

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÖNGERİLMELİ KİRİŞLERİN DEPLASMAN AÇISINDAN
İNCELENMESİ**

ERTUĞRUL CAN DOĞAN

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT - 2022

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖNGERİLMELİ KİRİŞLERİN DEPLASMAN AÇISINDAN
İNCELENMESİ

ERTUĞRUL CAN DOĞAN

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT - 2022

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ertuğrul Can DOĞAN

20/07/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ BEYANI.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xiv
ÖNSÖZ	xv
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	26
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	28
2.1. Öngerilmeli Beton.....	28
2.2. Öngerilmeli Beton Yöntemleri.....	38
2.2.1. Ön Çekme Yöntemi	38
2.2.2. Ard Çekme Yöntemi	38
2.3. Malzeme.....	39
2.3.1. Beton.....	39
2.3.2. Betonarme Donatısı	40
2.3.3. Öngerme Donatısı	40
2.4. Öngerilmeli Kirişlere Etkiyen Yükler	41
2.4.1. Kalıcı yükler	41

2.4.2.	Hareketli Yükler	41
2.4.2.1.	Hareketli Yüklerin Azaltılması	43
2.4.2.2.	Hareketli Yüklerin Kirişlere Dağılımı	44
2.4.3.	Dinamik Etki	45
2.5.	Kiriş En Kesit zellikleri	45
2.5.1.	Aktarma Dönemi	45
2.5.2.	Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan nceki Dönem	46
2.5.3.	Servis Dönemi	46
2.5.4.	Prefabrik ve Kompozit Kiriş Enkesiti	46
2.6.	Öngerilmeli Kiriş Kesit Tesirlerinin Hesaplanması	47
2.7.	n Germe Kayıplarının Hesaplanması	47
2.7.1.	Snme Kaybı (Beton)	48
2.7.2.	Snme Kaybı (elik)	49
2.7.3.	Büzülme (Rötre) Kaybı	49
2.7.4.	Elastik Kısılma Kaybı	50
2.7.5.	ngerilme Donatısının Gevşeme Kaybı	50
2.7.6.	Ankraj Kaybı	50
2.7.7.	Sürtünme Kaybı	51
2.8.	Öngerilmeli Kirişlerin Gerilme Hesabı	51
2.8.1.	Birinci Denetim	51
2.8.2.	İkinci Denetim	52

2.8.3.	Üçüncü Denetim	52
2.8.4.	Dördüncü Denetim.....	53
2.9.	Eğilme Durumu Taşıma Gücü Denetimleri	53
2.9.1.	Dikdörtgen Kesitlerin veya Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalan ($a \leq t$) Tablalı Kesitlerin Taşıma Gücü Moment Esasları	53
2.9.2.	Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalmayan ($a > t$) Tablalı Kesitlerin Taşıma gücü Momenti	54
2.10.	Öngerme Donatısı Süneklik Sınır Şartları	55
2.10.1.	Maksimum Öngerilme Donatısı.....	55
2.10.2.	Minimum Öngerilme Donatısı.....	55
2.11.	Kesme Dayanımı Hesabı.....	56
2.11.1.	Beton Kesme Dayanımı Hesabı	56
2.11.2.	Kesme Donatısı Dayanımı Hesabı	58
2.11.3.	Kiriş-Döşeme Bağlantısı Kesme Denetimi.....	58
2.12.	Sehim Kontrolü	58
2.12.1.	Birinci Denetim.....	59
2.12.2.	İkinci Denetim	60
2.12.3.	Üçüncü Denetim	60
2.12.4.	Dördüncü Denetim.....	60
2.12.4.1.	Kamyon Yükleme.....	60
2.12.4.2.	Şerit Yükleme.....	61
2.13.	Öngerme Kablo Sayısının Belirlenmesi.....	61

2.14.	Öngerme Kablo Kılıflanması	61
2.15.	Kılıflanacak Öngerme Kablo Sayısı Tespiti	62
3.	ÖNGERİLMELİ BETONARME ÖRNEK BİR KİRİŞİN ANALİZİ.....	63
3.1.	Konu ve Kapsam.....	63
3.2.	Analizde Kullanılacak Malzeme Özellikleri.....	63
3.3.	Tip Kirişlerin Geometrik Özellikleri	64
3.4.	Tip Kirişlerin Ayrıntılı Yük Analizi Ve Hesabı	68
3.4.1.	Zati Yükler	68
3.4.1.1.	Kiriş Ağırlığı.....	68
3.4.1.2.	Döşeme Ağırlığı	68
3.4.1.3.	İlave Yükler	68
3.4.2.	Hareketli Yükler	69
3.4.2.1.	H30-S24 Standart Kamyon Yükleme.....	70
3.4.2.1.1.	Eğilme Momenti İçin H30-S24 Standart Kamyon Yükleme	70
3.4.2.1.2.	Kesme Kuvveti İçin H30-S24 Standart Kamyon Yükleme	70
3.4.2.2.	Şerit Yükleme.....	71
3.4.2.2.1.	Eğilme Momenti İçin Şerit Yükleme	71
3.4.2.2.2.	Kesme Kuvveti İçin Şerit Yükleme	71
3.5.	Emniyet Gerilmeleri.....	72
3.5.1.	Rötre ve Sünmeden Önce Geçici Emniyet Gerilmeleri (Öngerilme Uygulama Anında)	72
3.5.2.	Kayıplardan Sonra Emniyet Gerilmeleri (Servis Yükleri Altında)	72

3.6.	Kesit Tesirlerinin Hesaplanması	73
3.6.1.	Zati Yüklerden Dolayı Oluşan Yüklerin Hesabı.....	73
3.6.2.	Hareketli Yüklerden Dolayı Oluşan Yüklerin Hesabı	74
3.7.	Yükleme Durumları	75
3.8.	ngerme Halat Sayılarının Tespiti	78
3.9.	ngerme Kayıpları.....	78
3.9.1.	Elastik Kısılma Kaybı	78
3.9.2.	Rötre Kaybı.....	79
3.9.3.	Snme Kaybı.....	80
3.9.4.	ngerme eliğinin Gevşeme Kayıpları.....	81
3.9.5.	Tüm ngerilme Kayıpları zeti	82
3.10.	Eğilme Dayanımı Taşıma Kapasitesi Tahkiki	82
3.11.	Süneklilik Limitleri.....	83
3.11.1.	Maksimum Donatı Kontrolü	83
3.11.2.	Minimum Donatı Kontrolü	84
3.12.	Gerilme Tahkikleri.....	84
3.13.	Kiriş Aderans Donatısı Hesaplama	91
3.13.1.	Kiriş zerinde Kullanılacak Betonarme Demirinin (Aderans Donatısı) Hesaplanması	91
3.13.2.	Kiriş Altında Kullanılacak Betonarme Demirinin (Aderans Donatısı) Hesaplanması	92
3.14.	Kayma Mukavemeti Kontrolleri	92

3.14.1.	Düşey Kayma Mukavemeti Kontrolleri.....	92
3.14.2.	Mesnetlenme Eksen Kesitinde Kayma Tahkiki.....	94
3.14.2.1.	Mesnetlenme Ekseninden (H)L Mesafedeki Kesitte Kayma Tahkiki	96
3.14.2.2.	Mesnetlenme Ekseninden 0,10L Mesafedeki Kesitte Kayma Tahkiki.....	98
3.14.3.	Yatay Kayma Mukavemeti Kontrolleri.....	99
3.15.	Sehim Ve Ters Sehim Hesapları Ve Kontrolü	100
3.15.1.	Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme δ_1, ϕ_1	101
3.15.2.	Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme δ_2, ϕ_2	102
3.15.3.	Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Ve Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme $\delta_1+\delta_2, \phi_1+\phi_2$	102
3.15.4.	Depolama Sırasında Montaja Kadar Oluşacak Ters Sehim Ve Dönme Δ_1, ϕ_d	102
3.15.5.	Tabliye Ağırlığından Dolayı Sehim Ve Dönme δ_3, ϕ_3	103
3.15.6.	Kompozit Kesite Etkiyen İlave Yüklerden Dolayı Sehim Ve Dönme δ_4, ϕ_4	103
3.15.7.	Uzun Zaman Diliminde Sabit Yüklerden Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme Δ_2, ϕ_y	103
3.15.8.	Hareketli Araç Yüklerinden Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme δ_H, ϕ_H	104
3.15.9.	Toplam Yüklerden Dolayı Oluşan Sonuç Sehim Ve Dönme Δ_s, ϕ_s	104
3.16.	Tip Kirişler Gerilme Tahkik Detayları.....	105
4.	BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	116

4.1.	Tip Kirişleri Moment Tesirleri zetleri	119
4.2.	Tip Kirişleri öngerme zetleri	121
4.3.	Tip Kirişleri Taşıma Kapasitesi ve Minimum Donatı Kontrolleri	123
4.4.	Sehim ve Dönme Hesap Detayları	125
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	128
6.	KAYNAKÇA.....	130



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖNGERİLMELİ KİRİŞLERİN DEPLASMAN AÇISINDAN İNCELENMESİ

ERTUĞRUL CAN DOĞAN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: PROF. FUAT KÖKSAL

Bu çalışma kapsamında tek açıklık üzerinde analizi yapılan yükseklikleri 100cm, 120cm ve 150cm olan farklı tip öngerilmeli kirişlerin tek açıklıklı hesabında ilgili standart ve yönetmeliklerle beraber kesit tesirleri, yeterli öngerme halatı ve bu öngerme halatlarının öngerilmeli kiriş üzerindeki yerleşimi, öngerme kayıpları, taşıma kapasitesi kontrolü, yatay mukavemet kontrolü, maksimum ve minimum donatı miktarları belirlenmiş ve sonuç kısmında tüm kombinasyonlardan elde edilen veriler ile farklı gerilmeler karşısında öngerilmeli tip kirişlerin davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde öngerilmeli kirişler hakkında dünya ve ülkemizdeki kullanımı ile beraber genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde, literatür çalışması yapıldı ve daha önce yapılan çalışmalar hakkında özet bilgiler verildi. Üçüncü bölümde öngerilmeli betonarme örnek bir köprü kirişinin analizi analog olarak yapılmış ve çalışma hesap detayları ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Dördüncü bölümde analiz sonuçları tüm öngerilmeli tip kirişler için detaylı hesap sonuçları ve bilgiler sunulmuştur ve değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde sonuç ve öneriler sunuldu. Altıncı bölümde ise kaynaklar yer almıştır. Devamında öz geçmiş bilgisi verilerek sonlanmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında öngerilmeli kirişlerin deplasman açısından incelenmesi amaçlanmıştır.

2022, xxiii+108 SAYFA

ANAHTAR KELİMELE: Öngerilme, Öngerilmeli beton, Öngerilmeli beton kiriş, Öngerilmeli kirişler, Sehim, Köprüler, AASHTO standardı.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF PRE-STRESSED BEAMS IN TERMS OF DISPLACEMENT

ERTUGRUL CAN DOGAN

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATES STUDIES**

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. FUAT KOKSAL

Within the scope of this study, in the calculation of different types of prestressed beams with 100cm, 120cm and 150cm heights analyzed on a single span, the section effects together with the relevant standards and regulations, sufficient prestressing rope and the placement of these prestressed ropes on the prestressed beam, prestress losses, bearing capacity control, horizontal strength control, maximum and minimum reinforcement amounts were determined and in the conclusion part, the behavior of prestressed type beams against different stresses with the data obtained from all combinations was examined and compared.

The thesis consists of six chapters. In the first chapter, general information about prestressed beams with their usage in the world and in our country is given. In the second part, a literature study was made and brief information about previous studies was given. In the third chapter, the analysis of a sample prestressed reinforced concrete bridge beam is made analogously and the working calculation details are shown in detail. In the fourth chapter, the analysis results, detailed calculation results and information for all prestressed type beams are presented and evaluated. In the fifth chapter, conclusions and recommendations are presented. In the sixth chapter, sources are included. Afterwards, it was concluded by giving background information.

In this master thesis, it is aimed to examine the prestressed beams in terms of displacement.

2022, xxiii+108 PAGES

KEYWORDS: Prestressing, Prestressed concrete, Prestressed concrete beam. Prestressed beams, Deflection, Bridges, AASHTO standard.

ÖNSÖZ

Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. AASHTO LRFD ve PCI yönetmeliklerine uyulmuştur.

“Öngerilmeli Kirişlerin Deplasman Açısından İncelenmesi” konusunda yaptığım tüm bu çalışma kapsamında bana tecrübelerini ve vaktini ayırıp beni aydınlatan ve her konuda desteğini esirgemeyen kıymetli tez danışmanım Hocam Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a emeklerinden ötürü şükran ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam ve öğrenimim boyunca vaktini harcamaktan kaçınmayan ilgi ve alakasını esirgemeyen değerli Hocam Dr.Öğr. Üyesi Yuşa ŞAHİN ve Statik İnşaat Mühendisi Mehmet Murat TAŞDEMİR(Varyant Proje Mühendislik İnşaat Ltd. Şti.) ile Statik İnşaat Mühendisi Fatih ÇELİK(Koba Proje ve Danışmanlık A.Ş.)'e teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın başlama öyküsü ve gelişmesinde bilgi, tecrübe, yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Yapı Merkezi İnşaat A.Ş. ve çok değerli yöneticileri Şantiye Şefi Ahmet HANÇER(Yapı Merkezi İnşaat A.Ş.), Fabrikalar Müdürü Mesut YURDAKUL(Yapıray Demiryolu İnşaat Sistemleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.) ve Sn. Yüksek İnşaat Mühendisi Bülent DOSTER(EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.) ile Teknik Ofis Mühendisi Burak YILMAZ(Yapı Merkezi İnşaat A.Ş.)'a sonsuz minnet ve teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, hayatım boyunca emeklerini esirgemeyen her daim dua edenim canım annem Hülya DOĞAN'a, babam Niyazi DOĞAN'a, her koşulda beni düşünen ve destek veren ablam Esra Sevilay DOĞAN'a, beni her zaman yüreklendiren abim Ahmet Kürşad DOĞAN'a ve ailemin tüm bireylerine ve son olarak süreç içerisinde yaşadığım tüm stresli dönemlerde tahammül sınırlarını tüm gücümle zorladığım sonsuz sabır ve destek gösteren biricik yol arkadaşım, değerlim Psk.Danışman Habibe KIRMIZIOĞLU'na varlıkları için teşekkür ederim.

Ertuğrul Can DOĞAN

20/07/2022

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Tip 270K Düşük gevşemeli öngerme kablosunun mekanik özellikleri.....	40
Tablo 2.2 Yapısal malzemelerin özgül ağırlıkları	41
Tablo 2.3 Eşit Yol genişliğine bağlı olarak trafik şerit sayıları	42
Tablo 2.4 Trafik şeridine göre hareketli yük azaltma katsayıları	43
Tablo 2.5 Köprü ve kiriş türüne göre K katsayıları	44
Tablo 3.1 Beton özellikleri	63
Tablo 3.2 Çelik özellikleri	63
Tablo 3.3 Diğer parametreler.....	63
Tablo 3.4 Öngerilmeli tip kirişlerin kesit boyutları	64
Tablo 3.5 Öngerilmeli prefabrik Tip1 kirişinin analiz parametreleri	65
Tablo 3.6 Öngerilmeli kompozit Tip1 kirişinin analiz parametreleri.....	65
Tablo 3.7 Öngerilmeli prefabrik Tip2 kirişinin analiz parametreleri	66
Tablo 3.8 Öngerilmeli kompozit Tip2 kirişinin analiz parametreleri.....	66
Tablo 3.9 Öngerilmeli prefabrik Tip3 kirişinin analiz parametreleri	67
Tablo 3.10 Öngerilmeli kompozit Tip3 kirişinin analiz parametreleri.....	67
Tablo 3.11 Zati yüklerden oluşan moment tesirleri	73
Tablo 3.12 Zati yüklerden oluşan kesme kuvvetleri.....	74
Tablo 3.13 Hareketli yüklerden meydana gelen eğilme momenti (Bir kiriş için)	74
Tablo 3.14 Hareketli yüklerin oluşan kesme kuvvetleri	75

Tablo**Sayfa**

Tablo 3.15 Betonun elastik kısalmasından kaynaklı öngerilme kayıpları	79
Tablo 3.16 Betonun sünmesinden kaynaklı öngerilme kayıpları	81
Tablo 3.17 Öngerme çeliğinin gevşeme kayıpları	81
Tablo 3.18 Tüm kesitler için öngerilme kayıpları	82
Tablo 3.19 Kılıflamadan sonra toron yerleşimi	90
Tablo 3.20 Öngerilmeli kiriş üzerindeki betonarme demiri çekme gerilmesi kuvveti	91
Tablo 3.21 Tip2 kiriş moment ve kesme kuvveti özetleri	94
Tablo 3.22 Tipik öngerilmeli kirişlerde uzun zamanda oluşacak sehim ve ters sehimlerin tahmininde uygulanacak tavsiye edilen katsayılar.....	101
Tablo 4.1 Tip Kirişler zati ağırlığından meydana gelen moment (M_{g1}) tesirleri	119
Tablo 4.2 Tip kirişler döşeme ağırlığından meydana gelen moment (M_{g2}) tesirleri.....	119
Tablo 4.3 Tip kirişler ilave yüklerden meydana gelen moment (M_{g3}) tesirleri.....	120
Tablo 4.4 Tip kirişler standart kamyon yükünden meydana gelen moment (M_{g4-h}) tesirleri	120
Tablo 4.5 Tip kirişler eşdeğer şerit yükünden meydana gelen moment ($M_{g4-ş}$) tesirleri ...	121
Tablo 4.6 Tip1 kiriş öngerme özetleri	121
Tablo 4.7 Tip2 kiriş öngerme özetleri	122
Tablo 4.8 Tip3 kiriş öngerme özetleri	122
Tablo 4.9 Tip1 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri	123
Tablo 4.10 Tip1 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri	123
Tablo 4.11 Tip2 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri	123

