın %17’ye elastik-stabilite teorisi kullanıldığında ise %15’e kadar düştüğü görülmektedir. Meydana gelen bu farkın bir kısmının da hesaplarda kullanılan öngerme kayıpları, mesnet koşulları, öngerme yatağındaki sürtünme ve öngerme kuvvetinin kirişe aktarılma hızı gibi belirsizliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kiriş sadece eğilme doğrultusundaki yüklere maruz kaldığında sehim hesabı, lineer-statik yöntemler ile doğru bir şekilde yapılmaktadır. Fakat kiriş öngerme kuvveti etkisinde olduğu zaman lineer-statik yöntemlerin her zaman doğru sonuçlar vermediği yapılan deneysel ölçümlerle belirlenmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan ani sehimin hesabı elastik-stabilite teorisi ile yapılmıştır.

Tablo 2.11 Aktarma döneminde oluşan sehim

Metot	Sehim (cm)			
	Kirişin öz ağırlığından	Öngerme kuvvetinden	Toplam	Deneyssel
Birinci mertebe teorisi	-5,46	10,21	4,75	
Elastik-stabilite teorisi	-5,46	12,39	6,93	
SAP2000(Lineer)	-5,46	10,11	4,67	8,15
SAP2000(Lineer olmayan)	-5,46	12,26	6,80	

2.7. Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Öngerilmeli kirişlere sahip köprülerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için üstyapının oluşturulmasında kullanılan öngerilmeli kirişlerin doğal frekanslarının bilinmesi gerekmektedir. Bu kısımdaki amaç, öngerilmeli kirişin dinamik karakteristiklerini analitik, sayısal ve deneysel olarak belirlemek ve elde edilen sonuçları karşılaştırmaktır. Öngerilmeli kirişlere, betonarme kirişlerden farklı olarak öngerme kuvveti uygulanmakta ve bu kuvvet öngerilmeli kirişin dinamik karakteristikleri üzerinde etkili olmaktadır. Betonarme ve öngerilmeli basit kirişin doğal frekansı ve periyodu analitik olarak sırasıyla

$$w_n = \frac{n_p^2 \times \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}$$

$$f = \frac{w_n}{2\pi}$$

$$T = \frac{1}{f}$$
(2.57)

$$w_n = \frac{n_p \times \pi}{l} \sqrt{\frac{1}{m} \left[EI \left(\frac{1 \times \pi}{l} \right)^2 - N \right]}$$

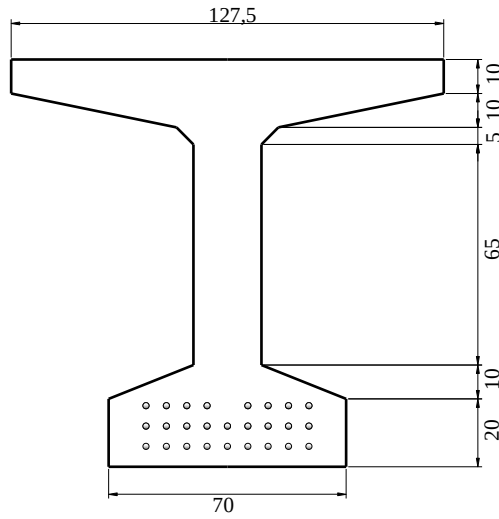
$$f = \frac{w_n}{2\pi}$$

$$T = \frac{1}{f}$$
(2.58)

şeklinde belirlenmektedir. Burada n_p periyot sayısını, l kirişin boyunu, E kirişin elastisite modülünü, I kirişin atalet momentini, N kirişe uygulanmakta olan toplam öngerme kuvvetini, m kirişin toplam kütlesini ve $\bar{m}$ ise birim boyun kütlesini göstermektedir (Timoshenko vd., 1974; Hamed ve Frostig, 2006; Li ve Zhang, 2011).

2.7.1. Öngerilmeli Kiriş Modeli

Çalışma kapsamında Habay İnşaat tesislerinde üretilen 27,45m uzunluğundaki öngerilmeli kiriş örnek olarak seçilmiştir. Kiriş enkesitine ait geometrik ölçüler cm cinsinden Şekil 2.44'te verilmektedir. Kirişte 1,524cm çaplı, 24 adet düşük gevşemeli, karakteristik çekme dayanımı 1862MPa olan öngerme kablosu kullanılmış olup kabloların merkezinden merkezine mesafesi 6cm olacak şekilde kirişe yerleştirilmiştir. Kiriş yapımında C40/45 sınıfı beton kullanılmıştır. Kirişe ait diğer malzeme özellikleri ise Tablo 2.12'de verilmiştir.



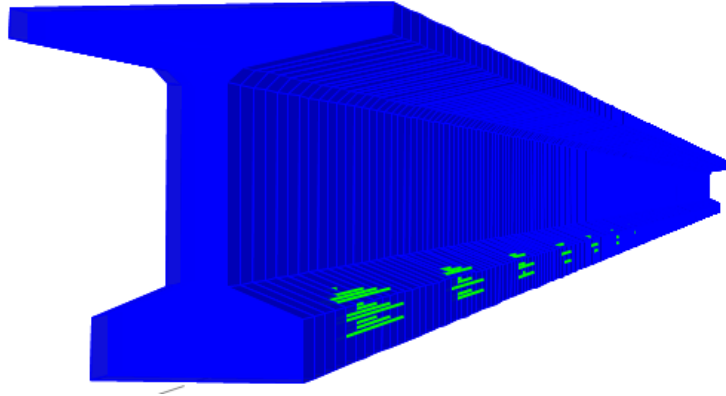
Şekil 2.44. Modal analiz için seçilen örnek kirişin enkesiti

Tablo 2.12. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Beton	36000	0,2	2440
Öngerme Kablosu	201600	0,3	7850

2.7.2. Kirişin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

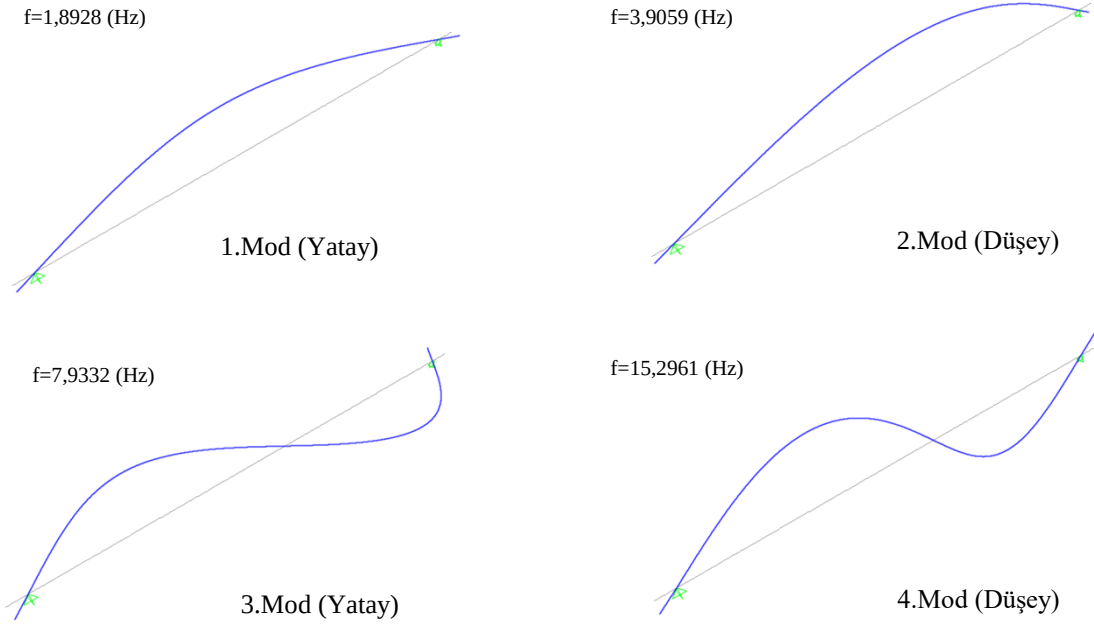
Örnek olarak seçilen kirişin sonlu eleman modeli SAP2000 (2016) programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 2.45). Kirişin modellenmesinde 275 adet *çubuk*, 24 adet *tendon* eleman kullanılmış olup kiriş *çubuk*, öngerme kabloları ise *tendon* elemanlar ile temsil edilmiştir. Sonlu eleman modelinde kirişin aktarma döneminde maruz kaldığı, kiriş öz ağırlığı ile öngerme kuvveti dikkate alınmıştır. Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan ilk öngerme kaybı hesaplarda dikkate alınmış olup zamana bağlı olan betonun sünme ve rötresi ile öngerme kablosunun gevşemesi dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.45. Kirişin sonlu eleman modeli

2.7.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Öngerilmeli kirişin modal analizi SAP2000 (2016) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kirişin modal analizinde başlangıç şartı olarak öngerme kuvvetinin etkisiyle değişen rijitlikler dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ilk dört moda ait mod şekli, frekanslar Şekil 2.46’da verilmiştir. Şekil 2.46’da görüldüğü gibi kirişin ilk dört frekansı 1,89-15,29 Hz arasında değişmektedir.



Şekil 2.46. Kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen ilk dört mod şekli

2.7.4. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Öngerilmeli Kirişin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Öngerilmeli kirişin dinamik karakteristiklerinin ÇTY kullanarak elde edilmesinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımı kullanılmıştır. Örnek seçilen öngerilmeli kirişte çevresel etkilere meydana gelen tepkileri ölçmek için 10 tane B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır (Şekil 2.47). Bu ivmeölçerler yarısı düşey diğer yarısı ise yatay doğrultuda yerleştirilerek hem yatay hem de düşey doğrultuda oluşan tepki titreşimlerinin ölçülmesi hedeflenmiştir.

İvmeölçerler ile elde edilen ham sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi vasıtasıyla PULSE (2006) yazılımına aktarılmış ve bu yazılım ile ham sinyaller işlenebilir hale dönüştürülmüştür. Bu sinyaller de OMA (2006) yazılımı yardımıyla Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri'ne göre ayırıştırılarak öngerilmeli kirişin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir.

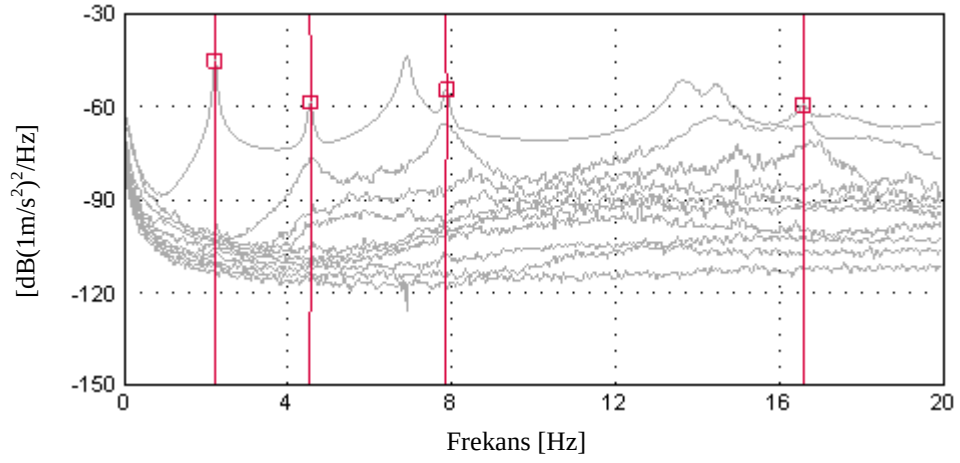


Şekil 2.47. Kirişte gerçekleştirilen çevresel titreşim testi

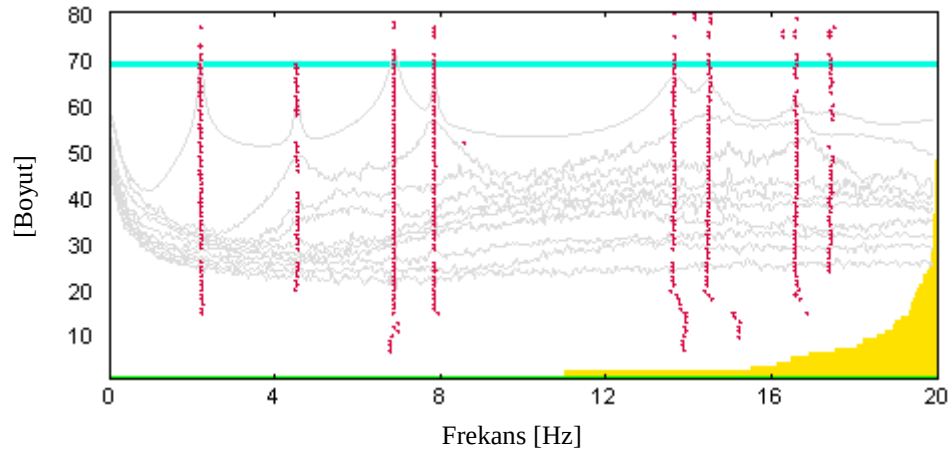
Öngerilmeli kirişin çevresel titreşim testlerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucunda belirlenen spektral yoğunluk matrisinin tekil değerleri Şekil 2.48’de verilmiştir. Şekil 2.48’de görülen sinyallerin pik değerlerinin seçilmesiyle öngerilmeli kirişin dinamik karakteristikleri (frekans ve mod şekli) hesaplanmıştır. SAB yöntemi kullanılarak kiriş için elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.49’da kararlılık diyagramı yardımıyla seçilen modlar ise Şekil 2.50’de verilmiştir. GFOA ve SAB yöntemleriyle öngerilmeli kirişin 4 modu için hesaplanan frekans değerleri Tablo 2.13’te verilmiştir. Öngerilmeli kirişin çevresel titreşim testlerinden, GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen mod şekilleri birbirine çok yakın olduğu için sadece GFOA’ya ait mod şekilleri verilmiştir (Şekil 2.51).

Tablo 2.13 GFOA ve SAB yöntemlerine göre belirlenen frekanslar

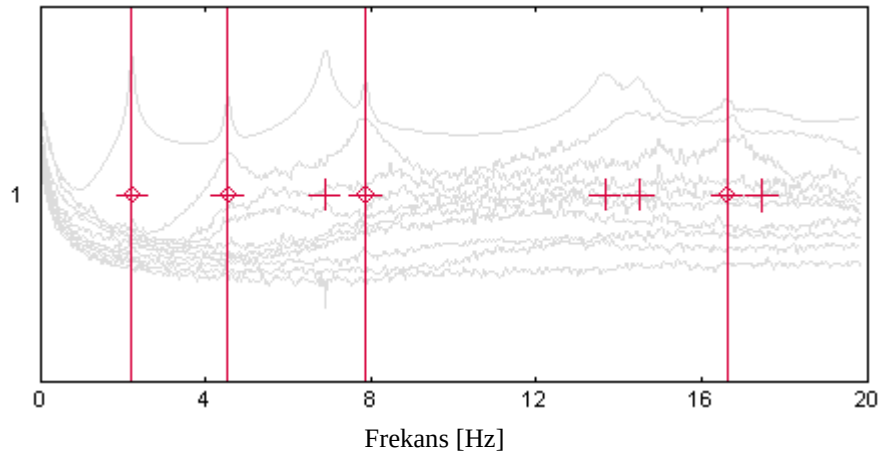
Yöntem	Frekanslar [Hz]			
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod
GFOA	2,225	4,543	7,867	16,590
SAB	2,218	4,540	7,872	16,610



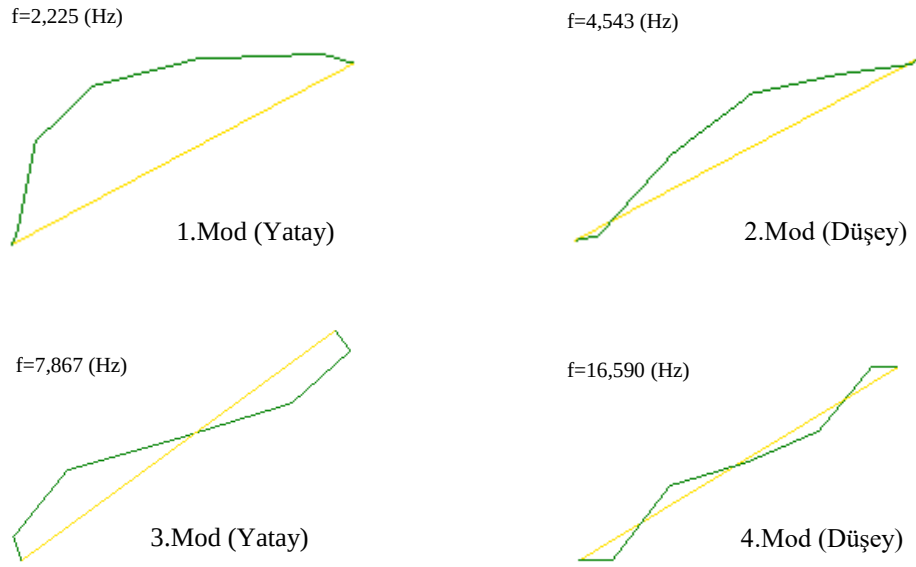
Şekil 2.48. Spektral yoğunluk matrisinin tekil değerleri



Şekil 2.49. Kirişin kararlılık diyagramı



Şekil 2.50. Kararlılık diyagramına göre seçilen modlar



Şekil 2.51. Kirişin çevresel titreşim yönteminden elde edilen mod şekilleri

2.7.5. Öngerilmeli Kiriş İçin Belirlenen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Öngerilmeli kirişin analitik, sayısal (SAP2000) ve deneysel yöntemler (GFOA ve SAB) kullanılarak elde edilen frekansları Tablo 2.14’te bir arada verilmiştir. Tablo 2.14’te görüldüğü gibi analitik ve sayısal, GFOA ve SAB yöntemleri ile elde edilen frekansların kendi aralarında oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Analitik ve sayısal yöntemler ile GFOA ve SAB yöntemleriyle elde edilen frekanslar arasındaki farkın ise %15’in altında olduğu görülmüştür.

Tablo 2.14. Kirişe ait frekans değerleri

Yöntem	Frekanslar [Hz]			
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod
Analitik	1,937	3,958	8,667	16,303
Sayısal	1,893	3,906	7,933	15,296
GFOA	2,225	4,543	7,867	16,590
SAB	2,218	4,540	7,872	16,610

3. BİLGİSAYAR PROGRAMLARININ OLUŞTURULMASI

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak oluşturulan, önerilmeli prefabrik kirişli köprülerin üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren I-CAD programı ve köprü üstyapısıyla altyapısı arasındaki bağlantıyı sağlayan elastomer mesnetlerin uygunluk kontrollerini gerçekleştiren SREI-CAD programı tanıtılmıştır.

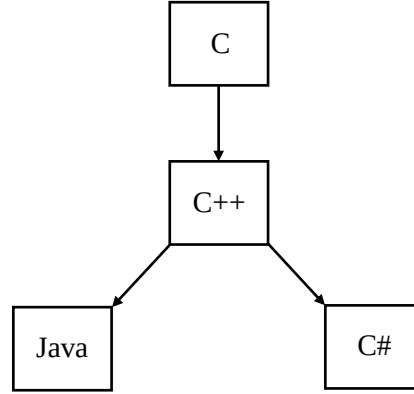
3.1. I-CAD Programına Giriş

Bu bölümde, ilk olarak I-CAD programının oluşturulmasında kullanılan programlama dili hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Sonra I-CAD programının genel akış şeması verilmiş ve programda bulunan menüler tanıtılmıştır. Daha sonra örnek seçilen önerilmeli prefabrik kirişli köprünün üstyapısının hesap ve tasarımı I-CAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak I-CAD programının doğruluğunu kontrol etmek için hesap ve tasarımı gerçekleştirilen köprü üstyapısında bulunan önerilmeli kirişin sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturularak, sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

3.1.2. Programlama Dili

Programlama dilleri, bilgisayarın icadından günümüze kadar geçen sürede artan ihtiyaçlar doğrultusunda gelişim göstermiştir. Programlama dilleri arasında önemli bir yere sahip olan ve yaygın olarak kullanılan diller arasında C ailesindeki programla dilleri ön sıralarda yer almaktadır. C ailesinde bulunan programlama dillerinin gelişim süreci Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmektedir (Schildt, 2002). Bu ailenin atası C programlama dili olup bu programlama dilinin gelişmiş versiyonu C++’dır. C Sharp (C#) ise Anders Heljberg’in başında olduğu bir ekip tarafından Java, C ve C++ dillerinin güçlü yönlerini bünyesine alarak geliştirilmiştir (Aktaş, 2013). Bu sayede pek çok açıdan söz konusu dillerden üstün bir yapıya sahiptir. Üstün yanlarına örnek olarak; ara yüzlerin kullanışlı ve kolay olması, program kodlarının anlaşılabilirliği, programın geliştirilmesinin herkes

tarafından yapılabilmesi, daha az kodlama ile çok fazla işlevin yerine getirilmesi (kalıtım özelliği), diğer kullanıcılar tarafından geliştirilen sınıfların, yapıların, nesnelerin ve metotların kullanılabilmesi sayılabilir. Bu üstünlüklerinden dolayı bu tez çalışmasında C# programlama dili tercih edilmiş olup derleyici olarak ise Microsoft Visual Studio (2015) kullanılmıştır.



Şekil 3.1. C# aile ağacı

3.1.3. C# Programlama Dili Üzerinde Crystal Reports Kullanılarak Raporlama

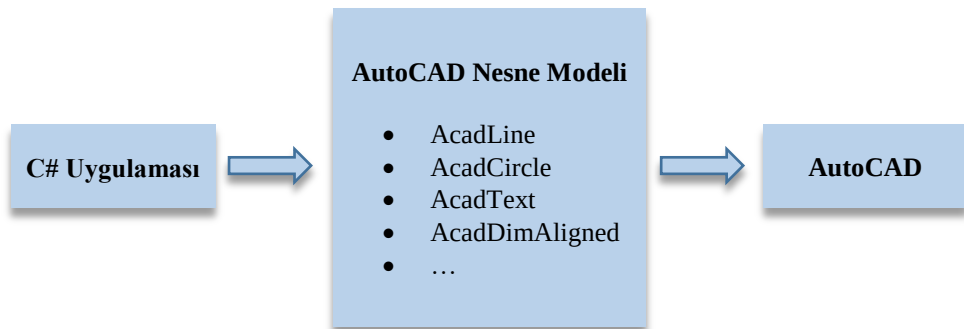
Yapı elemanlarının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bilgisayar programlarından beklenen en önemli özelliklerden birisi giriş verilerinin ve hesap sonucu elde edilen verilerin kullanıcıya sunulabilmesidir. I-CAD programı yardımıyla hesap ve tasarımı yapılan köprü üstyapısına ait proje raporunun elde edilmesi için Microsoft Visual Studio (2015) programında bulunan Crystal Reports eklentisi kullanılmıştır. Crystal Reports eklentisini aktif hale getirmek için kod sayfasının üst kısmına using CrystalDecisions.CrystalReports.Engine ve using CrystalDecisions.Shared direktifleri eklenmiştir.

3.1.4. C# Programlama Dili ile AutoCAD Üzerinde Çizim

Yapı elemanlarının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bilgisayar programlarından beklenen en önemli özelliklerden bir diğeri ise hesap ve tasarımı yapılan yapı elemanının uygulama projelerinin eksiksiz bir şekilde kullanıcıya sunulabilmesidir. Bu kapsamda I-CAD programında hesap ve tasarımı gerçekleştirilen yapı elemanlarının uygulama

projelerinin kullanıcıya sunulabilmesi için dünya genelinde en çok kullanılan çizim programlarından olan AutoCAD (2016) tercih edilmiştir. AutoCAD programının tercih edilmesinin en önemli nedeni I-CAD programının oluşturulmasında kullanılan C# programlama diliyle uyumlu olarak çalışabilmesidir. AutoCAD, sunmuş olduğu nesne modeli ile diğer uygulamalarla kendisi arasında çalışabilirlik sağlamaktadır. Bu nesne modeli içerisinde çizgi, daire, ölçeklendirme ve benzeri çizim nesneleri bulunmaktadır. Şekil 3.2’de AutoCAD ara yüzünün C# uygulaması ile ilişkisi gösterilmiştir.

AutoCAD nesne modelinde her bir nesnenin kendi özellikleri ve fonksiyonları bulunmaktadır. Bu özelliklerin ve fonksiyonların diğer uygulamalar tarafından kullanılabilmesi için AutoCAD bir uygulama programlama ara yüzü (API) sunmaktadır. Bu API’nın sunduğu nesne modelinin içindeki özellikler ve fonksiyonlar C# uygulamasının içinde ilklendirilir. Örneğin; bir çizgi (Line) çizileceği zaman AddLine isimli fonksiyon çağrılmakta ve bu fonksiyonun alacağı parametreler doldurularak nesne modelinin sunduğu özelliklere aktarılıp AutoCAD yazılımında bir çizgi çizdirilmektedir. C# uygulamasını AutoCAD yazılımı ile çalışabilir hale getirmek için AutoCAD COM kütüphanelerinin geliştirme ortamına eklenmesi gerekmektedir. Bunun için C:\Program Files\Common Files\Autodesk Shared dizininde bulunan acax19enu.tlb ve axdb19enu.tlb geliştirme editörünün referans kısmına eklenmesi gerekmektedir. Bu geliştirme editörünün eklenmesinden sonra yazılacak kod sayfasına geçilerek sınıfın başına using EnvDTE, using EnvDTE80 direktifleri eklenmektedir. C# kullanılarak 100 birimlik bir çizginin AutoCAD programında oluşturulması için yazılması gereken kod parçacığı Şekil 3.3’te görülmektedir.



Şekil 3.2. C#-AutoCAD ilişkisi

```

AcadLine line1 = default(AcadLine);
double[] line1_start= new double[3];
line_1[0] = 0;
line_1[1] = 0;
line_1[2] = 0;
double[] line1_end = new double[3];
end_1[0]=100;
end_1[1]=0;
end_1[2]=0;
line1=AcadApp.ActiveDocument.ModelSpace.AddLine(line1_start, line1_end);
line1.color = ACAD_COLOR.acByBlock;

```

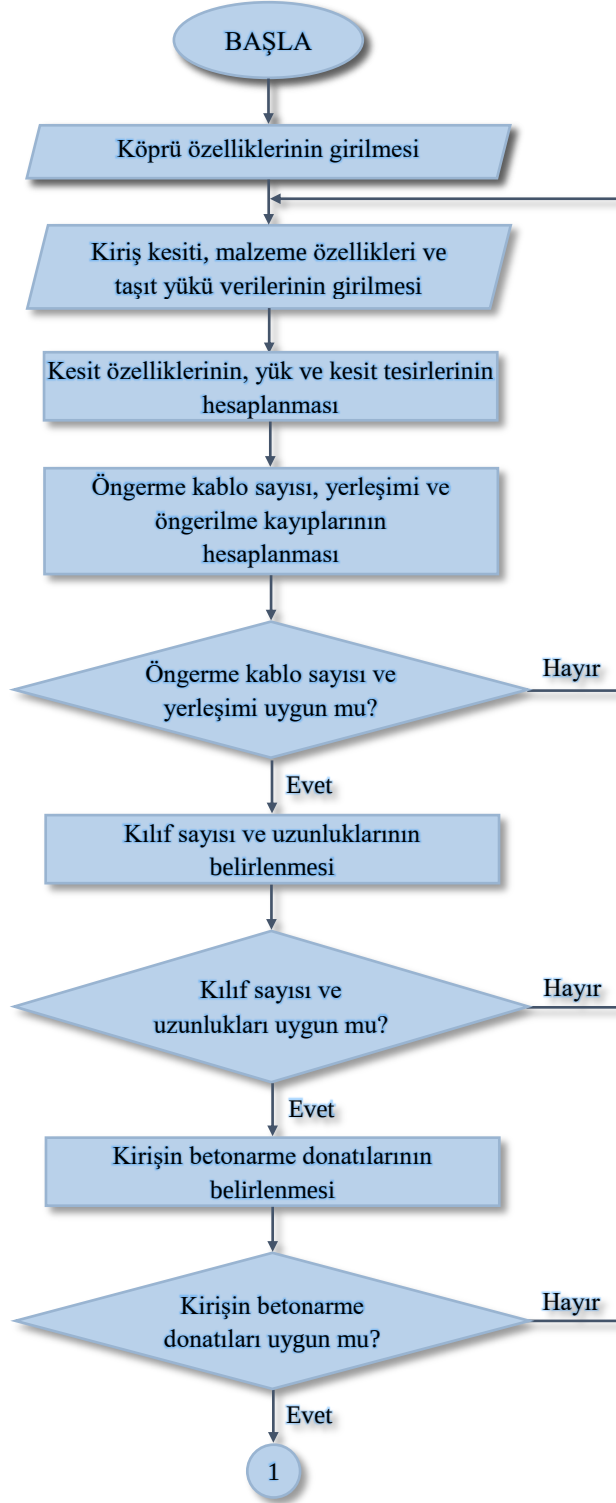
→ Çizgi adının atanması
 Çizgi başlangıç koordinatlarının atanması
 Çizgi bitiş koordinatlarının atanması
 → Çizgi renginin atanması

Şekil 3.3. AutoCAD’de çizgi oluşturmak için kullanılan C# kod parçasığı

3.1.5. I-CAD Programının Tanıtılması

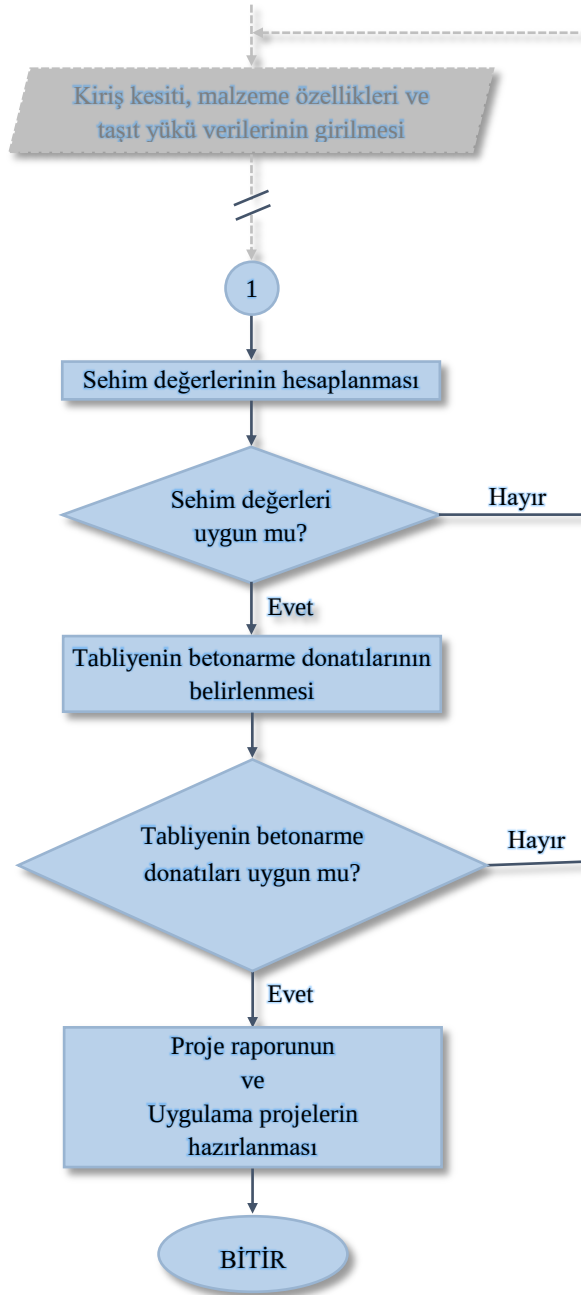
I-CAD programı farklı malzeme özelliklerine, açıklık ve genişliğe sahip önerilmeli prefabrik kirişli köprülerin farklı dış etkiler altındaki analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde tamamlanmasını ve buna ek olarak analizler sonucunda elde edilen; kesit özellikleri, kesit tesirleri, öngerme kablo sayısı ve yerleşim planı, kılıflanma parametreleri, sehim parametreleri, kiriş ve tabliye betonarme donatı planı gibi köprü üstyapısının inşasında gerekli bilgilerin raporlanmasını ve uygulama projelerinin oluşturulmasına olanak vermektedir. Bu kapsamda geliştirilen I-CAD programının genel akış diyagramı Şekil 3.4’te görülmektedir.