Tablo**Sayfa**

Tablo 4.12 Tip2 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri	124
Tablo 4.13 Tip3 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri	124
Tablo 4.14 Tip3 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri	125
Tablo 4.15 Tip kirişler sehim hesap değerleri	126
Tablo 4.16 Tip kirişler dönme hesap detayları	126



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Öngerilmeli basit kirişin açıklık ortasındaki gerilme dağılımı	30
Şekil 2.2 H ₃₀ -S ₂₄ standart kamyon yükünün eğilme momenti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi	42
Şekil 2.3 H ₃₀ -S ₂₄ standart kamyon yükünün kesme kuvveti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi	42
Şekil 2.4 H ₃₀ -S ₂₄ standartlarında şerit yükünün eğilme momenti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi	43
Şekil 2.5 H ₃₀ -S ₂₄ standartlarında şerit yükünün kesme kuvveti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi	43
Şekil 2.6 Prefabrike ve kompozit kiriş en kesitleri	46
Şekil 3.1 Öngerilmeli kiriş şematığı	64
Şekil 3.2 Öngerilmeli prefabrik Tip1 kirişi en kesiti	65
Şekil 3.3 Öngerilmeli kompozit Tip1 kirişi en kesiti.....	65
Şekil 3.4 Öngerilmeli prefabrik Tip2 kirişi en kesiti	66
Şekil 3.5 Öngerilmeli kompozit Tip2 kirişi en kesiti.....	66
Şekil 3.6 Öngerilmeli prefabrik Tip3 kirişi en kesiti	67
Şekil 3.7 Öngerilmeli kompozit Tip3 kirişi en kesiti.....	67
Şekil 3.8 Öngerilmeli Kiriş Zati Yük Yüklemeşi	68
Şekil 3.9 Öngerilmeli kiriş hareketli yük yüklemeşi	69
Şekil 3.10 Eğilme momenti için H30-S24 standart kamyon yüklemeşi	70

Şekil**Sayfa**

Şekil 3.11 Kesme kuvveti için H30-S24 standart kamyon yüklemesi.....	70
Şekil 3.12 Eğilme momenti için şerit yüklemesi	71
Şekil 3.13 Kesme kuvveti için şerit yüklemesi.....	71
Şekil 3.14 Öngerilmeli kiriş üzerindeki betonarme donatısı gerilme değerleri.....	91
Şekil 3.15 Öngerilmeli kiriş altındaki betonarme donatısı gerilme değerleri.....	92
Şekil 3.16 Öngerilmeli Kiriş En Kesiti Ve Öngerme Halatının Ağırlık Merkezi.....	102
Şekil 3.17 Öngerilmeli Kirişe Etki Eden Hareketli Yükler	104
Şekil 4.1 Tip kirişler sehim ve dönme değerleri.....	127

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile beraber aşağıdaki şekilde sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a^*	: Bir öngerme kablosu alanı
A_s	: Betonarme eğilme donatısı alanı
A_s^*	: Toplam öngerme kablosu alanı
A_v	: Kayma donatısı alanı
b	: Etkili tabla genişliği
b'	: Prefabrike kiriş gövde kalınlığı
CR_c	: Betonun sünmesinden oluşan öngerilme kayıpları
CR_s	: Öngerme çeliğinin gevşeme kayıpları
d	: Faydalı yükseklik
d'	: Öngerme kabloları ağırlık merkezinin prefabrike kiriş alt kenarından mesafesi
e_p	: Öngerme kablolarının prefabrike kirişe eksantrisitesi
e_c	: Öngerme kablolarının kompozit kirişe eksantrisitesi
E_c	: Beton elastisite modülü
E_{ci}	: Öngerme uygulama anında beton elastisite modülü
ES	: Betonun elastik kısılmasından oluşan öngerilme kayıpları
edk	: Enine dağılım katsayısı
F	: Prefabrike kiriş en kesit alanı
F_c	: Kompozit kiriş en kesit alanı
f_c'	: Karakteristik beton basınç dayanımı
f_{ci}'	: Öngerme uygulama anında beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cir}	: Öngerme uygulama aşamasında öngerme kuvveti ve prefabrike kiriş zati ağırlığından dolayı öngerme kabloları hizasında oluşan gerilme
f_{cds}	: Kiriş zati ağırlığı hariç tüm zati ağırlıkların etkisi ile öngerme kabloları hizasında oluşan gerilme
f_d	: Dış yüklerden dolayı çekme gerilmesi oluşan kiriş kenarında toplam zati ağırlıktan oluşan gerilme

f_e	: Bütün öngerilme kayıplarından sonra öngerme kuvvetinden kaynaklanan gerilme
f_i	: Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan öngerilme kayıplarından sonra öngerme kuvvetinden kaynaklanan gerilme
f_{pc}	: Kompozit kesit ağırlık merkezinde oluşabilecek minimum basınç gerilmesi
f_r	: Çatlama gerilmesi
f_s	: Betonarme çeliği çekme emniyet gerilmesi
f_s'	: Öngerme çeliği karakteristik kopma dayanımı
f_y'	: Betonarme çeliği basınç akma gerilmesi
f_{yk}'	: Betonarme çeliği çekme akma gerilmesi
q_1	: Prefabrike kiriş zati ağırlığı
q_2	: Bir kirişe gelen döşeme ağırlığı
q_3	: Bir kirişe gelen ilave yük
H	: Prefabrike kiriş yüksekliği
L	: Kiriş uzunluğu
I	: Prefabrike kirişin tarafsız eksenini etrafındaki atalet momenti
I_c	: Kompozit kirişin tarafsız eksenini etrafındaki atalet momenti
M_{cr}	: Çatlama Momenti
M_{cr}^*	: Dış yüklerden dolayı oluşan eğilme çatlamasına neden olan moment
M_{q1}	: Prefabrike kiriş zati ağırlığından kaynaklanan eğilme momenti
M_{q2}	: Döşeme ağırlığından kaynaklanan eğilme momenti
M_{q3}	: İlave yükten kaynaklanan eğilme momenti
M_{hk}	: Kamyon yükünden kaynaklanan eğilme momenti
M_{max}	: Zati yükler harici yüklerden kaynaklanan eğilme momenti
M_n	: Eğilme taşıma kapasitesi
$M_{hş}$	: Eşdeğer şerit yüklemeinden kaynaklanan eğilme momenti
M_u	: Faktörlü eğilme momenti
M_q	: Elverişsiz hareketli yükten kaynaklanan eğilme momenti
N	: Kılıfsız (aktif) öngerme kablosu adedi

P	: Öngerme kablolarına verilebilecek toplam öngerme kuvveti
P₁	: Bir öngerme kablosuna verilebilecek öngerme kuvveti
P₁'	: Kayıplardan sonra bir öngerme kablosunda bulunan öngerme kuvveti
P_e	: Bütün öngerilme kayıplarından sonra öngerme kablolarında bulunan öngerme kuvveti
P_i	: Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan öngerilme kayıplarından sonra öngerme kablolarında bulunan öngerme kuvveti
P_ö	: Bir kirişe gelen kamyon ön teker yükü
P_a	: Bir kirişe gelen kamyon arka teker yükü
S	: Kirişler arası net mesafe
SH	: Betonun büzülmesinden (rötre) oluşan öngerilme kayıpları
RH	: Yıllık ortalama bağıl nem oranı
T	: Çekme gerilmesi kuvveti
t	: Tabla yüksekliği
V_c	: Betonun kesme kuvveti taşıma kapasitesi
V_{ci}	: Diyagonal çatlakların moment ve kesme etkilerinin sonucunda oluşması durumunda betonun kesme kuvveti taşıma kapasitesi
V_{cw}	: Diyagonal çatlakların gövdedeki asal çekme gerilmelerinin sonucunda oluşması durumunda betonun kesme kuvveti taşıma kapasitesi
V_d	: Toplam zati ağılıktan kaynaklanan kesme kuvveti
V_{q1}	: Prefabrike kiriş zati ağırlığından kaynaklanan kesme kuvveti
V_{q2}	: Döşeme ağırlığından kaynaklanan kesme kuvveti
V_{q3}	: İlave yükten kaynaklanan kesme kuvveti
V_i	: Zati yükler harici yüklerden kaynaklanan kesme kuvveti
V_k	: Kamyon yükünden kaynaklanan kesme kuvveti
V_p	: Öngerme kuvvetinin düşey bileşeni
V_s	: Eşdeğer şerit yüklemesinden kaynaklanan kesme kuvveti; kayma donatısının kesme kuvveti taşıma kapasitesine katkısı
V_u	: Faktörlü kesme kuvveti
V_y	: Yaya yükünden kaynaklanan kesme kuvveti

V_q	: Elverişsiz hareketli yükten kaynaklanan kesme kuvveti
y_{alt}	: Prefabrike kiriş tarafsız ekseninden prefabrike kiriş alt kenarına mesafe
$y_{üst}$	: Prefabrike kiriş tarafsız ekseninden prefabrike kiriş üst kenarına mesafe
y_{calt}	: Kompozit kiriş tarafsız ekseninden prefabrike kiriş alt kenarına mesafe
$y_{cüst}$	: Kompozit kiriş tarafsız ekseninden prefabrike kiriş üst kenarına mesafe
W_{alt}	: Prefabrike kirişin alt kenarına göre mukavemet momenti
$W_{üst}$	: Prefabrike kirişin üst kenarına göre mukavemet momenti
W_{calt}	: Kompozit kirişin prefabrike kiriş alt kenarına göre mukavemet momenti
$W_{cüst}$	: Kompozit kirişin prefabrike kiriş üst kenarına göre mukavemet momenti
w_c	: Beton birim hacim ağırlığı
Q_s	: Eşdeğer şerit yüklemesinden bir kirişe gelen tekil yük
q_s	: Eşdeğer şerit yüklemesinden bir kirişe gelen yayılı yük
q_y	: Bir kirişe gelen yaya yükü
Φ	: Dayanım azaltma katsayısı; öngerme uygulama oranı
φ	: Titreşim katsayısı
α	: Betonun elastik kısalmasından kaynaklanan öngerilme kaybı oranı
β	: Toplam öngerilme kaybı oranı
β_1	: C45 betonu dayanım faktörü
γ	: Düşük gevşemeli öngerme çeliği tip faktörü
ρ^*	: Öngerme donatısı oranı
δ_1	: Öngerme anında kiriş kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim
δ_2	: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan sehim
$\delta_1+\delta_2$	: Öngerme anında öngerme kuvvetinden ve kendi ağırlığından dolayı oluşan sehim
δ_3	: Döşeme ağırlığından dolayı oluşan sehim
δ_4	: Kompozit kesite etkiyen ilave yüklerden dolayı oluşan sehim
δ_H	: Hareketli araç yüklerinden dolayı oluşan sehim

Δ_1	: Depolama sırasında montaja kadar oluşacak ters sehim
Δ_2	: Servis yükleri altında sehim
Δ_s	: Toplam yüklerden dolayı oluşan sehim
ϕ_1	: Öngerme anında kiriş kendi ağırlığından dolayı oluşan dönme
ϕ_2	: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan dönme
$\phi_1+\phi_2$	: Öngerme anında öngerme kuvvetinden ve kendi ağırlığından dolayı oluşan dönme
ϕ_d	: Depolama sırasında montaja kadar oluşacak dönme
ϕ_3	: Döşeme ağırlığından dolayı oluşan dönme
ϕ_4	: Kompozit kesite etkiyen ilave yüklerden dolayı oluşan dönme
ϕ_y	: Servis yükleri altında dönme
ϕ_H	: Hareketli araç yüklerinden dolayı oluşan dönme
ϕ_s	: Toplam yüklerden dolayı oluşan dönme
Δf_s	: Toplam öngerilme kayıpları

Kısaltmalar

Açıklamalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
PCI	: Precast/Prestressed Concrete Institute

1. GİRİŞ

Genel Bilgiler

Yapı sektörünün vazgeçilmezi olarak bilinen kompozit malzeme olan betonun, basınç gerilmesine oranla çekme gerilmesi çok düşük seviyededir ve birbirlerini karşılamamaktadırlar. Bu duruma çözüm olarak çelik çubuklar ile beton malzemesi beraber çalışmış ve betonarme ürünü ortaya çıkmıştır. Betonarme halinde yapı, tasarımda planlanan servis ömrünü tamamlayabilmektedir.

Basınç gerilmeleri beton ile karşılanabilir. Donatı, betonun oluşabilecek basınç çubuklarına mesnet görevi yapabilmektedir. Ayrıca kolon ve kiriş birleşim bölgelerinde, sargı bölgeleri betonun birim kısalma kapasitesi arttırarak ve kesit kırılması olmadan dönme yapmasını engelleyerek taşıyıcı sistemin “düktil” yapabilmesi gibi görevleride bulunmaktadır (Ünal ve Kürklü, 2007).

Modern mühendisliğin daha emniyetli yapılar ve yüksek dayanımı bulunan malzeme kullanımının uygulandığı çalışmalar kesit boyu azaltılması ve yapının hafifletilmesini sağlayabilmiştir. Yeni gelişen mühendisliğin geliştirdiği betonarme yapının toplam tasarım yükünün çoğunluğu yapı elemanının öz ağırlığı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu gelişmeler ışığında kesitin çekme gerilmesi ile beraber öngörülemeyen çekme gerilmeleri azaltabilecek ya da önleyebilecek ön basınç uygulaması ile ilgili düşünce artık ortaya çıkmıştır (Ünal ve Kürklü, 2007).

Öngerilmeli beton ilk defa P.H. Jackson tarafından 1888 yılında California eyaletinin San Francisco kentinde ortaya konulmuştur. Bu düşüncenin olduğu bu yıllarda yüksek dayanımlı çelik üretilmemesi öngerilmeli beton kullanılacak alanların genişlemesi engellenmiştir. Öngerilme tekniğini köprülerde kullanabilen ilk kişi E. Freyssinet’tir. E. Freyssinet 1920’li yıllarda iki tane kemer köprü bu tekniği kullanarak inşa etmiştir (Atmaca, 2018).

Öngerilmeli beton sistemlerinde sabit ölü yük, taşınan hareketli yük ve öz ağırlığı ile oluşabilecek çekme gerilmelerini uygulayacak öngerme kuvvetleri ile ya sınırları geçmeyecek şekilde tamamının ortadan kalkması ya da azaltılabilmesi amaçlanmaktadır.

Öngerilmeli prefabrik kirişli köprüler geneli itibariyle açıklığı kısa olanlar ekonomiklik sağlayabildiği, açıklığı daha fazla olanlar ise uzun açıklıklı bölgelerden geçebilmeyi sağladığı için tercih sebebidir. Büyük açıklıklarda ise Asma Köprü sistemleri

ya da Eğik Askılı Köprü (Cable Stayed Bridge) seçilir (Fenercioğlu, Sönmez, Koçak, Uğur ve Sönmez, 2007).

Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında, ön germeli kirişlerin farklı gerilmeler altında göstermiş olduğu deplasmanlar incelenecektir. Farklı öngerilmeli tip kirişlerin gerilmeleri karşılaştırılacak ve analizi yapılacaktır.

Kesit tesirleri hesaplanan öngerilmeli tip kirişlerin bağlantılı olarak öngerme halatları belirlenecek ve yerleşim düzeni yapılacaktır. Ardından öngerilmeli tip kirişler için gerilme analizleri yapıp kesit yeterliliği tespit edilmiştir. Maksimum ve minimum donatı miktarları belirlenip sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Taşıma kapasitesi ve yatay mukavemet hesapları yapıldıktan sonra sehim ve dönme miktarları belirlenen öngerilmeli betonarme kirişlerin yönetmelik katsayıları ile hesaplanıp analizi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Öngerilmeli Beton

Beton maliyeti hesaplı, işçilikte kolaylık, mimari projeye daha rahat uyulabilinmekte, yüksek dayanımlı ve yangın olması ihtimallerine daha dayanıklı olup bu özellikler ile çok fazla yapı sektöründe kullanılabilmektedir. Yalnız malzeme bakımından betonun çekme gerilmesi altındaki mukavemetinin, basınç gerilmesi altındaki mukavemetine kıyasla daha az olması (yaklaşık 1/10–1/12’i), beton çekme gerilmesi etkisinde kalan yapı elemanlarında değerlendirilmesi uygun görülmemiştir. Betonda istenmeyen bu durum betonun içerisine belli bir oranda çelik çubuk ya da demir konulması ile çözümlenmiştir. Joseph Monier demir ve beton kompozisyonu ile birçok kez patent alıp, aynı zamanda ilk betonarme köprüsünde tasarımcısı olma başarısını göstermiştir. İlerlemelerden bir süre sonra yapı ana malzemesi olarak artık betonarme kullanımına başlanılmıştır. Yapıların yavaş yavaş betonarme olmasından dolayı bu konudaki araştırmalar da hızlanmıştır. Betonarmenin zayıf görülebilecek olan, inşa süresini kısaltılması, kullanılan yapı elemanlarının ağırlığının düşürülebilmesi, düşük gerilme altında yapı elemanlarının çatlaması, kalıp maliyetlerinin düşürülebilmesi için araştırmalar yapılmış ve bu araştırmalar ışığında öngerilmeli beton ortaya çıkması sağlanmıştır (Atmaca, 2018).

Günümüzde fazla açıklıklı yapıların geçilebilmesi için çoğunlukla asma köprüler tercih edilmektedir. Ünlü gezginlerin ve kaşiflerin günlüklerinden asma köprü fikirlerinin yüzyıllar öncesinde de kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu günlüklere bakıldığında 100m’yi aşabilen açıklıklı asma köprülerin dünyanın farklı bölgelerinde var oldukları görülebilmektedir. Geçmişte asma köprü kullanımının fazla olması ile beraber çağdaş dünyadaki asma köprüler 20. yüzyılda gelişen teknoloji ile beraber olmuştur. 1826 yılında tamamlanan İngiltere’deki Menai Strait Köprüsü ilk büyük asma köprü olarak kayıtlara geçmiştir (Atmaca, 2018).

Öngerilme önerisi 1886 yılında ilk olarak Avusturyalı Mondl ile yakın zamanlarda Amerikalı Jackson ve Steiner, Alman Koenen tarafından üretilmiştir. Yüksek mukavemetli çelik kullanımı fikri ilk olarak Avusturyalı Van Emperger tarafından önerilmiştir. Aynı zamanlarda Amerikalı Dill ‘tam öngerilmenin’ çatlakların tamamının ortadan kalkabileceği fikrini ortaya atmıştır. Fakat bu düşünceler sadece kağıt üzerinde kalmış olup, öngerilmeli betonarme yapıların gerçek gelişimine Freyssinet ve Hoyer öncülük yapmıştır. Öngerilme

yöntemi Avrupa’da uzun açıklıklı köprü, çatı, kazık ve demiryollarının bağlanması gibi genişçe uygulama alanları bulmuştur (Oflazoğlu, 2007).

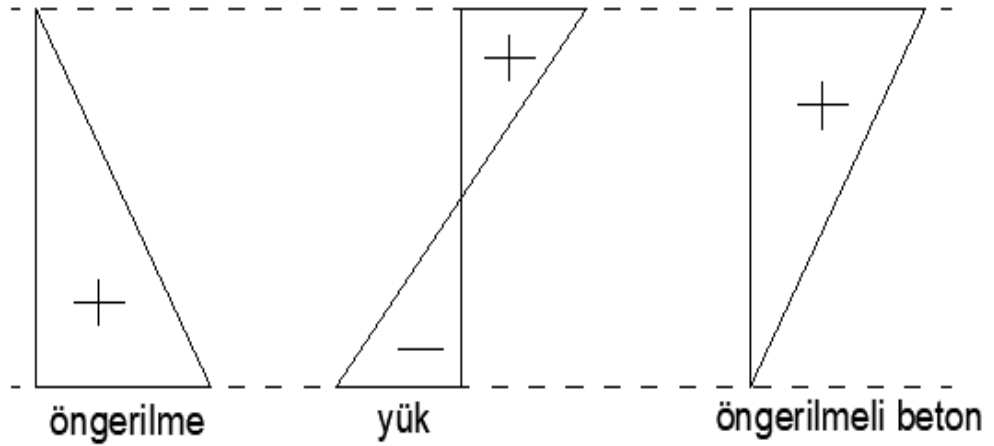
Öngerilmeli beton, TS3233’e göre elamana gelebilecek yükün etkisinin çelik gerilmesiyle istenilen şekilde dengelenebilen beton diye tanımlamaktadır (TS3233). Bir tanımda, farklı şekillerde iletme yükleri altındaki davranış ve dayanımı geliştirebilmek adına, bir yapı elemanına bilinçli bir şekilde verilen sabit gerilmelerdir. Bir diğer tanımda ise, bir yapı elemanı servis yüklerinin ortaya çıkardığı eğilmenin ters yönde eğme sağlayabilen kuvvetin tatbikidir. Dahada kolay olacak şekilde öngerilmeli beton tanımı; yüksek dayanımlı, haddelenmiş, yüksek elastik sınırlı çelik donatı ile yüksek dayanımlı betonun beraber kullanılması ile elde edilen, yapay bir şekilde verilen çelik gerilmesinin aderans ile beraber betona iletimi sayesinde kesitte oluşabilecek çekme gerilmelerinin giderilmesi gibi tanımlanabilmektedir. Öngerme sistem ve tekniği; ön çekim ve ard çekim olacak şekilde iki başlık olarak sınıflanacak (Kozak, 2011).

Öngerilmeli beton, yapı malzemelerindeki gelişmelerin en son basamağıdır. Betonarmede bir yapıda, çelik ile beton pasif bir kombinasyondur. Öngerilmeli beton yüksek elastik sınırlı çelik ve yüksek mukavemetli betondan meydana gelmektedir. Öngerilmeli beton için, çelik ile beton bir araya gelmesi aktif bir kombinasyonu doğurmaktadır. Betonarme ile öngerilmeli beton arasında yapım aşaması temel farktır. Betonarme yapılarda kalıplar içerisine çelik donatı yerleştirilip, kalıp içerisine beton dökülmektedir. Burada çelik betona basınç uygulamamaktadır. Öngerilmeli betonda ise kullanılacak olan çelik yüksek mukavemetli çelik olduğundan ötürü çelik tarafından betona basınç gerilmesi aktarılmaktadır. Bu şekilde betonarmede oluşan çekme dayanımı hayli az olan beton ve çekme dayanımı yüksek olan çelik, yüksek mukavemet gösteren malzemeler ile beraber kullanılıp uygun bir birleşim oluşmaktadır (Oflazoğlu, 2007).

Yapay gerilme durumu ile yükün vereceği gerilme durumu yapı ömrü boyunca kalıcı olarak durması, sabit olması gerekmektedir. Yapay gerilme durumunun değeri, donatının alanı ve kablonun yerine bağlı olarak donatının gerilmesine bağlıdır. Öngerme kablosunun uç kısımları ankraj imalatının ardından da donatının gerilme değerleri sabit kalmaz. Betonun zamanla büzülme ve kalıcı basınç değerleri altında zaman içerisinde kısalmaya uğramasından ötürü kabloların uç kısımları aralarındaki mesafe azalır ve donatının gerilmesi düşmeye başlar. Bu duruma ek olarak sabit iki nokta arasındaki gergin bir çelik telin zaman içerisinde uzaması(rölaksasyon) vardır. Rölaksasyonda ek bir gerilme kaybı oluşturmaktadır. Zaman içerisinde gelişen bu gerilme kayıplarının ortalama toplam değeri

250-300 N/mm² seviyesindedir. Sürtünme kaybı ve zaman içerisinde oluşan bu gerilme kayıpları çıkarılmasının ardından geride kalan donatının gerilme ve bu gerilmenin betonda verdiği yapay gerilme durumunun kalıcı olduğu düşünülebilir (Ünal ve Kürklü, 2007). Çelik süneklilik özelliği sayesinde öngerilme imalatında yüksek gerilme karşı faydalı özelliğe sahip olacak olup kullanılabilir. Yüksek seviyede gerilen bu çelik, gerilme sayesinde yapı elemanında enerji depolar. Depolanan enerji, yapı elemanının alt bölgesinde sıkışıp hafifce ters bir sehiö meydana getirmektedir. Öngerilme işlemiyle, betondaki yetersiz olan çekme kapasitesi artırılıp, yapısındaki eksiklik ortadan kaldırılır ve yüksek dayanım gösteren iki malzeme ideal bir şekilde birleşimi sağlanacaktır. Böylelikle kiriş kendi ağırlığını kaldırma zorunluluğu ortadan kaldırmış olup yukarı yönde bir kuvvet meydana getirmiş olacaktır. Kiriş uzunluğu boyunca meydana çıkacak olan bu kuvvet, kirişe uygulanacak yükleri karşılamaktadır (Kozak, 2011). Dış yüklerden gelebilecek olan gerilmeleri amacına göre hizmet edebilecek düzeyde değiştirebilen yapay gerilme ve devamlı bir gerilme durumuna öngerilme durumu ve öngerilmenin verileceği beton da öngerilmeli beton olarak tanımlanmaktadır (Ünal ve Kürklü, 2007).

Basit mesnetli bir kiriş açıklığının tam ortasında dış yüklerden dolayı meydana gelecek olan çekme gerilmesinin, kirişe bir öngerilme kuvveti verilmesi yoluyla ortadan kaldırılması aşağıdaki şekilde şema ile belirtilmiştir.



Şekil 2.1 Öngerilmeli basit kirişin açıklık ortasındaki gerilme dağılımı

Yukarıdaki şekil üzerinden de görüleceği gibi, basit kirişin açıklığının ortasında dış yük etkisi ile kesitin alt kısımlarında çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kirişe öngerilme tekniği ile öngerme kuvveti verildiği zaman, çekme gerilmelerinin kaybolduğu gözlenmektedir.

Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Fenercioğlu vd. (2005), yaptıkları çalışmada mevcut önerilmeli demiryolu köprüsünün önerilmeli kirişlerine etki eden tüm yükleri (Sabit yükler, merkezkaç kuvveti, yatay toprak basıncı, yüzme kuvveti, rüzgar yükleri, deprem yükleri, rötre ve sıcaklık farkı ile tren fren ve ivmelenme yükleri) SAP 2000 (Structural Analysis Program) yazılımı serisinde sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal olmayan ve doğrusal olan üç boyutlu dinamik ile statik analizlerini ve boyutlandırmasını yaparak, kullanıcıya zaman, kullanım kolaylığı ve uygunluk açısından programın doğru olarak kullanıldığı takdirde mühendislik ve insanlık için ekonomik ve estetik ürünlerin ortaya çıkabileceğini göstermişlerdir.

Evirgen (2007), yüksek lisans tez çalışmasında önerilmeli kirişlerde betonun çekme dayanımının yer değiştirmelere katkısı 4 ayrı beton çekme modeli ile incelenmiştir. Dikdörtgen ve I tip te iki ayrı kesitin incelendiği çalışmada betonun eğrilik ve yer değiştirmesine etkisinin az olduğu görülmüştür. TS 500’de kullanılan betonun basınç bölgesi için önerilen dikdörtgen gerilme bloğunun, betonun çekme dayanımında da kullanılması tavsiye edilmektedir.

Oflazoğlu (2007), yüksek lisans tez çalışmasında önerilmeli kolonların analiz ve tasarımını ele almıştır. Çalışmasında nominal eksenel yük ve moment değerlerini hesaplayacak ve aynı zamanda narin ve narin olmayan önerilmeli beton kolonların tasarımını yapan bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Çalışma kapsamındaki bu program eksenel yük – moment değerleri ve bu değerlerin etkileşim diyagramını çizbildiğini örnekler ile doğrulamış ve programın uyumlu çalıştığını göstermiştir.

Yanık (2007), yüksek lisans tez çalışmasında günümüzde kullanılabilecek yer üstü veya yer altından geçirilen kanalizasyon, sulama suyu, su, elektrik, telefon ve doğalgaz hatlarının değiştirilmesi, yapımı veya bakımlarına çalışma esnasında kolaylık ve imkan sağlayabilecek eğimli bir şekilde monte edilebilecek önerilmeli plak kullanılmasını araştırmıştır. Bu kapsamda, yapılan plakların kullanılabilirliği yüksek ekonomik ve amaçlanan hedefleri gerçekleştirebileceği gösterilmiştir.

Ünal ve Kürklü (2007), yaptıkları araştırmada önerilmeli beton hakkında referanslı bilgiler vermekte olup ana konu olarak çekme mukavemeti düşük olan betonun, önerilmeli beton ile günümüz teknolojisinde kullanılabilirliğini anlatmışlardır. Ön çekmeli ve art çekmeli metodlarını gösterip önerilmeli beton sisteminin daha güvenli, daha narin, daha

estetik, daha ekonomik yapı inşa edilebilmesini ve gelişimi hakkında bilgi vermeyi amaçlamışlardır.

Uluğ (2008), yüksek lisans tez çalışmasında örnek AASHTO-1996 yönetmeliğine göre kuvvet esaslı doğrusal yöntem ile tasarlanan öngerilmeli kirişli örnek bir hızlı tren köprüsünün AASHTO-LRFD yönetmeliğine göre yeniden tasarımını ve karşılaştırılması ile deprem performansını değerlendirmiştir.

Dündar ve Tokgöz (2010), yayımlarında betonarme kolonların normal kuvvet – moment etkileşim diyagramlarını araştırmışlardır. Eğik eğilme ve eksenel basınca maruz gelişigüzel geometriye sahip betonarme kolonların normal kuvvet-moment etkileşim diyagramlarının hesabı için bir yöntem önerilerek, yöntemi uygulayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Çalışmada, literatürde yer alan eğik eğilme ve eksenel yüke maruz betonarme kolonlar eksenel kuvvet-moment etkileşim diyagramlarının belirlenmesi için geliştirilen bilgisayar programı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Dündar ve Tokgöz (2010), başka bir yayımlarında ise eksantrik yük altında öngerilmeli beton kolonların analizini araştırmıştır. İki eksenli eğilme ve eksenel basınca maruz poligonal geometriye sahip öngerilmeli beton kolonların analiz ve tasarımı için iteratif bir yöntem önerilerek, yöntemine dayalı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Çalışmada, literatürde mevcut bulunan iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz öngerilmeli beton kolonlar geliştirilen bilgisayar program ile analiz edilmiş ve sonuçların uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Pekyer (2010), yüksek lisans tez çalışması olan öngerilmeli beton köprü kirişlerinin yapısal onarımını NCHRP 12-21'in sonucundan yararlanarak elde ettiği verilerden gerçekleştirmiştir. Yapısal hasar gören öngerilmeli beton köprü kirişlerinin onarım yöntemleri üzerine çalışmıştır. Farklı seviyelerde hasara sahip, AASHTO I tipi (IB) , ayrık kutu kesitli (SB) ve bitişik kutu kesitli (AB) kirişleri örnek olarak alan Pekyer, bu kirişlere uygulanan onarım yöntemi olarak karbon elyaflarla güçlendirilmiş polimer CFRP kumaşının, CFRP şeritlerinin, art germeli CFRP, öngerilmeli CFRP'nin, harici çelik art germe ve halat ekleme yöntemlerini kullanmıştır ve değiştirme veya onarım kararını verebilmek için gerekli parametreleri önermiştir.

Hilmioğlu (2010), yüksek lisans tez çalışmasında çelik lif katkılı öngerilmeli beton kirişlerde sonlu eleman çözümleri yapmıştır. Hacimsel çelik lif oranı %1.5 olan öngerilmeli

kirişin, deney sonuçları ile bağlantılı olarak uygun yerdeğiştirme-yük eğrisini elde eden doğrusal olmayan yay elemanı boyutunu sorgulamıştır. Bu araştırmayı daha önce yapılmış veriler doğrultusunda önerilmeli betonarme kiriş çözümlemesini yapıp, kirişlerin yük taşıma kapasiteleri için gerçeğe oldukça yakın değerler bulunabildiği göstermiştir.

Çakır (2011), yüksek lisans tez çalışmasında önerilmeli yanal burkulması önlenmiş çelik kafes kirişlerin minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmasını SAP 2000 (Structural Analysis Program) yazılım serisinde ele almıştır. Kiriş uzunluğu arttıkça ve kiriş yüksekliği azaldıkça çelik kafes kirişlerin boyutlandırılmasında gereken önerme kuvvetinin artacağını ve malzeme tasarrufunun dikkate alınacak biçimde olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında çelik kafes kirişlere önerilme uygulayarak kullanılan yapı çeliğinin malzeme ağırlığında %35'e kadar kazanç sağladığını göstermiştir.

Kozak (2011), yayınladığı teknik notta önerilmeli betonlar ve özelliklerinin teorik olarak araştırılması amaçlanmıştır. Önerilmeli beton hakkında genel bilgiler veren Kozak, önerilmeli betonun kısımlarını, kullanılabilirliğini, avantajlarını ve kullanım alanları hakkında bilgiler vermiştir.

Küçükaslan (2013), yüksek lisans tez çalışmasında kirişli döşemeli yapıların yatay ve düşey yükler altında sonlu elemanlar tabanlı sap2000 programı yazılımı ve çözümü üzerine çalışmıştır. Aynı zamanda sonlu elemanlar ve ts500 kapsamında yapılan kirişsiz döşemeli sistemlerin yatay ve düşey yükler altında çözüm yöntemlerini araştırmıştır. Yapay sınır ağlarının hesapta kaybedilen zamanı minimize ettiği hata oranlarını düşürdüğü ve karmaşık problemleri basit işlemler ile çözdüğü anlatılmıştır.

Korkmaz (2013), yüksek lisans tez çalışmasında ilk dengeli konsol yöntemim ile yapılan Kömürhan Köprüsünün önerilme kayıpları ile zamana bağlı yer değiştirmelerin bilgisayar programında malzeme özellikleri ve sınır değerlerdeki değişimleri dikkate alarak köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Düşey yükler altında sünme, yer değiştirme, büzülme ve önerilme kayıpları hesaplanmıştır. Modeli oluşturulan köprüde kamyon yükü sonrası yter değiştirme ve saha ölçümleri ile elde edilen köprüdeki yer değiştirmeleri karşılaştırma yapıp önerilme kayıplarının aşırı yer değiştirme üzerine etkilerini araştırmıştır.

Abdulaliyev vd. (2015), yayınladıkları makalede önerilmeli beton elemanlarda fotoelastik yöntemle gerilme analizi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada önerilmeli betonun fotoelastik yöntemlerle gerilme analizi yapılmış olup elemanın bazı bölgelerinde

üretimden kaynaklanan yüksek öngerilme seviyelerinin malzemenin dayanımını aşabildiği anlaşılmaktadır. Güvenli tasarım sınırlarında üretilmesi gereken öngerilmeli beton elemanların bahsedilen bölgelerde önlemler alınması gerektiği çalışma sonucu anlaşılmaktadır.