I-CAD programı beş ana menüden oluşmaktadır. Bu menüler sırasıyla Proje, Analiz Sonuçları, Rapor, Çizim ve Hakkında menüleridir. Proje menüsü ile köprü üstyapısının hesap ve tasarımında gerekli olan bilgilerin kullanıcı tarafından programa girilmesi işlemi yapılmaktadır. Analiz Sonuçları menüsünde, köprü üstyapısının analizi tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar özetlenmektedir. Rapor menüsü, köprü üstyapısı ile ilgili bilgilerin ve sonuçların sunulduğu raporun alınmasında kullanılmaktadır. Çizim menüsü yardımıyla, kiriş kalıp, kiriş betonarme donatı ve tabliye betonarme planları alınmaktadır. Hakkında menüsünde ise I-CAD programı hakkında genel bilgiler verilmektedir.



Şekil 3.4. I-CAD programının genel akış diyagramı

Şekil 3.4'ün devamı



3.1.5.1. Menü 1: Proje

Proje menüsü, önerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısı ile ilgili bilgilerin girildiği altı tane alt menüden oluşmaktadır. Bu alt menüler sırasıyla Proje Bilgileri, Köprü Özellikleri, Kesit Özellikleri, Malzeme Özellikleri, Taşıt Yüğü ve Analiz menüleri şeklindedir. Bu alt menüler arasındaki geçiş, Proje menüsünde bulunan dokuz butonlu şerit

menü yardımıyla ya da alt menülerin sağ alt köşesinde bulunan ileri geri butonları kullanılarak yapılabilmektedir. Şerit menüde bulunan butonların sıralaması veri girişini kolaylaştıracak şekilde düzenlenmiştir.

Proje menüsü içinde bulunan ilk alt menü Proje Bilgileri menüsüdür. Program çalıştırıldığında ilk olarak bu menü açılmaktadır. Bu menüde proje adı, projeyi hazırlayanın adı, unvanı ve proje sahibi bilgileri girilmektedir. Bu bilgiler girilmeden de analiz yapılabilen olup bu bilgiler sadece raporlama ve uygulama projelerin başlık kısmının doldurulmasında gerekli olmaktadır. Proje Bilgileri alt menüsüne ait ara yüz Şekil 3.5'te görülmektedir.

Proje Bilgileri

Proje Adı:

Projeyi Hazırlayan:

Unvanı:

Proje Sahibi:

Tarih: 04 Ocak 2018 Perşembe

Firma Logosunu Seçmek için Tıklayınız

Tarih

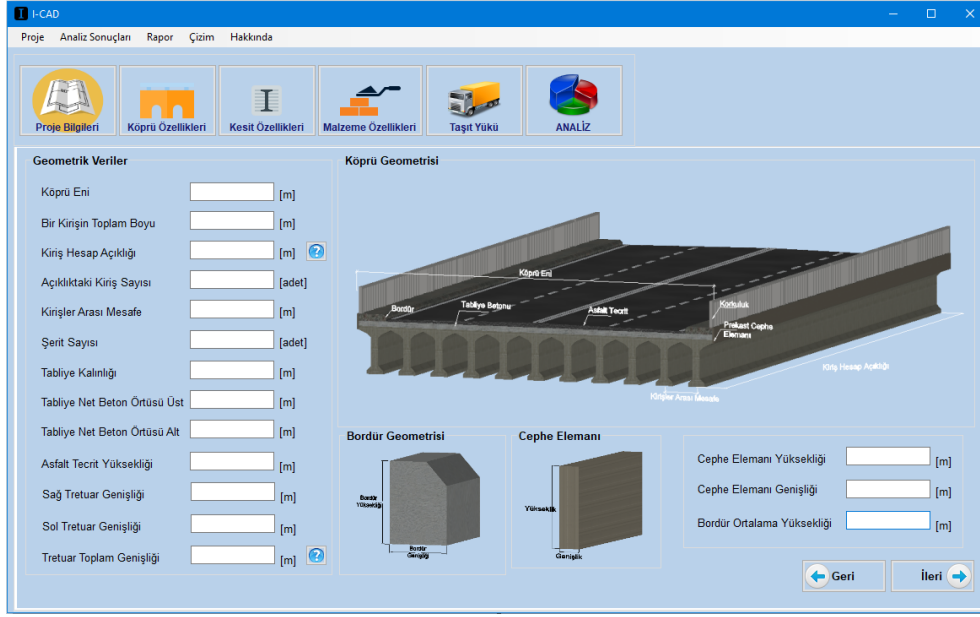
Pzt	Sal	Çar	Per	Cum	Cmt	Paz
25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4

Bugün: 04.01.2018

İleri ➔

Şekil 3.5. Proje bilgileri alt menüsünün ara yüzü

Proje menüsü içinde bulunan ikinci alt menü Köprü Özellikleri menüsüdür. Bu alt menüde köprü üstyapısına ait geometrik veriler, kiriş sayısı, tabliye ve asfalt kalınlığı, bordür ve cephe elemanına ait bilgilerin girişi yapılmaktadır. Bu bilgilerin daha iyi anlaşılması için Köprü Geometrisi, Bordür Geometrisi ve Cephe Elemanı çerçevelerinde sırasıyla verilmiş olan önerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısının, bordürün ve cephe elemanının şematik şekilleri ara yüze eklenmiştir. Bu alt menüye ait ara yüz Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Köprü özellikleri alt menüsünün ara yüzü

Proje menüsü içinde bulunan üçüncü alt menü Kesit Özellikleri menüsüdür (Şekil 3.7). Bu alt menü Hazır Kiriş Tipleri, Kesit Ölçüleri, Kesit Geometrisi, Öngerme Kablosu ve Kesit Özellikleri çerçevelerinden oluşmaktadır. Bu alt menüde köprü üstyapısında kullanılan öngerilmeli kirişin kesit özellikleri ve bu kirişte kullanılan öngerme kablosunun çapı, kablolar arası mesafesi ve pas payı verileri girilmektedir. Öngerilmeli kiriş kesitine ait ölçülerin girişi iki şekilde yapılabilmektedir. Birinci seçenek Hazır Kiriş Tipleri çerçevesi içerisinde bulunan listede tanımlanmış 56 farklı kirişten biri seçilerek kiriş kesit ölçülerinin otomatik olarak çağrılmasıdır. İkinci seçenek ise Kesit Ölçüleri çerçevesi içinde bulunan verilerin Kesit Geometrisi çerçevesinde verilmekte olan öngerilmeli kirişin şematik şekli yardımıyla kullanıcı tarafından girilmesidir. Kirişte kullanılan öngerme kablolarına ait bilgiler Öngerme Kablosu çerçevesi içinde bulunan veri giriş alanları yardımıyla girilmektedir. Öngerme kablosunun çapı için programda belirlenmiş olan üç tipten birisi seçilebilir. Öngerme kabloları arası mesafe için AASHTO LRFD (2012)'de kablo çapına göre belirlenmiş olan üç farklı değere ek olarak kullanıcının istediği değeri girmesi de mümkündür. Pas payı seçiminde etkili olan parametrelerden birisi elemanın maruz kaldığı çevre koşuldur. Çevre koşulları için AASHTO LRFD (2012)'de tuzlu suya maruz, kıyı bölgesi, buz çözücü tuza maruz ve diğer durumlar olmak üzere dört durum bulunmaktadır. Programa bu dört çevre koşulu için belirlenmiş değerler ya da kullanıcı tarafından belirlenen bir pas payı değeri girilebilmektedir. Bu menüde bulunan Kesit

Özellikleri çerçevesinde, seçilen ya da ölçüleri girilen kiriş kesiti için hesaplanan verilerin bir özeti sunulmaktadır.

Proje menüsü içinde bulunan dördüncü alt menü Malzeme Özellikleri menüsüdür. Bu alt menü Öngerme Kablosu, Kiriş Betonarme Donatısı, Tabliye Betonarme Donatısı, Beton ve Diğer Yapı Malzemeleri çerçevelerinden oluşmaktadır. Öngerme Kablosu çerçevesinde; öngerme kablo sınıfı, kopma dayanımı, birim hacim ağırlığı ve elastisite modülüne ait veri giriş alanları bulunmaktadır. AASHTO LRFD (2012)'de bulunmakta olan 250K (Grade 250) ve 270K (Grade 270) öngerme kablo sınıfları programda hazır olarak bulunmaktadır. Bu kablo sınıflarından herhangi biri seçildiğinde, seçilen kablo sınıfına ait kopma dayanımı ve birim hacim ağırlığı otomatik olarak tanımlanmaktadır. Bu kablo sınıflarının dışında bir seçim yapılması durumunda kullanıcı seçtiği kablo sınıfına ait bilgileri girmesi gerekmektedir. Kiriş Betonarme Donatısı ve Tabliye Betonarme Donatısı çerçeveleri içinde Boyuna Donatı ve Enine Donatı çerçeveleri bulunmaktadır. Bu çerçeveler içerisinde bulunan veri giriş alanları yardımıyla öngerilmeli kirişte ve tabliyede kullanılacak olan boyuna ve enine betonarme donatılarına ait bilgilerin girişi yapılmaktadır. Beton çerçevesi içinde Prefabrik Kiriş ve Tabliye çerçeveleri bulunmaktadır. Her iki çerçeve içerisinde bulunan beton sınıfı veri giriş alanından herhangi bir beton sınıfı seçildiğinde, seçilen beton sınıfına ait elastisite modülü Pauw (1960) tarafından belirlenmiş olan amprik formüle göre belirlenmektedir. Bu değer istenildiği takdirde değiştirilebilir. Diğer Yapı Malzemeleri çerçevesinde, köprü üstyapısında bulunan fakat taşıyıcı olmayan diğer yapı elemanlarının köprü üzerinde oluşturduğu ölü yüklerin hesaplanması için gerekli olan birim hacim ağırlıklarının girişleri yapılmaktadır. Bu alt menüye ait ara yüz Şekil 3.8'de görülmektedir.

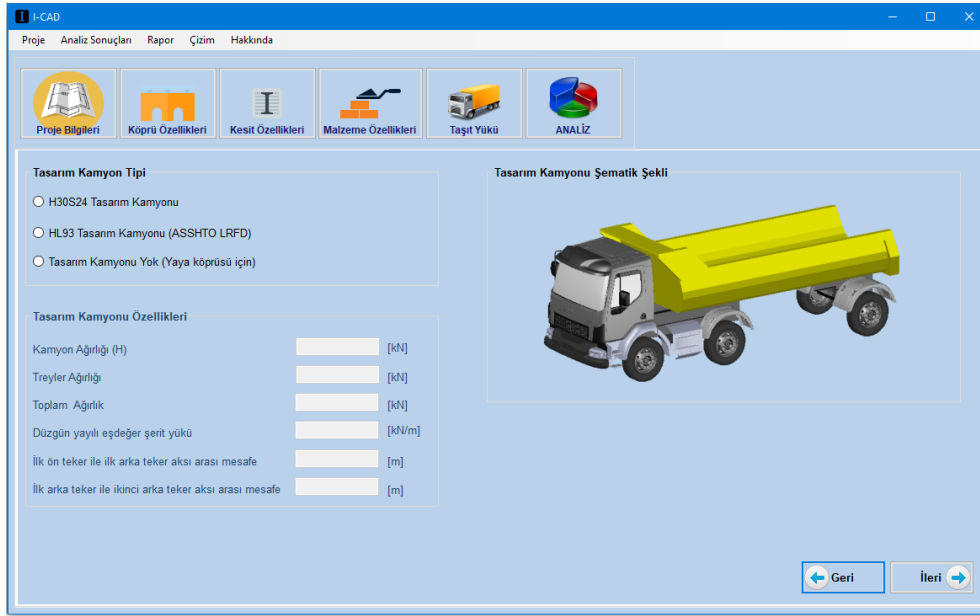
Proje menüsü içinde bulunan beşinci alt menü Taşıt Yüğü menüsüdür (Şekil 3.9). Bu alt menü Tasarım Kamyon Tipi, Tasarım Kamyonu Özellikleri ve Tasarım Kamyonu Şematik Şekli çerçevelerinden oluşmaktadır. Tasarım kamyon tipi olarak AASHTO LRFD (2012) ve Karayolları Teknik Şartnamesinde sırasıyla tanımlanmış olan HL93 ve H₃₀S₂₄ tasarım kamyonları bulunmaktadır. Bu tasarım kamyonlarından herhangi biri seçildiği takdirde Tasarım Kamyonu Özellikleri çerçevesi içerisinde bu kamyonu ait bilgiler özetlenmektedir. HL93 ve H₃₀S₂₄ tasarım kamyonlarının dışında, Tasarım Kamyon Tipi çerçevesinde, Tasarım Kamyonu Yok seçeneği de bulunmaktadır. Bu seçenek, yaya köprüsü ve benzeri köprülerin tasarımında tasarım kamyon yükünün analizlerde dikkate alınmadığı durumlarda kullanılmaktadır.

Şekil 3.7. Kesit özellikleri alt menüsünün ara yüzü

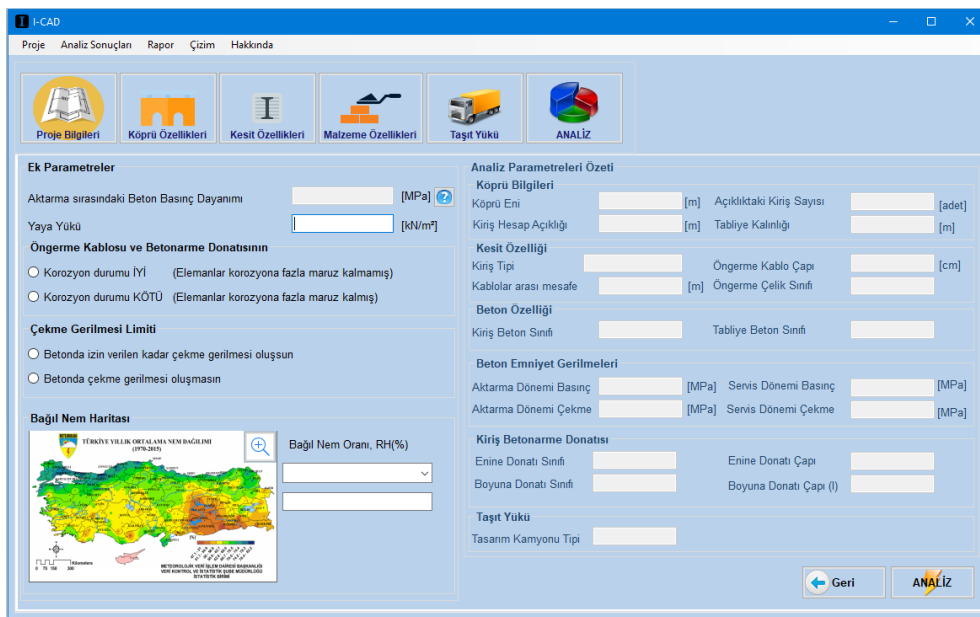
Şekil 3.8. Malzeme özellikleri alt menüsünün ara yüzü

Proje menüsü içinde bulunan altıncı alt menü ANALİZ menüsüdür (Şekil 3.10). Bu alt menü Ek Parametreler ve Analiz Parametreleri Özeti çerçevelerinden oluşmaktadır. Ek Parametreler çerçevesi içinde köprü üstyapısının analizi için gerekli olan ve daha önceki menülerde veri girişi yapılmamış parametrelerin girişi yapılmaktadır. Bu parametreler yaya yükü, öngerme kablosu ve betonarme çeliğinin korozyon durumu, betonda çekme

gerilmesi limiti ve köprünün yapıldığı yerin bağıl nem durumları ile ilgilidir. Analiz Parametreleri Özeti çerçevesinde veri girişi tamamlanmış parametrelerin bir özeti sunulmaktadır. Bu çerçeve sayesinde veri girişi yapılmış parametrelerin genel bir kontrolü kolay bir şekilde yapılabilir. Proje sekmesinde bulunan menülerdeki verilerin girişi tamamlandıktan sonra köprü üstyapısının analizini başlatmak için ANALİZ menüsünün sağ alt köşesinde bulunan ANALİZ butonu tıklanmalıdır.



Şekil 3.9. Taşıt yükü alt menüsünün ara yüzü



Şekil 3.10. Analiz alt menüsünün ara yüzü

3.1.5.2. Menü 2: Analiz Sonuçları

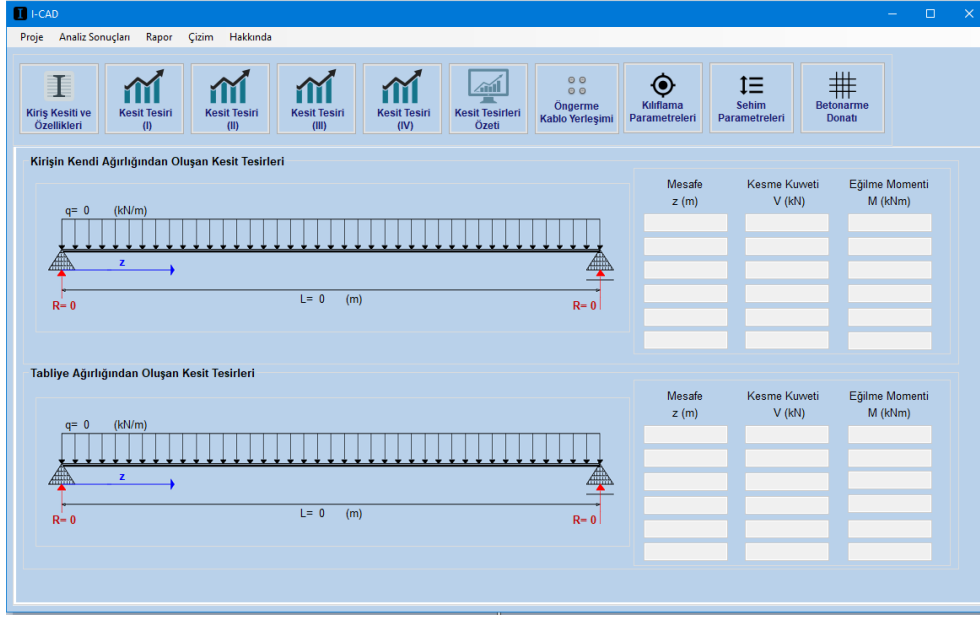
Analiz Sonuçları menüsünde önerilmeli prefabrik kirişli köprü üstyapısının analizi tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar özetlenmektedir. Bu menü, Kiriş Kesiti ve Özellikleri, Kesit Tesiri (I, II, III ve IV), Kesit Tesirleri Özeti ve Öngerme Kablo Yerleşimi, Kılıflama Parametreleri, Şehim Parametreleri ve Betonarme Donatı alt menülerini kapsamaktadır. Bu alt menüler arasındaki geçiş, Analiz Sonuçları menüsünde bulunan on butonlu şerit menü yardımıyla yapılmaktadır. Şerit menüde bulunan butonların sıralaması analiz sonuçlarının takip edilmesini kolaylaştıracak şekilde düzenlenmiştir.

Analiz Sonuçları menüsü içinde bulunan ilk alt menü Kiriş Kesiti ve Özellikleri menüsüdür. Bu alt menü Prefabrik Kiriş ve Kompozit Kiriş çerçevelerinden oluşmaktadır. Bu çerçevelerde sırasıyla prefabrik ve kompozit kirişleri için hesaplanan kesit alanı, atalet momenti, mukavemet momenti ve kirişin ağırlık merkezine ait bilgiler gösterilmektedir. Bu alt menüye ait ara yüz Şekil 3.11’de görülmektedir.

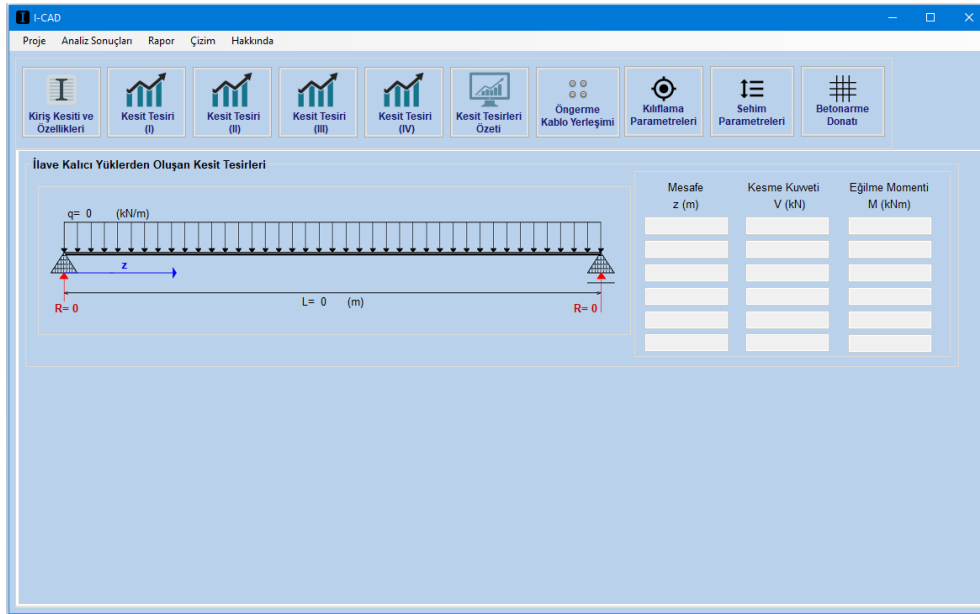
Öngerilmeli kirişlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlardan dolayı bir kirişte meydana gelen yük durumu ve bu yükün oluşturduğu kesit tesirleri, Kesit Tesiri (I ve II) alt menülerinde gösterilmektedir. Kesit Tesiri I menüsünde kirişin kendi ağırlığından ve tabliye ağırlığından, Kesit Tesiri II menüsünde ise ilave olmayan kalıcı yüklerden dolayı meydana gelen yük durumu ve kesit tesirleri gösterilmektedir. Kesit Tesiri I ve Kesit Tesiri II menüleri sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13’te gösterilmektedir.

The screenshot displays the I-CAD software interface with the 'Analiz Sonuçları' (Analysis Results) menu selected. The 'Kiriş Kesiti ve Özellikleri' (Beam Section and Properties) sub-menu is active, showing two main categories: 'Prefabrik Kiriş' (Prefabricated Beam) and 'Kompozit Kiriş' (Composite Beam). Each category has a list of input fields for various properties, including 'Kesit Alanı' (Section Area), 'Kiriş Yüksekliği' (Beam Height), 'Atalet Momenti' (Moment of Inertia), 'Mukavemet Momenti' (Resistance Moment), and 'Kiriş Ağırlık Merkezinin' (Beam Weight Center). The 'Kompozit Kiriş' section also includes 'Dönüştürülmüş efektif tabliye genişliği' (Transformed effective slab width).

Şekil 3.11. Kiriş kesiti ve özellikleri alt menüsünün ara yüzü

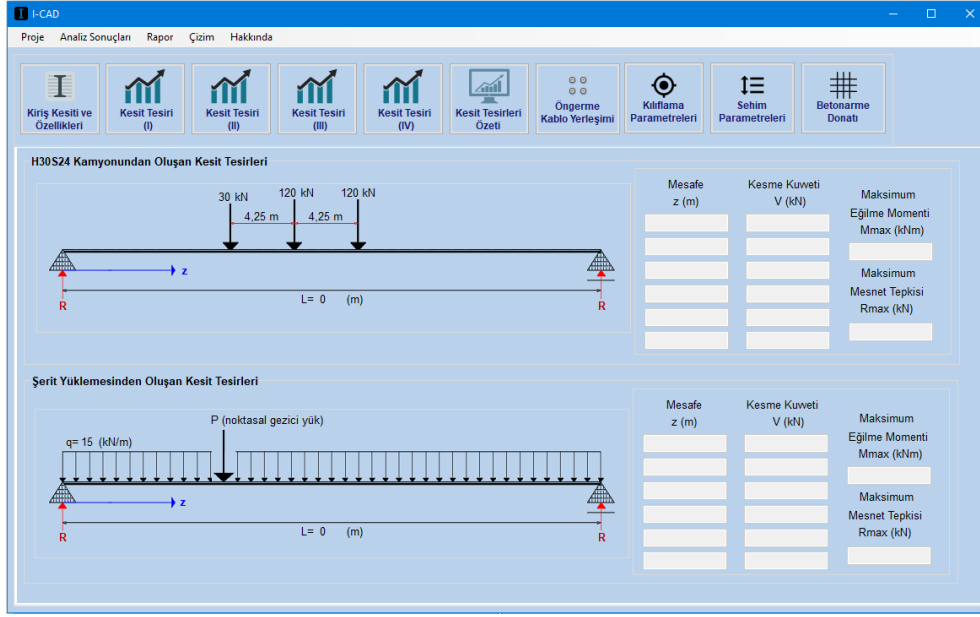


Şekil 3.12. Kesit tesiri I alt menüsünün ara yüzü

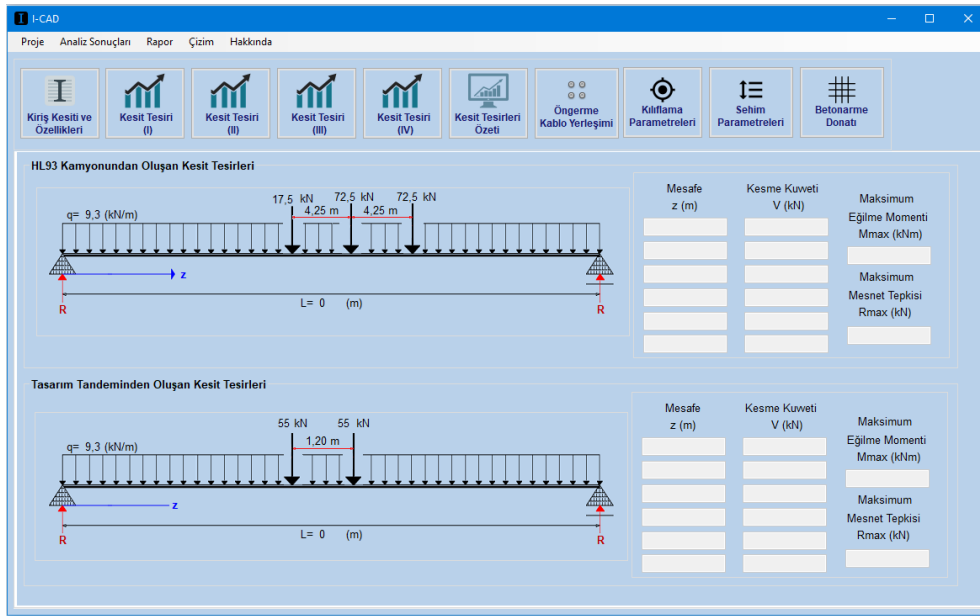


Şekil 3.13. Kesit tesiri II alt menüsünün ara yüzü

Kesit Tesiri III ve Kesit Tesiri IV alt menülerinde H₃₀S₂₄ ve HL93 tasarım kamyon yüklerinin öngerilmeli kiriş üzerinde oluşturduğu yük durumu ve kesit tesirleri gösterilmektedir. Kesit Tesiri III ve Kesit Tesiri IV menüleri sırasıyla Şekil 3.14 ve 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Kesit tesiri III alt menüsünün ara yüzü



Şekil 3.15. Kesit tesiri IV alt menüsünün ara yüzü

Kesit Tesirleri Özeti menüsünde, öngerilmeli köprünün aktarma, tabliye prizini almadan önceki ve servis dönemlerinde öngerilmeli kirişte meydana gelen kesit tesirleri gösterilmektedir. Bu menüde gösterilen kesit tesirlerinde henüz kirişteki öngerme kablo sayısı ve konumu belirlenmediği için öngerme kablosundan kaynaklanan kesit tesirlerini içermemektedir. Bu menüye ait ara yüz Şekil 3.16’da görülmektedir.

Öngerme Kablo Yerleşimi menüsü Kablo Yerleşimi ve Öngerme Kayıpları çerçevelerinden oluşmaktadır. Kablo Yerleşimi çerçevesinde bulunan beyaz bölümde seçilen kirişin alt başlığının ve alt başlığına yerleştirilen öngerme kablolarının çizimi yapılmaktadır. Öngerilme Kayıpları çerçevesinde ise kısa ve uzun dönem kayıpların miktarı ve kayıp yüzdeleri özetlenmektedir. Bu menüye ait ara yüz Şekil 3.17’de görülmektedir.