Dönmez (2015), doktora çalışmasında öngerilmeli inşaat elemanlarında gerime analizi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında inşaat elemanlarında öngerilmeler fototermoelastisitenin gerilmelerin dondurulması metodu kullanılarak incelenmiştir. Fotoelastik modellerin deneysel analizi sonucundan farklı malzemelerin birleşim bölgeleri olan aderans ve birleşim yüzeyinin serbest kenarı olan ankraj bölgeleri ile ilgili gerilme dağılımlarını elde etmiştir. Elde ettiği bu sonuçlardan bazı bölgelerde analitik ve sayısal yöntemlerle bulunan berileri karşılaştırmıştır. Sonuç incelendikten sonra öngerilme uygulanan bir yapının ankraj bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarının ekstremum değerlerinin malzemenin elastik sabitlerine ve verilen ilk öngerilme değerine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Öztürk ve Öztürk (2016), yaptıkları araştırmada öngerilmeli kompozit köprü kirişlerinin etkin kullanım açıklıklarının belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Üç adet tipik omega ve I kesitinin incelendiği çalışmada köprü kirişlerinin hangi açıklıkta en efektif kullanılacağı araştırılmıştır. Kirişlerin öngerme donatısı miktarlarına göre toplam gerilme kayıplarının ve moment taşıma kapasitelerinin nasıl değiştiği diyagram şeklinde verilmiştir. Ayrıntılı incelemeler yapılmış ve sonuçları sunulmuştur.

Yecan (2016), yüksek lisans tez çalışmasında farklı bölgelerde öngerilmeli betonarme köprülerde zamana bağlı yer değiştirmeleri incelemiştir. Öngerilmeli köprüler hakkında bölgesel ve yıl bazlı bilgiler verip kullanımda olan sünme ile büzülme modelleri çevre koşulları, köprü yapım süresi, kesit özellikleri, beton dayanımı, beton karışım oranı gibi özellikler göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Modeller arasında karşılaştırmalı çalışmalar yapılmış ve sonuçta ortaya çıkan modellerin verdiği farklı sonuçların sebeplerini tartışmıştır. Ayrıca TS3233 ünde güncellenmesi gerektiği tavsiyesinde bulunmuştur.

Ekici (2017), yüksek lisans tez çalışmasında alışık olunan karayolu için tasarlanan öngerilmeli köprü kirişlerinin demiryoluna kazanımlarını anlatmıştır. Bu kapsamda AASHTO sismik tasarım kriterlerinin bir demiryolu köprüsüne uygulanabilirliğini analiz etmiştir. Ayrıca, Türkiye Ulusal Şartnamesi olan DLH şartnamesinin sismik tasarım kriterleri incelenmiş ve AASHTO ile olan farkların ve köprünün tasarımına olan etkisinin

görülebilmesi için bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için bir örnek köprü modeli, bilgisayar programı yardımıyla Türkiye’de iki farklı deprem bölgesi için analiz edilmiştir.

Ortaç (2017), diferansiyel gelişim algoritması tabanlı öngerilmeli beton köprü kirişlerinin optimum tasarımı adlı yüksek lisans tez çalışmasında prefabrik I profilli öngerilmeli beton köprü kirişlerinden meydana gelen köprü üst yapılarının öngerilmeli beton ve donatısı esas alınarak optimum maliyet tespiti yapmıştır. Optimizasyon tasarımında emniyet ve maliyet olmak üzere iki önemli kriter göz önünde bulundurularak tasarım probleminin tanımlanması amaçlamıştır. Optimum tasarım; amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılarından oluşur. Yapılan çalışmada tasarım değişkenlerinin optimum değerleri hesaplanırken, son zamanlarda bir çok alanda kullanılan diferansiyel gelişim algoritması kullanılmıştır.

Eker (2018), yüksek lisans tez çalışmasında Elazığ ilinin Maden ilçesindeki Maden viyadüğünün T kesitli prekast ve kompozit kirişlerinin yerine AASHTO yönetmeliğinden alınan tip kirişleri kullanmış ve hesaplamalarda bulunmuştur. Yaptığı hesaplamalar sonucunda uygun olan tip kirişi belirlemiştir.

Öztürk (2018), yüksek lisans tez çalışmasında öngerilmeli prekast kirişlerin kablo yerleşimini ve köprünün açıklığına bağlı olarak en uygun kesit seçiminin yapılmasını amaçlamıştır. Bu doğrultuda yedi farklı öngerilmeli prekast kiriş üzerinde çalışılmıştır ve her bir örnek kiriş için değişik kablo sayıları için kullanılabilecek maksimum ve minimum mesafeleri belirlemiştir.

Atmaca ve Ateş (2018), yaptıkları araştırmada öngerme kablo düzeninin aktarma dönemi sonrasında kirişin gerilme ve kılıflama parametreleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmada öngerilmeli öngermeli beton kirişlerde öngerilme kuvvetinin öngerme kablolarından betona aktarılmasından sonra öngerme kablo düzeninin gerilme dağılımı ve kılıflama parametrelerinin üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Atmaca (2018), doktora çalışmasını öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerinin üstyapı tasarım ve hesabını veren bilgisayar programı geliştirmiştir. Bu program dahilinde farklı tip malzemelerin açıklıklarına, genişliklerine ve özelliklerine sahip öngerilmeli prefabrik kirişli betondan oluşan köprülerin farklı dış tesirler altında analizleri üzerine çalışmıştır. Tasarlanan program sayesinde köprü üstyapısının inşasında gerekli olabilecek bilgilerin rapor halinde sunulması çok büyük kolaylık sağlamıştır.

Atmaca (2019), yaptığı araştırmada öngerilmeli ve betonarme kirişlerin dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada malzeme, kesit özellikleri ve efektif açıklık değerleri aynı olan öngerilmeli ve betonarme kirişlerin dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Öngerilmeli ve betonarme kirişlerin dinamik karakteristiklerinden mod şekilleri ve periyodların belirlenmesinde, literatürde bulunan bağıntılar ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı bilgisayar programı kullanılmıştır.

Kunt (2019), yüksek lisans tez çalışması dahilinde öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerde üstyapı enkesitleri için abaklar hazırlayıp imalat öncesi gerekli metrajların ve maliyetin hesaplanabilmesi üzerine çalışmıştır. Bu kapsamda farklı genişlik ve açıklıklarda öngerilmeli prefabrik kirişlerin dış tesirler altındaki analizini gözlemlemiştir.

Gönenli vd. (2021), yaptıkları araştırmada öngerilmeli eğri ince plakanın titreşim analizini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında büyük çökmeli izotropik ince plakanın serbest titreşim analizini incelemişlerdir. Analiz sonucunun güvenilirliğini ve geçerliliğini tespit etmek için ANSYS yazılımı ile karşılaştırma yapılarak eğri ince levhayı oluşturan yük parametresinin levha yapısının mod şekillerini değiştirdiği sonucuna varılmıştır.

Heydarinouri vd. (2021), bu çalışma kapsamında distorsiyon kaynaklı yüklemelere (çok eksenli gerilmeler oluşturan) maruz kalan ve öngerilmeli elemanlarla güçlendirilen köprü bağlantılarının yüksek devirli yorulma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Öngerilmeli güçlendirme sistemi, öngerilme kuvvetinin bir sonucu olarak ortalama değerlerin düşürülmesinde etkili olmuş ve stres durumunun başlangıç eşiğinin altına kaymasına olanak sağlamıştır.

Shi vd. (2022), yayımladıkları makalede dış fiber takviyeli polimer tendonlarla öngerilmeli beton kirişler için ankraj ve saptırıcının optimizasyonu konusu üzerinde çalışmışlardır. Bu makale, harici bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) tendonlarla öngerilmeli beton kirişler için ankraj ve saptırmanın optimizasyonuna odaklanmaktadır.

Sciascia vd. (2022), araştırmalarında öngerilmeli değişken sertlikte kompozit kabuk yapılarının dinamik analizi üzerinde çalışmışlardır. Yüksek performanslı kompozit yapılar hakkında bilgiler veren yazarlar, değişken sertlikte kompozitlerin, burkulma performansını ve dinamik stabiliteyi iyileştirdiği ve yapısal sertliği uyarlayarak yapının dinamik tepkisini ayarladığı bulmuştur. Önerilen yaklaşım, yayınlanmış kıyaslama sonuçları ve sonlu eleman çözümleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Standart sonlu eleman prosedürlerine kıyasla daha az değişkenle büyük bir doğruluk gösteren öngerilmeli sertleştirilmiş değişken açılı bir

çekme kabuğu yapısı için orijinal çözümler sunulmaktadır ve çoklu dinamik analizi ile ilgili mevcut yöntemin güvenilirliğini ve verimliliğini kanıtlamaktadır.

Qiang vd. (2022), yapılan çalışmada önerilmeli kiriş-kolonlarda burkulma davranışını analitik olarak incelemiş ve doğrusal olmayan davranışı değerlendirebilmek için akıllı modeller ile makine öğrenimi kullanılarak geliştirilmiştir. Hem çift simetrik hem de tek simetrik duran elemanların burkulma davranışının doğrudan değerlendirilmesine izin veren örtük bir çözüm ilk kez analitik olarak belirlenir ve regresyon kullanılarak burkulma yükünün açık ve basitleştirilmiş bir çözümü elde edilir. Hem örtük hem de açık çözümler, kalan elemanların burkulma yükünü değerlendirmek için geleneksel sayısal yöntemi basitleştirebilir ve sayısal modelleme kullanılarak doğrulanmaktadır. Yük taşıma kapasitesi değerlendirmesi için, burkulma yükünün açık çözümüne dayalı olarak, geleneksel yöntemde saf ve etkileşimli burkulma modları arasında ayırım yapmanın zorluklarının üstesinden gelebilen önerilmeli duran kiriş-kolonların doğrusal olmayan burkulma davranışını değerlendirmek için akıllı yöntemler geliştirmek için makine öğrenme modelleri benimsenmiştir. Yapay sinir ağlarının doğrusal olmayan arıza modunu ve önerilmeli kalan kiriş-kolonların nihai yükünü doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

Wu vd. (2022), yapılan çalışmada eksantrik sıkıştırma altında önerilmeli sabit kiriş ve sabit kolonların davranış ve önerilme açısından optimizasyonunu araştırmışlardır. Önerilmeli sabit kiriş-kolonlar için, eksantrik sıkıştırma altında yapısal davranış ve optimizasyon yöntemi sayısal olarak incelenmiştir. Eksantrik sıkıştırma genellikle kurulum hataları olduğunda veya eleman hem eksenel yükü hem de bitiş momentini aldığı anda meydana gelir. Yapısal verimliliği ve arıza modunu ölçmek için göstergeler tanımlanır ve bunlar, farklı yapısal konfigürasyonlara ve önerilme dağılımlarına sahip kalan elemanın yük taşıma kapasitesi ile birlikte incelenir. Bu çalışmada, eksantrik sıkıştırma altında önerilmeli kiriş-kolonların tasarımı ve montajdaki eksantrik tolerans için önerilerde bulunulmuştur.

Sonal vd. (2022), ortamda kürlenmiş önerilmeli ve önerilmeli geopolimer beton kirişlerin davranışlarını araştırmıştır. Bu araştırmada, ortam kürlenme tekniği kullanılarak önerilme kuvvetini almak üzere özel olarak tasarlanmış geopolimer önerilmeli beton için bir tasarım geliştirilmesi ve performansını aynı dereceli portland çimentolu beton karışımı ile karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan teknik ile alakalı bilgiler verilerek kullanılan malzemeler ile alakalı genel bilgiler verilmiştir. Ortam kürü altında

kürlenlen öngerilmeli geopolimer beton kirişlerin yeterli dayanımda olduğu ve portland çimentolu beton kirişlerle kıyas edildiği zaman yükü eşit derecede taşıyabildiği görülmüştür.

Kamran ve M.A. Iqbal (2022), araştırmalarında balistik mermilerin öngerilmeli plakalara etkisi üzerinde araştırmalar yaptı ve karşılaştırmalarda bulundu. Delikli olan öngerilmeli plaklar farklı hesaplama yöntemleri ile karşılaştırıldı ve hesaplamalar ile ölçüm arasında yakın bir ilişki fark edildi. Öngerilmeli betonun penetrasyon direncinin arttığı görülmektedir.

2.2. Öngerilmeli Beton Yöntemleri

Yukarıda da belirtildiği üzere, Öngerme sistem ve teknik olarak; Önçekme ve ardçekme olarak iki sınıfta gruplandırılabilir.

2.2.1.Ön Çekme Yöntemi

Ön çekme yöntemi, ön germe kablosunun beton döküm işinden önce gerdirilmesi olayıdır. Bu sistemde, ön germe kablosu bir uç sabit olacak şekilde diğer uç ise piston yardımı ile kalıp kontrolü sağlanıp bunun içerisinde gerdirilme işlemidir. Bunun ardından taze beton, ön germe kablolarının gerdirilmiş olduğu kalıplar içerisine dökülecek olup, sonrasında bakımı yapılmaktadır. Sertleşen beton yeterli basınç dayanımına sahip olduktan sonra, pistona bağlı olan ön germe kablosunun pistondaki bağlı olan ucu yavaş bir şekilde serbest bırakılıp ön çekme kablosundaki gerilme donatı ve beton arasında oluşan aderans yardımıyla betona aktarımı yapılmaktadır. Bu yöntem sayesinde çekme gerilmesinin olmadığı bir yapı elemanı üretilmiş olacaktır. Prefabrik eleman üretimi başta olmak üzere yapı sektöründe kullanılmaktadır (Atmaca, 2018).

Ön çekme metodu kullanılması halinde, ön germe çeliğindeki kuvvet, çekme işleminden aktarmaya kadar değişmeden sabit tutulmalıdır. Ön çekmenin uzun kalıpta yapılması halinde çeliğin uygun yerlerde bulunmasını sağlayabilmek için kalıp boyunca belirli aralıklar ile çeliği yerinde tutacak delikli plaklar bulunmalıdır. Böyle bir kalıpta öngerme kuvvetinin betondan betona bütün sıra boyunca aktarımını sağlayabilmeli ve bu yönde plaklar serbest olmalıdır (TS3233).

2.2.2.Ard Çekme Yöntemi

Ard çekme yöntemi, ön germe kablolarının beton döküldükten sonra yeterli mukavemeti sağladıktan sonra gerilmesi işlemidir.

Bu yöntem ilk olarak öngerilmeli elemanın uygulanacağı kalıbın yeterli şekilde temizlenip yağlanması ile başlar. Ardından betonarme projedeki düz donatı montajlanıp, içerisinde ön germe kablo kılıfları olan ince cidarlı olan borular yerlerine yerleştirilecektir (Ünal ve Kürklü, 2007). Beton döküm işleminden önce serbest bir durumda ya da beton istenilen dayanımını elde ettikten sonra kılıfların içerisine kablolar yerleştirilir. Kablolar gerdirilip ve yapı elemanın uç kısmına ankraj edilmesinin ardından, ön germe kablosu ve kılıfların arasındaki kalacak olan boşluklar sonradan sertleşen çok özel bir harç malzemesi yardımı ile kapatıla bilinmektedir. Bu harç etkisiyle, ön germe kablosu ile kabloyu çevreleyen beton arasında aderans sağlanmaktadır. Bu şekilde, öngerilmeli eleman çatlamaya karşıt mukavemeti arttırıla bilinmekte ve donatıların korozyon riski minimum düzeylere inmektedir (Kunt, 2019).

Ard çekme metodu kullanılması halinde, ön germe çelikleri aynı anda gerdirilmesi, çelikler arasında uyuşmazlık olmamasına adına tavsiye edilmektedir. Ön germe çeliği beraber çekilmez ise, çekme sırası; kesite, genişliği doğrultusunda mümkün olduğu kadar az moment gelecek şekilde ayarlanmalıdır. Ön germe kabloları eğer kullanılıyor ise kablo içerisindeki tel toron veya çubukları birbirinden ayıran yerleştirme elemanları oynamayacak şekilde rijit yapılmalıdır (TS3233).

2.3. Malzeme

2.3.1. Beton

Kompozit bir yapı malzemesi olan beton, homojen ve yarı gevrek bir malzemedir. Tasarlanan yapı ömrüne ve üzerine gelecek ölü yükler ile gelebilecek hareketli yüklere bağlı olarak farklı dayanımlarda beton sınıfları kullanılabilir. Fakat öngerilmeli elemanlarda kullanılan betonun yüksek dayanımlı olması zorunlu kılınmıştır. TS 3233'e göre öngerilmeli elemanların beton sınıfı minimum 300 kgf/cm² (30 N/mm²) küp, 250 kgf/cm² (25 N/mm²) silindir basınç dayanımlı (BS 25) olma zorunluluğu getirilmiştir.

TS19 standartlarında uyumlu normal portland tipi çimento kullanılmalıdır. Agrega TS 706 standartına ve su TS 500'e uyumlu olmalıdır. Asitli ve nitratlı sular kullanılmamalıdır. Öngerilmeli beton üretiminde katkı maddeleri kullanılmaması gerekmektedir. Özellikle priz hızlandırıcı katkı maddeleri içerisinde bulunan kalsiyum klorürlü katkı maddeleri kesinlikle kullanılmamalıdır.

2.3.2. Betonarme Donatısı

Betonarme donatısı, öngerilmeli kirişlerde çoğunlukla eğilme ve kesme gerilmesini karşılayan boyuna ve beton kesitinin etrafınca dönen etriyeler için kullanılır. Betonun çekmeye çalıştırılması istenmeyen bir durum olduğundan bu çekmenin uygun şekilde tertiplenmiş bir donatı ile karşılanması gerekir. Beton ile daha kuvvetli bağ yapabilen yüzeyi pürüzlü nervürlü betonarme donatısı tercih edilmektedir (Atmaca, 2018). Adi donatı olarak adlandırılan bu donatıların yüksek dayanımlı olmasına gerek yoktur (Ünal ve Kürklü, 2007).