Şekil 3.16. Kesit tesirleri özeti alt menüsünün ara yüzü

Şekil 3.17. Öngerme kablo yerleşimi alt menüsünün ara yüzü

Kılıflama Parametreleri menüsünde önerilmeli kirişin aktarma döneminde özellikle kirişin mesnet bölgelerinde meydana gelen aşırı gerilmeleri emniyet gerilmeleri seviyesine indirmek için kullanılan kılıflara ait boy ve adet bilgileri özetlenmektedir. Bu menüye ait ara yüz Şekil 3.18’de görülmektedir.

Sehim Parametreleri menüsünde önerilmeli kirişte meydana gelen kısa dönemde, uzun dönemde ve hareketli yükte meydana gelen sehim ve dönme parametreleri özetlenmektedir. Kısa dönemde meydana gelen sehim değerleri hem birinci merteye hem de elastik-stabilite teorileri kullanılarak elde edilmiştir. Uzun dönemde meydana gelen sehim ve dönme parametrelerinin hesabı ise kısa dönemde elde edilen değerlerin Martin (1977) tarafından belirlenen katsayılar ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Bu menüye ait ara yüz Şekil 3.19’da görülmektedir.

Betonarme Donatı menüsünde önerilmeli kirişte ve tabliyede kullanılan boyuna ve enine donatının geometrik ve malzeme özelliklerinin bir özeti sunulmakta olup önerilmeli kirişte ve tabliyede kullanılan donatılar ile ilgili detaylı bilgi çizim menüsünde sunulmaktadır. Bu menüye ait ara yüz Şekil 3.20’de görülmektedir.

Şekil 3.18. Kılıflama parametreleri alt menüsünün ara yüzü

Sehim Hesabı

Kısa Dönem Sehim ve Dönme Hesabı

	Sehim (cm)	Dönme (rad)
Aktarma Döneminde Kirişin Kendi Ağırlığında Oluşan Sehim ve Dönme		
Aktarma Döneminde Öngerilme Kuvvetinden Oluşan Sehim ve Dönme		
Aktarma Dönemi Sonunda Oluşan Sehim ve Dönme		
Depolama Sırasından Montaja Kadar Oluşan Sehim ve Dönme		
Tabliye Ağırlığından Oluşan Sehim ve Dönme		
İlave Kalıcı Yüklerden Kompozit Kesitte Oluşan Sehim ve Dönme		

Elastik Stabilite ile Kısa Dönem Sehim Hesabı

Sehim (cm)

Uzun Dönem Sehim ve Dönme Hesabı (Sabit Yük Altında)

Sehim (cm)	Dönme (rad)

Hareketli Yükten Oluşan Sehim ve Dönme Hesabı

Sehim (cm)	Dönme (rad)	Sehim Kontrol
Sehim Sınırı (L/800)		

Şekil 3.19. Sehim parametreleri alt menüsünün ara yüzü

Betonarme Donatı

Öngerilmeli Kirişte Kullanılan Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı

Donatı Sınıfı	
Donatı Çapı (1)	
Donatı Çapı (2)	
Birim Hacim Ağırlığı	[kN/m ³]
Elastisite Modülü	[MPa]

Enine Donatı (Etriye)

Donatı Sınıfı	
Donatı Çapı	
Birim Hacim Ağırlığı	[kN/m ³]
Elastisite Modülü	[MPa]

Tabliyede Kullanılan Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı (Aderans)

Donatı Sınıfı	
Donatı Çapı	
Birim Hacim Ağırlığı	[kN/m ³]
Elastisite Modülü	[MPa]

Enine Donatı

Donatı Sınıfı	
Donatı Çapı	
Birim Hacim Ağırlığı	[kN/m ³]
Elastisite Modülü	[MPa]

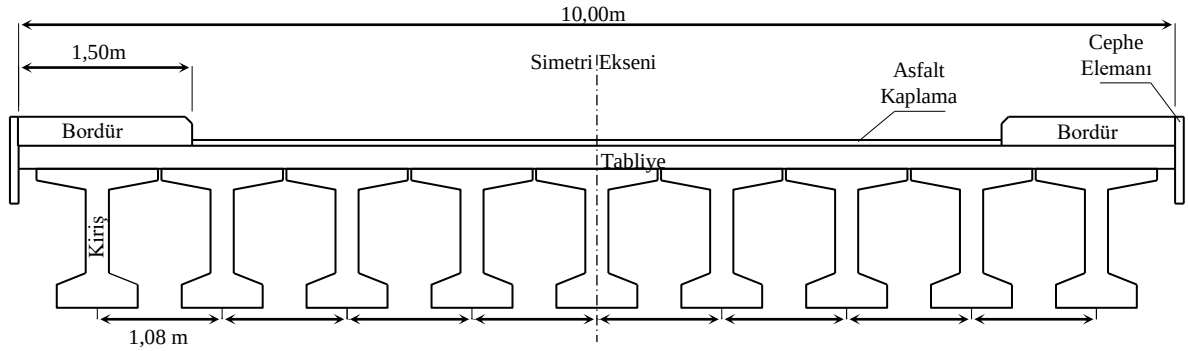
NOT

Öngerilmeli köprü kirişlerinde ve tablidesinde kullanılan betonarme donatılarının detayları ve metrajı ile ilgili bilgiler Çizim menüsünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

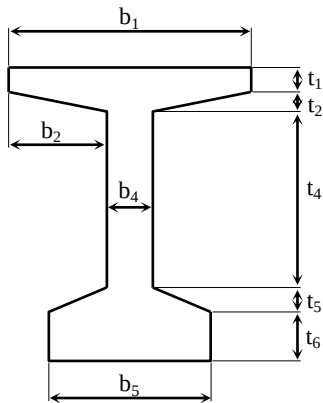
Şekil 3.20. Betonarme donatı alt menüsünün ara yüzü

3.1.5.3. Geliştirilen I-CAD Programıyla Öngerilmeli Prefabrik Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımı

Bu bölümde, Trabzon’da yapılacağı varsayılan hesap açıklığı 24,8m ve genişliği 10m olan 0,2m kalınlığındaki tabliyesi 9 adet 1,2m yüksekliğinde öngerilmeli I kiriş ile desteklenmiş bir köprü örnek olarak seçilmiş ve köprü üstyapısının hesap ve tasarımı geliştirilen I-CAD programı yardımıyla yapılmıştır. Örnek seçilen köprü üstyapısının ve köprü üstyapısında kullanılan öngerilmeli kirişin kesiti sırasıyla Şekil 3.21 ve 3.22’de, kiriş kesitinin ölçüleri ise Tablo 3.1’de verilmiştir. Köprü kirişlerinde ve tabliyesinde kullanılan beton sınıfları sırasıyla C40/50 ve C25/30’dur. Öngerilmeli kirişlerde düşük gevşemeli (270K), karakteristik çekme dayanımı 1862MPa olan 1,524cm çaplı öngerme kablosu kullanılmış olup öngerme kabloları kirişin alt başlığına merkezleri arasında 6cm mesafe olacak şekilde yerleştirilecektir. Kirişlerdeki pas payı 2,5cm’dir.



Şekil 3.21. Örnek olarak seçilen köprü üstyapısı



Şekil 3.22. Örnek seçilen köprü kirişi

Tablo 3.1. Kirişin kesit ölçüleri

Kesit Ölçüleri (cm)					
b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	
105	42,5	0	20	70	
t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
10	8	0	72	10	20

Köprü üstyapısının tasarımında hareketli yük olarak $H_{30S_{24}}$ tasarım kamyonu ve yaya yükü için 3kN/m^2 yayılı yük dikkate alınmıştır. Analizde önerilmeli kirişin üretiminde kullanılan öngerme ve betonarme donatısının korozyona uğramadığı durumu dikkate alınmıştır. Ayrıca önerilmeli kirişte servis yükleri altında izin verilen çekme gerilmesi kadar gerilmenin oluşması istenmektedir. Analizde gerekli olan köprü özellikleri Tablo 3.2’de, diğer yapı malzemelerin ağırlıkları Tablo 3.3’te, öngerme kablosu, enine ve boyuna donatı, prefabrik kiriş ve tabliyede kullanılan betona ait malzeme özellikleri ise Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.2. Köprü özellikleri

Köprü Özellikleri		Birimi
Köprü Eni	10,00	m
Bir Kirişin Toplam Boyu	25,30	m
Kiriş Hesap Açıklığı	24,80	m
Açıklıktaki Kiriş Sayısı	9	adet
Kirişler Arası Mesafe	1,08	m
Şerit Sayısı	2	adet
Tabliye Kalınlığı	0,20	m
Asfalt Tecrit Yüksekliği	0,05	m
Bordür Toplam Genişliği	3,00	m
Cephe Elemanı Yüksekliği	0,75	m
Cephe Elemanı Genişliği	0,075	m

Tablo 3.3. Diğer yapı malzemelerinin ağırlıkları

Diğer Yapı Malzemeleri		Birimi
Asfalt + Tecrit Birim Hacim Ağırlığı	23	kN/m^3
Bordür Birim Hacim Ağırlığı	25	kN/m^3
Cephe Elemanı Birim Hacim Ağırlığı	25	kN/m^3
Korkuluk Birim Uzunluk Ağırlığı	1,50	kN/m

Tablo 3.4. Malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri			Birimi
Öngerme Kablosu	Öngerme Kablo Sınıfı	270K	-
	Kopma Dayanımı	1862	MPa
	Birim Hacim Ağırlığı	78,5	kN/m ³
	Elastisite Modülü	193053,2	MPa
	Poisson Oranı	0,3	-
Boyuna Donatı	Donatı Sınıfı	S420	-
	Donatı Çapı	20(I) 12(II)	mm
	Birim Hacim Ağırlığı	78,5	kN/m ³
	Elastisite Modülü	200000	MPa
	Poisson Oranı	0,3	-
Enine Donatı	Donatı Sınıfı	S420	-
	Donatı Çapı	10	mm
	Birim Hacim Ağırlığı	78,5	kN/m ³
	Elastisite Modülü	200000	MPa
	Poisson Oranı	0,3	-
Prefabrik Kiriş	Beton Sınıfı	C40/50	-
	Elastisite Modülü	33836	MPa
	Birim Hacim Ağırlığı	25	kN/m ³
	Possion Oranı	0,2	-
Tabliye	Beton Sınıfı	C25/30	-
	Elastisite Modülü	26750	MPa
	Birim Hacim Ağırlığı	25	kN/m ³
	Possion Oranı	0,2	-

Örnek olarak seçilen öngerilmeli prefabrik I kirişli köprünün yukarıda verilen özelliklerinin girilmesi, üstyapısının hesap ve tasarımının yapılmasında I-CAD programı kullanımı aşağıda açıklanmıştır.

I-CAD programı çalıştırıldığında ilk olarak Proje menüsünde bulunan Proje Bilgileri alt menüsü açılmaktadır. Bu alt menünün veri girişi yapılmış hali Şekil 3.23'te görülmektedir. Örnek olarak seçilen öngerilmeli prefabrik I kirişli köprünün Tablo 3.2'de verilen özelliklerinin Proje menüsünde bulunan Köprü Özellikleri alt menüsüne girilmiş hali ise Şekil 3.24'te görülmektedir.

Proje Bilgileri

Proje Adı: Örnek Viyadük Projesi

Projeyi Hazırlayan: Barbaros ATMACA

Unvanı: Yüksek İnşaat Mühendisi

Proje Sahibi: Karayolları Genel Müdürlüğü

Tarih: 14 Şubat 2018 Çarşamba

Tarih

Şubat 2018

Pzt	Sal	Çar	Per	Cum	Cmt	Paz
29	30	31	1	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	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11

Bugün: 14.02.2018

İleri

Şekil 3.23. Proje bilgileri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

Geometrik Veriler

Köprü Eni: 10 [m]

Bir Kirişin Toplam Boyu: 25,3 [m]

Kiriş Hesap Açıklığı: 24,8 [m]

Açıklıktaki Kiriş Sayısı: 9 [adet]

Kirişler Arası Mesafe: 1,08 [m]

Şerit Sayısı: 2 [adet]

Tablilye Kalınlığı: 0,2 [m]

Tablilye Net Beton Örtüsü Üst: 0,025 [m]

Tablilye Net Beton Örtüsü Alt: 0,025 [m]

Asfalt Tecrit Yüksekliği: 0,05 [m]

Sağ Tretuar Genişliği: 1,5 [m]

Sol Tretuar Genişliği: 1,5 [m]

Tretuar Toplam Genişliği: 3 [m]

Köprü Geometrisi

Bordür Geometrisi

Cephe Elemanı

Cephe Elemanı Yüksekliği: 0,75 [m]

Cephe Elemanı Genişliği: 0,075 [m]

Bordür Ortalama Yüksekliği: 0,25 [m]

Geri İleri

Şekil 3.24. Köprü özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

Örnek köprü üstyapısında kullanılan öngerilmeli kiriş (Şekil 3.22), I-CAD programında tanımlanmış olan 56 kiriş tipinden farklı olduğu için kiriş kesitine ait ölçülerin girişi Kesit Özellikleri alt menüsündeki Kesit Ölçüleri çerçevesinde bulunan veri girişi alanları kullanılarak yapılmıştır. Kiriş kesitine ait ölçülerin girişi tamamlandıktan sonra kirişe ait kesit alanı, atalet momenti gibi hesaplanan bazı kesit özellikleri bu alt menüde bulunan Kesit Özellikleri çerçevesinde görüntülenmektedir. Kirişte kullanılan öngerme kablosuna ait çap, kablolar arası mesafe ve pas payı verilerinin girişi ise Öngerme Kablosu çerçevesinden yapılmıştır. Kesit özellikleri ile ilgili verilerin girişi tamamlandıktan sonra Kesit Özellikleri alt menüsünün ara yüzü Şekil 3.25'te görülmektedir.

Şekil 3.25. Kesit özellikleri alt menüsünün ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

Örnek köprüde kullanılan öngerme kablosu, betonarme donatısı, beton ve diğer yapı malzemeleri ile ilgili Tablo 3.3 ve 3.4'te verilen bilgilerin girişi Malzeme Özellikleri alt menüsünden yapılmıştır. Veri girişi tamamlandıktan sonra Malzeme Özellikleri alt menüsünün ara yüzü Şekil 3.26'da görülmektedir. Köprü üstyapısının tasarımında kullanılan kamyon yükü ile ilgili ara yüz ise Şekil 3.27'de görülmektedir.

Öngerme Kablo

Öngerme Kablo Sınıfı: 270K Tıp Kablo (Grade 270)

Kopma Dayanımı: 1862 [MPa]

Birim Hacim Ağırlığı: 78,5 [kN/m³]

Elastisite Modülü: 193053,2 [MPa]

Kiriş Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı

Donatı Sınıfı: S420

Donatı Çapı (1): 20

Donatı Çapı (2): 12

Birim Hacim Ağırlığı: 78,5 [kN/m³]

Elastisite Modülü: 200000 [MPa]

Enine Donatı (Etriye)

Donatı Sınıfı: S420

Donatı Çapı: 10

Birim Hacim Ağırlığı: 78,5 [kN/m³]

Elastisite Modülü: 200000 [MPa]

Tabliye Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı (Aderans)

Donatı Sınıfı: S420

Donatı Çapı: 14

Birim Hacim Ağırlığı: 78,5 [kN/m³]

Elastisite Modülü: 200000 [MPa]

Enine Donatı

Donatı Sınıfı: S420

Donatı Çapı: 16

Birim Hacim Ağırlığı: 78,5 [kN/m³]

Elastisite Modülü: 200000 [MPa]

Beton

Prefabrik Kiriş

Beton Sınıfı: C40/50

Elastisite Modülü: 33836 [MPa]

Birim Hacim Ağırlığı: 25 [kN/m³]

Tabliye

Beton Sınıfı: C25/30

Elastisite Modülü: 26750 [MPa]

Birim Hacim Ağırlığı: 25 [kN/m³]

Diğer Yapı Malzemeleri

Asfalt+Tecrit Birim Hacim Ağırlığı: 23 [kN/m³]

Bordür Birim Hacim Ağırlığı: 25 [kN/m³]

Cephe Elemanı Birim Hacim Ağırlığı: 25 [kN/m³]

Korkuluk Birim Uzunluk Ağırlığı: 1,5 [kN/m]

Şekil 3.26. Malzeme özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

Tasarım Kamyon Tipi

☒ H30S24 Tasarım Kamyonu

☐ HL93 Tasarım Kamyonu (ASSHTO LRFD)

☐ Tasarım Kamyonu Yok (Yaya köprüsü için)

H30S24

Kamyon Ağırlığı (H)	300	[kN]
Treyler Ağırlığı	240	[kN]
Toplam Ağırlık	540	[kN]
Düzgün yayılı eşdeğer genit yükü	15	[kN/m]
İlk ön teker ile ilk arka teker aksı arası mesafe	4,25	[m]
İlk arka teker ile ikinci arka teker aksı arası mesafe	4,25	[m]

Tasarım Kamyonu Şematik Şekli

3D model of a yellow truck with a white cab and a yellow trailer.

Şekil 3.27. Taşıt yükü alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

Örnek köprü üstyapısının analizini gerçekleştirmek için gerekli olan son veriler ANALİZ alt menüsü altında bulunmaktadır. Örnek köprü için verilen yaya yükü, öngerme kablo ve betonarme çeliğinin korozyon durumu, çekme gerilmesi limiti ve köprünün yapıldığı şehir bu alt menüde bulunan Ek Parametreler çerçevesinde bulunan veri giriş alanlarına girilmiştir. Böylece analiz için gerekli tüm verilerin girişi tamamlanmıştır.

Analiz Parametreleri Özeti çerçevesindeki bilgiler kontrol edildikten sonra bu alt menünün sağ alt köşesinde bulunan ANALİZ butonu tıklanarak analiz başlatılmıştır. Veri girişi tamamlandıktan sonra ANALİZ alt menüsünün ara yüzü Şekil 3.28’de görülmektedir.

The screenshot displays the ANALİZ software interface with the following sections:

- Ek Parametreler (Additional Parameters):**
 - Aktarma sırasındaki Beton Basınç Dayanımı: 30 [MPa]
 - Yaya Yüğü: 3 [kN/m²]
 - Öngerme Kablo ve Betonarme Donatısının:**
 - ☒ Korozyon durumu İYİ (Elemanlar korozyona fazla maruz kalmamış)
 - ☐ Korozyon durumu KÖTÜ (Elemanlar korozyona fazla maruz kalmış)
 - Çekme Gerilmesi Limiti:**
 - ☒ Betonda izin verilen kadar çekme gerilmesi oluşsun
 - ☐ Betonda çekme gerilmesi oluşmasın
 - Bağıl Nem Haritası:**
 - YERLİ YÜZLÜK ORTALAĞI NEM BAĞLILIK (1979-2015)
 - Bağıl Nem Oranı, RH(%)
 - Trabzon
 - 73
- Analiz Parametreleri Özeti (Analysis Parameters Summary):**
 - Köprü Bilgileri:**
 - Köprü Eni: 10 [m]
 - Açıklıktaki Kiriş Sayısı: 9 [adet]
 - Kiriş Hesap Açıklığı: 24,8 [m]
 - Tabliye Kalınlığı: 0,2 [m]
 - Kesit Özelliği:**
 - Kiriş Tipi: Kullanıcı Tanımlı
 - Öngerme Kablo Çapı: 1,524cm çaplı I [cm]
 - Kablolar arası mesafe: [m]
 - Öngerme Çelik Sınıfı: 270K Tip Kablo
 - Beton Özelliği:**
 - Kiriş Beton Sınıfı: C40/50
 - Tabliye Beton Sınıfı: C25/30
 - Beton Emniyet Gerilmeleri:**
 - Aktarma Dönemi Basınç: 18 [MPa]
 - Servis Dönemi Basınç: 18 [MPa]
 - Aktarma Dönemi Çekme: 3,451 [MPa]
 - Servis Dönemi Çekme: 3,162 [MPa]
 - Kiriş Betonarme Donatısı:**
 - Enine Donatı Sınıfı: S420
 - Enine Donatı Çapı: 10
 - Boyuna Donatı Sınıfı: S420
 - Boyuna Donatı Çapı (I): 20
 - Taşıt Yüğü:**
 - Tasarım Kamyonu Tipi: H30S24

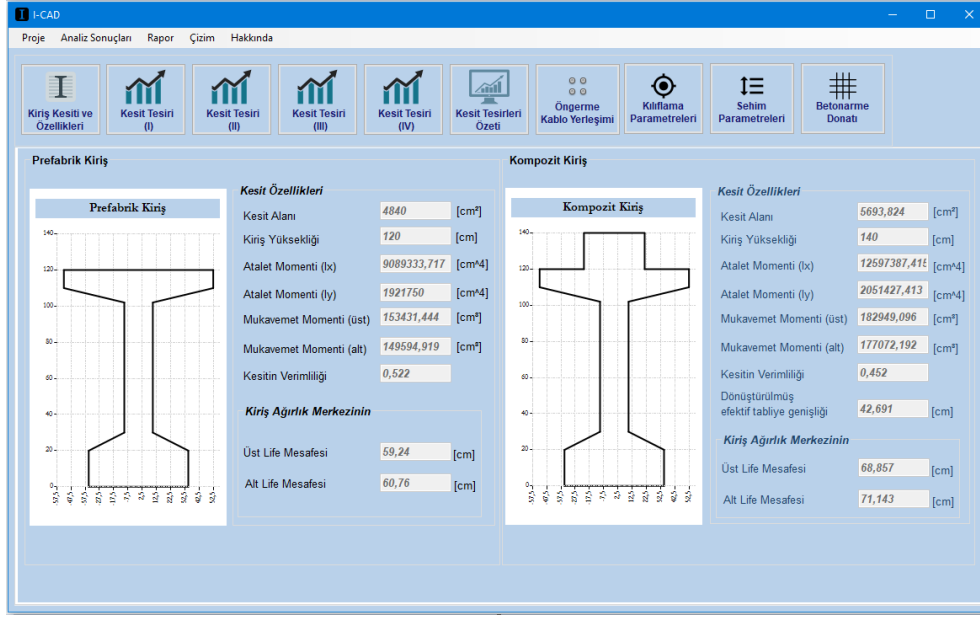
Buttons: Geri, ANALİZ

Şekil 3.28. Analiz alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü girdileri

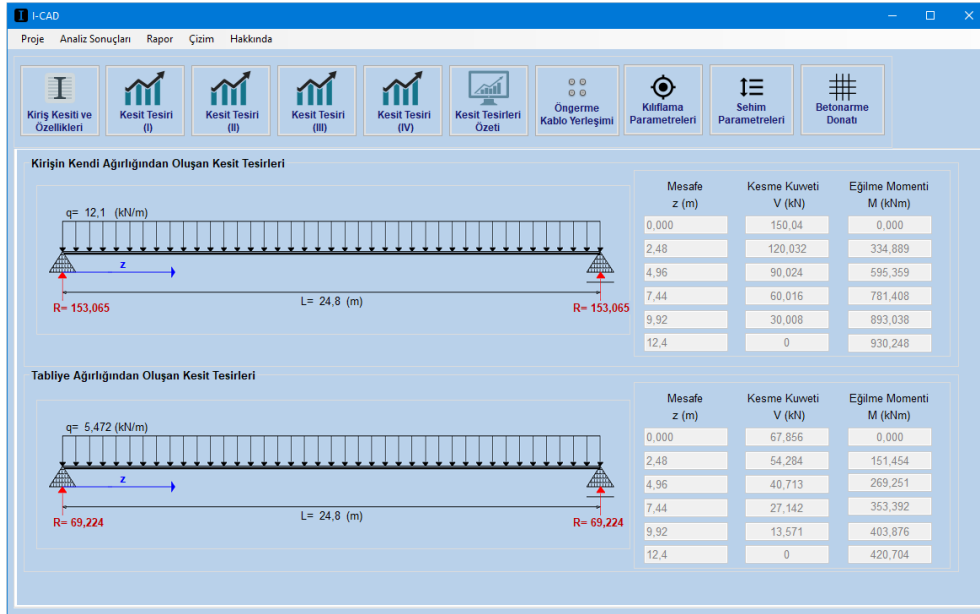
Analiz tamamlandıktan sonra Analiz Sonuçları menüsünde bulunan 7 alt menü aracılığıyla analizden elde edilen sonuçlara ulaşılmaktadır. Analiz Sonuçları menüsündeki ilk alt menü Kiriş Kesiti ve Özellikleri menüsüdür. Bu alt menüde bulunan Prefabrik ve Kompozit Kiriş çerçevelerinde bu kirişlere ait hesaplanmış olan kesit alanı, atalet ve mukavemet momenti ve ağırlık merkezi ile ilgili bilgiler görüntülenmektedir. Bu alt menüye ait ara yüz Şekil 3.29’da görülmektedir.

Örnek seçilen köprü kirişlerinde, kirişin kendi ağırlığı, tabliye ve yapısal olmayan elemanların ağırlığından meydana gelen yük durumu ve kesit tesirlerinin özetlendiği Kesit Tesiri I ve Kesit Tesiri II alt menüleri sırasıyla Şekil 3.30 ve 3.31’de görülmektedir.

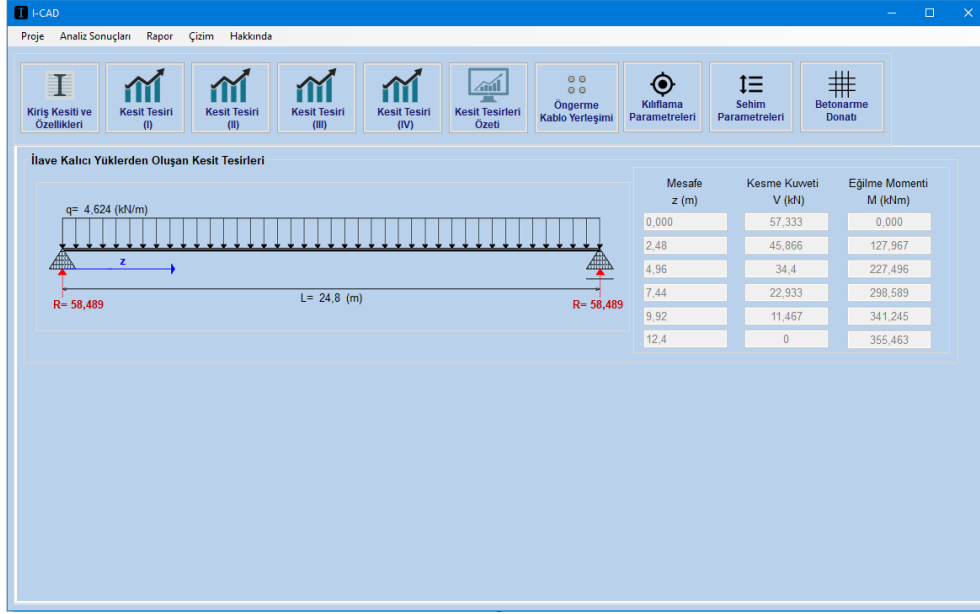
Kirişlerde hareketli yük etkisinde meydana gelen yük durumu ve kesit tesirlerinin özetlendiği Kesit Tesiri III ve Kesit Tesiri IV alt menüleri sırasıyla Şekil 3.32 ve 3.33’te görülmektedir. Örnek uygulamada hareketli yük olarak H_{30S24} tasarım kamyonu seçildiği için HL93 tasarım kamyonu etkisinde meydana gelen kesit tesirlerinin gösterildiği Kesit Tesiri IV alt menüsündeki tüm veriler sıfır olarak görülmektedir.