2.3.3. Öngerme Donatısı

Öngerilme kuvvetinin uygulanması, öngerilmeli beton yapısında yüksek dayanımı olan çelik kabloların yardımı ile yapılmaktadır. Bu kablolar belirli sayılardaki tellerin helis şeklinde sarmalanmasıyla elde edilmektedir. Betonarme kesitleri iç kuvvetler olduğundan dolayı, dış kuvvet olan öngerilme kuvvetleriyle karıştırılmamalıdır (Ünal ve Kürklü, 2007). Öngerme kabloları yüksek dayanımının yanı sıra beton ile iyi aderans yapabilme, yüksek gerilmelerde elastik sınırlar içinde kalabilme, düşük gevşeme kapasitesi, dayanım sınırına kadar yeterli süneklik gösterebilme, korozyon ve yorulmaya karşı dayanım gibi özelliklere de sahip olmalıdır (Atmaca, 2018). KGM Teknik Şartnamesinde, öngerme çeliği ASTM A 416 ve AASTHO M 203 standartına uyumlu ve öngerme halatı ASTM standartlarında Tip 270 K düşük gevşemeli ve normal gevşemeli olarak tanımlanmıştır. Öngerilmeli köprü kirişi üretiminde düşük gevşemeli halatlar tercih edilmesi önerilmiştir. Bu standartlarda belirtilen mekanik özellikler ve öngerilmeli kiriş üretiminde kullanılacak halatların özellikleri Tablo 2.1’de verilmektedir (KGM, 2013).

Tablo 2.1 Tip 270K Düşük gevşemeli öngerme kablosunun mekanik özellikleri

Nominal Halat Çapı		Kesit Alanı (mm ²)	Birim Ağırlık (kg/m)	Akma Dayanımı (kgf)	Halat 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

Öngerme donatıları ve aparatları; öngerme teli(yüksek dayanımı olan çeşitli çaplardaki kıvrık ve düz tellerdir), öngerme toronu(bir tel etrafında bir veya daha fazla tel veya iki telin birbirine sargılanması ile ortaya çıkan örgü), öngerme çubuğu(yüksek dayanımı olan çeşitli çapta üretilen özel alaşımlı çelik çubuk), öngerme kablosu(öngerme teli, öngerme toronu veya öngerme çubuklarının beraber bir şekilde kullanılması), öngerme çeliği(öngerilmeli yapı elemanlarında donatı olarak kullanılan tel, toron, çubuk veya

beraberlikten oluşan kablodur), kılıfı(sonradan germeli elemanların beton içerisine öngerme donatısının konulacağı aksta boşluk bırakabilmek için kullanılan plastik ya da metal borulardır), ankraj kilidi(öngerme kablo kesim işi ardından kablonun içeriye kaçmamasını engellemek için konulan parça) ve öngerilme verme aygıtı(çekme aygıtı olarak bilinir, jak ya da veren olarakta adlandırılır) olarak çeşitlendirilebilir (Aktaş, 2010).

2.4. Öngerilmeli Kirişlere Etkiyen Yükler

Bir yapıya etkiyen yükler, kalıcı(zati) yükler ve hareketli yükler olarak iki ana kategoriye ayrılır. Yapı üzerindeki taşıyıcı sistemlerin ve amaca yönelik bulunan elemanların kendi ağırlıkları kalıcı yükler olarak tanımlanabilir. Geçici yükler ise, yapı üzerindeki dikey yükler (taşıt yükü, demiryolu yükü, yaya yükü) ve yanal yükleri (deprem yükü, rüzgâr yükü, kar yükü, su akıntısı etkisi, araç çarpışması gibi) içerir. Sıcaklık, zamana bağlı diğer etkiler ve büzülme göz önünde bulundurulmamalıdır.

2.4.1. Kalıcı yükler

Yapı üzerinde ömrü boyunca var olan taşıyıcı sistemin yükleri ve hizmet ömrü boyunca tesisat borusu, bariyer, kablo ve diğer bileşenler kendi ağırlıkları kalıcı(sabit) yük olarak adlandırılır. Bu etkiler AASHTO 3.3.5-1’de ve aşağıdaki Tablo 2.2 ile verilen malzemelerin özgül ağırlıkları ile hesaplayabiliriz. Taneli malzemelerin birim hacim ağırlıkları derecesine bağlıdır.

Tablo 2.2 Yapısal malzemelerin özgül ağırlıkları

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
Dökme demir	70,7
Çelik	77
Beton(donatılı veya donatısız)	25
Sıkıştırılmış kum, toprak, çakıl veya balast	19,2
Asfalt	22

2.4.2. Hareketli Yükler

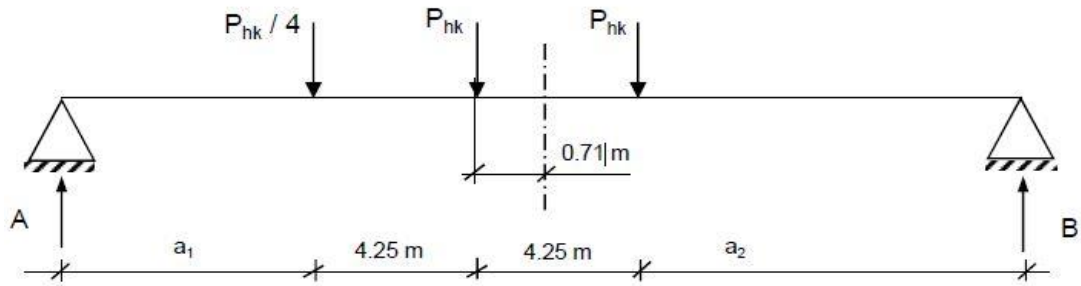
Yapı üzerindeki hareketli yük AASHTO (2002) yönetmeliğine bağlı olarak standart kamyon ya da standart kamyon katarlarına eşit olan şerit yüklerinden meydana gelmektedir. Hareketli yükler, yapı üzerindeki taşıt, yaya ya da bu kısalara eşdeğer statik yüklerdir. Taşıt yükü tekil ve düzgün yayılı yüklerden oluşmaktadır. S kamyonu bağlı yarım treylere, H iki dingilli kamyon olarak tanımlanabilmektedir. S harfinin ardından gelen rakam treylerin tek dingiline denk gelen ağırlığı, H harfinden sonra gelen rakam ise kamyonun iki dingiline denk gelen ağırlığı ifade etmektedir.

Standart bir kamyonun yükünün ve şerit yüklerinin 3.00 m genişliğinde bir yer kapladığı kabul görülerek hesap yapılır. Bu hesaplarda yolun eşit genişliğine bağlı olarak trafik şeritlerinin adedi aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Aydın, 2006).

Tablo 2.3 Eşit Yol genişliğine bağlı olarak trafik şerit sayıları

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

H₃₀-S₂₄ standart kamyon yükünün ve H₃₀-S₂₄ şerit yüklemesinin basit mesnetli kiriş üzerindeki en yüksek moment ve en düşük kesme kuvveti değerlerini verebilecek şekilde aksiyonu yapılmış durumu bulunmaktadır.

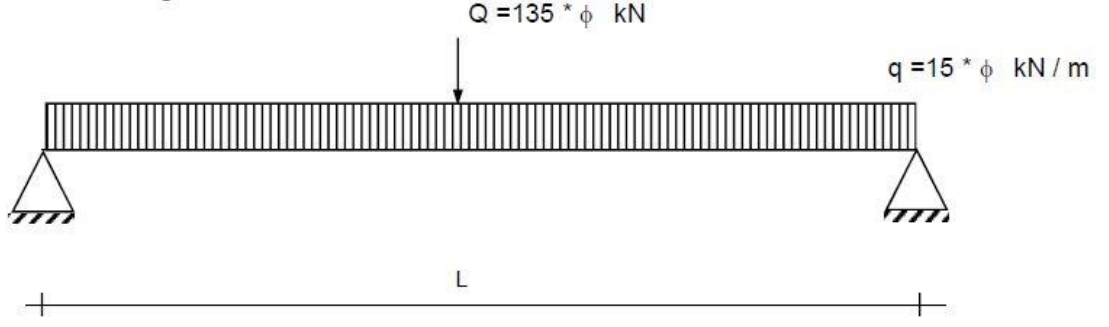


Şekil 2.2 H₃₀-S₂₄ standart kamyon yükünün eğilme momenti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi

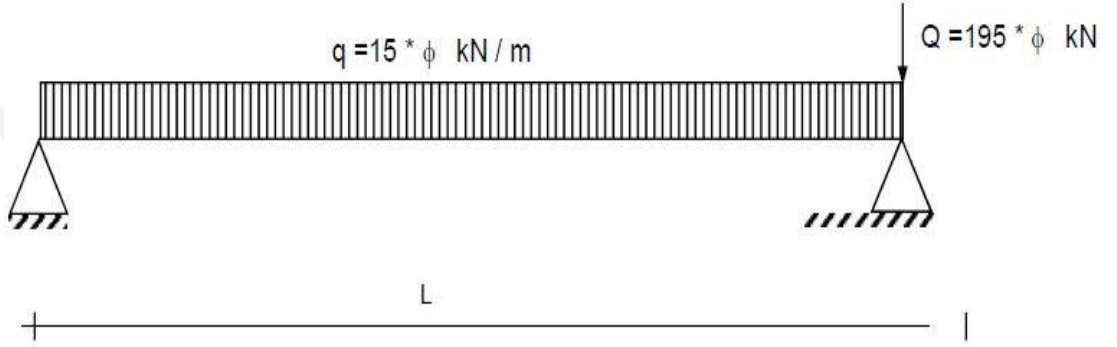


Şekil 2.3 H₃₀-S₂₄ standart kamyon yükünün kesme kuvveti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi

H₃₀-S₂₄ standart kamyon yükünün en yüksek moment ve en düşük kesme kuvvetini değerlerini verecek şekilde yerleştirilmiş tipleri sırası ile verilmiştir.



Şekil 2.4 H₃₀-S₂₄ standartlarında şerit yükünün eğilme momenti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi



Şekil 2.5 H₃₀-S₂₄ standartlarında şerit yükünün kesme kuvveti için basit kiriş üzerindeki elverişsiz yerleşimi

Öngörilmeli kiriş yapılarının hareketli yük etkisi, yukarıda verildiği gibi H₃₀-S₂₄ standartlarında kamyon yükü ve şerit yükünün en yüksek eğilme momenti ve en düşük kesme kuvveti için ayrıca hesaplanacak olup, bu hesaplanan değerlerin en büyük olanı iç tesir olarak kabul edilecektir (Aydın, 2006).

2.4.2.1. Hareketli Yüklerin Azaltılması

AASHTO standartlarına göre, maksimum etkilerin birden fazla şeride aynı anda yüklenmesi ile elde edilen durumların tam yük ihtimalinin çok zayıf olduğu göz önünde bulundurularak, hareketli yükten doğan etkileri aşağıdaki tabloda verilecek katsayılarla azaltılabilir (Aydın, 2006).

Tablo 2.4 Trafik şeridine göre hareketli yük azaltma katsayıları

Trafik Şerit Sayısı	Azaltma Katsayıları
Bir veya iki şerit için	%100
Üç şerit için	%90
Dört veya daha fazla şerit için	%75

2.4.2.2. Hareketli Yüklerin Kirişlere Dağılımı

Öngerilmeli kirişli yapılarda kirişlerin boyutlandırılabilmesi için yapıya ait en büyük kesit tesirlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesabın yapılabilmesi için yapıdan kirişler üzerine aktarılabilen yüklerin değerleri bilinmelidir (Atmaca, 2018). Boylama kirişlerinin hesabını yaparken hareketli yükler boyuna yönde dağılmadığı varsayılacaktır. Bütün iç ve dış boylama kirişlerine yükün eşit miktarda paylaştığı varsayılarak, bütün boylama kirişlerinin bir tanesine gelen hareketli yük miktarı AASHTO yönetmeliğinde,

$$\text{Yük katsayısı} = \frac{S}{D}$$

olarak verilmiştir. Formülasyon üzerinde verilen S kirişler aks ara mesafesini D, köprü tipine göre belirlenen katsayılar yardımı ile hesaplanabilmektedir. Şöyle ki ilgili standartta mm cinsinden,

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

bağıntısı ile beraber hesaplanabilecektir. N_L , trafik şerit sayısını belirtmektedir (Aydın, 2006), C ise hareketli yükün öngerilmeli kirişe aktarımında kullanım gören rijitlik parametresi olarak tanımlanmaktadır (Kunt, 2019).

$$C=K\left(\frac{W}{L}\right), \quad \frac{W}{L} < 1$$

$$C=K, \quad \frac{W}{L} \geq 1$$

Bağıntısıyla hesaplanabilecektir. Formülasyonda verilen W yapının toplam genişliği, L yapının kirişlerinin hesap boyunu, K ise kiriş ve köprü cinsi ile bağlantılı katsayı olarak çizelgede gösterildiği gibi alınacaktır.

Tablo 2.5 Köprü ve kiriş türüne göre K katsayıları

Köprü Tipi	Kiriş Tipi	K
Bitişik Düzen Kirişli	Boşluksuz Dikdörtgen Kirişler	0,7
	Dairesel Boşluklu Dikdörtgen Kirişler	0,8
	Kutu Kesit Kirişler	1,0
	U veya tek ya da çok kollu T kirişler	2,2

Bu tez kapsamı içerisinde K katsayısı 2,2 olarak kabul görecektir.

2.4.3. Dinamik Etki

Yapıdan geçen taşıtların dinamik etkilerini hesaba katabilmek için, şerit yüklerinden ve standart kamyon yüklerinden meydana gelen gerilmeler, dinamik etki katsayısı ile çarpılırlar. AASHTO standartlarında dinamik etki katsayısı (Φ) aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$\Phi = 1 + \frac{15}{L+37}$$

Bu denklem ile hesaplanan dinamik etki katsayı değeri (ϕ) 1,30'a eşit ya da küçük olmalıdır (Aydın, 2006).

2.5. Kiriş En Kesit Özellikleri

Öngerilmeli beton kirişlerin en kesit özelliğinin belirlenebilmesi yapının yapım seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. En kesit özelliklerinin bilinmesi için bu seviyelerin aşamalarının bilinmesi gerekmektedir. Kirişin atalet ve mukavemet momenti, en kesit alanı gibi bir takım kesit özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir (Aktaş, 2010). Kirişler yükleme seviyelerine göre ana elemanlardan bazen kiriş tek başına bazen de tabliye ile beraber çalışmaktadır. Öngerilmeli kiriş tek başına çalıştığı kesitlere prefabrike kesit, tabliye ile beraber çalıştığı kesitlere ise kompozit kesitler denilmektedir. Kiriş boyutlandırılması aşamasında prefabrik ve kompozit kesitlerin tek tek hesaplanması gerekmektedir (Aydın, 2006).

Öngerilmeli kirişlere sahip yapının yapım seviyeleri aşağıdaki belirtilen gibi 3 kısma ayrılmaktadır.

2.5.1. Aktarma Dönemi

Öngerilmeli kirişin aktarma dönemi, bir ucunda pistonların bir diğer ucunda ankrajların bulunduğu kalıp içerisindeki kılıflardan geçirilen öngerme kablolarının, beton dökümü gerçekleşip kür işlemi tamamlandıktan sonra yavaş bir şekilde pistonlar kontrolünde bırakılıp öngerme kuvvetinin betona aktarılmasıyla tamamlanmaktadır.

Bu süreç içerisinde etki altında kalan yükler öngerilmeli kirişin öz ağırlığı ve aktarılan öngerme kuvvetidir. Bu yükler prefabrik kesit ile karşılanmaktadır. Öngerme kayıpları prefabrik kesit olduğundan ötürü minimum seviyededir. Betonun elastik kışalmasından dolayı ortaya çıkan öngerilme kaybı ortaya çıkmaktadır (Atmaca, 2018).

2.5.2. Tabliye Betonu Prizini Tamamlamadan Önceki Dönem

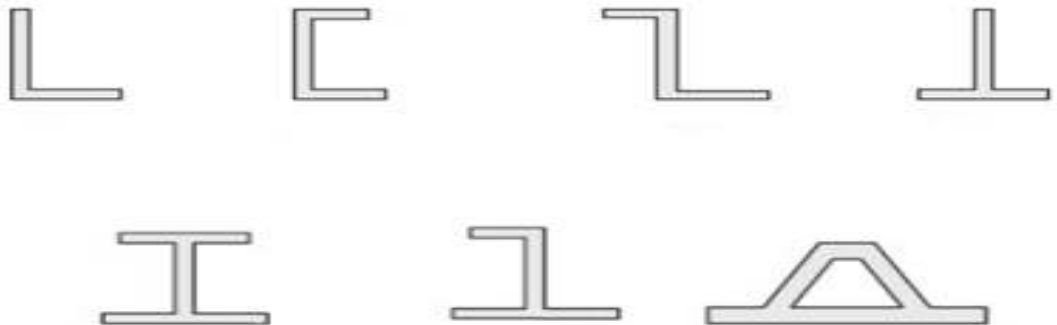
Tabliye betonu prizini tamamlamadan önceki dönem, yapı lokasyonunda prefabrik kirişlerin montajı sonrası üzerine dökülen tabliye betonunun priz almadan önceki süreci kapsar. Aktarma döneminde taşıdığı öz ağırlık ve öngerme kuvvetine ek olarak tabliye betonunun ağırlığını da taşımaktadır. Dolayısı ile bu yükler de prefabrik kesit ile karşılanmaktadır. Betonun elastik kısılmasından kaynaklanan öngerilme kayıplarına ek olarak, betonun sünme ve rötresi ile beraber öngerme kablosunun gevşemesi gibi meydana gelebilecek olan uzun dönem sürebilecek kayıplarda ortaya çıkabilmektedir (Atmaca, 2018).