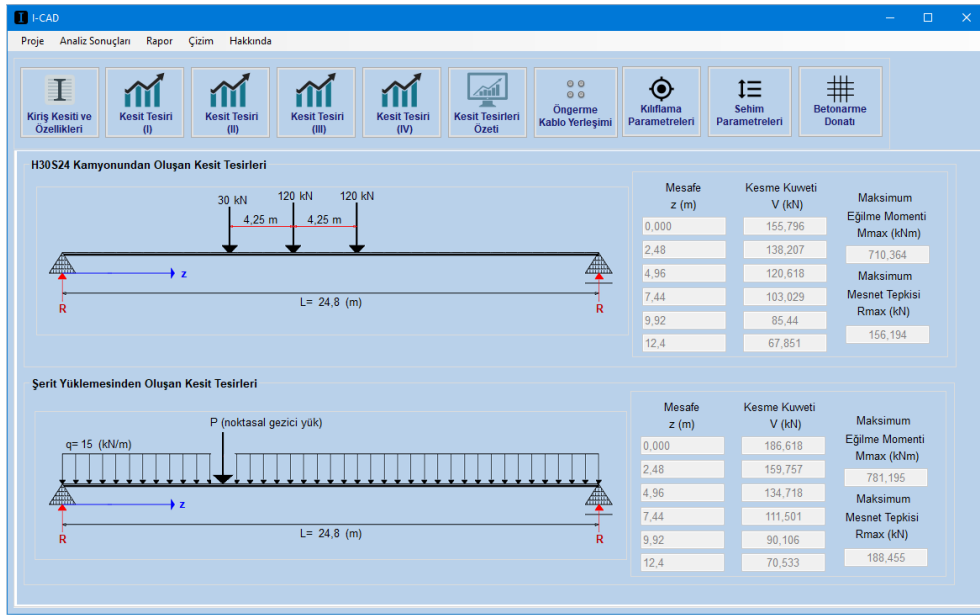
Şekil 3.29. Kiriş kesiti ve özellikleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları



Şekil 3.30. Kesit tesiri I alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

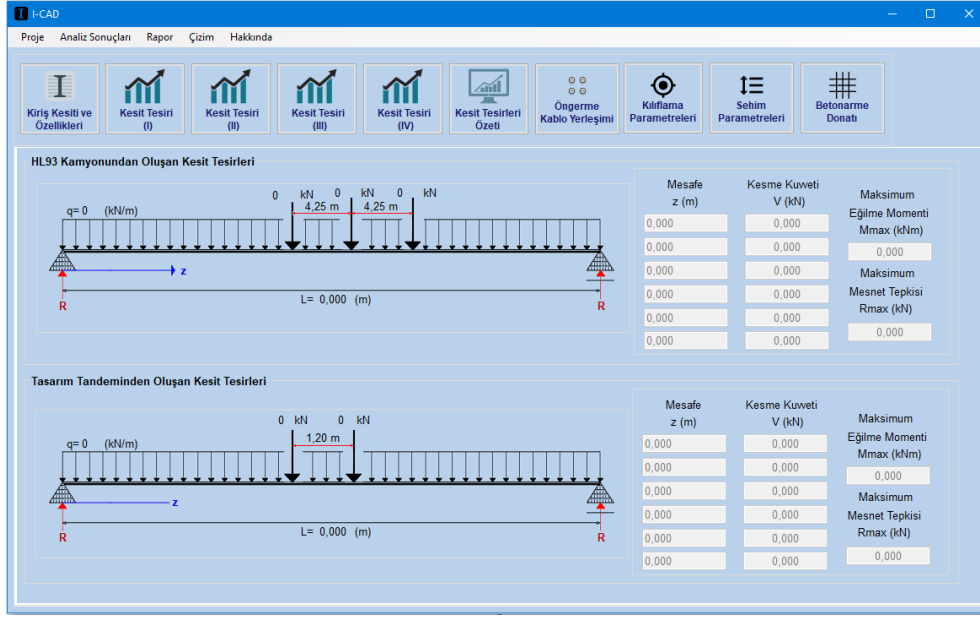


Şekil 3.31. Kesit tesiri II alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

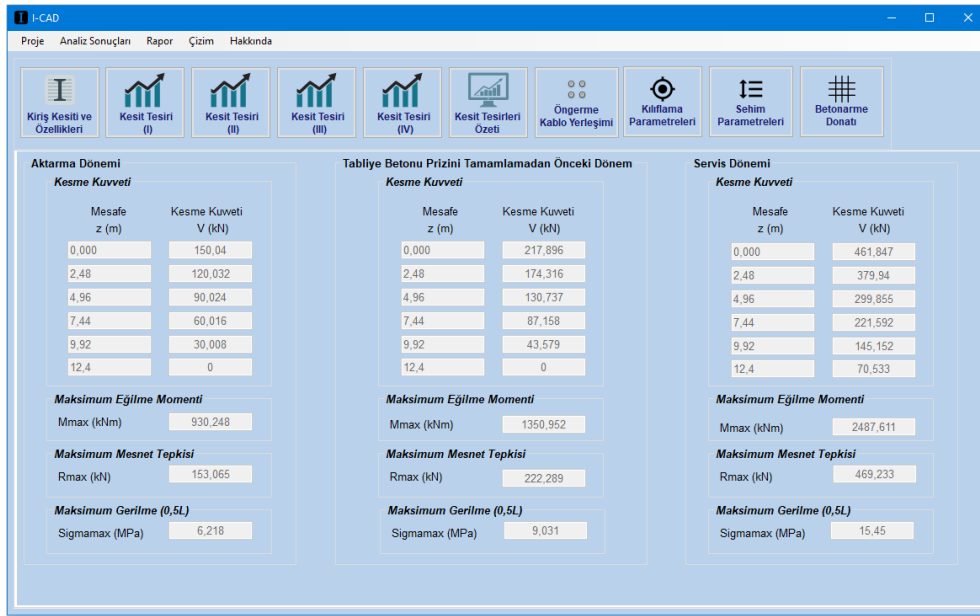


Şekil 3.32. Kesit tesiri III alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

Örnek köprünün aktarma, tabliye prizini almadan önceki ve servis dönemlerinde köprü kirişlerinde öngerme kablosu olmadığı durumda meydana gelen kesit tesirlerinin özetlendiği Kesit Tesirleri Özeti alt menüsü Şekil 3.34'te gösterilmektedir.



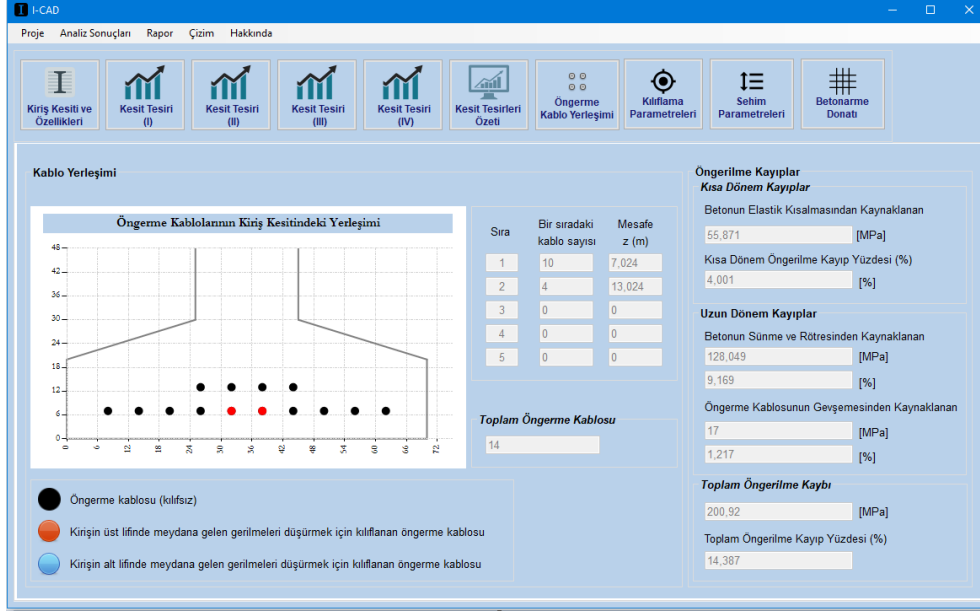
Şekil 3.33. Kesit tesiri IV alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları



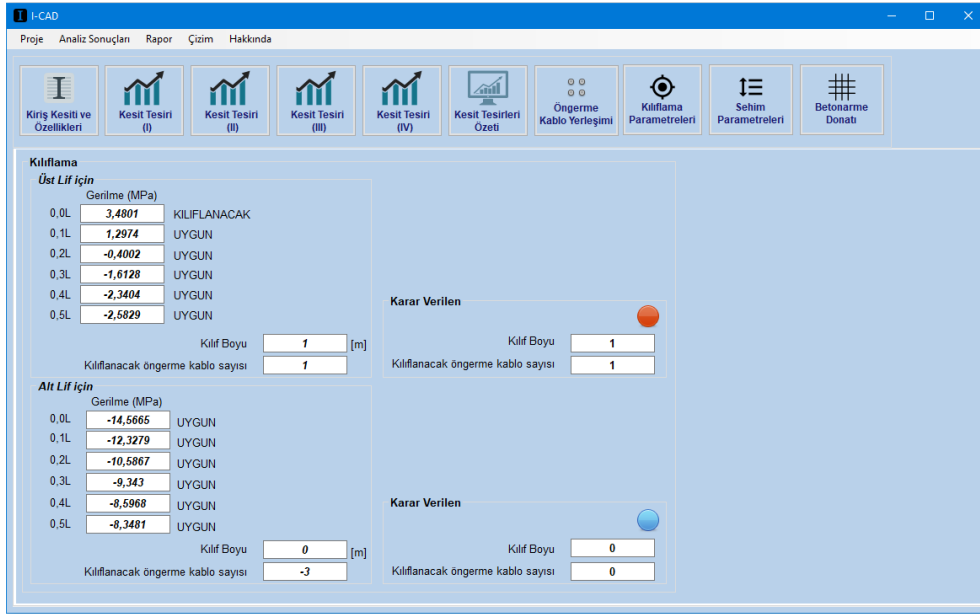
Şekil 3.34. Kesit tesirleri özeti alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

Örnek seçilen köprü kirişlerinin alt başlığına yerleştirilmesi gereken öngerme kablo sayısı ve öngerme kablolarının alt başlık içindeki yerleşiminin gösterildiği Öngerme Kablosu Yerleşimi alt menüsü Şekil 3.35'te görülmektedir. Şekilde kırmızı renk, ilgili öngerme kablosunun kılıflandığını göstermektedir. Kirişte meydana gelen kısa ve uzun dönem öngerme kayıp miktarları ve oranları da bu alt menüde görüntülenmektedir.

Köprü kirişlerinde kullanılması gereken kılıf sayısı ve boylarının özetlendiği alt menü Şekil 3.36’da görülmektedir



Şekil 3.35. Öngerme kablo yerleşimi alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları



Şekil 3.36. Kılıflama parametreleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

Kirişlerde kısa ve uzun dönemde ve bunlara ek olarak hareketli yükte meydana gelen sehim ve dönme değerlerinin özetlendiği alt menü Şekil 3.37’de, köprü kirişlerinde ve tabliyesinde kullanılan donatılara ait genel bilgilerin verildiği alt menü ise Şekil 3.38’de görülmektedir.

Sehim Hesabi

Kısa Dönem Sehim ve Dönme Hesabı

	Sehim (cm)	Dönme (rad)
Aktarma Döneminde Kirişin Kendi Ağırlığında Oluşan Sehim ve Dönme	-2,238	0,003
Aktarma Döneminde Öngerilme Kuvvetinden Oluşan Sehim ve Dönme	3,946	0,006
Aktarma Dönemi Sonunda Oluşan Sehim ve Dönme	1,708	-0,003
Depolama Sırasından Montaja Kadar Oluşan Sehim ve Dönme	2,963	-0,006
Tabliye Ağırlığından Oluşan Sehim ve Dönme	-0,876	0,001
İlave Kalıcı Yüklerden Kompozit Kesitte Oluşan Sehim ve Dönme	-0,534	0,001

Uzun Dönem Sehim ve Dönme Hesabı (Sabit Yük Altında)

	Sehim (cm)	Dönme (rad)
Uzun Dönemde Sabit Yükten Oluşan Sehim ve Dönme	-0,308	-0,002

Hareketli Yükten Oluşan Sehim ve Dönme Hesabı

	Sehim (cm)	Dönme (rad)
Hareketli Yükten Oluşan Toplam Sehim	-0,955	0,001
Sehim Sınırı (L/800)	-3,1	

Elastik Stabilite ile Kısa Dönem Sehim Hesabı

	Sehim (cm)
	-2,238
	4,211
	1,974

Hareketli Yük için Sehim Sınırı Aşılmamıştır.
Seçilen Kesit Hareketli Yük Altında Oluşan Sehim Açısından Uygundur.

Şekil 3.37. Sehim parametreleri alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

Betonarme Donatı

Öngerilmeli Kirişte Kullanılan Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı

Donatı Sınıfı	S420
Donatı Çapı (1)	20
Donatı Çapı (2)	12
Birim Hacim Ağırlığı	78,5 [kN/m³]
Elastisite Modülü	200000 [MPa]

Enine Donatı (Etriye)

Donatı Sınıfı	S420
Donatı Çapı	10
Birim Hacim Ağırlığı	78,5 [kN/m³]
Elastisite Modülü	200000 [MPa]

Tabliyede Kullanılan Betonarme Donatısı

Boyuna Donatı (Aderans)

Donatı Sınıfı	S420
Donatı Çapı	14
Birim Hacim Ağırlığı	78,5 [kN/m³]
Elastisite Modülü	200000 [MPa]

Enine Donatı

Donatı Sınıfı	S420
Donatı Çapı	16
Birim Hacim Ağırlığı	78,5 [kN/m³]
Elastisite Modülü	200000 [MPa]

NOT
Öngerilmeli köprü kirişlerinde ve tabliyesinde kullanılan betonarme donatılarının detayları ve metrajı ile ilgili bilgiler Çizim menüsünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Şekil 3.38. Betonarme donatı alt menüsü ara yüzü üzerinde örnek köprü çıktıları

Hesabı tamamlanan köprü üstyapısının raporunu oluşturmak için Proje menüsünde bulunan şerit menü içerisindeki Rapor butonu tıklanmalıdır. Rapor butonu tıklandıktan sonra Proje Raporu formu açılmaktadır. Bu form içerisinde bulunan ilk menü Raporu Dışa Aktar menüsüdür. Bu menü yardımıyla proje raporu PDF ya da Word formatında kaydedilebilmektedir. Proje Raporu formunun görüntüsü Şekil 3.39’da verilmiştir. Örnek köprü üstyapısına ait proje raporu ise Ek 1’de verilmiştir.

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
 PROJE : Örnek Viyadük Projesi
 Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
 TARİH : 14.02.2018

1. KÖPRÜ GENEL BİLGİLERİ

Köprü Eni : 10 [m]
 Bir kirişin toplam boyu : 25,3 [m]
 Kiriş hesap açıklığı : 24,8 [m]
 Açıklıktaki kiriş sayısı : 9 [adet]
 Kirişler arası mesafe : 1,08 [m]
 Şerit Sayısı : 2 [adet]

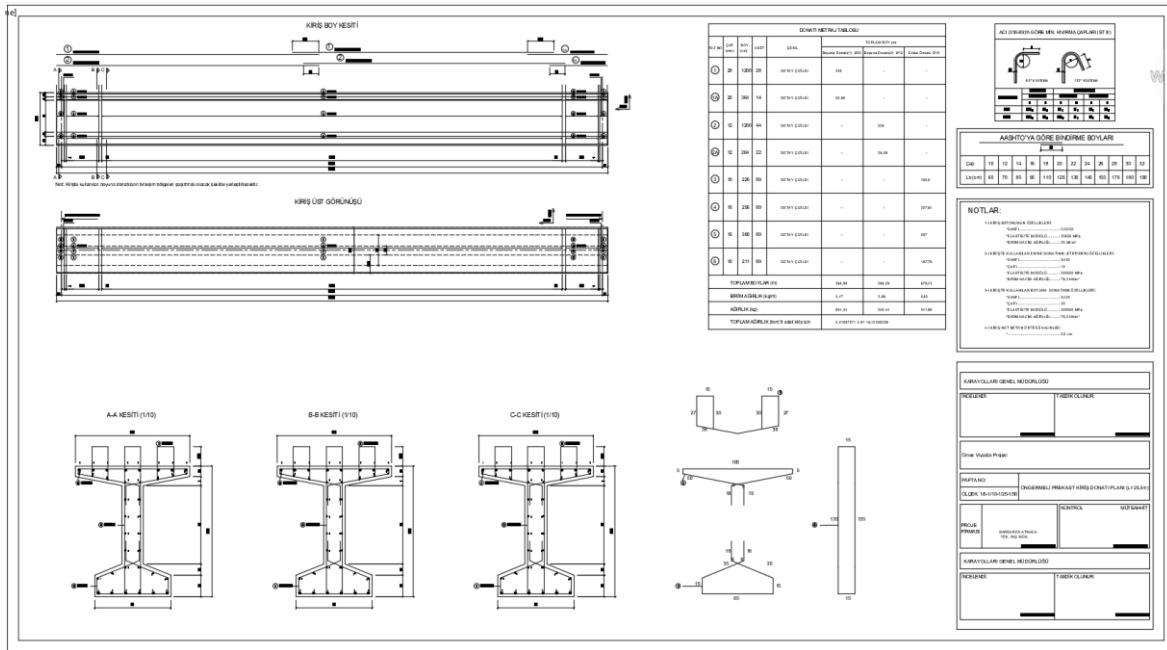
Tabliye kalınlığı : 0,2 [m]
 Asfalt teçnit yüksekliği : 0,05 [m]
 Bordürler toplam genişliği : 3 [m]
 Bordürler ortalama yüksekliği : 0,25 [m]
 Cephe elemanı yüksekliği : 0,75 [m]
 Cephe elemanı genişliği : 0,075 [m]

2. KIRIŞ BİLGİLERİ

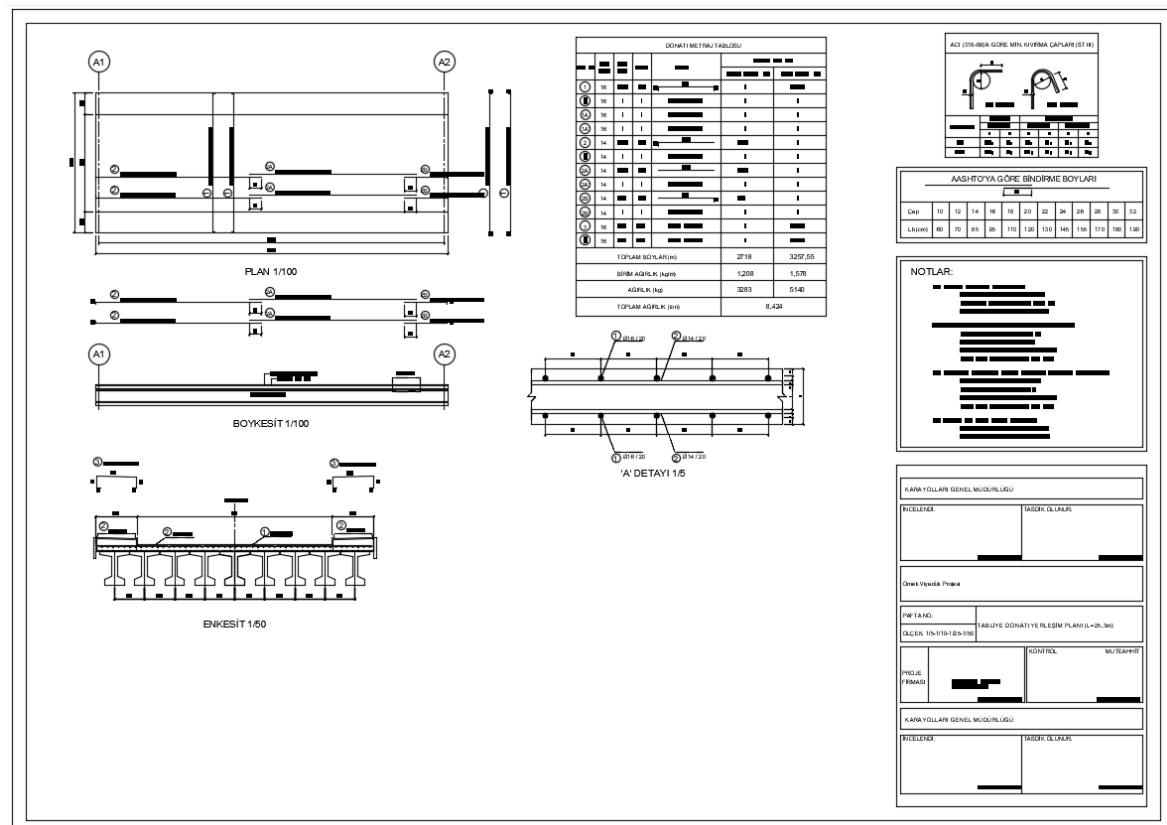
b1 : 105 [cm]
 b2 : 42,5 [cm]
 b3 : 0 [cm]
 b4 : 20 [cm]
 b5 : 70 [cm]
 t1 : 10 [cm]
 t2 : 8 [cm]
 t3 : 0 [cm]
 t4 : 72 [cm]
 t5 : 10 [cm]
 ts : 20 [cm]
 Kiriş Yüksekliği : 120 [cm]
 Öngerme kabloları arası mesafe : 6 [cm]

Şekil 3.39. Proje raporu formu

Proje menüsünde bulunan şerit menü içerisindeki Çizim butonu tıkladığında, Kiriş Kalıp Planı, Kiriş Betonarme Donatı Planı ve Tabliye Betonarme Planı alt seçenekleri kullanıcıya sunulmaktadır. Kiriş Kalıp Planı seçeneği tıkladığında örnek seçilen köprü kirişinin en ve boy kesiti, üstten görünüşü, öngerme kablolarının kiriş boyunca ve kesitteki yerleşimi, kirişte kullanılan öngerme kablolarının metrajı, kaldırma kancası detayı ve kiriş yapımında dikkat edilecek hususların bulunduğu AutoCAD dosyası açılmaktadır (Şekil 3.40). Kiriş Betonarme Donatı seçeneği tıkladığında kirişte kullanılan enine ve boyuna



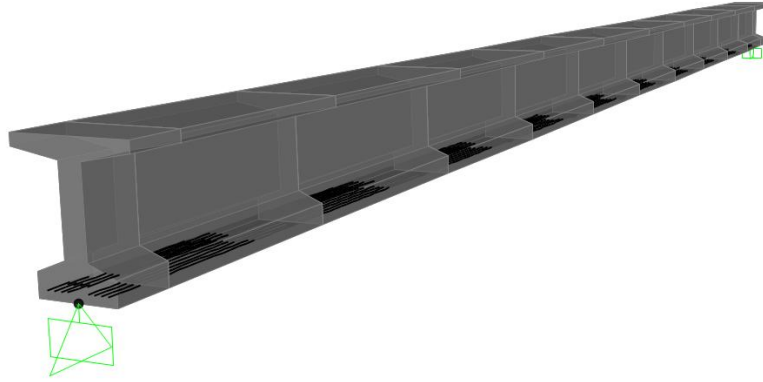
Şekil 3.41. Örnek köprü kirişinin betonarme donatı çizim paftası



Şekil 3.42. Örnek köprü tabliyesinin çizim paftası

3.1.5.4. Geliştirilen I-CAD Programının Kontrolü

Tez çalışması kapsamında oluşturulan; öngerilmeli prefabrik kirişli köprülerin üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren I-CAD programının doğruluğu göstermek için örnek seçilen, hesap açıklığı 24,8m, genişliği 10m olan 0,2m kalınlığındaki tabliyesi 9 adet 1,2m yüksekliğinde öngerilmeli I kirişle desteklenmiş köprünün I-CAD programında yapılan analizler sonucunda tasarlanan öngerilmeli kiriş aynı yükleme koşulları altında SAP2000 programında tekrar analiz edilmiş ve elde edilen gerilmeler emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır. I-CAD programında tasarlanmış olan prefabrik ve kompozit kirişin SAP2000 programında oluşturulmuş olan sonlu eleman modeli sırasıyla Şekil 3.43 ve 3.44'te görülmektedir. Kirişin SAP2000 programında modellenmesinde 12 adet *çubuk eleman*, 14 adet *tendon eleman* kullanılmış olup kiriş *çubuk eleman*, öngerme kabloları ise *tendon elemanlar* ile temsil edilmiştir.

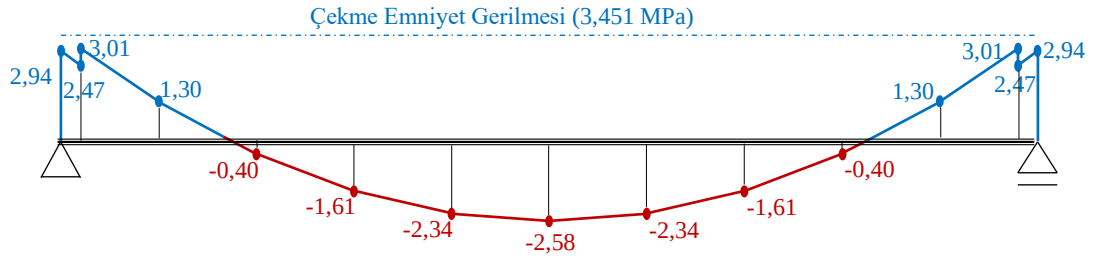


Şekil 3.43. Prefabrik kirişin sonlu eleman modeli

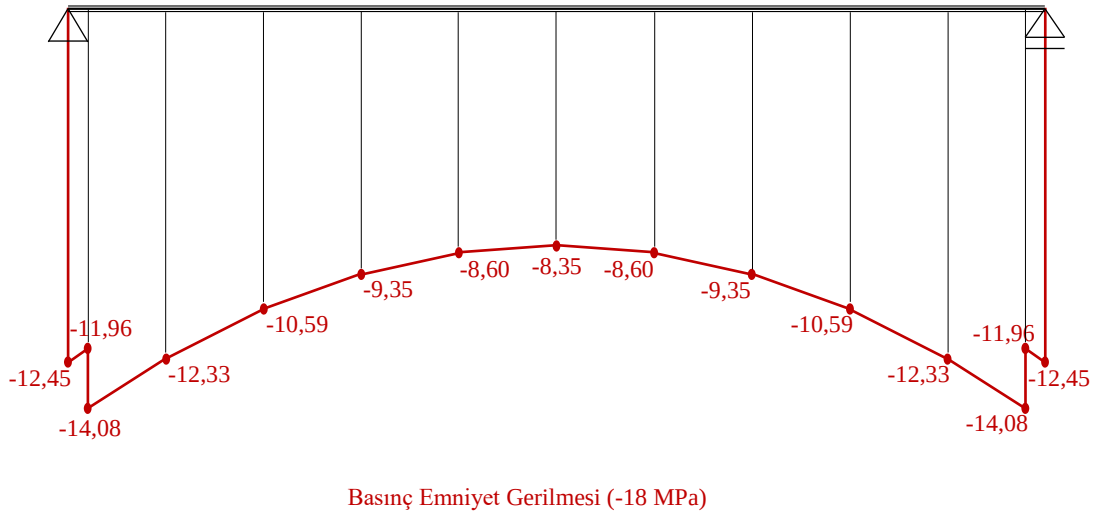


Şekil 3.44. Kompozit kirişin sonlu eleman modeli

Aktarma döneminde kiriş sadece kendi ağırlığı ve öngerilme kuvveti etkisi altında olup bu dönemde meydana gelen öngerilme kaybı betonun elastik kısılmasından kaynaklanmaktadır. Bu koşullar dikkate alınarak prefabrik kirişin sonlu eleman modeli üzerinde yapılan analizler sonucunda prefabrik kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen asal gerilmeler sırasıyla Şekil 3.45 ve 3.46’da görülmektedir.



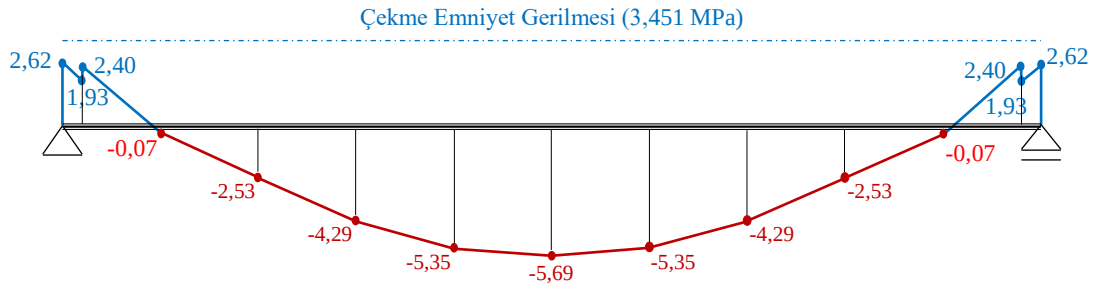
Şekil 3.45. Öngerilmeli prefabrik kirişin üst lifinde aktarma döneminde meydana gelen asal gerilmeler



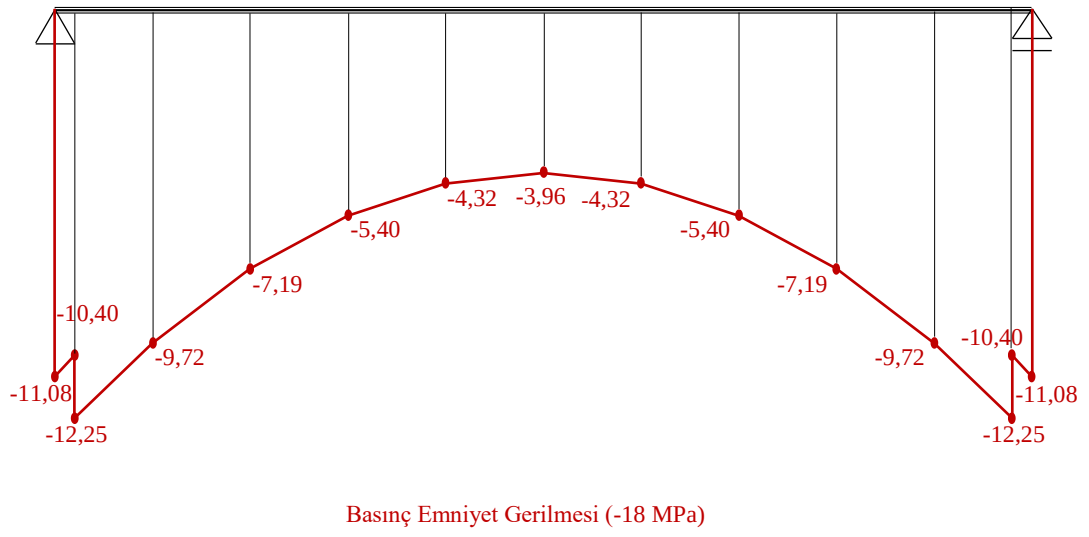
Şekil 3.46. Öngerilmeli prefabrik kirişin alt lifinde aktarma döneminde meydana gelen asal gerilmeler

Tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde, öngerilmeli kirişler ayaklar arasına yerleştirilmekte ve kirişlerin üzerine tabliye betonunun dökümü yapılmaktadır. Bu dönemde öngerilmeli kirişler; kendi ağırlığını, öngerilme kuvvetini ve tabliye betonunun ağırlığını taşımaktadır. Tabliye betonu prizini tamamlamadığı için yükler aktarma döneminde olduğu gibi prefabrik kesit ile taşınmaktadır. Betonun elastik kısılmasının

neden olduğu kayıplara, öngerme kablusunun gevşemesi, betonun sünmesi ve rötresinden meydana gelen uzun dönem kayıplar da eklenmektedir. Bu koşullar dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda prefabrik kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen asal gerilmeler sırasıyla Şekil 3.47 ve Şekil 3.48’de görülmektedir.



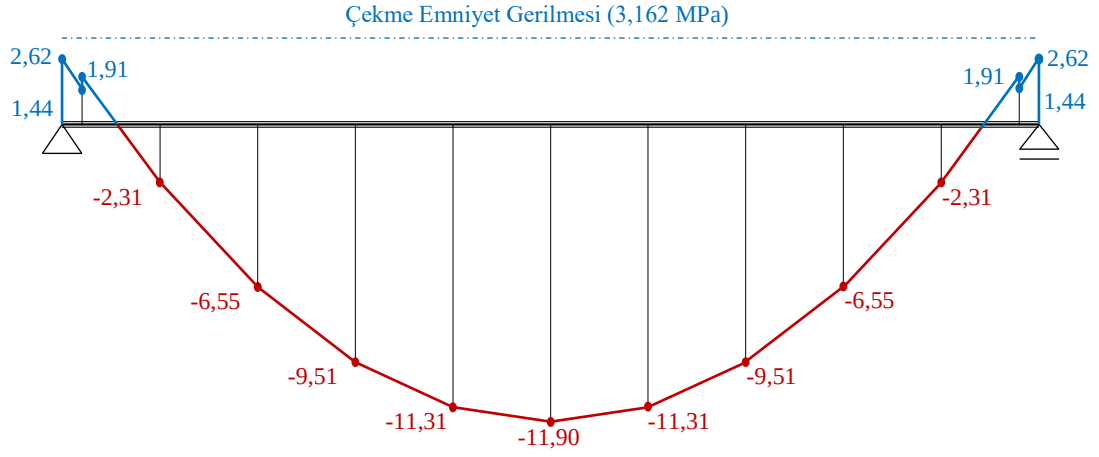
Şekil 3.47. Öngerilmeli prefabrik kirişin üst lifinde tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde meydana gelen asal gerilmeler



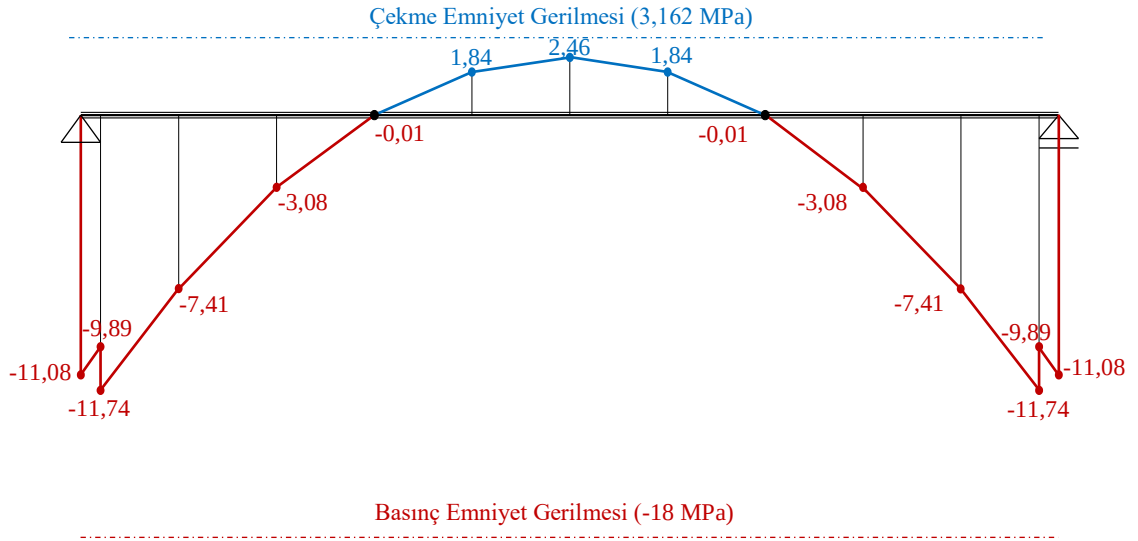
Şekil 3.48. Öngerilmeli prefabrik kirişin alt lifinde tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönemde meydana gelen asal gerilmeler

Servis döneminde prizini tamamlayan tabliye betonunun bir kısmı prefabrik kirişle birlikte çalışarak kompozit kirişi oluşturmaktadır. Bundan dolayı servis döneminde köprünün maruz kalacağı yükler kompozit kiriş tarafından taşınmaktadır. Bu dönemde öngerilme kayıpları en yüksek seviyede olmaktadır. Bu koşullar dikkate alınarak yapılan

analizler sonucunda kompozit kirişin üst ve alt liflerinde meydana gelen asal gerilmeler sırasıyla Şekil 3.49 ve Şekil 3.50’de görülmektedir.



Şekil 3.49. Öngerilmeli kompozit kirişin üst lifinde servis döneminde meydana gelen asal gerilmeler



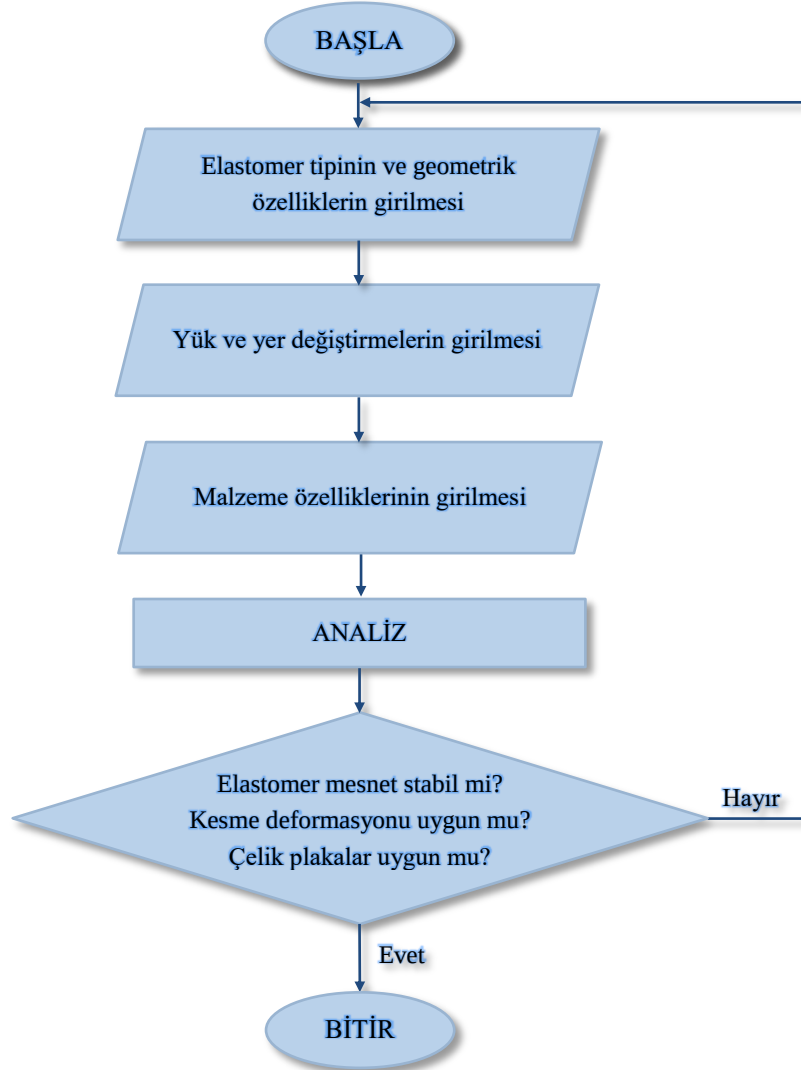
Şekil 3.50. Öngerilmeli kompozit kirişin alt lifinde servis döneminde meydana gelen asal gerilmeler

I-CAD programında tasarımı yapılan öngerilmeli kirişin, 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. SAP2000 programında yapılan analizler sonucunda; köprünün aktarma, tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki ve servis dönemlerinde öngerilmeli kirişin alt ve üst liflerinde elde edilen gerilmelerin

emniyet gerilmeleri sınırı içinde kaldığı görülmüştür. Bu durum önerilmeli kirişin I-CAD programında doğru bir şekilde tasarlandığını göstermektedir.

3.2. Geliştirilen SREI-CAD Programına Giriş

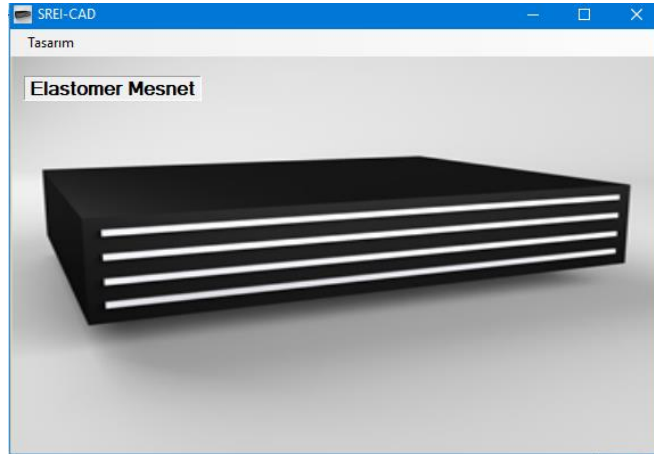
Bu bölümde, önerilmeli köprü üstyapısı ile altyapısı arasındaki bağlantıyı sağlayan elastomer mesnetlerin AASHTO LRFD 2012'ye göre hesabını gerçekleştiren SREI-CAD programı tanıtılmıştır (Atmaca ve Ateş, 2017). SREI-CAD programı da I-CAD programı gibi C# programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Programın genel akış diyagramı Şekil 3.51'de görülmektedir.



Şekil 3.51. SREI-CAD programının genel akış diyagramı

3.2.1. SREI-CAD Programının Tanıtılması

SREI-CAD programı farklı yükler, geometri ve malzeme özelliklerine sahip olan elastomer mesnetlerin uygunluk kontrollerini AASHTO LRFD'ye (2012) göre gerçekleştirmektedir. Bu kapsamda geliştirilen SREI-CAD programının açılış menüsü Şekil 3.52'de görülmektedir. Bu menüdeki tasarım butonu tıklanarak elastomer mesnete ait geometrik, yük ve yer değiştirme, malzeme özelliklerinin girişinin yapıldığı alt menülere ulaşılmaktadır. Geometrik Özellikler menüsünde ilk olarak elastomerin tip seçimi yapılmakta ve daha sonra seçilen elastomer mesnet tipine ait geometrik özelliklerin girişi yapılmaktadır. Yükler ve Yer değiştirme menüsünde elastomer mesnetin maruz kaldığı düşey ve hareketli yükler ile yer değiştirme parametrelerinin girişi yapılmaktadır. Malzeme Özellikleri menüsünde ise elastomer mesnetin kesme ve elastisite modüllerinin girişi yapılmaktadır. Gerekli olan tüm verilerin girişi yapıp ANALİZ butonuna tıklandığında analiz sonuçlarının verildiği Stabilité Kontrolü, Çelik Plakalar, Kesme Deformasyonu ve Rijitlikler menülerine ulaşılmaktadır.



Şekil 3.52. SREI-CAD programının açılış menüsünün ara yüzü

3.2.2. SREI-CAD ile Elastomer Mesnet Tasarımı

Bu bölümde malzeme özellikleri aynı geometrik özellikleri birbirine çok yakın olan karesel ve dairesel kesite sahip elastomer mesnetlerin aynı yük koşulları altındaki uygunluk durumları SREI-CAD yardımıyla belirlenmiştir. Örnek olarak seçilen elastomer

mesnetlere ait geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 3.5’te, talep edilen yük ve yer değiştirme değerleri ise Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.5. Elastomer mesnetlerin geometrik ve malzeme özellikleri

Elastomer Mesnetlerin Özellikleri		
Tipi	Dairesel	Karesel
Boyut(mm)	Φ400	400*300
İç kauçuk tabaka kalınlığı (mm)		12
Kauçuk tabaka sayısı		5
Dış kauçuk tabaka kalınlığı (mm)		2,5
Çelik tabaka kalınlığı (mm)		3
Çelik tabakanın akma dayanımı (MPa)		240
Kayma modülü (MPa)		0,68

Tablo 3.6. Yükler ve yer değiştirme verileri

Yük ve yer değiştirme	
Yatay yerdeğiştirme (mm)	7,2
Maks. düşey statik yük (N)	500000
Maks. hareketli yük (N)	240000

Örnek olarak seçilen elastomer mesnetlerin yukarıda verilen özelliklerinin SREI-CAD programı menülerine girilmiş hali Şekil 3.53, 3.54 ve 3.55’te verilmiştir. Gerekli olan verilerin girişi tamamlandıktan sonra analizi yapılan elastomerler için elde edilen sonuç menüleri ise Şekil 3.56, 3.57, 3.58 ve 3.59’da verilmiştir.

The left screenshot shows the 'Karesel Mesnet' (Square Support) configuration. The 'Elastomer Tipi' (Elastomer Type) is set to 'Karesel'. The 'Elastomer Boyutları' (Elastomer Dimensions) section includes input fields for: İç kauçuk tabaka kalınlığı (mm) = 12, Dış kauçuk tabaka kalınlığı (mm) = 2.5, En küçük çelik plaka kalınlığı (mm) = 3, İç kauçuk tabaka sayısı = 5, Çelik plakaların akma dayanımı (MPa) = 240, Köprü uzunluğunu doğrultusuna dik Elastomer mesnet boyutu (mm) = 300, Köprü uzunluğuna paralel Elastomer mesnet boyutu (mm) = 400. The right screenshot shows the 'Dairesel Mesnet' (Circular Support) configuration. The 'Elastomer Tipi' is set to 'Dairesel'. The 'Elastomer Boyutları' section includes input fields for: İç kauçuk tabaka kalınlığı (mm) = 12, Dış kauçuk tabaka kalınlığı (mm) = 2.5, En küçük çelik plaka kalınlığı (mm) = 3, İç kauçuk tabaka sayısı = 5, Çelik plakaların akma dayanımı (MPa) = 240, and Elastomer mesnetin çapı (mm) = 400. Both windows have an 'ANALİZ' (ANALYZE) button at the bottom right.

(Karesel Mesnet)

(Dairesel Mesnet)

Şekil 3.53. Elastomer mesnetlere ait geometrik özelliklerin girişi

The left screenshot shows the 'Karesel Mesnet' (Square Support) configuration. The 'Yer değiştirme' (Displacement) section includes a dropdown for 'Köprünün yatay ötelenmesi' (Bridge horizontal displacement) set to 'Serbest' (Free) and an input field for 'Elastomerin maksimum kesme deformasyonu (mm)' (Maximum shear deformation of the elastomer) set to 7.2. The 'Yükler' (Loads) section includes input fields for 'Maksimum düzey statik yük (N)' (Maximum level static load) set to 500000 and 'Maksimum hareketli yük (N)' (Maximum moving load) set to 240000. The right screenshot shows the 'Dairesel Mesnet' (Circular Support) configuration. The 'Yer değiştirme' section includes an input field for 'Elastomerin maksimum kesme deformasyonu (mm)' set to 7.2. The 'Yükler' section includes input fields for 'Maksimum düzey statik yük (N)' set to 500000 and 'Maksimum hareketli yük (N)' set to 240000. Both windows have an 'ANALİZ' (ANALYZE) button at the bottom right.

(Karesel Mesnet)

(Dairesel Mesnet)

Şekil 3.54. Elastomer mesnetlere ait yük ve yer değiştirme verilerinin girişi

The screenshot shows the 'Malzeme Özellikleri' (Material Properties) window. The 'Kesme Modülü (MPa)' (Shear Modulus) is set to 'Kullanıcı Tanımlı' (User Defined) with a value of 0.68. The 'Elastisite Modülü (MPa)' (Elastic Modulus) is set to 'Otomatik' (Automatic). The 'Elastisite Modülü Ek Bilgi' (Elastic Modulus Additional Information) section contains a text box stating: 'Elastomer mesnetlerin tasarımında kullanılan en önemli malzeme özelliklerinde biri elastisite modülüdür. Elastomerin elastisite modülü ile elde herhangi bir veri yoksa elastisite modülü E=4.8GS² denklemi ile hesaplanabilir.' (The elastic modulus is one of the most important material properties used in the design of elastomer supports. If no data is available for the elastomer's elastic modulus, it can be calculated using the equation E=4.8GS²). The window has an 'ANALİZ' (ANALYZE) button at the bottom right.

Şekil 3.55. Elastomer mesnetlere ait malzeme özelliklerinin girişi

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

Stabilite Parametreleri

$$A = \frac{1,92 \frac{h_r}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2,0L}{W}}} = 0,163$$

$$B = \frac{2,67}{(S_i + 2,0) \left(1 + \frac{L}{4,0W}\right)} = 0,219$$

45,458 >= 4,167
Elastomer mesnet stabil ve daha fazla araştırma yapmaya gerek yoktur.

(Karesel Mesnet)

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

Stabilite Parametreleri

$$A = \frac{1,92 \frac{h_r}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2,0L}{W}}} = 0,225$$

$$B = \frac{2,67}{(S_i + 2,0) \left(1 + \frac{L}{4,0W}\right)} = 0,207$$

0.45 > 0.207
Elastomer mesnet stabil değildir ve daha fazla araştırma yapılmalıdır.

(Dairesel Mesnet)

Şekil 3.56. Elastomer mesnetlere ait stabilite kontrol sonuçları

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

En küçük çelik tabaka kalınlığının kontrolü

3 > 1.5875 En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

Servis Sınır Durumu

$$h_z \geq \frac{3h_r \sigma_z}{F_y} \Rightarrow 3 \geq 0,625$$

En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

Yorulma Sınır Durumu

$$h_z \geq \frac{2h_r \sigma_z}{\Delta F_{TH}} \Rightarrow 3 \geq 0,291$$

En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

(Karesel Mesnet)

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

En küçük çelik tabaka kalınlığının kontrolü

3 > 1.5875 En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

Servis Sınır Durumu

$$h_z \geq \frac{3h_r \sigma_z}{F_y} \Rightarrow 3 \geq 0,597$$

En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

Yorulma Sınır Durumu

$$h_z \geq \frac{2h_r \sigma_z}{\Delta F_{TH}} \Rightarrow 3 \geq 0,278$$

En küçük çelik tabaka kalınlığı uygundur.

(Dairesel Mesnet)

Şekil 3.57. Elastomer mesnetlere ait çelik plakaların kontrol sonuçları

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

Kesme Deformasyonu

$h_r \geq 2\Delta_z$ 65 >= 14,4 Yorulmadan dolayı elastomer mesnetin köşelerinde kırılma, bozulma meydana gelmez.

Kesme Şekil Değiştirmesi

Eksenel statik kuvvetten $r_s = D_s \frac{\sigma_s}{GS} = 1,201$ Eksenel tekrarlı yükten $r_s = D_s \frac{\sigma_s}{GS} = 0,576$

Dönmeden $r_s = D_s \left(\frac{L}{h_r} \right)^2 \frac{\sigma}{n} = 0,556$ 4,042 <= 5 ve 1,201 < 3 Kesme deformasyonu uygundur.

Kesme deformasyonundan $\gamma_z = \frac{\Delta_z}{h_r} = 0,111$

(Karesel Mesnet)

Stabilite Kontrolü Çelik Plakalar Kesme Deformasyonu Rijitlikler

Kesme Deformasyonu

$h_r \geq 2\Delta_z$ 65 >= 14,4 Yorulmadan dolayı elastomer mesnetin köşelerinde kırılma, bozulma meydana gelmez.

Kesme Şekil Değiştirmesi

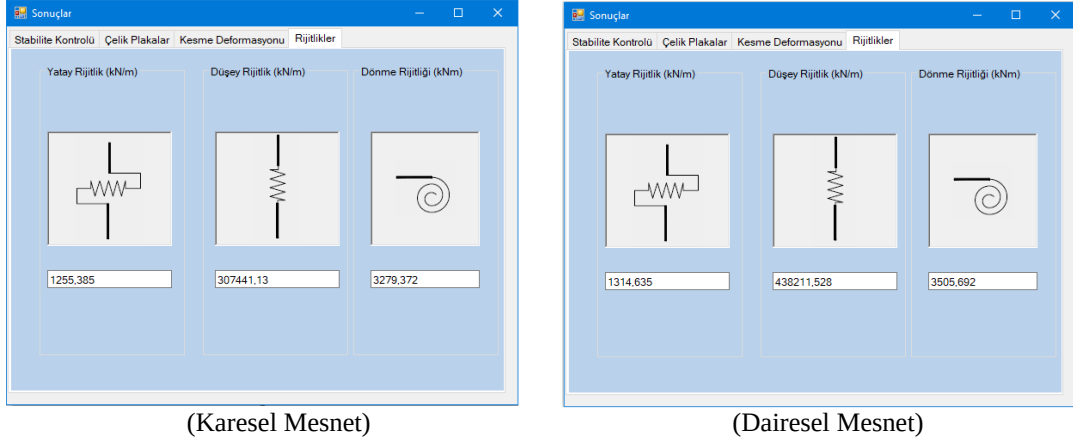
Eksenel statik kuvvetten $r_s = D_s \frac{\sigma_s}{GS} = 0,702$ Eksenel tekrarlı yükten $r_s = D_s \frac{\sigma_s}{GS} = 0,337$

Dönmeden $r_s = D_s \left(\frac{L}{h_r} \right)^2 \frac{\sigma}{n} = 0,417$ 2,742 <= 5 ve 0,702 < 3 Kesme deformasyonu uygundur.

Kesme deformasyonundan $\gamma_z = \frac{\Delta_z}{h_r} = 0,111$

(Dairesel Mesnet)

Şekil 3.58. Elastomer mesnetlere ait kesme deformasyonu kontrol sonuçları



Şekil 3.59. Elastomer mesnetlere ait rijitlik değerleri

Örnek olarak seçilen elastomer mesnetlerin SREI-CAD yardımıyla yapılan analizleri sonucunda dairesel kesite sahip mesnetin stabilite şartını sağlamadığı ve bu mesnet için söz konusu yönetmeliğe göre detaylı analizlerin yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Fakat dikdörtgen kesite sahip elastomerin stabil olduğu elde edilen sonuçlarda görülmektedir. Elastomer mesnetlere ait diğer parametrelerin ise iki mesnet içinde uygun olduğu görülmektedir.

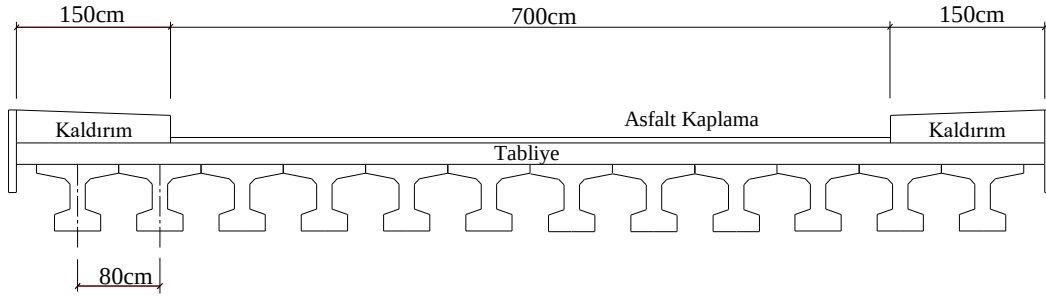
4. BULGULAR VE İRDELEMELER

4.1. Öngerilmeli I Kirişlerin Etkin Açıklıklarının Belirlenmesi

Öngerilmeli kirişli köprü üstyapısında bulunan kirişlerin hangi açıklıklarda uygulanabilir olduğunu belirlemek için, ülkemizde sıklıkla kullanılan yükseklikleri 60, 75, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 ve 180cm olan on iki kiriş örnek olarak seçilmiştir. Analizler, AASHTO LRFD (2012) koşullarını dikkate alan bu tez çalışması kapsamında geliştirilen I-CAD programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde; köprü üstyapısını oluşturan yapısal ve yapısal olmayan elemanların sabit ağırlıkları, öngerme kuvveti, standart kamyon yükü, eşdeğer şerit yükü ve yaya yükleri dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda öngerme kablo sayısı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri AASHTO LRFD (2012)'de bulunan sınır değerler ile karşılaştırılıp kirişlerin uygunluğu belirlenmiştir. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen metraj bilgilerinden yararlanarak köprü üstyapısında kullanılan kirişlerin malzeme maliyetleri de belirlenmiştir.

4.1.1. Örnek Köprü Üstyapısı

Bu çalışmada, üstyapısında kullanılan kiriş boylarının 15m ile 35m arasında üçer metre artışlar ile değiştiği, genişliği 10m ve tabliye kalınlığı 0,2m olan köprü üstyapısı dikkate alınmıştır. Seçilen on iki farklı kiriş tipi için köprü tabliyesini destekleyen kiriş sayısı ve kirişler arası mesafe, üstyapıda en fazla sayıda kiriş olacak şekilde hesaplanıp köprü üstyapısının hesap ve tasarımı I-CAD programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak seçilen köprü üstyapısının, I-60 tipi öngerilmeli kiriş kullanılması durumundaki kesiti Şekil 4.1'de görülmektedir. Kiriş tiplerine göre köprü üstyapısında kullanılan kiriş sayısı ve kirişler arası mesafe Tablo 4.1'de, kirişlerin kesit ölçüleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Örnek olarak seçilen köprü üstyapısı (I-60 kirişi kullanılmıştır)

Tablo 4.1. Köprü Tabliyesini Destekleyen kiriş sayısı ve kirişler arası mesafe

Kiriş Tipi	b_1 (cm)	b_5 (cm)	Köprü Tabliyesini Destekleyen Kiriş Sayısı	Kirişler Arası Mesafe (cm)
I-60	80	45	12	83
I-75	75	75	13	77
I-90	80	50	12	83
I-100	95	65	10	100
I-110	80	80	12	83
I-120	75	75	13	77
I-130	80	75	12	83
I-140	40	50	20	50
I-150	40	60	16	62
I-160	80	74	12	83
I-170	190	70	5	200
I-180	120	70	8	125

Tablo 4.2. Kirişlerinin kesit ölçüleri

Kiriş Tipi	Kesit Boyutları(cm)										
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
I-60	80	27,5	5	15	45	7,5	5	5	22,5	5	15
I-75	75	27,5	0	20	75	15	10	0	25	10	15
I-90	80	32,5	0	15	50	10	7,5	0	50	7,5	15
I-100	95	32,5	5	20	65	15	6,5	5	46	7,5	20
I-110	80	30	0	20	80	10	7,5	0	70	7,5	15
I-120	75	27,5	0	20	75	10	10	0	75	10	15
I-130	80	30	0	20	75	12	6	0	67	10	35
I-140	40	11	0	18	50	20	11	0	73	16	20
I-150	40	10	0	20	60	20	11	0	74	20	25
I-160	80	30	0	20	74	12	8	0	110	8	22
I-170	190	70	12,5	25	70	7,5	12,5	12,5	92,5	22,5	22,5
I-180	120	32,5	10	35	70	15	15	10	95	20	25

Köprü üstyapısının tasarımında hareketli yük olarak H₃₀S₂₄ tasarım kamyonu, yaya yükü olarak ise 3kN/m² yayılı yük dikkate alınmıştır. Analizde önerilmeli kiriş üretiminde kullanılan öngerme ve betonarme donatısının korozyona uğramadığı durumu dikkate alınmıştır. Ayrıca önerilmeli kirişte servis yükleri altında izin verilen çekme gerilmesi kadar gerilmenin oluşması istenmektedir. Örnek olarak seçilen köprü üstyapısının özellikleri Tablo 3.2’de, diğer yapı malzemelerinin ağırlıkları Tablo 3.3’te, öngerme kablosu, enine ve boyuna donatı, prefabrik kiriş ve tabliyede kullanılan betona ait malzeme özellikleri ise Tablo 3.4’te, önerilmeli kirişte kullanılan malzemelerin birim fiyatları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Öngerilmeli kirişte kullanılan malzemelerin birim fiyatları

Malzeme	Birimi	Birim Fiyatı (TL)
Öngerme halatı (0,6") (Tip 270K)	ton	3.000,00
Betonarme donatısı (S420)	ton	1.900,00
Beton (C40/50)	m ³	190,00

4.1.2. Analiz Sonuçları

Kiriş boylarının 15m ile 35m arasında üçer metre artışlar ile değiştiği, genişliği 10m olan 0,2m kalınlığındaki tabliyesi I kirişler ile desteklenmiş bir köprü üstyapısı, farklı kesit ölçülerine sahip on iki adet kiriş kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen; kirişte kullanılan öngerme kablo sayısı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri, sınır değerler ile kontrol edilmiştir. Bu parametreler ışığında kirişlerin uygunlukları belirlenmiştir. Ayrıca her bir kirişin üretilmesi için gerekli olan malzeme miktarı belirlenip birim fiyatlar ile çarpılarak kirişlerin malzeme maliyeti hesaplanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen tüm parametreler irdelenerek hangi açıklıkta hangi öngerilmeli kirişin en uygun ve ekonomik olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Örnek olarak seçilen on iki adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 15m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.4'te verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Örnek olarak seçilen tüm kirişlerin 15m açıklık için öngerme kablo sayısı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim değeri açısından uygun olduğu görülmüştür.
- Örnek olarak seçilen kirişlerde kullanılan öngerme kablo sayısı ve sehim değerlerinin I-60 kirişinden I-180 kirişine doğru gidildikçe azaldığı ve kirişlerin hiçbirinde kılıflanma işleminin yapılmasına gerek olmadığı görülmüştür.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 kirişi, en yüksek maliyetin de I-75 kirişi kullanıldığında elde edildiği görülmüştür.

- Köprü üstyapısı, en hafif şekilde I-60, en ağır şekilde ise I-150 kirişi kullanıldığında elde edilmektedir. Hafif üstyapı sayesinde yapının deprem performansının artacağı ve yapının altyapı maliyetinin azalacağı beklenmektedir.

Tablo 4.4. Kiriş boyu 15m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (15m)							
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	Uygun mu?
I-60	7	-	-0,978	38,34	15,32	11,01	74.163,60	UYGUN
I-75	6	-	-0,459	72,15	14,46	14,23	84.125,50	UYGUN
I-90	4	-	-0,390	52,20	9,39	13,31	63.377,00	UYGUN
I-100	3	-	-0,267	67,43	7,82	11,78	58.653,70	UYGUN
I-110	3	-	-0,205	74,7	7,41	15,61	66.082,00	UYGUN
I-120	2	-	-0,168	84,34	5,89	16,23	64.531,60	UYGUN
I-130	2	-	-0,130	102,6	5,43	15,36	64.968,00	UYGUN
I-140	1	-	-0,124	119,31	5,76	17,35	72.913,90	UYGUN
I-150	1	-	-0,104	117,84	4,61	15,65	65.954,60	UYGUN
I-160	1	-	-0,086	100,15	3,46	17,02	61.476,50	UYGUN
I-170	3	-	-0,093	62,63	3,09	7,17	34.792,70	UYGUN
I-180	1	-	-0,064	116,28	2,30	12,10	51.983,20	UYGUN

Örnek olarak seçilen on iki adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 18m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.5'te verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 18m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-60 kirişi kullanıldığında, kiriş için hesaplanan öngerme kablo sayısı ve sehim ile ilgili

sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değer in aşıldığı görülmüştür. Bu durum I-60 önerilmeli kiriş in bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.

- I-75 kirişinden I-180 kirişine doğru gidildikçe, kirişlerde kullanılan önerme kablo sayısı ve sehim değerlerinin azaldığı ve bu kirişlerin hiçbirinde kılıflanma işleminin yapılmasına gerek olmadığı görülmüştür.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-75 kirişinden elde edildiği görülmüştür. Bu sonucun en büyük sebeplerinden birinin, I-170 kirişinin üst başlık genişliğinin (b_5) diğer kirişlere göre oldukça fazla olması ve bundan dolayı köprü tabliyesini destekleyen kiriş sayısının diğer kirişlere göre az olmasıdır.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-90, en ağır şekilde ise I-140 kirişi kullanıldığında elde edilmektedir.