2.5.3. Servis Dönemi

Servis döneminde, yapı proje aşamasında ki ön görülen yüklerin tamamının taşındığı dönemdir. Prizi tamamlanan tabliye betonunun prefabrik kirişle beraber çalışıp kompozit kiriş en kesitini meydana getirmektedir. Öngerilme kayıpları maksimum seviyeye ulaşmış olup sahip olduğu tüm yükler kompozit kiriş üzerinden karşılandığı kabul edilmektedir (Atmaca, 2018).

2.5.4. Prefabrik ve Kompozit Kiriş Enkesiti

Aktarma dönemi ve tabliye betonunun priz öncesi döneminde etkisi altında kalınan yükleri taşıyan yapı malzemesine prefabrik kiriş denilmektedir. Yerinde döküm olarak gerçekleştirilen öngerilmeli kirişli beton köprü tabliyelerinin, prizi tamamlandıktan sonra belli bir bölüm prefabrik kiriş ile birlikte çalışıp kompozit kiriş en kesitini ortaya çıkarmaktadır. Kiriş boyutlandırılmasında prefabrik ve kompozit kesit için ayrı ayrı kesit özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Atmaca, 2018).



Şekil 2.6 Prefabrike ve kompozit kiriş en kesitleri

2.6. Öngerilmeli Kiriş Kesit Tesirlerinin Hesaplanması

Çalışma kapsamında planlanan köprünün öngerilmeli beton bir kirişi basit mesnetli olarak moment aktarmadan çalışacak olup, köprü üstyapısına etki eden kirişin zati ağırlığı, kaplama ve tabliyenin ağırlıkları ve diğer etki edecek olan sabit yükler kirişin üzerinde çizgisel eşdeğer yayılı yük etkisinde alınarak, eşdeğer yayılı yük ile yüklü basit kiriş olarak iç kuvvetler bulunmaktadır. Hareketli yükler, önceden belirtilen kamyon ve eşdeğer şerit yüklemesine ait elverişsiz yerleşimde olduğu üzere kiriş kesit tesirleri hesaplanabilmektedir (Aydın, 2006).

Öngerilmeli beton kirişlerin kesit kuvvetlerinin hesabında; öngerilmeli beton elemanların, eğilme ve bileşik eğilme etkileri altında çatlamamış kesit olarak davrandıkları, şekil değiştirme öncesi çubuk ve düzlem eksenine dik olan kesitlerin şekil değiştirme sonrasında da düzlem ve çubuk eksenine dik kalarak her durumda kesitteki şekil değişimlerinin kesit derinliği boyunca yayılışının tarafsız eksen ile orantılı olduğu varsayılmaktadır, yani ‘Bernoulli-Navier hipotezi’ geçerlidir. İşletme limitine göre yapılan hesaplarda beton ve çelik lineer elastik davranır, bu hususta da ‘Hooke kanunu’ geçerlidir (Atmaca, 2018).

2.7. Ön Germe Kayıplarının Hesaplanması

Ön germe kuvveti, yapı elemanında meydana gelecek olan sabit, hareketli ve diğer yüklerin ön germeli yapı elemanında oluşturacağı çekme gerilmelerini azaltabilmesi ya da oluşan çekme gerilmesini karşılayıp ortadan kaldırması amacı ile kullanılmaktadır. Bu yükler altındaki kabloda ön germe kuvveti ani ya da zaman içerisinde değişim göstermektedir. Bu değişimler ön germe kayıpları olarak ele alınıp; betonun elastik kısılması, sürtünme kaybı, ankraj oturması, sünmesi, ön germe kablosunun relaksasyonu ve sünmesi sebep olmaktadır (Atmaca, 2018). Bu kayıpların hesabı AASHTO’ya göre hesaplanabilmektedir. Yalnız ön germe kayıpları; ön germeli kiriş boyutlarına, ön germe kuvvetine, çevre koşullarına, kullanılan malzemenin özelliklerine, yükleme durumu ve etkiyecek yük parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Kunt, 2019).

Ön germe kayıplarının tasarımı, servis yükleri altında yapı elemanının gerilme değerleri betonun emniyet gerilme sınır değerini geçip geçmediğinin kontrolünü sağlayabilmek için doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önem arz etmektedir. Ön germe kaybı gerçek kayıptan az olarak hesaplanması durumunda kiriş üzerinde yetersiz ön germe kablosu kullanılır ve sonucunda yapı elemanında olmaması gereken çatlaklar meydana gelir. Eğer ön

germe kablosu gerçek kayıptan çok olarak hesaplanması durumunda yapı elemanında kesit artışına sebep olur ve buda maliyet artışı ile karşımıza çıkar (Atmaca, 2018). Bu bölümde ön germe kayıpları AAHTO LRFD 2012' ye göre hesaplanacaktır.

Ön germeli yapı elemanlarında ön çekme ve ard çekme yapım metotları birbirinden farklı oldukları için oluşacak olan ön germe kayıpları da farklı olacaktır. Ön çekme metodundan meydana gelen yapı elemanlarında; betonun elastik kısılması, rötresi, sünmesi ve çeliğin gevşemesi neden olur. Ard çekmeli metottan oluşan yapı elemanında ön germe kaybı olarak sürtünme kaybı ve ankraj oturma kayıpları da oluşmaktadır.

Ön germeli betondaki toplam gerilme kaybı denklemde verilen ifade yardımı ile hesaplanabilir.

$\Delta f_s = SH + ES + CR_c + CR_s$, burada ki Δf_s toplam ön germe kaybını, SH betonda rötreten (büzülme) dolayı oluşan ön germe kaybını, ES betonun elastik kısılmasından kaynaklı olarak oluşan ön germe kaybını, CR_c betonda sünmeden kaynaklı ön germe kaybını ve CR_s ön germe donatısının gevşemesinden kaynaklı oluşan ön germe kaybını ifade etmektedir.

2.7.1. Sünme Kaybı (Beton)

Sabit gerilme altında zaman geçtikçe, betonun gösterdiği yavaş fakat ilerleyen deformasyon sünme olarak tanımlanabilmektedir. Sünmeden kaynaklanan öngerilme kaybı aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$CR_c = 12f_{cir} - 7f_{cds}$$

bağlantıdaki CR_c sünme kaybını, f_{cds} öngerilme kuvveti uygulandığında sabit yüklerin dışındaki diğer bütün kalıcı yüklerden öngerilmeli kirişin donatılarının ağırlık merkezinde oluşan beton gerilmesini, f_{cir} 'de öngerilme aktarımı ardından kalıcı yük ve öngerilmenin kuvveti nedeni ile öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşacak olan betonun gerilmesini ifade etmektedir ve bu gerilme aşağıdaki denklem hesaplanabilmektedir.

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

M_{g2} öngerilmeli kiriş ve tabliye ağırlığının eğilme momenti, M_{g3} öngerilmeli kiriş ve tabliye ağırlığı dışında bütün zati yüklerinin etki sonucu meydana gelen eğilme momenti, e_{ci} öngerilme donatısının öngerilmeli kirişe olan dış merkezliğini, I_{ci} öngerilmeli kirişin kesitinin atalet momenti olarak tanımlanmaktadır (Kunt, 2019).

$$f_{cir} = \frac{F_i}{A_i} + \frac{F_i \cdot e_i^2}{I_i} - \frac{M_{gl} \cdot e_i}{I_i}$$

denklemdaki bağlantıda e_i öngerilme çeliğinin öngerilmeli kirişe dış merkezliğini, M_{gl} öngerilmeli kirişin zati yükünden kaynaklı oluşan momenti, A_i öngerilmeli kiriş kesit alanını, I_i 'de öngerilmeli kirişin atalet momenti olarak ifade edilmekte. F_i öngerilmeli kirişe verilecek ilk öngerilme kuvvetidir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$F_i = A_{ps} \cdot f_{pi}$$

bu Formülasyonda gösterilen A_{ps} öngerilme donatı alanı, f_{pi} ise AASHTO standartlarına göre yeterli yaklaşımla gerilmesi azaltılmış çelikler için;

$$f_{pi} = 0,63 \cdot f_s'$$

düşük gevşemeli çelikler için ise;

$$f_{pi} = 0,69 \cdot f_s'$$

olarak dikkate alınacaktır.

2.7.2. Sünme Kaybı (Çelik)

Öngerilme donatısı sabit yük altında sünme ve relaksasyon yapabilmektedir. Sünme değeri yapının hizmet edeceği çevresel ve fiziksel şartlara bağlı olarak imalatı sırasında belirlenmektedir.

2.7.3. Büzülme (Rötre) Kaybı

Beton içerisinde bulunan suyun zamanla kimyasal veya fiziksel sebeplerle azalması betonda zamanla şekil değişimine sebep olur. Bu durum rötre olarak tanımlanabilmektedir. Beton daha yüksek dayanıma sahip olduğu için ve de iyi koşullarda üretildiği için rötre kaybı normal üretim betonlara göre daha az olacaktır. Betonda büzülmeden dolayı oluşan kayıp (SH) aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$SH = 117 - 1,03RH$$

bu denklemde RH, yıllık ortalama bağıl nem oranını ifade etmektedir.

2.7.4. Elastik Kısılma Kaybı

Öngerme kuvveti aktarım sırasında ön çekmeli ya da ard çekmeli elemanda, öngerilme çeliği etrafındaki betonda oluşturacağı basınçtan ötürü bir kısılma meydana gelmektedir. Bu kısılma miktarı ile doğru orantılı olarak öngerilme kuvveti de eksilmektedir. Elastik sınırlar içerisinde kalındığından ötürü aderanslı elemanlarda çelik sınırlarındaki betonun birim deformasyonu çelikte de aynı değerde kayıp yaratır. Aderanssız elemanlardaysa bu kaybı toplam kısılmanın uzunluğa bölümü ile elde edilip ortalama birim deformasyon değerinden hesaplanır (Keyder, 2013).

$$ES = \frac{E_s}{E_c} f_{cir}$$

bu denklemde ES elastik kısılmadan meydana gelen kaybı, E_s öngerilme çeliği elastisite modülü E_c betonun öngerilme aktarma anında meydana gelen elastisite modülünü ve f_{cir} 'de öngerilme aktarımı ardından kalıcı yük ve öngerilmenin kuvveti nedeni ile öngerilme donatılarının ağırlık merkezinde oluşacak olan betonun gerilmesini ifade etmektedir (Aydın, 2006).

2.7.5. Öngerilme Donatısının Gevşeme Kaybı

Zaman içerisinde öngerilme donatısında meydana gelen gerilmedeki azalma olayına donatının gevşemesi denilmektedir. Öngerilme donatısının gevşeme kaybı (CR_s), gerilmenin oranına bağlı olarak imalat aşamasında verilmektedir. Bu değer bilinmediği durumlarda gerilme azaltılmış çelikler için;

$$CR_s = 138 - 0,4 ES - 0,2 (SH + CR_c) \quad (\text{Birimi: Mpa})$$

denklemleri hesaplanabilmektedir ve düşük gevşemeli çelikler için ise;

$$CR_s = 34 - 0,1 ES - 0,05 (SH + CR_c) \quad (\text{Birimi: Mpa})$$

denklemleri hesaplanır. CR_s öngerilme donatısı gevşeme kaybı, ES elastik kısılma kaybı, SH büzülme kaybı, CR_c sünme kaybını ifade etmektedir.

2.7.6. Ankraj Kaybı

Ankraj kaybı, kilit mekanizmaları ya da ankraj bloğunda meydana gelen aşınmadan kaynaklı oluşan kayıplardır. Ankraj kayıplarının önüne geçilebilmesi için düzenli olarak

ankraj bloğunun gözetimde olması ve dişleri sıyrılan kilitlerin belirli aralıklarla yenilenmesi gerekmektedir.

2.7.7. Sürtünme Kaybı

Aderanslı ard çekmeli öngerilmeli kirişlerde, öngerilme donatısı ile etrafındaki beton ile arasında oluşan sürtünmeden kaynaklanan kayıplar oluşmaktadır. Sürtünme kayıpları yerel eğriliklere ve ard çekme kabloşunun şekline bağlıdır. Kablo şeklinde oluşan parabolik, dairesel ya da kırık çizgiler halinde olan eğrilikler, istenilen eğriliktir. Yerel eğriliklerse ard germe kablosu yerleştirilirken oluşabilen istenmeyen düzensizliklerdir. Aşağıdaki denklem ile hesabı yapılabilir.

$$dP = K.P.Dx$$

bu denklemdeki dP uzunluk için öngerilme kuvvet kaybını, K yerel eğrilik katsayısını, dx sonsuz küçüklükteki uzunluğu ifade etmektedir.

2.8. Öngerilmeli Kirişlerin Gerilme Hesabı

Bu çalışma kapsamında gerilme analizleri öngerilmeli kirişlerin imalatı sırasında etkilendiği yük ya da yükler, oluşabilecek öngerilme kayıpları, kesit özellikleri açısından farklı gerilmeler altında oluşturulacaklardır. Bu gerilmeler yükleme durumlarına göre dört bağımsız durum altında incelenebilecektir. Yapılacak olan durum değerlendirmeleri ve bu değerlendirmeler ile elde edilecek olan alt ve üst liflerdeki gerilmeler sırası ile aşağıda anlatılmaktadır.

2.8.1. Birinci Denetim

Öngerilmeli kirişe öngerilmenin ilk verildiği an dikkate alınması gereken durumdur. Bu denetim kapsamına öngerilme kuvveti ve kirişin öz ağırlığı girmektedir. Öngerilmenin verildiği ilk an dikkate alındığından ötürü yalnız elastik kısalma kaybı mevcuttur, zamana bağlı olan öngerilme kayıpları ise çok düşük seviyededir. Birinci denetim aşamasında öngerilmeli kirişin alt ve üst ucunda ulaşabilecek gerilmeler sırası ile;

$$\sigma_{b1} = \frac{\eta_1 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_1 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{M_{g1}}{W_{bi}}$$

$$\sigma_{t1} = \frac{\eta_1 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_1 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{M_{g1}}{W_{ti}}$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemlerde ki, η_1 minimum düzeyde öngerilme kaybı (yalnız elastik kısalma), A_i öngerilmeli kirişin en kesit alanı, P öngerilmeli kiriş kesitindeki toplam öngerilme kuvveti, W_{bi} öngerilmeli kiriş alt kenarının mukavemet momenti, W_{ti} öngerilmeli kirişin üst kenarına göre mukavemet momentini göstermektedir.

2.8.2. İkinci Denetim

Birinci denetimdeki öngerilme kuvveti ve öngerilmeli kiriş öz ağırlığına ek olarak tabliye betonunun ağırlığını da öngerilmeli kiriş tarafından taşınması kabul görmektedir. İkinci denetim aşamasında öngerilme kayıpları maksimum seviyede olduğu varsayılmaktadır. Bundan dolayı elastik kısalma kaybına ilave olarak sünme, büzülme ve öngerilme donatısının gevşeme kaybının da olduğu düşünülecektir. Bu aşamada alt lif ve üst liflerde meydana gelen gerilmeler sırası ile;

$$\sigma_{b2} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{M_{g2}}{W_{bi}}$$

$$\sigma_{t2} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{M_{g2}}{W_{ti}}$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemde görülen η_2 maksimum seviyede öngerilme kayıplarını ifade edip tüm öngerilme kayıplarını ifade etmektedir.

2.8.3. Üçüncü Denetim

Üçüncü denetim aşamasında hareketli yük dışındaki, öngerilmeli kiriş ve tabliye ağırlığının prefabrik kesit tarafından, bordür ağırlığı, korkuluk ağırlığı ve asfaltın kaplama ağırlıkları kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilecektir. Oluşabilecek tüm öngerilme kayıpları maksimum seviyededir. Prefabrik kesitin alt lifinde ve üst liflindeki oluşan gerilmeler ile kompozit kesitin üst ucunda oluşabilecek gerilmeler sırası ile;

$$\sigma_{b3} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} + \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{M_{g2}}{W_{bi}} - \frac{M_{g3}}{W_{bci}}$$

$$\sigma_{t3} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{M_{g2}}{W_{ti}} + \frac{M_{g3}}{W_{tci}}$$

$$\sigma_{ts3} = \frac{M_{g3}}{W_{tsi}}$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemde W_{bci} uygun kompozit öngerilmeli kirişin alt kenarına göre mukavemet momentini, W_{tci} uygun kompozit öngerilmeli kirişin üst kenarına göre mukavemet momentini ve W_{tsci} tabliye üst kenarına göre mukavemet momentini göstermektedir.

2.8.4. Dördüncü Denetim

Dördüncü denetim aşamasında hareketli yükler de dahil olmak üzere tüm yüklerin dahil olduğu varsayılmaktadır. Tabliye ile kiriş ağırlıklarının prefabrik kesit, diğer tüm ağırlıkların ise kompozit kesit tarafından karşılandığı ve öngerilme kayıplarının maksimum seviyede olduğu kabul edilmektedir. Bu denetim için sırası ile, prefabrik kesit alt lifinde ve üst lifinde meydana gelecek olan gerilmeler ve kompozit kesit üst lifinde meydana gelebilecek gerilmeler aşağıda denklemlerde verilmiştir.

$$\sigma_{b4} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{bi}} - \frac{M_{g2}}{W_{bi}} - \frac{M_{g3} + M_h}{W_{bci}}$$

$$\sigma_{t4} = \frac{\eta_2 \cdot P}{A_i} - \frac{\eta_2 \cdot P \cdot e_i}{W_{ti}} + \frac{M_{g2}}{W_{ti}} + \frac{M_{g3} + M_h}{W_{tci}}$$

$$\sigma_{ts4} = \frac{M_{g3} + M_h}{W_{tsci}}$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemde M_h hareketli yüklerden dolayı oluşan maksimum momenti göstermektedir.

2.9. Eğilme Durumu Taşıma Gücü Denetimleri

Eğilme durumu taşıma gücü denetimi tabliye betonu ile öngerilmeli kiriş betonundan oluşan kompozit ve prefabrik kesit için ayrı ayrı gerçekleşecektir. Eğilme elemanlarında, eğilme durumu taşıma gücü değeri, en elverişsiz yük tertibinden elde edilen hesap eğilme momenti değerinden büyük olması gerekir. Dikdörtgen ve tablalı kesitler için eğilme durumu taşıma gücü direnme momentleri hesaplanacaktır (Aydın, 2006).

2.9.1. Dikdörtgen Kesitlerin veya Basınç Bölgesi Tabla İçinde Kalan ($a \leq t$) Tablalı Kesitlerin Taşıma Gücü Moment Esasları

AASHTO standartlarına göre dikdörtgen kesitler için eşdeğer dikdörtgen basınç bölge derinliği aşağıdaki formülizasyon ile hesaplanabilmektedir;

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{su}^*}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

bağıntısı ile hesaplanabilen bu durumdaki b tablalı kesitlerin tabla ya da dikdörtgen kesit genişliğini, f_{su}^* öngerme çeliğinin azaltılmış hesap dayanımını, f'_c beton karakteristik basınç dayanımı ve A_{ps} toplam öngerme kablosunun alanı olarak tanımlanmaktadır. Dikdörtgen kesitli tablalar için taşıma gücü direnme momenti;

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

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Buradaki ϕ direnimsizlik katsayısı olarak tanımlanır ve de f_{su}^* ifadesi;

$$f_{su}^* = f'_c \left[1 - \frac{\gamma}{\beta_1} p_p \frac{f'_s}{f'_c} \right]$$

olarak açıklanabilmektedir. Bu denklemde p_p öngerme donatısı oranı, f'_s öngerme çeliğinin karakteristik kopma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Öngerme donatı oranı;

$$p_p = \frac{A_{ps}}{bd}$$

bu denklemdeki d ifadesi basınç gerilmesinin en büyük olduğu noktadan öngerilme kuvvetinin faydalı yüksekliğini ifade etmektedir.

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

Basınç bölgesi tabla eşdeğer dikdörtgen basınç bölgesi derinliği;

$$a = \frac{A_{sr} \cdot f_{su}^*}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_w}$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir. b_w tablalı kesit gövde genişliği, A_{sr} tablalı kesitin gövde bölümüne denk gelen öngerilme donatı miktarının alanı olarak tanımlanmaktadır. Bu denklem ile hesaplanabilen değer, tablalı kesitin başlık kalınlığından büyük olan kesitler için taşıma gücü direnme momenti değeri denklemde görüldüğü gibi,

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

hesaplanabilmektedir. Bu denklemde ki A_{sr} ifadesi;

$$A_{sr} = A_{ps} - A_{sf}$$

denklemini yardımı ile hesaplanabilir. Bu denklemdeki A_{sf} ifadesi tablalı kesit başlığının gövde bölümü dışarısında kalan kesimlerinin basınç dayanımına karşılık gelen öngerilme donatısı miktarının alanını göstermektedir ve bu ifade;

$$A_{sf} = 0,85 \cdot f'_c \cdot (b - b_w) \cdot \frac{t}{f_{su}^*}$$

denklem yardımı ile hesaplanabilmektedir (Aydın, 2006). Öngerilmeli kiriş kesit için taşıma gücü direnme moment değeri kesite tesir eden faktörlü moment değerinden büyük olmalıdır. Öngerilmeli kiriş kesit olarak çalışma başlamadan önce kiriş öz ağırlığı ve tabliye ağırlığının tesir etmesiyle faktörlü moment değeri M_d aşağıdaki denklem ile bulunabilmektedir (Kunt, 2019).

$$M_d = 1.3M_{g2}$$

2.10. Öngerme Donatısı Süneklik Sınır Şartları

2.10.1. Maksimum Öngerilme Donatısı

AASHTO standartına göre maksimum öngerilme donatısı ile ilişik koşullar 2005 yılında yapılan çalışma sonucunda kaldırılmıştır. Maksimum öngerilme donatısı kontrolüne ihtiyaç duyulmamaktadır (Kunt, 2019).

2.10.2. Minimum Öngerilme Donatısı

Öngerilmeli kesitindeki öngerilme ve betonarme donatı miktarı, kritik kesitteki çatlama moment değerinin 1,2 katına eşit ya da 1,2 katından daha fazla bir direnme momenti oluşumunu sağlayacak düzeyde olmak zorundadır. Kesit çatlama momenti değeri kompozit kesitler için;

$$M_{cr,c}^* = W_{bci} \cdot (f_r + f_{pe}) - M_{gl} \cdot \left(\frac{W_{bci}}{W_{bi}} - 1 \right)$$

denklemini yardımı ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde ki W_{bci} ideal kompozit kesit kiriş alt kenar mukavemet momenti, M_{gl} öngerilmeli kirişin zati ağırlığı ve tabliyenin ağırlığından

dolayı oluşan eğilme momenti ve f_r kesit çatlama modülünü ifade etmektedir. Kesit çatlama moment değeri prefabrike kesitler için ise;

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

denklemleri yardımı ile hesaplanabilmektedir. Denklemlerdeki W_{bi} ideal prefabrike kesit kiriş alt lifi için mukavemet momentini ifade eder. Kesit çatlama gerilmesi f_r birimi MPa ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır;

$$f_r = 0,62 \cdot \sqrt{f_c'}$$

f_{pe} ise, bütün öngerilme kayıplarının minha edildikten sonra kesitin alt ucunda yalnız öngerme kuvveti sebebiyle ortaya çıkan basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Birimi MPa ve aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanmaktadır.

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

bu denklemdeki P kesitin toplam öngerme kuvveti, η_2 maksimum düzey öngerilme kayıp oranı, A_i prefabrik kiriş en kesit alanı, e_i prefabrik kesit öngerilme çeliği dış merkezliği olarak tanımlanmaktadır.

2.11. Kesme Dayanımı Hesabı

Öngerilmeli kiriş kesitinin kesme dayanımı hesabı, öngerilmeli beton kesme dayanımı ve kayma donatısı kesme dayanımına bağlı olarak;

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

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Burada V_u hesaplanacak olan kesitin kesme kuvveti, V_c itibari beton kesme dayanımını, V_s ise kesme donatısından karşılanan itibari kesme dayanımı(donatının taşıdığı) olarak tanımlanmaktadır (Aydın, 2006).

2.11.1. Beton Kesme Dayanımı Hesabı

Kesme kuvveti ve kesme momentinin birleşimi sonucu diyagonal çatlakların oluştuğu andaki hareket kesme dayanımıdır. Betondan elde edilen kesme taşıma gücü V_c , hesap edilen V_{ci} ve V_{cw} değerlerinden az olanı dikkate alınacaktır. Eğik çatlakların oluştuğu andaki kesme dayanımı V_{ci} ;

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

denklemleri yardımı ile hesabı yapılabilir. V_d zati yüklerden dolayı oluşan ve yük katsayıları ile çarpılmamış kesme kuvveti, V_i zati yük hariç yük katsayıları ile çarpılmamış dış yüklerin olduğu kombinasyonun etkisi sonucu oluşan maksimum tasarım kesme kuvvetini, M_{cr} kesitte eğilme çatlağına sebep olan zati yüklerin haricindeki dış yüklerden kaynaklanan çatlama momentini ve M_{max} zati yükler haricindeki yük katsayılarıyla çarpılmış dış yüklerin olduğu kombinasyonun etkisi sonucu oluşan maksimum hesap momentini ifade etmektedir. Denklemlerdeki birimler mm ve N olarak kabul edilmektedir. Bu denklemde hesap edilen V_{ci} değeri $0,14\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$ bağıntısından küçük olmamalı ve d ifadesi h kompozit kesit yüksekliğini göstermek kaydıyla $0,8h$ 'dan küçük olmayacak şekilde kullanılacaktır. Burada kullanılan kesitte dış yükler nedeniyle oluşan çatlama momenti M_{cr} ;

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

denklemleri yardımı ile hesaplanabilmektedir. Birimi Nmm olarak kabul edilmektedir. Bağlantıdaki Y_t kompozit brüt kesit ağırlık merkezinin kesit ağırlık merkezinin kesit alt ucuna olan mesafesini belirtmektedir. f_d sabit yük nedeni ile kesit alt ucunda oluşan çekme gerilmesini göstermekte olup hesap yapılan bölüm mesnet bölgesinde olduğu için sıfır alınacaktır.

Gövdede oluşan asal çekme gerilmeleri maksimum seviyede olması dolayısıyla diyagonal çatlakların oluştuğu andaki beton kesme dayanımı V_{cw} olarak tanımlanmakta ve

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

denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Fakat bu formülizasyon da d değeri $0,8h$ değerinden küçük alınmamalıdır. f_{pc} kompozit brüt kesit ağırlık merkezinde tüm kayıpların oluşumundan sonra dış yükler sebebiyle oluşan beton basınç gerilmesini, V_p öngerme kuvvetinin düşey bileşenini ifade etmektedir. V_p değeri öngerme telleri düz çekileceği varsayılarak yani öngerilmeli kirişe kiriş boyunca yerleştirileceği kabul edilip sıfır alınacaktır (Aydın, 2006).

Yukarıda belirtilen denklemlerde, kiriş mesnet kesitinde kılıflamadan ötürü öngerme kuvvetinin yarıya indiği kabul edilecektir.

2.11.2. Kesme Donatısı Dayanımı Hesabı

Kesme donatısı dayanımı V_s ;

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{sy} \cdot d}{s}$$

denklemini yardımı ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde f_{sy} kesme donatısının karakteristik akma dayanımını, A_v ise ölçülü bir s aralığındaki kesme donatısının alanını ifade etmektedir. Kesme donatısı olan V_s ifadesinin birimi MPa olacak şekilde $0,66\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$ denklemi ile hesaplanan değerden büyük alınmamalıdır. Bu denklemdeki d değeri $0,8h$ değerinden yine az olmamalıdır.

Minimum kesme donatısının alanı A_v olmak üzere ve birimi mm^2 olmak üzere;

$$A_v = \frac{0,34 \cdot b_w \cdot s}{f_{sy}}$$

denklemini yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki f_{sy} değeri MPa birimindedir.

2.11.3. Kiriş-Döşeme Bağlantısı Kesme Denetimi

Öngerilmeli kiriş döşeme bağlantısı için kesme denetimi, döşeme ile öngerilmeli kirişin birleştiği noktada öngerilmeli kiriş üzerinde AASHTO 'ya uygun şekilde yapılmaktadır (Kunt, 2019).

$$V_u \leq \phi V_{nh}$$

V_{nh} , nominal yatay kesme kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Kesite en az etriye yerleştirilip, temas yüzeyini temizleyip ve öngerilmeli kiriş üzerine yaklaşık 6mm yüksekliğinde pürüzlendirildiğinde ise nominal yatay kesme kuvveti değeri V_{nh} birimi kN kabul edilip,

$$V_{nh} = 2413b_1d$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan b_1 ifadesi öngerilmeli kiriş üst flanş genişliğini ifade etmektedir.

2.12. Sehim Kontrolü

Bir yapı elemanının basit eğilme altındaki davranışının önceki durumu ile elastik eğri durumu arasındaki deformasyon miktarına sehim denilmektedir. Öngerilmeli kirişler betonarme kirişlere kıyasla daha fazla yük altında oldukları için daha fazla sehime

uğramaktadırlar. Öngerilmeli kirişlerde meydana gelen bu sehimler genel itibariyle ani sehim ve uzun süreli sehim olmak üzere iki ayrı grupta incelenmelidir. Öngerilmeli kiriş yapım sürecindeki aktarma döneminde oluşacak olan ani sehim, tabliye prizini tamamlamadan önceki ve servis döneminde oluşacak olanda uzun süreli olarak tanımlanmaktadır.

Ani sehim, öngerilmeli kirişin aktarma döneminde oluşmaktadır. Aktarma dönemi öngerilmeli kirişte öngerilme kuvveti ile öngerme kablosunun dış merkezliliğine bağlı olacak şekilde ters sehim oluşabilmektedir. Aktarma döneminde öngerilmeli kirişte oluşacak olan bu ters sehim, öngerilme kuvvetinden ve öngerilmeli kiriş zati ağırlığından kaynaklanan sehimin toplamından meydana gelmektedir. Öngerilmeli kiriş yalnız zati ağırlığı var iken, aşağı yönde bir sehim oluşturacaktır (Atmaca, 2018).

AASHTO aktarma dönemi ve öngerilmeli kirişin imalatı esnasında yüklemeler etkisi ile meydana gelebilecek olan maksimum sehimin M_1 mesnet açıklığı olmak üzere $M_1/400$ değerinden az olması bildirilmektedir. Hareketli yük ve bu yüklerin sebep oldukları dinamik etkiler altında, köprü üst yapı kirişlerde ortaya çıkan maksimum sehimin açıklığa oranı ise $M_1/800$ 'den az olması gerektiğini, meskûn mahal bölgelerde bulunan köprüler için $M_1/1000$ oranından az olması tavsiyelerle bildirilmektedir.

2.12.1. Birinci Denetim

Öngerme kuvveti altında iken oluşacak olan ters sehim(f_{1i}), öngerilmeli kiriş zati ağırlığı halindeyken(f_{1ii}), kirişteki mevcut oluşan sehim aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$f_{1i} = -\frac{P \cdot e_i \cdot L_1^2}{8 \cdot E_c \cdot I_i}$$

$$f_{1ii} = \frac{5 \cdot g_1 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i} - \frac{24 \cdot g_1 \cdot L_1^2 \cdot C^2}{384 \cdot E_c \cdot I_i}$$

$$f_1 = f_{1i} + f_{1ii}$$

denklemlerdeki P kiriş orta bölgesi gerilme kuvveti, L_1 kirişin mesnet açıklık uzunluğu, e_i P kuvvetinin dış merkezliğini, E_c prefabrik kiriş betonunun 28 günlük elastisite modülünü, g_1 öngerilmeli kirişin öz ağırlığından kaynaklı yayılı yükü, I_i prefabrik kiriş kesiti atalet momenti ve c kirişin boyuna yönündeki konsol boyu olarak tanımlanmaktadır.

2.12.2. İkinci Denetim

Öngerilme kayıpları maksimum, öngerilmeli kirişin öz ağırlığına ek olarak tabliye betonunun ağırlığını prefabrik kesitin taşıdığı mevcut olduğu durumlarda, g_2 öngerilmeli kirişin ve tabliyenin ağırlığından kaynaklı yükü ifade etmekte olup aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$f_2 = -\frac{P \cdot e_i \cdot L_1^2}{8 \cdot E_c \cdot I_i} + \frac{5 \cdot g_1 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i} + \frac{5 \cdot g_2 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i}$$

2.12.3. Üçüncü Denetim

Öngerilme kayıpları maksimum seviye ve hareketli yükler hariç bütün yüklerin mevcut olduğu bu bölümde, g_3 tabliye öz ağırlığı ve öngerilmeli kirişin öz ağırlığı dışındaki bütün kalıcı ağırlıklardan dolayı oluşan yükü, I_{ci} 'de ideal kompozit kesitin atalet momentini ifade etmektedir.

$$f_3 = -\frac{P \cdot e_i \cdot L_1^2}{8 \cdot E_c \cdot I_i} + \frac{5 \cdot g_1 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_i} + \frac{5 \cdot g_2 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_{ci}} + \frac{5 \cdot g_3 \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_{ci}}$$

2.12.4. Dördüncü Denetim

Öngerilme kayıpları maksimum seviyede olduğu tekrardan göz ününe alınacak ve hareketli yükler altında sehim denetimi yapılacaktır. Kamyon($f_{4,1}$) ve şerit($f_{4,2}$) yüklemeleri farklı bir şekilde hesaplanacak olup hesaplanan sehim değerlerinden büyük olan dikkate alınacaktır.

2.12.4.1. Kamyon Yükleme

Kamyon yükleme için maksimum sehim miktarı değeri, eğilme etkisi için verilmiş olan yükleme durumu için kamyon arka tekerleklerinin öncü tekerin öngerilmeli kirişin maksimum eğilmenin olacağı kiriş orta bölgesine geldiği zaman meydana gelmektedir.

$$f_{4,1} = \frac{P \cdot L^2}{12 \cdot E_c \cdot I_{ci}} \left\{ \frac{y_1}{4} \left[\frac{x_1}{L_1} \left(1 + \frac{y_1}{L_1} \right) - 0,25 \right] + y_2 \left[\frac{x_2}{L_1} \left(1 + \frac{y_2}{L_1} \right) - 0,25 \right] + x_3 \left[\frac{y_3}{L_1} \left(1 + \frac{y_3}{L_1} \right) - 0,25 \right] \right\}$$

bu denklemde P şerit yüklemesinde olan tekil yükünü ifade etmektedir. $f_{4,1}$ kamyon yüklemesi sonucu oluşan $M_1/800$ değerinden küçük olmalı ve P ile q değerleri dinamik etki katsayısı(ϕ) ile yük dağıtma katsayısı ile çarpılmış değerleri olarak tanımlanmaktadır.

2.12.4.2. Şerit Yükleme

Yükleme durumu dikkate alınması zorunluluğu ile, şerit yüklemesi için sehim miktarı;

$$f_{4,2} = \frac{P \cdot L_1^3}{48 \cdot E_c \cdot I_{ci}} + \frac{5 \cdot q \cdot L_1^4}{384 \cdot E_c \cdot I_{ci}}$$

denklemdeki q şerit yüklemesindeki yayılı yükü ifade etmektedir. $f_{4,2}$ şerit yüklemesi sonucu oluşan $M_1/800$ değerinden küçük olmalıdır.