Örnek olarak seçilen on bir adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 21m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.6'da verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 21m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-75 kirişi kullanıldığında, kiriş için hesaplanan önerme kablo sayısı ve sehim ile ilgili sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değer in aşıldığı görülmüştür. Bu durum I-75 önerilmeli kirişinin bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.
- I-90 kirişinden I-180 kirişine doğru gidildikçe, kirişlerde kullanılan önerme kablo sayısı ve sehim değerlerinin azaldığı ve I-90 kirişi hariç diğer tüm kirişlerde kılıflanma işleminin yapılmasına gerek olmadığı görülmüştür.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-140 kirişinden elde edildiği görülmüştür.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-90, en ağır şekilde ise I-140 kirişi kullanılarak oluşturulmaktadır.

Tablo 4.5. Kiriş boyu 18m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (18m)							
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	Uygun mu?
I-60	12	5	-1,814	x	x	x	x	DEĞİL
I-75	9	-	-0,850	86,58	24,75	16,98	122.962,20	UYGUN
I-90	7	-	-0,723	62,64	18,09	15,97	96.514,60	UYGUN
I-100	7	-	-0,493	81,00	15,08	14,14	87.496,00	UYGUN
I-110	5	-	-0,393	89,64	13,35	18,47	92.174,60	UYGUN
I-120	4	-	-0,322	101,21	11,89	18,49	90.030,90	UYGUN
I-130	4	-	-0,241	123,12	10,97	17,31	89.191,80	UYGUN
I-140	3	-	-0,231	143,72	14,33	21,48	111.108,80	UYGUN
I-150	3	-	-0,193	141,408	11,46	17,45	94.402,52	UYGUN
I-160	3	-	-0,160	120,18	8,59	19,15	84.989,20	UYGUN
I-170	6	-	-0,171	75,15	6,55	8,82	50.686,50	UYGUN
I-180	4	-	-0,118	139,50	7,32	13,79	74.666,00	UYGUN

Örnek olarak seçilen on adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 24m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.7’de verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 24m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-90 kirişi kullanıldığında, kiriş için hesaplanan öngerme kablo sayısı ve sehim ile ilgili sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değerinin aşıldığı görülmüştür. Bu durum I-90 öngerilmeli kirişinin bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.

- I-100 kirişinden I-180 kirişine doğru gidildikçe, kirişlerde meydana gelen sehim değerlerinin azaldığı ve I-100 kirişi hariç diğer tüm kirişlerde kılıflanma işleminin yapılmasına gerek olmadığı görülmüştür.

- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-140 kirişinden elde edildiği görülmüştür.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-170, en ağır şekilde ise I-140 kirişi kullanılarak oluşturulmaktadır. Uzunluğu 24m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-170 kirişinin kullanımının hem ekonomik hem de ağırlık bakımından en uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.6. Kiriş boyu 21m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (21m)							Uygun mu?
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	
I-75	13	4	-1,392	x	x	x	x	DEĞİL
I-90	10	1	-1,184	73,08	29,17	18,63	136.792,20	UYGUN
I-100	10	-	-0,806	94,40	24,31	16,51	122.235,00	UYGUN
I-110	8	-	-0,621	104,58	26,15	21,73	139.607,20	UYGUN
I-120	7	-	-0,509	118,07	22,60	21,65	131.368,30	UYGUN
I-130	7	-	-0,394	143,64	20,86	20,41	128.650,60	UYGUN
I-140	5	-	-0,379	167,03	25,54	24,77	155.418,7	UYGUN
I-150	5	-	-0,315	164,98	20,43	20,14	130.902,20	UYGUN
I-160	5	-	-0,261	140,21	15,33	22,08	110.375,60	UYGUN
I-170	9	-	-0,278	87,68	11,00	10,29	69.210,20	UYGUN
I-180	6	-	-0,193	162,75	12,06	16,16	97.806,50	UYGUN

Örnek olarak seçilen dokuz adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 27m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.8'de verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 27 m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-100 ve I-110 kirişleri kullanıldığında, kirişler için hesaplanan öngerme kablo sayısı ve sehim ile

ilgili sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değerlerin aşıldığı görülmüştür. Bu durum I-100 ve I-110 önerilmeli kirişlerinin bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.

- I-110 kirişinden I-180 kirişine doğru gidildikçe, kirişlerde meydana gelen sehim değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-140 kirişinden elde edildiği görülmüştür.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-170, en ağır şekilde ise I-140 kirişi kullanılarak oluşturulmaktadır. Uzunluğu 27m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-170 kirişinin kullanımının hem ekonomik hem de ağırlık bakımından en uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.7. Kiriş boyu 24m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (24m)							Uygun mu?
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraj (m ³)	Kablo Metrajı (ton)	Donatı Metrajı (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	
I-90	14	4	-1,789	x	x	x	x	DEĞİL
I-100	15	3	-1,216	107,88	40,79	18,76	178.511,20	UYGUN
I-110	11	-	-0,937	119,52	36,29	24,72	178.546,80	UYGUN
I-120	9	-	-0,769	134,94	32,46	24,76	170.602,6	UYGUN
I-130	10	-	-0,595	164,16	33,13	23,37	174.983,40	UYGUN
I-140	6	-	-0,574	190,90	34,11	30,87	197.254,00	UYGUN
I-150	7	-	-0,477	188,54	31,51	23,43	174.869,60	UYGUN
I-160	7	-	-0,394	160,24	23,63	25,32	149.443,60	UYGUN
I-170	13	-	-0,418	100,20	17,76	11,68	94.510,00	UYGUN
I-180	10	-	-0,29	186,20	20,09	18,52	130.836,00	UYGUN

Tablo 4.8. Kiriş boyu 27m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (27m)							
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	Uygun mu?
I-100	20	7	-1,734	x	x	x	x	DEĞİL
I-110	15	4	-1,338	x	x	x	x	DEĞİL
I-120	13	3	-1,098	151,81	51,75	28,61	238.452,90	UYGUN
I-130	14	2	-0,849	184,68	51,32	26,84	240.045,20	UYGUN
I-140	9	1	-0,821	214,76	55,87	35,67	276.130,40	UYGUN
I-150	10	2	-0,681	212,11	49,45	29,18	244.092,90	UYGUN
I-160	10	-	-0,562	180,27	37,09	29,25	201.096,30	UYGUN
I-170	17	-	-0,594	112,73	25,83	13,44	124.443,75	UYGUN
I-180	13	-	-0,413	209,25	31,85	21,35	175.872	UYGUN

Örnek olarak seçilen yedi adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 30m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.9'da verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 30m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-120, I-130, I-140 ve I-150 kirişleri kullanıldığında, kirişler için hesaplanan öngerme kablo sayısı ve sehim ile ilgili sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değerlerin aşıldığı görülmüştür. Bu durum bu kirişlerinin bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-160 kirişinde elde edildiği görülmüştür.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-170, en ağır şekilde ise I-180 kirişi kullanılarak oluşturulmaktadır. Uzunluğu 30m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-170 kirişinin kullanımının hem ekonomik hem de ağırlık bakımından en uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.9. Kiriş boyu 30m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (30m)							Uygun mu?
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	
I-120	17	6	-1,503	x	x	x	x	DEĞİL
I-130	18	6	-1,161	x	x	x	x	DEĞİL
I-140	12	4	-1,126	x	x	x	x	DEĞİL
I-150	13	4	-0,933	x	x	x	x	DEĞİL
I-160	13	-	-0,769	200,30	52,91	32,33	258.214,00	UYGUN
I-170	22	-	-0,810	125,25	36,88	14,91	162.766,5	UYGUN
I-180	18	-	-0,564	232,50	48,46	23,85	234.870,00	UYGUN

Örnek olarak seçilen üç adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 33m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.10'da verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 33m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-160, I-170 ve I-180 kirişleri kullanıldığında, kirişler için hesaplanan öngerme kablo sayısı, kılıf sayısı ve sehim değeri parametrelerinin uygun oluğu görülmüştür.
- Üstyapıda kullanılan kirişlerin toplam malzeme maliyeti incelendiğinde, en düşük maliyetin I-170 en yüksek maliyetin ise I-160 kirişinde elde edildiği görülmüştür.
- Köprü üstyapısı en hafif şekilde I-170, en ağır şekilde ise I-180 kirişi kullanılarak oluşturulmaktadır. Uzunluğu 33m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-170 kirişinin kullanımının hem ekonomik hem de ağırlık bakımından en uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.10. Kiriş boyu 33m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (33m)							Uygun mu?
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	
I-160	16	3	-1,017	220,33	71,11	35,41	322.471,70	UYGUN
I-170	29	5	-1,068	137,78	53,20	16,47	217.071,20	UYGUN
I-180	23	4	-0,745	255,75	67,71	26,08	301.274,50	UYGUN

Örnek olarak seçilen üç adet farklı kiriş ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan 35m açıklığa sahip köprü üstyapısının analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.11’de verilmiştir. Analizler sonucunda köprü kirişlerinde elde edilen veriler incelendiğinde;

- Uzunluğu 35m olan kirişlerle oluşturulan üstyapıda I-160 ve I-180 kirişleri kullanıldığında, kirişler için hesaplanan öngerme kablo sayısı ve sehim ile ilgili sınır değerlerin aşılmadığı fakat kullanılan kılıf sayısı ile ilgili sınır değerlerin aşıldığı görülmüştür. Bu durum I-160 ve I-180 öngerilmeli kirişlerinin bu açıklıkta kullanılamayacağını göstermektedir.
- Bu açıklıkta örnek seçilen kirişlerden sadece I-170 kirişinin kullanılabileceği görülmüştür.

Tablo 4.11. Kiriş boyu 35m için analiz sonuçları

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu (35m)							Uygun mu?
	Kablo Sayısı	Kılıf Sayısı	Sehim (cm)	Beton Metraji (m ³)	Kablo Metraji (ton)	Donatı Metraji (ton)	Kiriş Maliyeti (TL)	
I-160	19	5	-1,208	x	x	x	x	DEĞİL
I-170	34	8	-1,266	146,13	66,00	17,70	259.394,70	UYGUN
I-180	27	8	-0,884	x	x	x	x	DEĞİL

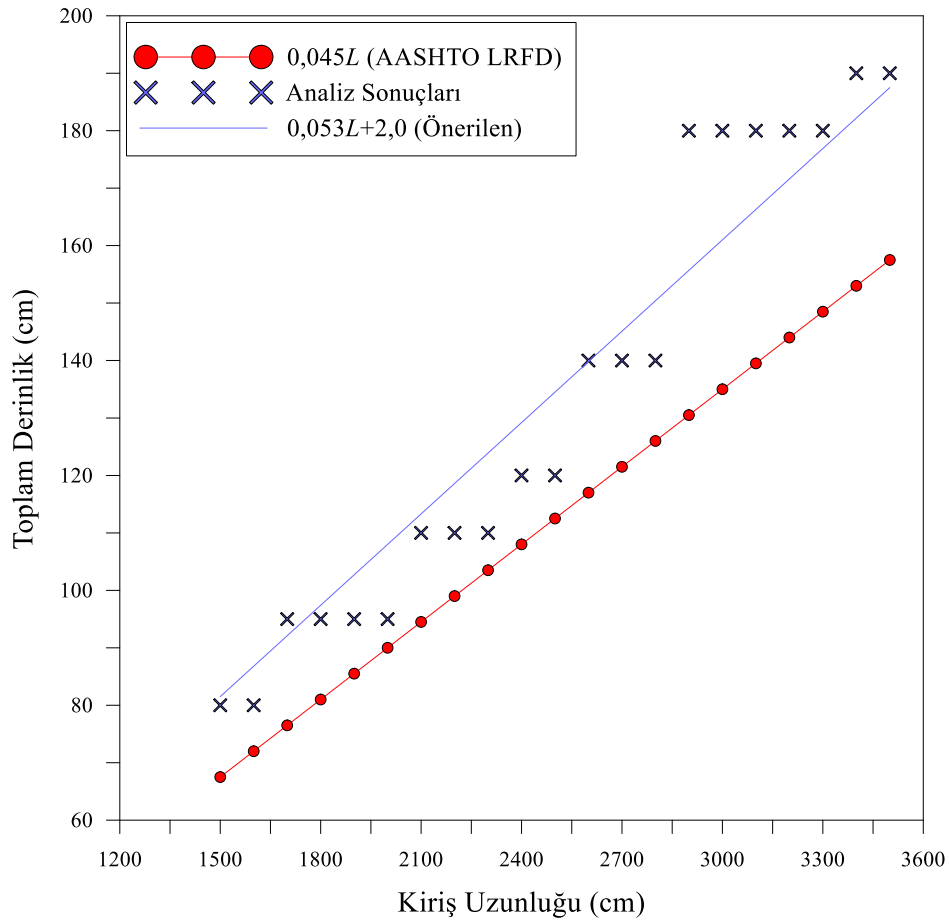
En uygun ve ekonomik kirişin belirlenmesinde sadece köprü üstyapı maliyetini dikkate almak daha ağır köprü üstyapısının oluşmasına neden olabilir. Bu durum hem yapının deprem performansını olumsuz etkileyebilir hem de köprü altyapı maliyetinin artmasına sebep olabilir. Bu nedenle köprü üstyapısı ile ilgili en uygun kirişlerin belirlenebilmesi için altyapı ile ilgili analizlerinde yapılması gerekmektedir.

Yapılan tüm analizler sonucunda örnek seçilen önerilmeli kirişlerin, önerme kablo sayısı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri AASHTO LRFD (2012)'de bulunan sınır değerler ile karşılaştırılıp kirişlerin uygunluğu belirlenmiştir. Kirişlerin hangi açıklıklarda kullanılabilir olduğu Tablo 4.12'de verilmiştir.

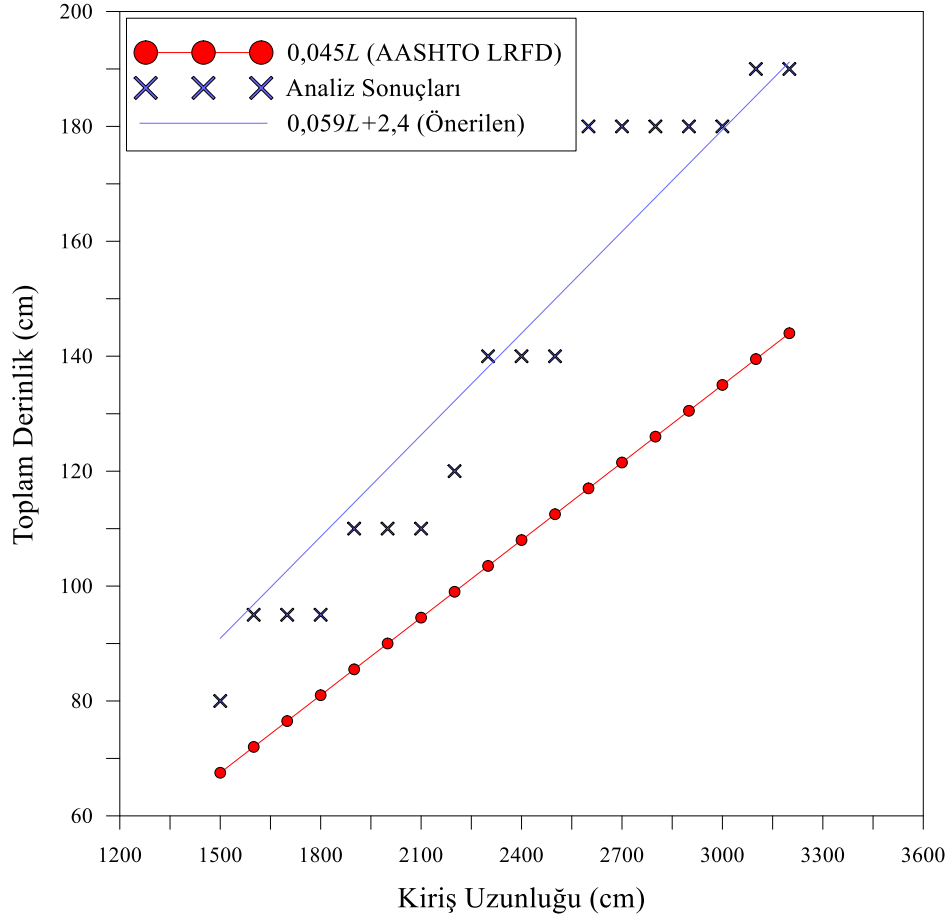
Tablo 4.12. Örnek olarak seçilen köprü üstyapısı için önerilmeli kirişlerin kullanılabildiği açıklıklar

Kiriş Tipi	Kiriş Uzunluğu							
	15m	18m	21m	24m	27m	30m	33m	35m
I-60	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
I-75	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
I-90	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
I-100	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
I-110	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
I-120	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
I-130	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
I-140	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
I-150	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
I-160	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
I-170	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
I-180	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

AASHTO LRFD (2012)'de önerilmeli kirişler kullanılarak oluşturulan bir köprü üstyapısının tabliye dâhil en küçük derinliği $0,045L$ olarak belirlenmektedir. Örnek olarak seçilen on iki kiriş kullanılarak oluşturulan farklı açıklığa sahip köprü üstyapısında yapılan analizler; *izin verilen çekme gerilmesi kadar gerilmenin oluşması durumu* dikkate alınarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında belirlenen tabliye dâhil en küçük derinlikler, bu değerler için belirlenen regresyon eğrisi ve AASHTO tarafından belirlenmiş olan bağıntı kullanılarak elde edilen en küçük derinlikler Şekil 4.2'de bir arada verilmiştir. Örnek olarak seçilen on iki kiriş kullanılarak oluşturulan farklı açıklığa sahip köprü üstyapısında yapılan analizler; *çekme gerilmesi oluşmaması durumu* dikkate alınarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında belirlenen tabliye dâhil en küçük derinlikler, bu değerler için belirlenen regresyon eğrisi ve AASHTO tarafından belirlenmiş olan bağıntı kullanılarak elde edilen en küçük derinlikler Şekil 4.3'te bir arada verilmiştir.



Şekil 4.2. Köprü üstyapı açıklığı-derinlik ilişkisi (*İzin verilen kadar çekme gerilmesi oluşması durumu*)



Şekil 4.3. Köprü üstyapı açıklığı-derinlik ilişkisi (*Çekme gerilmesi oluşmaması durumu*)

İzin verilen çekme gerilmesi kadar gerilmenin oluşması durumu dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda köprü üstyapısının tabliye dâhil en küçük derinliği $0,053L+2,0$ olarak belirlenmiştir. *Çekme gerilmesi oluşmaması durumu* dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda köprü üstyapısının tabliye dâhil en küçük derinliği $0,059L+2,4$ olarak belirlenmiştir. Burada L cm cinsinden kiriş uzunluğu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Öngerilmeli kirişler kullanılarak inşa edilen köprülerin dünyada ve ülkemizdeki sayısı göz önüne alındığında bu tür köprülerin ne kadar önemli oldukları görülmektedir. Modern mühendisliğin en önemli gelişmelerinden biri olan öngerilmeli beton, kısa bir süreçte sahip olduğu birçok üstün özellikten dolayı günümüzün ve geleceğin yapı malzemesi olarak süratle ön sırayı almış bulunmaktadır. Toplumların hızla artan ulaşım ihtiyaçları da göz önüne alındığında öngerilmeli beton köprülerin inşasının artarak devam edeceği açıktır.

Bu doktora tez çalışmasında, öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapılmış elde edilen bilgiler ışığında köprü üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Geliştirilen program ile farklı malzeme özelliklerine, açıklığa ve genişliğe sahip öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprü üstyapısının farklı dış etkiler altındaki analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde tamamlanması ve bunlara ek olarak analiz sonucunda elde edilen; kesit özellikleri, kesit tesirleri, öngerme kablo sayısı ve yerleşimi planı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri, kiriş ve tabliyenin yapımında gerekli olan betonarme donatı sayısı ve yerleşimi gibi köprü üstyapısının inşasında gerekli bilgilerin raporlanması ve uygulama projelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Ülkemizde öngerilmeli kirişli beton köprülerin tasarımı için TS3233 (1979) standardı ve Karayolu Teknik Şartnamesi (2013) bulunmasına rağmen bu yayınlar bu tür köprü üstyapısının boyutlandırılmasında yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada köprü üstyapısının hesap ve tasarımında, “American Association of State Highway and Transportation Officials” tarafından yayımlanmış olan “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” adlı yönetmelik hükümleri büyük ölçüde dikkate alınmıştır.

Çalışmada öngerilmeli kirişlere sahip köprü üstyapısının boyutlandırılması için dikkate alınması gereken yükler ve bu yüklerin kirişlerde meydana getirdiği kesit tesirleri, kirişlerin kesit özelliklerinin belirlenmesi ve hesabı incelenmiştir. Daha sonra kirişteki öngerme kablolarının kirişin alt başlığındaki dağılımının kirişte meydana gelen gerilme, sehim ve kılıflanma parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda hesap açıklığı, kesit ve malzeme özellikleri aynı fakat öngerme kablo sayısı ve yerleşimi birbirinden farklı olan toplam 18 adet öngerilmeli I kiriş örnek olarak seçilmiştir. Bu

kirişler, toplam kablo sayısına ve kiriş alt başlığının ilk sırasında bulunan kablo sayısına bağlı olarak 4 farklı grup altında toplanmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen verilerle en uygun kablo dizilimine karar verilmiştir. Daha sonra aktarma döneminde kirişte oluşan sehim ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Literatürde mevcut olan lineer-elastik ve elastik-stabilite yöntemlerinden elde edilen sonuçlar deneysel ölçümlerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Köprü üstyapısının oluşturulmasında kullanılan önerilmeli kirişlerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için analitik, sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmış ve elde edilen veriler birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak, önerilmeli prefabrik kirişli beton köprü üstyapısının hesap ve tasarımı gerçekleştirilen I-CAD ve köprü üstyapısı ile altyapısı arasındaki bağlantıyı sağlayan elastomer mesnetlerin analizini gerçekleştiren SREI-CAD programları geliştirilmiştir. Örnek olarak seçilen önerilmeli prefabrik kirişli beton bir köprü üstyapısının hesap ve tasarımı I-CAD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. I-CAD programının doğruluğunu kontrol etmek için hesap ve tasarımı gerçekleştirilen önerilmeli kiriş, SAP2000 programında modellenerek, kirişin sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. SREI-CAD programı yardımıyla ise aynı malzeme özelliklerine sahip dikdörtgen ve dairesel kesitli elastomer mesnetler aynı yük koşulları dikkate alınarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Öngerilmeli kirişlerin etkin açıklıklarını belirlemek için farklı açıklıklara sahip önerilmeli prefabrik kirişli beton köprü üstyapısının hesap ve tasarımı I-CAD programı yardımıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak köprü üstyapı derinliğinin, köprü açıklığına bağlı olarak belirlenmesinde kullanılan bağıntılar önerilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- 1) AASHTO LRFD (2012)'de bulunan tasarım kamyonu koşulları dikkate alındığında, köprü açıklığı artıkça HL93 tasarım kamyonu ve şerit yükünün birlikte etkimesi durumu, köprü açıklığı azaldıkça ise tandem yükü ve şerit yükünün birlikte etkimesi durumu elverişsiz olmaktadır.
- 2) Ülkemizde kullanılmakta olan H₃₀S₂₄ tasarım kamyonu koşulları dikkate alındığında elverişsiz yükleme durumu genel olarak şerit yüklemesi altında elde edilmektedir.

- 3) $H_{30}S_{24}$ ve HL93 tasarım kamyonları kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük eğilme momenti $H_{30}S_{24}$ tasarım kamyonu koşulları dikkate alındığında elde edilmiştir.
- 4) Öngerme kablo yerleşiminin kiriş davranışına olan etkilerini belirlemek için yapılan çalışmalar sonucunda, her grupta bulunan kirişler kendi içerisinde incelendiğinde, kirişin alt başlığında bulunan öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça servis dönemi koşulları altında açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst ve alt lifinde meydana gelen gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Azalma miktarı kirişin alt lifinde Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %33, %49, %39 ve %58 olarak elde edilmiştir. Açıklık ortasındaki kiriş kesitinin üst lifinde servis döneminde meydana gelen basınç gerilmesinde ki azalma miktarı ise sırasıyla %6, %5, %7 ve %8 olarak elde edilmiştir.
- 5) Kablo düzeninin, servis döneminde açıklık ortasındaki kiriş kesitinin alt lifinde meydana gelen gerilmeler üzerindeki etkisinin üst lifinde meydana gelen gerilmelere üzerindeki etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür.
- 6) Kirişteki öngerme kabloları kiriş alt lifine ve aynı sırada bulunan kablolar ise kirişin simetri eksenine yaklaştıkça, servis döneminde kirişte meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerinin azaldığı görülmüştür.
- 7) Öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça servis döneminde açıklık ortasında meydana gelen sehim miktarının azaldığı görülmüştür. Meydana gelen azalma miktarları Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %15, %15, %19 ve %28 olarak elde edilmiştir.
- 8) Her grupta bulunan kirişler kendi içerisinde incelendiğinde, kirişin alt başlığında bulunan öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça aktarma dönemi koşulları altında kirişin açıklık ortasındaki kesitinin üst lifindeki gerilmelerde azalma alt lifindeki gerilmelerde ise artma olduğu görülmüştür. Kirişin üst lifinde meydana gelen azalma miktarları Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %44, %51, %52 ve %58 olarak elde edilmiştir. Kirişin alt lifinde meydana gelen artış miktarları ise Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %7, %6, %10 ve %9 olarak elde edilmiştir.

- 9) Kirişin alt başlığında bulunan öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça, aktarma dönemi koşulları altında mesnet bölgesindeki kiriş kesitinin üst ve alt lifindeki gerilmelerde artış olduğu görülmüştür. Kirişin üst lifinde meydana gelen artış miktarları Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %19, %17, %26 ve %27 olarak elde edilmiştir. Kirişin alt lifinde meydana gelen artış miktarları Grup 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla %5, %4, %7 ve %7 olarak elde edilmiştir.
- 10) Aktarma döneminde kirişte meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, kirişin mesnet bölgelerinde gerilme yığılmalarının olduğu görülmüştür. Bu gerilme yığılmalarını yönetmeliklerle belirlenen emniyet gerilmeleri seviyelerine indirmek için belirli sayıdaki öngerme kablosunun kılıflanması gerekmektedir.
- 11) Her grupta bulunan kirişler kendi içerisinde incelendiğinde, kirişlerin alt başlığında bulunan öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça aktarma döneminde kirişin mesnet bölgelerinde meydana gelen aşırı gerilmeleri emniyet gerilmelerinin altına indirmek için gerekli olan kılıf sayısının arttığı görülmüştür.
- 12) Aktarma dönemi sonrası kirişte yukarı yönde bir sehimin meydana geldiği görülmüş ve kirişlerin alt başlığında bulunan öngerme kabloları kirişin alt lifine ve kirişin simetri eksenine yaklaştıkça meydana gelen sehimin arttığı görülmüştür.
- 13) Öngerilmeli kirişli köprü üstyapısının inşası sırasındaki farklı dönemler dikkate alınıp öngerme kablolarının kirişin alt başlığındaki dağılımının kiriş üzerindeki etkileri incelendiğinde, öngerme kablolarının kirişin alt lifine ve simetri eksenine yaklaştırılmasının en uygun çözüm olduğu belirlenmiştir.
- 14) Kiriş kendi ağırlığı etkisi altındayken, birinci mertebe ve elastik-stabilite teoremleri kullanılarak belirlenen sehimin aynı olduğu görülmüştür. Kiriş sadece eğilme doğrultusundaki yüklere maruz kaldığında yani kirişin maruz kaldığı yüklerin doğrultusu kirişte meydana gelen sehim ile aynı doğrultuda olduğunda, kirişte ikincil momentler oluşmadığı ve bu sebepten ikincil momentleri dikkate alan elastik-stabilite ile ikincil momentleri dikkate almayan birinci mertebe teorisinden elde edilen sehim değerlerinin aynı olduğu görülmüştür.

- 15) Kiriş sadece öngerme kuvveti etkisi altındayken, birinci mertebe ve elastik-stabilite teoremleri kullanılarak hesaplanan sehim değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Kiriş, öngerme kuvvetinden dolayı eğilme doğrultusuna dik bir kuvvete maruz kalmakta bu durumda kirişte ikincil momentlerin oluşmasına neden olmakta ve iki teorilerinden elde edilen sehim değerleri birbirinden farklı olmaktadır.
- 16) Kiriş sadece eğilme doğrultusundaki yüklere maruz kaldığında sehim hesabı, birinci mertebe teorisi ile doğru bir şekilde yapılmaktadır. Fakat kiriş öngerme kuvveti etkisinde olduğu zaman birinci mertebe teorisinin her zaman doğru sonuçlar vermediği yapılan deneysel ölçümlerle belirlenmiştir. Kirişte aktarma dönemi sonunda oluşan sehimin elastik-stabilite teoremi ile hesaplamasının daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.
- 17) Öngerilmeli kirişin analitik, sayısal (SAP2000) ve deneysel yöntemler (GFOA ve SAB) kullanılarak elde edilen frekansları incelendiğinde analitik ve sayısal, GFOA ve SAB yöntemleri ile elde edilen frekansların kendi aralarında oldukça uyumlu olduğu ve bunlar arasındaki farkın ise %15'in altında olduğu tespit edilmiştir.
- 18) I-CAD programında tasarımı yapılan öngerilmeli kirişin 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak yapılmış ve analizler sonucunda; aktarma, tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki ve servis dönemlerinde öngerilmeli kirişin alt ve üst liflerinde elde edilen gerilmelerin emniyet gerilmeleri sınırı içinde kaldığı görülmüştür. Bu durum öngerilmeli kirişin I-CAD programı ile doğru bir şekilde tasarlandığını göstermektedir.
- 19) AASHTO LRFD (2012)'de karesel mesnetlerin stabilite koşulunun sağlanması dairesel mesnetlere göre daha kolay olması, karesel mesnetlerin kullanılmasının teşvik edildiği sonucunu göstermektedir.
- 20) Öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısında bulunan kirişlerin etkin açıklıklarını belirlemek için yapılan analizler sonucunda, kirişler için dikkate alınan öngerme kablo sayısı, kılıflanacak kablo sayısı ve sehim parametreleri ile ilgili sınır değerlerden, kılıf sayısı ile ilgili sınır değerin kirişlerin kullanılabilir olduğu açıklıklarının belirlenmesinde etkili olduğu görülmüştür.

- 21) Köprü üstyapısında kullanılacak olan en uygun kirişin belirlenmesinde toplam kiriş ağırlığı ile toplam kiriş yapım maliyeti dikkate alınmıştır. Farklı açıklıklarda yapılan analizler sonucunda toplam kiriş maliyeti ve kiriş ağırlığının bazı açıklıklarda aynı kirişte en uygun çıktığı bazı açıklıklarda ise farklı kirişlerde çıktığı görülmüştür. En uygun kirişin belirlenmesinde sadece köprü üstyapı maliyeti dikkate almak daha ağır köprü üstyapısının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durumda hem yapının deprem performansını olumsuz etkilemekte hem de köprü altyapı maliyetinin artmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle köprü üstyapısını oluşturmak için kullanılacak en uygun kirişin belirlenebilmesinde sadece üstyapı maliyetinin dikkate alınması uygun olmamaktadır. En uygun üstyapı kesitinin belirlenmesi için altyapı ile ilgili analizlerinde yapılması gerekmektedir.
- 22) AASHTO LRFD (2012)'de önerilmeli kirişler kullanılarak oluşturulan bir köprü üstyapısının tabliye dâhil en küçük derinliği $0,045L$ olarak belirlenmektedir. Örnek olarak seçilen on iki kiriş kullanılarak oluşturulan farklı açıklığa sahip köprü üstyapısında yapılan analizler; izin verilen çekme gerilmesi kadar gerilmenin oluşması ve çekme gerilmesi oluşmaması durumları dikkate alınarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında belirlenen tabliye dâhil en küçük derinlikler sırasıyla $0,053L+2,0$ ve $0,059L+2,4$ olarak elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan hareketle, aşağıdaki önerilerin dikkate alınması ve bu konuyla ilgili araştırmaların geliştirilmesi tavsiye edilmektedir:

- Bu çalışmada, önerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısının hesap ve tasarımını gerçekleştiren bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Aynı tür köprülerin üstyapısının yanında altyapısının hesabının da gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır.
- Öngerme kablolarının kiriş içindeki dağılımının kiriş üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenebilir.
- Öngerilmeli kirişlerde kullanılan kılıf sayısı ve yerleşimi ile ilgili AASHTO LRFD (2012)'de verilen koşullar deneysel olarak incelenebilir.
- Öngerilmeli köprü kirişlerinin uzun süreli sehim hesabı genel olarak birinci mertebe teorisiyle belirlenen ani sehimin belirli katsayılarla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Ani sehimin elastik-stabilite teoremi ile belirlenmesi durumunda uzun süreli sehim için kullanılacak katsayılar araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- AASHTO. 2012. LRFD bridge design specifications, 6th Ed., Washington, D.C.
- Ahmed, S.H. ve Shah, S.P., 1985. Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete, PCI Journal, 30, 6, 92-119.
- Akoğlu, C., 2007. Prekast Kirişli Betonarme Köprülerin AASHTO'ya Göre Depreme Dayanıklı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akoğlu, C. ve Çelik O.C., 2008. Effect Of Elastomeric Bearing Modeling Parameters On The Seismic Design Of Rc Highway Bridges With Precast Concrete Girders, World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Aktaş, E., 2010. Öngerilme Kirişli Bir Köprü Tasarımı ve Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aktaş, V., 2013. Her Yönüyle C# 5.0, Kodlab, İstanbul.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- ANSYS, 2015. Swanson Analysis System, Pennsylvania, USA.
- Aparicio, A.C., Casas, J. R. ve Ramos G., 1996. Computer Aided Design of Prestressed Concrete Highway Bridges, Computers and Structure, 60, 6, 957-969.
- Araz, S., 2000. Öngerilmeli Sürekli Kirişlerin Bilgisayar ile Hesabı, Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ateş, Ş. ve Dumanoğlu, A.A., 2003 Taban İzolasyonlu Binaların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi, 13. Ulusal Mekanik Kongresi, Gaziantep.
- Atmaca, B. ve Ateş, Ş. 2017. Determination of bearing type effect on elastomeric bearing selection with SREI-CAD, Advances in Computational Design, 2, 1, 43-56.
- AutoCAD, 2016, Autodesk, USA.
- Avşar, Ö., Yakut A. ve Caner A., 2011. Türkiye'deki Tipik Karayolu Köprülerinin Kırılma Eğrilerinin Analitik Yöntemle Belirlenmesi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ekim, Ankara, Türkiye, Bildiri Kitabı, 1-8.

- Aydın, Z., 2006. Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üst Yapılarının Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bonopera, M., Chang, K.C., Chen, C.C., ve Tullini, N., 2017. Influence of prestress force on the fundamental frequency of concrete beams with straight unbonded tendons, The Thirtieth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, İtalya.
- Buckle, I., Nagarajaiah, S. ve Ferrell, K., 2002. Stability of Elastomeric Isolation Bearings: Experimental Study, Journal of Structural Engineering, 128, 1, 3-11.
- Burgueño, R. ve Sun, Y., 2011. Effects of Debonded Strands on the Production and Performance of Prestressed Concrete Beams, Research Report for MDOT, Michigan State University.
- Caro, L. A., Marti-Vargas, J.R. ve Serna, P., 2013. Prestress Losses Evaluation in Prestressed Concrete Prismatic Specimens, Engineering Structures, 48, 704-715.
- Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H. ve Slate, F.O., 1981. Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, ACI Journal, 87, 3, 171-178.
- Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., ve Slate, F. O., 1981. Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, ACI Journal, 78, 3, 171–178.
- Castrodale, R. W., Burns, N.H., ve Kreger, M.E., 1988. A Study of Pretensioned High Strength Concrete Girders in Composite Highway Bridges-Laboratory Tests Research Report 381-3, CTR, The University of Texas at Austin.
- Chaudary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2001. Performance Evaluation of Base-Isolated Yama-age Bridge with High Damping Rubber Bearings Using Recorded Seismic Data, Engineering Structures, 23, 902-910.
- Chaudary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2002. Investigation of Atypical Seismic Response of a Base-Isolated Bridge, Engineering Structures, 24, 945-953.
- Colajanni, P., Recupero, A. ve Spinella, N., 2014. Design Procedure for Prestressed Concrete Beams, Computer and Concrete, 13, 2, 235-253.
- Comité Euro-International du Béton (CEB) and the Fédération International de la Précontrainte (FIP) . CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft.
- Computers and Structures Inc. 2016. SAP2000: Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Berkeley, CA, USA.
- Constantinou, M.C. ve Tadjbakhsh, I.G., 1984a. The Optimum Design of a Base-Isolation System with Frictional Element, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 12, 2, 203-214.

- Constantinou, M.C., 1987. A simplified Analysis Procedure for Base-Isolated Structures on Flexible Foundation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 963-983.
- Çağatay, İ.H., 1996. Öngerilmeli Beton Kirişlerin Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dicleli, M. ve Erhan, S., 2009. Live Load Distribution Formulas for Single-Span Prestressed Concrete Integral Abutment Bridge Girders, Journal of Bridge Engineering, 14, 472-486.
- Du, J.S. ve Au, F.T.K., 2005. Deterministic and Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of the Chines Hong Kong and AASHTO LRFD Codes, Structural Safety, 27, 230-245.
- Erdoğan, T.Y., 2007. Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Erkek, H., 2011. Standart I-Tipi Öngermeli Kirişlerde Öngerme Çeliğinin Transfer Uzunluğunun 3-Boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu ile Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- French, C.E., 2012. Validation of Prestressed Concrete I-Beam Deflection and Camber Estimates, Research Report 1210-5F, CTR, University of Minnesota, USA.
- Garber D., Gallardo J., Deschenes D., Dunkman D. ve Bayrak O., 2013. Effect of New Prestress Loss Estimates on Pretensioned Concrete Bridge Girder Design, Technical Report, 0-6374, Texas Department of Transportation.
- Gardner, N.J. ve Lockman, M.J., 2001. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete, ACI Materials Journal, 98, 2, 159-167.
- Gerçek, M., 2001. Köprü ve Viyadüklerin Depreme Dayanıklı Olarak Projelendirilmesi ve Deprem İzolatörleri, Teknik Dergi, Sayı:58.
- Gies, J., 1963. Bridges and Men, Grosset & Dunlap, New York.
- Green, T., Yazdani, N., Spainhour, L. ve Cai, C.S., 2007. Effect of Bearing Stiffness and Skew Angle on Performance of Precast Concrete Bridge, Transportation Research Record, 1770, 27-33.
- Gross S. P. ve Burns N. H., 1995. Transfer and Development Length of 15.2 mm Diameter Prestressing Strand in High Performance Concrete: Result of The Holitzell-Bruckner Beam Test, Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin , USA.
- Günaydın, M., 2016. Onarılmış Ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel Ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Gündüz, B. C., 2010. Öngerme Kirişli Betonarme Demiryolu Köprüsünün Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamed, E., ve Frostig, Y., 2006. Natural Frequencies of bonded and unbonded prestressed beams-prestress force effects, Journal of Sound and Vibration, 295, 28-39.
- Harper, Z.S. ve Consolazio, G.R., 2013. Calculation Method for Quantifying Axial and Roll Stiffnesses of Rectangular Steel-Reinforced Elastomeric Bridge Bearing Pads, Transportation Research Record, 2331, 3-13.
- Hernandes, S., Fontan, A.N., Diaz, J. ve Marcos, D., 2010. VTOP. An Improved Software for Design Optimization of Prestressed Concrete Beams, Advanced in Engineering Software, 41, 415-421.
- Hopkins, H.J., 1970. A Span of Bridges, Praeger, New York.
- Hoyer E., 1939. Der Stahlsaitenbeton [piano-string-concrete]. Otto Elsner, Berlin.
- İnan, M., 1970. Cisimlerin Mukavemeti, Ofset Matbaacılık, İstanbul.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Kang-Su, K., Deuck-Hang, L., Sang-Sik, K., Chang-Hyuk, K. ve Jung-Woo, P., 2009. Study on The Efficiency of Post-Tension Slab Method by Strand Lay-Out, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 25, 9, 59-68.
- Karaesmen, E., 2015. Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler, Lord Matbaacılık, İstanbul.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Keskin, A., 2007. Yapı İzolatörleri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Keyder, E., 2013. Öngerilmeli Beton, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- Koh, C.H. ve Kelly, J.M., 1990. Application of Frictional Derivatives to Seismic Analysis of Base-Isolated Models, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 229-241.
- Kozak, M., 2011. Öngerilmeli Betonlar ve Özelliklerinin Teorik Olarak Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 1, 100-106.
- Li, R. ve Zhang, Y., 2011. Frequencies and Modals Analysis of Prestressed Concrete Beam by ANSYS, Advanced Materials Research, 769-773.

- Li, X.M., 1989. Optimisation of Stochastic Response of a Bridge Isolation System with Hysteretic Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 7, 951-964.
- Magnel, G., 1954. Prestressed Concrete, McGraw Hill, New York.
- Martin, L.A., 1977. A Rational Method for Estimating Camber and Deflection of Precast Prestressed Members, PCI Journal, 22, 1, 100-108.
- Marti-Vargas, J. R., Serna, P., Navarro-Gregori, J. ve Pallares, L. 2012. Bond of 13 mm Prestressing Steel Strands in Pretensioned Concrete Members, Engineering Structures, 41, 403-412.
- Mitchell, D., Cook, W. D., Khan, A. A., ve Tham, T., 1993. Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand, PCI Journal, 38, 3, 52-66.
- Moravcik, M., 2013. Modified System of Prestressing for New Precast Girders Developed for Highway Bridges, Procedia Engineering, 65, 236-241.
- Mum, N., 2006. Betonarme Köprülerde Sismik İzolasyon Etkisinin İncelenmesi Ve Bir Uygulama Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Murnal, P. ve Sinha, R., 2004. Aseismic Design of Structure-Equipment Systems Using Variable Frequency Pendulum Isolator, Nuclear Engineering and Design, 231, 129-139.
- Mutobe, R.M. ve Cooper, T.R., 1999. Nonlinear Analysis of a Large Bridge with Isolation Bearings, Computers and Structures, 72, 279-292.
- Nawy, E.G., 2003. Prestressed Concrete, Fourth Edition, Printice Hall, New Jersey.
- Nohutçu, H., 1996. Öngerilme Kompozit ve Kompozit Olmayan Köprü ve Viyadük Kirişlerinin Bir Bilgisayar Programı ile Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Nowak, A. S., Park, C. ve Casas J. R., 2001. Reliability Analysis Of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of Eurocode, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD, Structural Safety, 23, 331-334.
- Oflazoğlu, M.Z., 2007. Öngerilmeli Beton Kolonların Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Oktar, B.Ö., 1995. Öngerilmeli Beton Kirişlerin Lineer Olmayan Programlamayla Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Okumuş, P. ve Olivia, M.G., 2013. Evaluation of Crack Control Methods for End Zone Cracking in Prestressed Concrete Bridge Girders, PCI Journal, 91-105.
- Overschee, P.V. ve Moor, B.D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Park, K.S., Jung, H.J. ve Lee, I.W., 2002. A Comparative Study on Seismic Performances of Base Isolation Systems for Multi-Span Continuous Bridge, Engineering Structures, 24, 1001-1013.
- Pauw, A., 1960. Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density, ACI Journal, 32, 6, 679-687.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Polat, Z. “Öngerilmeli Beton Ders Notları, Öngerilmeli Beton ve Öngerilme Kayıpları” www.yildiz.edu.tr.
- Rana, S., Ahsan, R., ve Ghani, S.N., 2010. Design of prestressed concrete I-girder bridge superstructure using optimization algorithm, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, Dhaka, Bangladesh.
- Rizkalla S., Zia, P. ve Storm, T., 2010. Predicting Camber, Deflection, and Prestress Losses in Prestressed Concrete Members, NCSU Report, North Carolina Department of Transportation.
- Rodriguez-Gutierrez, J. A. ve Aristizabal-Ochoa J. D., 2007. Short- and Long-Term Deflections in Reinforced, Prestressed, and Composite Concrete Beams, Journal of Structural Engineering, 133, 4, 495-506.
- Russell, B. W., ve Burns, N. H., 1993. Design Guidelines for Transfer, Development, and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders, Research Report 1210-5F, CTR, The University of Texas at Austin.
- Sarsık, S.T., 2008. Öngerilmeli Prefabrike I Kesitli Köprü Kirişlerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Schildt, H., 2005. Herkes İçin C#, Alfa, İstanbul.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2008. Influence of Soil-Structure Interaction on the response of Seismically Isolated Cable-Stayed Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 245-257.
- Soyluk, A., 2010. Sismik Taban İzolatorü Kullanımının Mimari Tasarıma Etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Steinman, D.B. ve Watson, S.R., 1957. Bridges and Their Builders, Putnam, New York.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No:25, İzmir.
- Tadros, M.K., Al-Omaishi, N., Seguirant, S.P. ve Gallt, J.G., 2003. Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders, NCHRP Report 496. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- Tadros, M.K., Baddie S.S. ve Tuan C.Y., 2010. Evaluation and repair procedures for precast/prestressed concrete girders with longitudinal cracking in the web, National Cooperative Highway Research Program report 654, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Taly, N., 1998. Design of Modern Highway Bridges, Mc Graw-Hill, Los Angeles.
- Tan, K.H. ve Ng, C.K., 1997. Effects of Deviators And Strand Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams, ACI Structural Journal, 94, 1, 13-22.
- Timoshenko, S., 1953. History of Strength of Materials, McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Timoshenko, S., Young, D.H. ve Weaver, W.J.R., 1974. Vibration Problems in Engineering, Wiley., New York.
- Tomosawa, F. ve Noguchi, T., 1993. Relationship Between Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete, Proceedings of the Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer, Norway.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2000. Earthquake Response of Seismically Isolated Bridges, Journal of European Association for Earthquake Engineering, 1, 48-58.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2002. Earthquake Response of Bridges with Sliding Systems, Journal of European Association for Earthquake Engineering, 2, 19-33.
- Tongaokar, N.P. ve Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-Structure Interaction, Soil Dynamics and Engineering, 23, 287-302.
- Topçu, İ.B., 2006. Beton Teknolojisi, Uğur Ofset A. Ş., Eskişehir.

- Toyota, Y., Hirose, T., Ono, S. Ve Shidara, K., 2017. Experimental study on vibration characteristics of prestressed concrete beam, *Procedia Engineering*, 171, 1165-1172.
- TS 3233, 1979. Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 19390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri, deney numunelerinde basınç dayanımının tayini Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 197-1, 2012. Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Tsopelas, P., Okamoto, S., Constantinou, M.C., Ozaki, D. ve Fujii, S., 1994. Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of System Consisting of Sliding Bearing, Rubber Res. Force De., Technical Report MCEER-94-0002, State University of New York at Buffalo.
- Tuan, C.Y., Yehia, S.A. ve Jomgpitaksseel, N., 2004. End Zone Reinforcement for Pretensioned Concrete Girders, *PCI Journal* 1-16.
- Tuna, M. E., 1998. Köprüler ve Dinamik İzolasyon Mesnetleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11, 2, 401-411.
- Uluğ, N.İ., 2008. Öngerilmeli Bir Köprü Tasarımı ve Performans Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL-1, <http://www.pinterest.com/pin/236720524136268778/>. 1 Ocak 2014.
- URL-2, http://en.wikipedia.org/wiki/Abraham_Darby_III. 5 Şubat 2014.
- URL-3, http://en.wikipedia.org/wiki/Eads_Bridge. 15 Aralık 2013.
- URL-4, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Menai_Suspension_Bridge.jpg. 9 Eylül 2013.
- URL-5, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Brooklyn_Bridge_Postdlf.jpg. 9 Eylül 2013.
- URL-6, <http://yapisor.com/1556/bu-celik-borular-ne-ise-yarar>. 2 Aralık 2016.
- URL-7, <http://www.sap.com/comminty/topic/crystal-reports-for-visual-studio.html>.
- Visual Studio Community 14.0, 2015, Microsoft Corporation.

- Wagdy, G., 2003. Compressive Design Example for Prestressed Concrete (PSC) Girder Superstructure Bridge with Commentary, Modceski and Masters, Ing, The Federal Highway Administration., Virginia 61-02-T-63032.
- Yapar, O., Basu, P.K. ve Nordendale, N., 2015. Accurate Finite Element Modeling of Pretensioned Prestressed Concrete Beams, Engineering Structures, 101, 163-178.
- Yazdani, N., Eddy, S.M., ve Cai, C.S., 2000. Validation of AASHTO Bearing Stiffness For Standard Precast Concrete Bridge Girders, ACI Structural Journal, 97, 3, 436-443.
- Yu, DJ. ve Ren, WX., 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zayas, V., Low, S. ve Mahin, S.A., 1987. The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, EERC Technical Report, UBC/EERC, 87-01.
- Zokaie, T., 2000. AASHTO-LRFD Live Load Distribution Specifications, Journal of Bridge Engineering, 131-138.

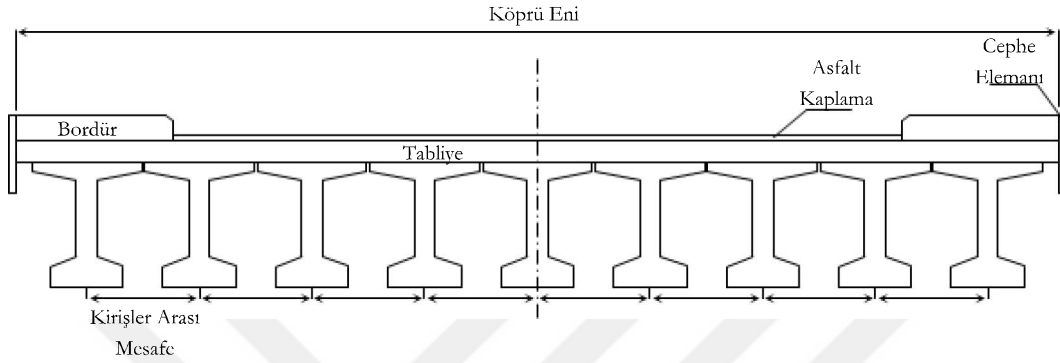
7. EKLER

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018

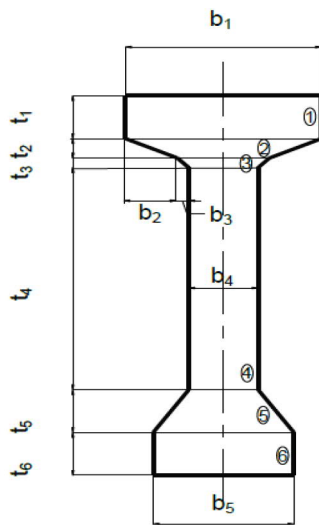


1. KÖPRÜ GENEL BİLGİLERİ



Köprü Eni	: 10	[m]	Tabliye kalınlığı	: 0,2	[m]
Bir kirişin toplam boyu	: 25,3	[m]	Asfalt tecrit yüksekliği	: 0,05	[m]
Kiriş hesap açıklığı	: 24,8	[m]	Bordürler toplam genişliği	: 3	[m]
Açıklıktaki kiriş sayısı	: 9	[adet]	Bordürler ortalama yüksekliği	: 0,25	[m]
Kirişler arası mesafe	: 1,08	[m]	Cephe elemanı yüksekliği	: 0,75	[m]
Şerit Sayısı	: 2	[adet]	Cephe elemanı genişliği	: 0,075	[m]

2. KIRIŞ BİLGİLERİ



b ₁ : 105	[cm]	t ₁ : 10	[cm]	t ₆ : 20	[cm]
b ₂ : 42,5	[cm]	t ₂ : 8	[cm]		
b ₃ : 0	[cm]	t ₃ : 0	[cm]		
b ₄ : 20	[cm]	t ₄ : 72	[cm]		
b ₅ : 70	[cm]	t ₅ : 10	[cm]		
Kiriş Yüksekliği	: 120	[cm]			
Öngerme kabloları arası mesafe	: 6	[cm]			
Pas payı	: 2,5	[cm]			

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

3.1. Beton Özellikleri

Prekast kiriş beton sınıfı : C40/50
Prekast kiriş beton elastisite modülü : 33836 [MPa]
Prekast kiriş beton birim hacim ağırlığı : 25 [kN/m³]

Tabliye beton sınıfı : C25/30
Tabliye beton elastisite modülü : 26750 [MPa]
Tabliye beton birim hacim ağırlığı : 25 [kN/m³]

3.2. Çelik Özellikleri

Öngerme çeliği sınıfı : 270K Tıp Kablo (Grade 270)
Öngerme çeliği çapı : 1.524 cm çaplı halat (0.6 inch)
Öngerme çeliği kopma dayanımı : 1862 [MPa]
Öngerme çeliğinin elastisite modülü : 193053,2 [MPa]
Öngerme çeliğinin birim hacim ağırlığı : 78.5 [kN/m³]

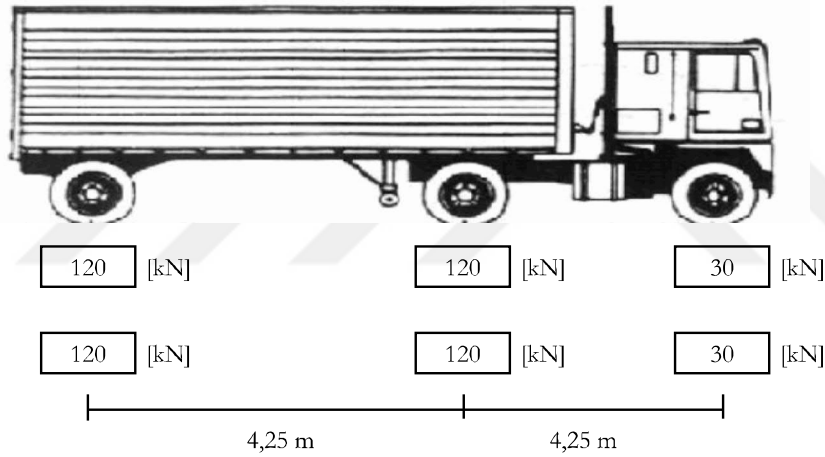
Boyuna donatı sınıfı : S420
Boyuna donatı çapı : 20
Boyuna donatı elastisite modülü : 200000 [MPa]
Boyuna donatının birim hacim ağırlığı : 78,5 [kN/m³]

Enine donatı sınıfı : S420
Enine donatı çapı : 10
Enine donatı elastisite modülü : 200000 [MPa]
Enine donatının birim hacim ağırlığı : 78,5 [kN/m³]

4. YÜK BİLEŞENLERİ

4.1. Hesaplarda Kullanılan Tasarım Kamyonu

Tasarım kamyonu	:	H30S24
Tasarım kamyonun ağırlığı	:	300 [kN]
Treyler ağırlığı	:	240 [kN]
Tasarım kamyonun toplam ağırlığı	:	540 [kN]
Düzgün yaylılı eşdeğer şerit yükü	:	15 [kN/m]



4.2. Hesaplarda Kullanılan Diğer Elemanların Birim Hacim Ağırlıkları

Asfalt + tecrit birim hacim ağırlığı	:	23 [kN/m ³]
Bordür birim hacim ağırlığı	:	25 [kN/m ³]
Cephe elemanı birim hacim ağırlığı	:	25 [kN/m ³]
Korluluk ağırlığı	:	1,5 [kN/m]

4.3. Hesaplarda Kullanılan Yaya Yüğü

Yaya yükü	:	3 [kN/m]
-----------	---	----------

I-CAD

YAPAN	: Barbaros ATMACA
PROJE	: Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi	: Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH	: 14.02.2018



4.4. Bağlı Nem Oranı Haritası



Seçilen nem bölgesi : Trabzon

Yıllık ortalama nem dağılımı (%) : 73

5. EK PARAMATRELER

Öngerme ve betonarme çeliğinin korezyon durumu iyidir.

Öngerilmeli kiriş, kiriş kesitinde yönetmelikte izin verilen kadar çekme gerilmesi oluşacak şekilde tasarla

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



6. EMNİYET GERİLMELERİ

6.1. Aktarma Dönemi Emniyet Gerilmeleri

Öngerme kuvvetinin, öngerme kabloları vasıtasıyla betona aktarıldığı dönemdir. Bu dönemde maruz kalınan, öngerilmeli beton kiriş kendi ağırlığı ve öngerilme kuvveti prefabrike kesit tarafından taşınmaktadır. Öngerilme kayıpları minimum düzeyde olup, zamana bağlı öngerilme kayıpları henüz oluşmamıştır.

6.1.1. Aktarma Dönemi Basınç Emniyet Gerilmesi

Aktarma döneminde dikkate alınan basınç emniyet gerilmesi öngerilme kuvvetinin kirişi aktarılma anında betonun basınç dayanımının %60'dır.

Basınç emniyet gerilmesi : 18 [MPa]

6.1.1. Aktarma Dönemi Çekme Emniyet Gerilmesi

Beton için çekme emniyet gerilmesi kesitte aderans donatısının kullanıp kullanılmamasına göre değişiklik göstermektedir. Aderans donatısı kullanılmayan kesitte beton çekme emniyet gerilmesi (6.1) , aderans donatısı kullanılan kesitler için ise (6.2) bağıntısı kullanılmaktadır.

$$\sigma_{ti} = 0.25 \sqrt{f'_{ci}} \quad (6.1)$$

$$\sigma_{ti} = 0.63 \sqrt{f'_{ci}} \quad (6.2)$$

Çekme emniyet gerilmesi : 3,451 [MPa]

6.2. Servis Dönemi Emniyet Gerilmeleri

Servis döneminde prizini tamamlayan tabliye betonunun bir kısmı prefabrik kirişle birlikte çalışarak kompozit kiriş enkesitini oluşturmaktadır. Servis dönemi, proje aşamasında köprünün maruz kalacağı düşünülen tüm yüklerin taşındığı dönemdir. Bu dönemde öngerilme kayıpları maksimum düzeyde olduğu ve maruz kalınan tüm yüklerin kompozit kiriş tarafından taşındığı kabul edilmektedir.

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



6.2.1. Servis Dönemi Basınç Emniyet Gerilmesi

Servis döneminde dikkate alınan basınç emniyet gerilemesi kirişte kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımının %45'tir.

Basınç emniyet gerilmesi : 18 [MPa]

6.2.2. Aktarma Dönemi Basınç Emniyet Gerilmesi

Servis döneminde öngerilmeli elemanlarda beton çekme emniyet gerilmesi öngerilme ve betonarme çeliğinin korozyon durumuna göre değişiklik göstermektedir. Korozyon durumu kötü olan elemanlar için çekme emniyet gerilmesi (6.3), korozyon durumu kötü olmayan elemanlarda ise (6.4) bağıntısı kullanılmaktadır.

$$0.25\sqrt{f'_c} \quad (6.3)$$

$$0.5\sqrt{f'_c} \quad (6.4)$$

Çekme emniyet gerilmesi : 3,162 [MPa]

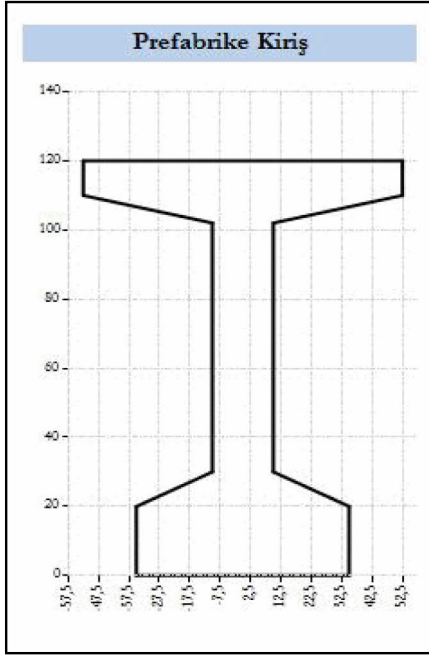
I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



7. KIRIŞ KESİTİ VE ÖZELLİKLERİ

7.1. Prefabrik Kiriş Kesiti ve Özellikleri



Kesit alanı	:	4840	[cm ²]
Kiriş yüksekliği	:	120	[cm]
Atalet momenti $I_{(x-x)}$	:	9089333,	[cm ⁴]
Atalet momenti $I_{(y-y)}$	:	1921750	[cm ⁴]
Mukavemet momenti $W_{(üst)}$	:	153431,4	[cm ³]
Mukavemet momenti $W_{(alt)}$	:	149594,9	[cm ³]
Kesit verimliliği	:	0,522	
Kiriş ağırlık merkezinin üst life mesafesi :		59,24	[cm]
Kiriş ağırlık merkezinin alt life mesafesi :		60,76	[cm]

7.2. Kompozit Kiriş Kesiti ve Özellikleri

Tabliye betonu prizini aldıktan sonra prefabrike kiriş ve üzerindeki tabliyenin efektif genişliği beraber çalışarak kompozit kiriş kesitini oluşturmaktadır. Kompozit kiriş, servis dönemindeki yükleri taşıyan yapı elemanıdır. Tabliye köprü enkesiti boyunca sürekli olduğundan, tek bir prefabrike kiriş ile kompozit yapı oluşturan tabliye kısmı tabliye efektif genişliği olarak ifade edilmektedir. AASHTO LRFD 2012'ye göre kompozit kirişler için efektif tabliye genişliği kiriş aralığının yarısı olarak tanımlanmaktadır.

Kompozit kesitler farklı malzeme özelliklerine sahip ise, hesaplarda bu kesitlerden biri diğerinin malzeme özelliğine dönüştürülmektedir. Prefabrike kiriş ve tabliyeden oluşan kompozit kesit için tabliye betonunun malzeme özellikleri prefabrike kirişin malzeme özelliğine dönüştürülecektir. Bu dönüştürme prefabrike kiriş ile tabliyenin birleşim bölgesinde oluşacak birim uzamaların aynı olacağı kabulüne göre elastik modüler oran kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Burada, b_{tab} dönüştürülmüş efektif tabliye genişliğini; E_t tabliyenin, E_p prefabrike kirişin elastisite modülünü göstermektedir.

$$b_{mb} = \frac{kirişaralığı}{2} \times \frac{E_t}{E_p}$$

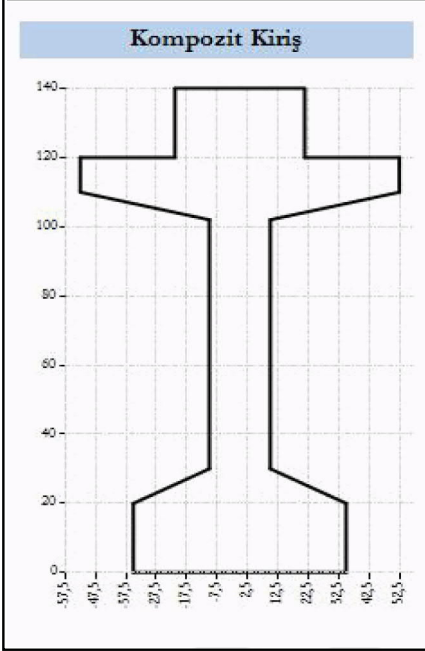
Dönüştürülmüş efektif tabliye genişliği : 42,691 [cm]

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



7.2. Kompozit Kiriş Kesiti ve Özellikleri

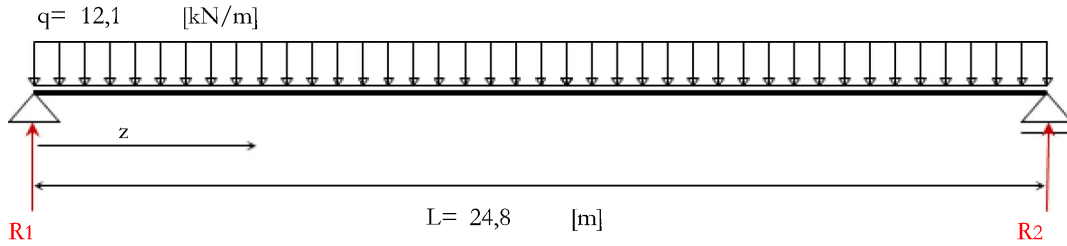


Kesit alanı	:	5693,824 [cm ²]
Kiriş yüksekliği	:	140 [cm]
Atalet momenti $I_{(x-x)}$	:	12597387 [cm ⁴]
Atalet momenti $I_{(y-y)}$	:	2051427, [cm ⁴]
Mukavemet momenti $W_{(üst)}$	:	182949,0 [cm ³]
Mukavemet momenti $W_{(alt)}$	:	177072,1 [cm ³]
Kesit verimliliği	:	0,452
Kiriş ağırlık merkezinin üst life mesafesi :		68,857 [cm]
Kiriş ağırlık merkezinin alt life mesafesi :		71,143 [cm]

8. ÜST YAPIYA ETKİ EDEN YÜKLER

8.1. Kalıcı Yükler

8.1.1. Prekast kirisin kendi ağırlığından meydana gelen yük durumu



Mesnet Tepkileri:

$$R1 = 153,065 \text{ [kN]}$$

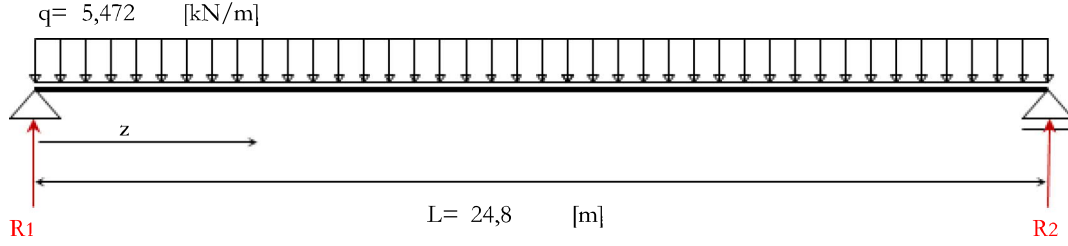
$$R2 = 153,065 \text{ [kN]}$$

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



8.1.2. Tabliye betonunun ağırlığından meydana gelen yük durumu

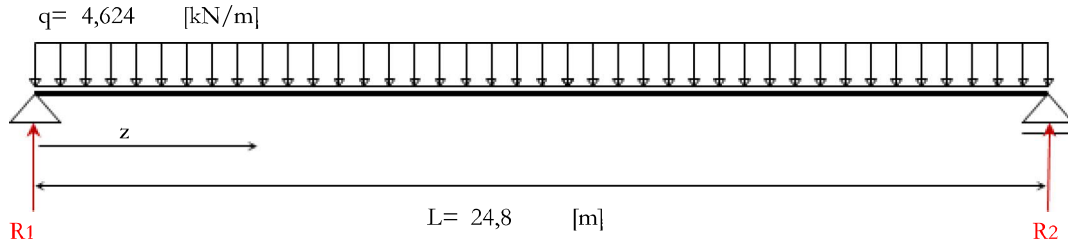


Mesnet Tepkileri:

$$R1 = 69,224 \quad [\text{kN}]$$

$$R2 = 69,224 \quad [\text{kN}]$$

8.1.3. İlave kalıcı yüklerden meydana gelen yük durumu



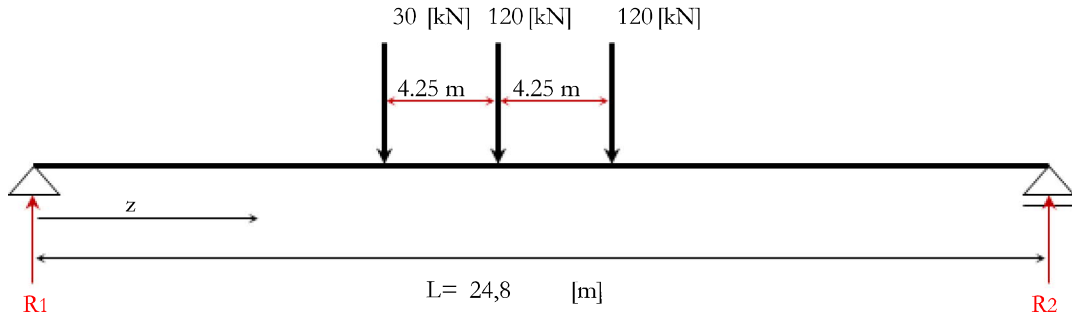
Mesnet Tepkileri:

$$R1 = 58,489 \quad [\text{kN}]$$

$$R2 = 58,489 \quad [\text{kN}]$$

8.2. Tasarım Kamyon Yüklü

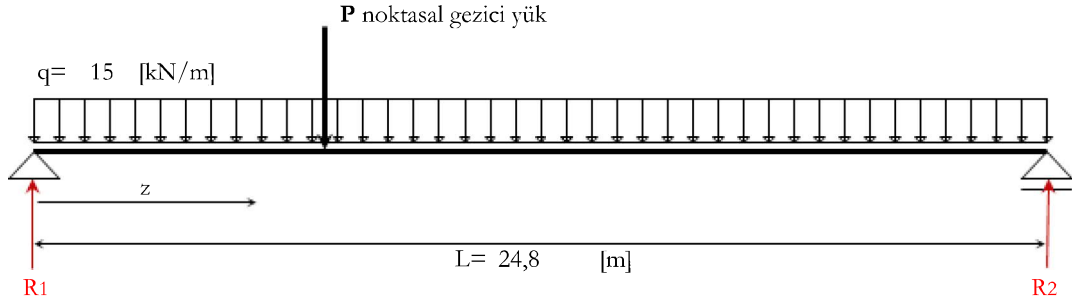
8.2.1. H30S24 Kamyonu



Mesnet Tepkisi:

$$R_{\max} = 156,194 \text{ [kN]}$$

8.2.1.1. H30S24 kamyonu şerit yükü



Mesnet Tepkisi:

$$R_{\max} = 188,455 \text{ [kN]}$$

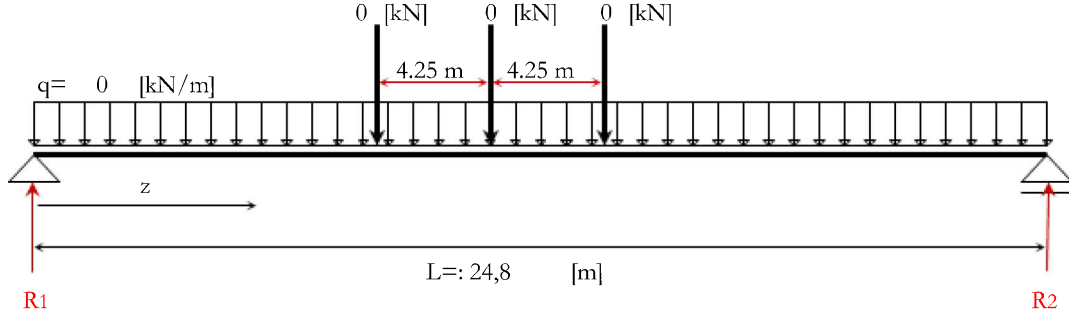
P noktasal gezici yükü eğilme momenti ve kesme kuvveti hesaplanırken sırasıyla 135 kN ve 195 kN olarak dikkate alınmaktadır. Eğilme momenti değeri hesaplanırken **P** noktasal gezici yük kiriş hesap açıklığının ortasına yerleştirilmekte kesme kuvveti hesaplanırken ise mesnet bölgesine yerleştirilmektedir.

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



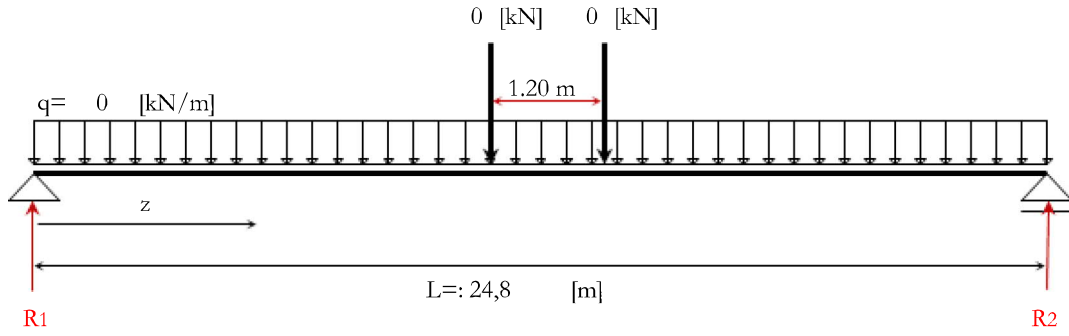
8.2.1. HL93 Kamyonu



Mesnet Tepkisi:

$$R_{max} = 0,000 \quad [kN]$$

8.2.1. HL93 Tasarım Tandemi



Mesnet Tepkisi:

$$R_{max} = 0,000 \quad [kN]$$

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



9. ÜST YAPIYADA MEYDANA GELEN KESİT TESİRLERİ

9.1. Kalıcı Yükler

9.1.1. Prekast kirişin kendi ağırlığından meydana gelen kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	150,04	0,000
2,48	120,032	334,889
4,96	90,024	595,359
7,44	60,016	781,408
9,92	30,008	893,038
12,4	0	930,248

9.1.2. Tabliye betonunun ağırlığından meydana gelen kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	67,856	0,000
2,48	54,284	151,454
4,96	40,713	269,251
7,44	27,142	353,392
9,92	13,571	403,876
12,4	0	420,704

9.1.3. İlave kalıcı yüklerden meydana gelen kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	57,333	0,000
2,48	45,866	127,967
4,96	34,4	227,496
7,44	11,467	298,589
9,92	11,467	341,245
12,4	0	355,463

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



9.2. Taşıt Yükü

H30S24 Tasarım Kamyonu

9.2.1. H30S24 kamyonundan oluşan kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	155,796	710,364
2,48	138,207	
4,96	120,618	
7,44	103,029	
9,92	85,44	
12,4	67,851	

9.2.2. H30S24 serit yüklemesinden oluşan kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	186,618	781,195
2,48	159,757	
4,96	134,718	
7,44	111,501	
9,92	90,106	
12,4	70,533	

HL93 Tasarım Kamyonu

9.2.1. HL93 kamyonundan oluşan kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	

9.2.2. Tandem yüklemesinden oluşan kesit tesirleri

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti M(kN/m)
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	
0,000	0,000	

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



2.3. Kesit Tesirleri Özeti

Prekast kirişlerin tasarımı üç dönem için yapılmaktadır. Bu dönemler;

- 1-) Aktarma Dönemi
- 2-) Tabliye Betonunu Prizini Almadan Önceki Dönem
- 3-) Servis Dönemi

1. Aktarma Dönemi : Öngerme kuvvetinin, öngerme kabloları vasıtasıyla betona aktarıldığı dönemdir. Bu dönemde maruz kalınan öngerilmeli beton kirişin kendi ağırlığı ve öngerilme kuvveti, prekast kesit tarafından taşınmaktadır. Öngerilme kayıpları minimum düzeyde olup zamana bağlı kayıplar henüz oluşmamıştır.

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti Mmax(kN/m)	Maksimum Mesnet Tepkisi Rmax(kN)	Maksimum Gerilme (kN/m ²)
0,000	150,04			
2,48	120,032	930,248	153,065	6,218
4,96	90,024			
7,44	60,016			
9,92	30,008			
12,4	0			

2. Tabliye Betonunu Prizini Almadan Önceki Dönem : Prestekast kirişlerin yerlerine yerleştirildiği ve tabliye betonunun prizini tamamlamadığı dönemdir. Bu dönemde öngerilemeli kirişler aktarma dönemindeki yüklere ek olarak tabliye betonunun ağırlığına da taşımaktadır. Bu dönemde yükler aktarma döneminde olduğu gibi prefabrike kesit ile taşınmaktadır. Betonun elastik ksalmasından meydana gelen kayıba, öngerme çeliğinin gevşemesi, betonun sünme ve rötresinden meydana gelen uzun dönem

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti Mmax(kN/m)	Maksimum Mesnet Tepkisi Rmax(kN/m)	Maksimum Gerilme (kN/m ²)
0,000	217,896			
2,48	174,316	1350,952	222,289	9,031
4,96	130,737			
7,44	87,158			
9,92	43,579			
12,4	0			

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



3. Servis Dönemi : Servis döneminde prizini tamamlayan tabliye betonunun bir kısmı prefabrike kirişle birlikte çalışarak kompozit kiriş enkesitini oluşturmaktadır. Servis dönemi, proje aşamasında köprünün maruz kalacağı düşünülen tüm yüklerin taşındığı dönemdir. Bu dönemde öngerilme kayıpları maksimum düzeyde olup maruz kalınan tüm yükler kompozit kiriş tarafından taşınmaktadır.

Mesafe z(m)	Kesme Kuvveti V(kN)	Maksimum Eğilme Momenti Mmax(kN/m)	Maksimum Mesnet Tepkisi Rmax(kN/m)	Maksimum Gerilme (kN/m ²)
0,000	461,847	2487,611	469,233	15,45
2,48	379,94			
4,96	299,855			
7,44	221,592			
9,92	145,152			
12,4	70,533			

I-CAD

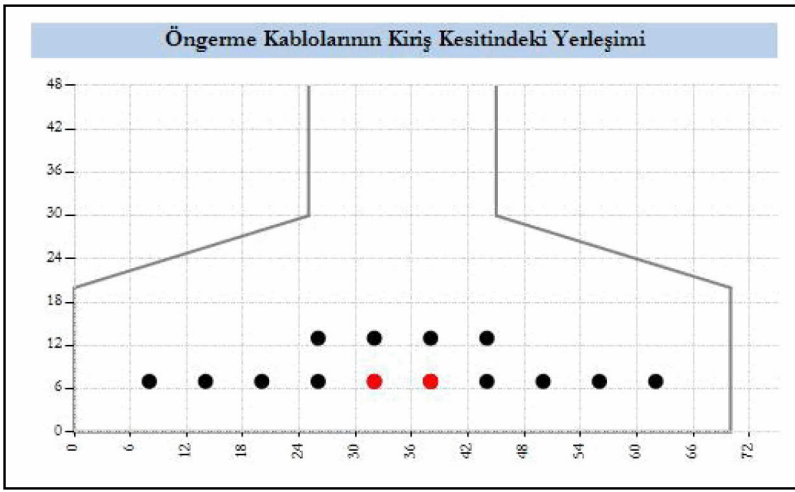
YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



10. ÖNGERME KABLO SAYISI TESPİTİ VE YERLEŞİMİ

Öngerme kuvveti gereksinimi en fazla kirişin ortasındaki alt lifte servis döneminde oluşacağından kablo sayısının tespiti bu koşullar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

10.1 Kablo Yerleşim Düzeni



Öngerme Kablo Yerleşimi		
Sıra	Kablo Sayısı	y
1	10	7,024
2	4	13,024
3	0	0
4	0	0
5	0	0

Toplam Öngerme Kablo Sayısı 14



Öngerme Kablosu Kılıfsız



Kirişin üst lifinde meydana gelen gerilmeleri düşürmek için kılıflanan öngerme kablosu



Kirişin alt lifinde meydana gelen gerilmeleri düşürmek için kılıflanan öngerme kablosu

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



11. ÖNGERİLME KAYIPLARI

Öngerilme kuvvetinde kısa dönem ve uzun dönem kayıplar meydana gelmektedir. Kısa dönem kayıp; aktarma döneminde öngerilme kuvvetinin betona aktarılması sırasında meydana gelmektedir. Aktarma döneminde nihayi dayanımına ulaşmamış olan betonda, aktarma işlemin başlamasıyla oluşan basınç kuvveti ile elastik kılma meydana gelmekte bu durumda öngerme kablosunda gerilme kaybına neden olmaktadır. Uzun dönem kayıplar ise betonun sünmesi, rötresi ve öngerme kablosunun gevşemesinden dolayı oluşmaktadır. Betonda sünme sabit yük altında, rötresine ise yük etkisi olmadan yaş betonun su kaybından dolayı gelen deformasyonu ifade etmektedir. Betonun sünme ve rötresinden kaynaklanan öngerilme kaybı öngerilmeli elemanın servis ömrü boyunca devam etmektedir. Öngerme kablosu, öngerilme kuvvetine mazruz kaldığında, kablonun boyunda uzama meydana gelmekte ve bu durumda öngerilme kuvvetinde azalmalara sebep olmaktadır.

Öngerilme Kaybı			
Dönem	Sebebi	Miktarı (MPa)	Yüzdesi (%)
Kısa Dönem Kayıp	Betonun elastik kılmasından	55,871	4,001
Uzun dönem kayıp	Betonun sünme ve rötresinden	128,049	9,169
	Öngerme kablosunun gevşemesinden	17	1,217
Toplam		200,92	14,387

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



12. KILIFLAMA

Öngerilmeli kirişlerin mesnet bölgelerinde, öngerme kablolarından aktarılan kuvvetlerden dolayı istenmeyen gerilmeler oluşabilmekte ve bu gerilmeler kirişin mesnet bölgesindeki betonun çatlamasına neden olmaktadır. Öngerilmeli kirişlerde oluşan bazı çatlaklar kabul edilebilir seviyelerde olup kapatılabilmektedir. Fakat çatlak genişliği arttıkça durabilite açısından kabul edilemez seviyelere ulaşmaktadır. Özellikle öngerme kablolarının etrafında oluşan çatlaklar öngerme kablolarının paslanmasına neden olmaktadır. Kiriş mesnet bölgelerinde meydana gelen fazla gerilmeleri izin verilen seviyelere getirebilmek için yeterli sayıdaki öngerme kablosunun belirli mesafe boyunca kılıflanması tavsiye edilmektedir. Kılıflanma sayesinde beton ile donatı arasındaki bağ mekanizmasının oluşması engellenerek kılıflanmanın yapıldığı mesafe boyunca betona öngerilme kuvvetinin aktarılması sağlanmaktadır.

Mesafe z(m)	Gerilme (MPa)
0,000	3,4801
2,48	1,2974
4,96	-0,4002
7,44	-1,6128
9,92	-2,3404
12,4	-2,5829

KILIFLANACAK

OK

OK

OK

OK

OK

Üst lif için karar verilen

Kılıf Boyu	1
Kılıflanacak kablo sayısı	1

Mesafe z(m)	Gerilme (MPa)
0,000	-14,5665
2,48	-12,3279
4,96	-10,5867
7,44	-9,343
9,92	-8,5968
12,4	-8,3481

OK

OK

OK

OK

OK

OK

Alt lif için karar verilen

Kılıf Boyu	0
Kılıflanacak kablo sayısı	0

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



13. SEHİM DENETİMİ

Betonarme kirişlere göre daha narin kesitlere sahip olan öngerilmeli beton kirişler, maruz kaldığı yüklerin etkisiyle sehime uğramaktadır. Öngerilmeli kirişli beton köprülerin yapım dönemleri incelendiğinde aktarma, tabliye prizini tamamlamadan önceki ve servis dönemlerinde meydana gelen sehim değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu farklılığın sebebi her dönem için kirişi oluşturan malzeme özelliklerinin, kirişe uygulanan yüklerin ve kirişte meydana gelen öngerilme kayıplarının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Öngerilmeli kirişlerde meydana gelen sehim genel olarak ani ve uzun süreli sehim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aktarma döneminde oluşan sehim ani diğer dönemlerde oluşan sehim ise uzun süreli sehim olarak adlandırılmaktadır.

13.1 Ani Sehım

Aktarma döneminde kirişte öngerilme kuvveti ve öngerme kablolarının eksantrisitesine bağlı olarak sehim meydana gelmektedir. Aktarma döneminde kirişte meydana gelen sehim, öngerilmeli kirişin kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim ile öngerilme kuvvetinin etkisiyle oluşan ters sehimin toplamından oluşmaktadır.

<u>LİNEER-STATİK TEORİYE GÖRE</u>	<u>Sehim (cm)</u>	<u>Dönme (rad)</u>
Aktarma döneminde kirişin kendi ağırlığından oluşan	-2,238	0,003
Aktarma döneminde kirişin öngerilme kuvvetinden oluşan	3,946	0,006
Aktarma döneminde kirişte oluşam toplam	1,708	-0,003

<u>ELASTİK-STABİLİTE TEORİSİNE GÖRE</u>	<u>Sehim (cm)</u>
Aktarma döneminde kirişin kendi ağırlığından oluşan	-2,238
Aktarma döneminde kirişin öngerilme kuvvetinden oluşan	4,211
Aktarma döneminde kirişte oluşam toplam	1,974

I-CAD

YAPAN : Barbaros ATMACA
PROJE : Örnek Viyadük Projesi
Proje Sahibi : Karayolları Genel Müdürlüğü
TARİH : 14.02.2018



13.1 Uzun Süreli Şehim

Öngerilmeli kirişte meydana gelen şehimde, aktarma dönemi tamamlandıktan sonra zamana bağlı olarak değişim meydana gelmektedir. Bu değişimin temel sebepleri betonda meydana gelen sünme ve rötre ile öngerme kablosunda meydana gelen gevşemedir (Martin, 1977). Öngerilmeli kirişte bu sebeplerden dolayı oluşan şehim uzun süreli şehim olarak adlandırılmaktadır. Uzun süreli şehim hesabı genellikle ani şehim için bulunan değerlerin belirli katsayılarla çarpımı ile elde edilmektedir. Uzun süreli şehim hesabı, Amerikan Öngerilmeli Beton Enstitüsü (PCI) tarafından da kullanılan Martin'in (1977) belirlediği katsayılar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır.

<u>UZUN SÜRELİ ŞEHİM</u>	<u>Şehim (cm)</u>	<u>Dönme (rad)</u>
Depolama sırasından montaja kadar oluşan	2,963	-0,006
Tabliyeden ağırlığından oluşan	-0,876	0,001
İlave kalıcı yüklerden kompozit kesitte oluşan	-0,534	0,001
Uzun Dönemde Sabit Yükten Oluşan Şehim ve Dönme	-0,308	-0,002
Hareketli Yükten Oluşan Toplam Şehim	-0,955	0,001
Şehim Sınırı (L/800)	-3,1	

Hareketli Yük için Şehim Sınırı Aşılmamıştır.

Seçilen Kesit Hareketli Yük Altında Oluşan Şehim Açısından Uygunudur.

ÖZGEÇMİŞ

Barbaros ATMACA, 1984 yılında Çorum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini 1990-2002 yılları arasında Trabzon’da tamamladı. 2004 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı’nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 2009 yılında bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsüne Araştırma görevlisi olarak atandı. 2012 yılında hazırladığı “Kablolu Köprülerin Yapım Aşamalarına Göre Analizi” başlıklı tez ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Doktora” eğitimi başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde görevine devam eden ATMACA, iyi derecede İngilizce bilmektedir. ATMACA’ya ait bilimsel çalışma listesi aşağıda sunulmaktadır.

Uluslararası Hakemli Dergiler

- 1) **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş., 2012. Construction Stage Analysis of Three-Dimensional Cable-Stayed Bridges, Steel and Composite Structures, 12, 413-426.
- 2) Ateş, Ş., **Atmaca, B.**, Yıldırım, E. ve Demiröz, N.A., 2013. Effects of Soil-Structure Interaction on Construction Stage Analysis of Highway Bridges, Computer and Concrete, 2, 169-186.
- 3) **Atmaca, B.**, Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2014. Nonlinear Dynamic Analysis of Base Isolated Cable-Stayed Bridge Under Earthquake Excitations, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 66, 314-318.
- 4) **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş., 2017. Determination Of Bearing Type Effect On Elastomeric Bearing Selection with SREI-CAD, Advances in Computational Design, 2, 43-56.
- 5) **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş., 2017. Camber Calculation of Prestressed Concrete I-Girder Considering Geometric Nonlinearity, Computers and Concrete, 19, 1-6.

Uluslararası Konferans Bildirileri

- 1) **Atmaca, B.**, Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2014. Dynamic behaviour of cables of cable-stayed bridge isolated with SCFP placed under pylon, Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM 15), Abstract Book: (11), 25-29 Aug, Incheon, Güney Kore.
- 2) **Atmaca, B.**, Ateş, Ş., Günaydın, M., ve Altunışık, A.C., 2016. Effects of Strand Configuration on Pretensioned I-Girder After Detensioning, 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), ICCESEN-373, 19-24 October, Antalya, Turkey.
- 3) **Atmaca B.**, Ateş Ş., "Camber Calculation of Prestressed Concrete Girder After Detensioning", International Conference on Advances and Innovations in Engineering, ELAZIĞ, TÜRKİYE, 10-12 Mayıs 2017, pp.398-401
- 4) **Atmaca B.**, Ateş Ş., "The Effect of Strand Configuration on Stress Distribution and Debonding Parameters of Prestressed Girder After Detensioning", International Multidisciplinary Congress of Eurasia, ROMA, ITALYA, 23-25 Ağustos 2017, pp.536-536
- 5) **Atmaca B.**, Ateş Ş., "Nonlinear Modal Analysis of Prestressed Girder After Detensioning", International Conference on Advanced Engineering Technologies, BAYBURT, TÜRKİYE, 21-23 Eylül 2017, pp.134-134
- 6) Uzunali U.Y., Çuvalcı H., **Atmaca B.**, "The Effect of Weld Penetration on the Strength of Tempered Martensite and Thermomechanically Rolled Steel Welded Joints", International Multidisciplinary Congress of Eurasia, ROMA, ITALYA, 23-25 Ağustos 2017, pp. 531-531
- 7) Uzunali U.Y., Çuvalcı H., **Atmaca B.**, "The Effect of Depth of Fusion on the Displacement of Steel Welded Joints", International Conference on Advanced Engineering Technologies, BAYBURT, TÜRKİYE, 21-23 Eylül 2017, pp.150-150

Ulusal Konferans Bildirileri

- 1) **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş., 2011. Kablolu Köprülerin Yapım Aşamasına Göre Analizi, 2. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 28-30 Eylül, Eskişehir, Türkiye.
- 2) Yurdakul, M., Tonyalı, Z., **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş., 2015. Üniform Yer Hareketlerine Maruz Eğik Askılı Köprünün Dinamik Davranışı, Mühendislikte Yeni Teknolojiler Sempozyumu, 22-25 Ekim, Bayburt, Türkiye

- 3) Tonyalı, Z., **Atmaca, B.**, Yurdakul, M., ve Ateş, Ş., 2015. Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketlerine Maruz Kablolı Köprülerde Kablo Davranışlarının İncelenmesi, Mühendislikte Yeni Teknolojiler Sempozyumu, 22-25 Ekim, Bayburt, Türkiye
- 4) **Atmaca, B.** ve Ateş, Ş. ve Altunışık, A.C., 2015. Köprülerde Kullanılan Kauçuk Mesnetlerin Hesap ve Tasarım Yazılımı, 3. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 8-10 Mayıs, Bursa, Türkiye.