Nihai sehim değeri, tüm denetimler sonucunda oluşan sehim miktarlarının toplamaları şeklindedir. Bu f sehim değeri $M_1/400$ değerinden az olmalıdır.

$$f = f_3 + f_4$$

2.13. Öngerme Kablo Sayısının Belirlenmesi

Öngerilme kuvvet ihtiyacı öngerilmeli kirişin en çok tüm gerilmeler ve kayıpların maksimum olduğu servis döneminde kiriş orta bölgesindeki kesitin alt liflerinde meydana gelmektedir. Kirişe yerleştirilecek olan öngerme kablo sayısı, kablonun çap, tip ve ara mesafesine, kirişin kesit ve bu kesitte meydana gelen çekme gerilmesine, öngerilmeli kirişinde kullanılan beton sınıfına ve betonarme çeliğinin korozyon durumuna, öngerilme kayıpları ve pas payı değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir (Atmaca, 2018).

2.14. Öngerme Kablo Kılıflanması

Öngerilmeli kirişlerde, kirişin mesnet bölgelerinde öngerme kablolarındaki gerilmelerden kaynaklı öngerilmeli kirişlerde çatlaklar meydana gelmektedir. Mikro ve makro seviyede oluşan bu çatlaklarda, mikro çatlaklar kabul edilebilecek seviyede olup kapatılabilmektedir. Yalnız çatlak genişliği arttıkça yapı kalıcılığına zarar vermekte olup öngerme kablolarının paslanmasına sebep olmaktadır. Çatlakları istenilen seviyede tutabilmek için öngerme kablolarının kılıflanması öngörülmektedir. Bu kılıflanma sebebiyle beton ve donatı arasında oluşabilecek olan bağ mekanizması engelleyecek olup kılıflanma mesafesi boyunca betona öngerilme kuvvetinin aktarılması sağlanmaktadır.

Kılıflanma işinde yumuşak ve sert plastikten üretilmiş iki kılıf tipi kullanılmakta olup, yumuşak plastik üretimli kılıfların sertleşmiş beton aşamasında sert plastikten üretilmiş kılıflara kıyasla daha fazla deforme olmaktadır. Bu sebeple yumuşak plastikten üretilmiş olan kılıf kullanıldığı takdirde bağ mekanizmalarında mekanik kenetlenmenin tamamen önüne geçilememektedir. Sert plastikten üretilen kılıflar bundan dolayı tavsiye edilmektedir (Atmaca, 2018).

2.15. Kılıflanacak Öngerme Kablo Sayısı Tespiti

Öngerilmeli kirişlerde kılıflanacak öngerme kablo sayısı belirlenmesi, öngerilmeli kirişlerin aktarma dönemleri tamamlandıktan sonra mesnet bölgelerindeki öngerilmeli kiriş kesitinin alt ve üst liflerinde meydana gelecek gerilmeler dikkate alınacak şekilde belirlenecektir. Emniyet gerilmesine denk gelecek olan kablo sayısı kirişte bulunan kablo sayısından çıkartılarak hesaplanabilmektedir.

3. ÖNGERİLMELİ BETONARME ÖRNEK BİR KİRİŞİN ANALİZİ

3.1.Konu ve Kapsam

Bu tez çalışmasında, öngerilmeli kirişlerinin deplasman açısından davranışları incelenecektir.

Bu çalışma, üç farklı betonarme öngerilmeli kirişin (Tip1:1,00mt; Tip2:1,20mt; Tip3:1,50mt) aynı açıklıktaki gerilme analizlerinin yapılması, uygun halat sayısının bulunması ve yerleşimi ile sehim değerlerinin irdelenmesi kapsamında yapılmıştır.

Sınır değerleri AASHTO LRFD (AASHTO LRFD bridge design specifications-2012) yönetmeliğinden alınmıştır.

3.2.Analizde Kullanılacak Malzeme Özellikleri

Tablo 3.1 Beton özellikleri

Kiriş beton sınıfı	C45/55
Kiriş karakteristik basınç dayanımı (f_c)	45 MPa
Kiriş karakteristik basınç dayanımı (f_{ci}) (Öngerme Anında)	33,8 MPa
Kiriş betonu elastisite modülü (E_c) (AASHTO 8.7.1)	35889 MPa
Tabliye beton sınıfı	C30/37
Tabliye karakteristik basınç dayanımı (f_c)	30 MPa
Tabliye betonu elastisite modülü (E_c) (AASHTO 8.7.1)	29303 MPa

Tablo 3.2 Çelik özellikleri

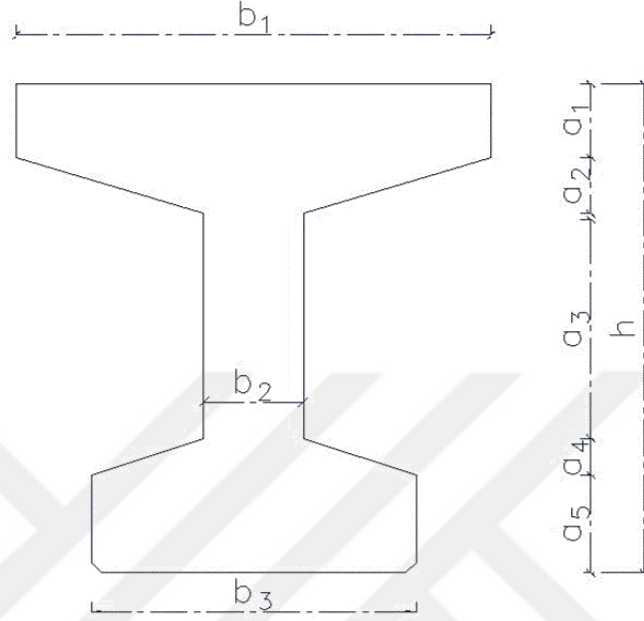
Öngerme çelik tipi	270K Düşük Gevşemeli ASTM A416
Öngerme çelik çapı	0.6" (15.24 mm)
Öngerme çelik kesit alanı	140 mm ²
Öngerme çelik karakteristik kopma dayanımı (f_s')	1862 MPa
Öngerme çelik elastisite modülü	193000 MPa
Yumuşak donatı akma dayanımı	420 MPa
Yumuşak donatı elastisite modülü	200000 MPa

Tablo 3.3 Diğer parametreler

Hareketli yük	H30-S24
Yaya yükü	3 kN/m ³
Korkuluk yükü	1,5 kN/m
Beton birim hacim ağırlığı	25 kN/m ³
Asfalt birim hacim ağırlığı	23 kN/m ³

3.3. Tip Kirişlerin Geometrik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında 3 tip öngerilmeli kiriş üzerinde analiz yapılacak olup geometrik özellikleri aşağıda gösterileceği gibi belirlenip, açıklanacaktır.

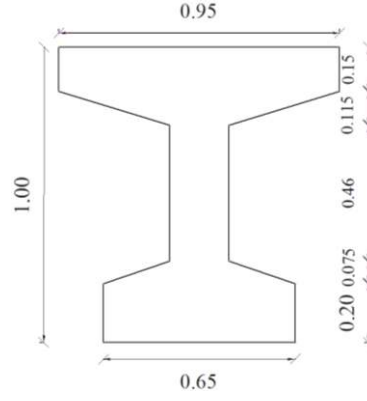


Şekil 3.1 Öngerilmeli kiriş şematifi

Tablo 3.4 Öngerilmeli tip kirişlerin kesit boyutları

Kiriş Kodu	Kesit boyutları(cm)								
	h	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b ₁	b ₂	b ₃
Tip 1	100	15	11,5	46	7,5	20	95	20	65
Tip 2	120	10	15	65	10	20	127,5	20	70
Tip 3	150	10	15	90	10	25	120,0	20	70

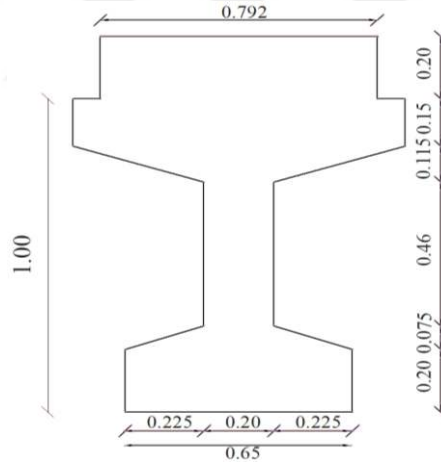
Tabloda ifade edilen h kiriş toplam yüksekliği, b₃ alt flanş genişliği, a₅ alt flanş yüksekliği, a₄ alt flanş pah yüksekliği, b₁ üst flanş genişliği, a₁ üst flanş yüksekliği, a₂ üst flanş pah yüksekliği ve b₂ kirişin gövde genişliğini göstermektedir.



Şekil 3.2 Öngerilmeli prefabrik Tip1 kirişi en kesiti

Tablo 3.5 Öngerilmeli prefabrik Tip1 kirişinin analiz parametreleri

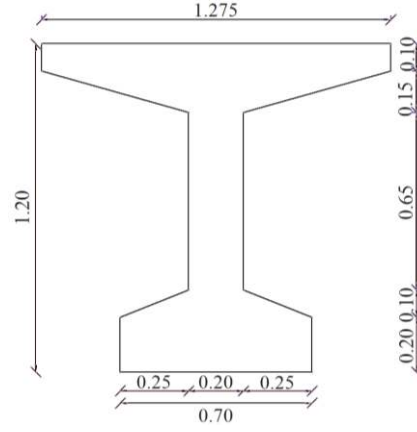
TİP 1 (h:1,00m)	Prefabrike Kiriş
F: En Kesit Alanı (m ²)	0,462500
y _{alt} : Tarafsız Eksen (m)	0,544568
y _{üst} : Tarafsız Eksen (m)	0,455432
I _x : Atalet Momenti (m ⁴)	0,056481
W _{alt} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,103718
W _{üst} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,124017



Şekil 3.3 Öngerilmeli kompozit Tip1 kirişi en kesiti

Tablo 3.6 Öngerilmeli kompozit Tip1 kirişinin analiz parametreleri

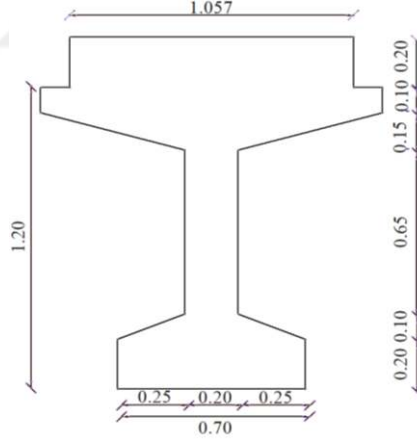
TİP 1 (h:1,00m)	Kompozit Kiriş
F: En Kesit Alanı (cm ²)	0,620900
y _{alt} : Tarafsız Eksen (cm)	0,686266
y _{üst} : Tarafsız Eksen (cm)	0,513734
I _x : Atalet Momenti (cm ⁴)	0,093410
W _{alt} : Mukavemet Momenti (cm ³)	0,136113
W _{üst} : Mukavemet Momenti (cm ³)	0,181825



Şekil 3.4 Öngerilmeli prefabrik Tip2 kirişi en kesiti

Tablo 3.7 Öngerilmeli prefabrik Tip2 kirişinin analiz parametreleri

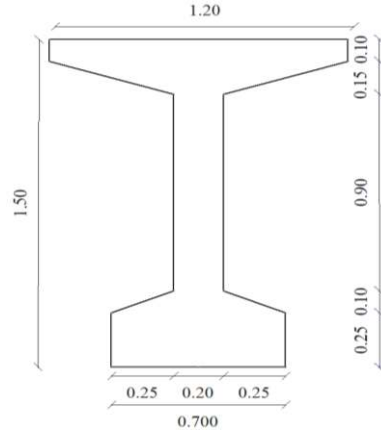
TİP 2 (h:1,20m)	Prefabrike Kiriş
F: En Kesit Alanı (m ²)	0,553125
y _{alt} : Tarafsız Eksen (m)	0,665518
y _{üst} : Tarafsız Eksen (m)	0,534482
I _x : Atalet Momenti (m ⁴)	0,104170
W _{alt} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,156524
W _{üst} : Mukavemet Momenti (m ³ ,)	0,194898



Şekil 3.5 Öngerilmeli kompozit Tip2 kirişi en kesiti

Tablo 3.8 Öngerilmeli kompozit Tip2 kirişinin analiz parametreleri

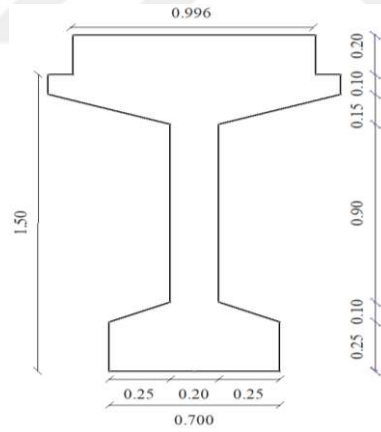
TİP 2 (h:1,20m)	Kompozit Kiriş
F: En Kesit Alanı (m ²)	0,764525
y _{alt} : Tarafsız Eksen (m)	0,840960
y _{üst} : Tarafsız Eksen (m)	0,559040
I _x : Atalet Momenti (m ⁴)	0,166445
W _{alt} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,197923
W _{üst} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,297734



Şekil 3.6 Öngerilmeli prefabrik Tip3 kirişi en kesiti

Tablo 3.9 Öngerilmeli prefabrik Tip3 kirişinin analiz parametreleri

TİP 3 (h:1,50m)	Prefabrike Kiriş
F: En Kesit Alanı (m ²)	0,625000
y _{alt} : Tarafsız Eksen (m)	0,790333
y _{üst} : Tarafsız Eksen (m)	0,709667
I _x : Atalet Momenti (m ⁴)	0,186348
W _{alt} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,235784
W _{üst} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,262585



Şekil 3.7 Öngerilmeli kompozit Tip3 kirişi en kesiti

Tablo 3.10 Öngerilmeli kompozit Tip3 kirişinin analiz parametreleri

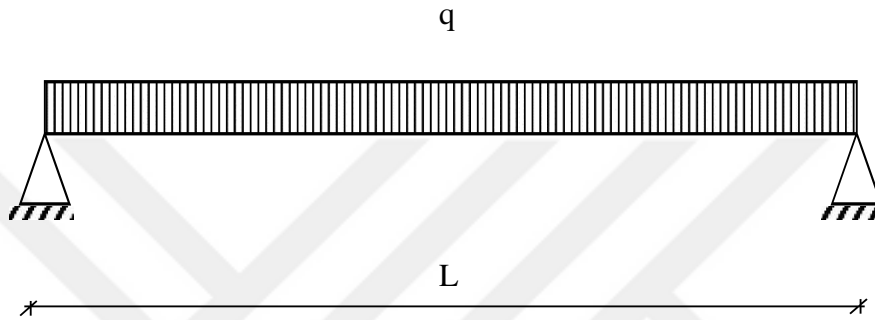
TİP 3 (h:1,50m)	Kompozit Kiriş
F: En Kesit Alanı (m ²)	0,824200
y _{alt} : Tarafsız Eksen (m)	0,986021
y _{üst} : Tarafsız Eksen (m)	0,713979
I _x : Atalet Momenti (m ⁴)	0,286038
W _{alt} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,290093
W _{üst} : Mukavemet Momenti (m ³)	0,400625

3.4. Tip Kirişlerin Ayrıntılı Yük Analizi Ve Hesabı

Bu kısımda açıklanacak yük değerleri kiriş tasarımı için kullanılacak değerleri ifade etmektedir. Köprü üst yapısını oluşturacak olan yapı elemanlarının tasarımında yükleme durumunda sabit ve hareketli yükler dikkate alınacak olup hesap detayları aşağıda verilmiştir.

Kiriş hesabı, mesnetten mesnede 25 mt açıklıklı TİP2 kirişi için hesaplanacaktır.

3.4.1. Zati Yükler



Şekil 3.8 Öngerilmeli Kiriş Zati Yük Yükleme

3.4.1.1. Kiriş Ağırlığı

- Kiriş zati ağırlığı; $q_{\text{kiriş}} = 25 \times 1 \times 0,5531 = 13,828 \text{ kN/m}$

3.4.1.2. Döşeme Ağırlığı

- Döşeme zati ağırlığı; $q_{\text{döşeme-iç}} = 25 \times 0,2 \times 1,295 = 6,475 \text{ kN/m}$

3.4.1.3. İlave Yükler

- Asfalt kaplama ağırlığı; $q_{\text{ilave-asfalt}} = 23 \times 0,06 = 1,380 \text{ kN/m}$
- Bordür ağırlığı; $q_{\text{ilave-bordür}} = 25 \times 0,248 \times 0,2 = 1,240 \text{ kN/m}$
- Korkuluk ağırlığı; $q_{\text{ilave-korkuluk}} = (2 \times 1,5) / 14 = 0,214 \text{ kN/m}$
- Yaya ağırlığı; $q_{\text{yaya}} = [(1,50+1,50) \times 3] / 14 = 0,642 \text{ kN/m}$

Toplam ilave yükler; $\sum q_{\text{ilave}} = 3,476 \text{ kN/m}$

Diğer zati yüklerin döşeme prizini aldıktan sonra meydana geleceği bilindiğinden bu yüklerin kirişlerince aynı oranda taşınacağı kabul edilmiştir.

Zati yüklerden meydana gelen moment ve kesme kuvvetleri aşağıdaki bağlantılar yardımı ile çözümlenebilmektedir.

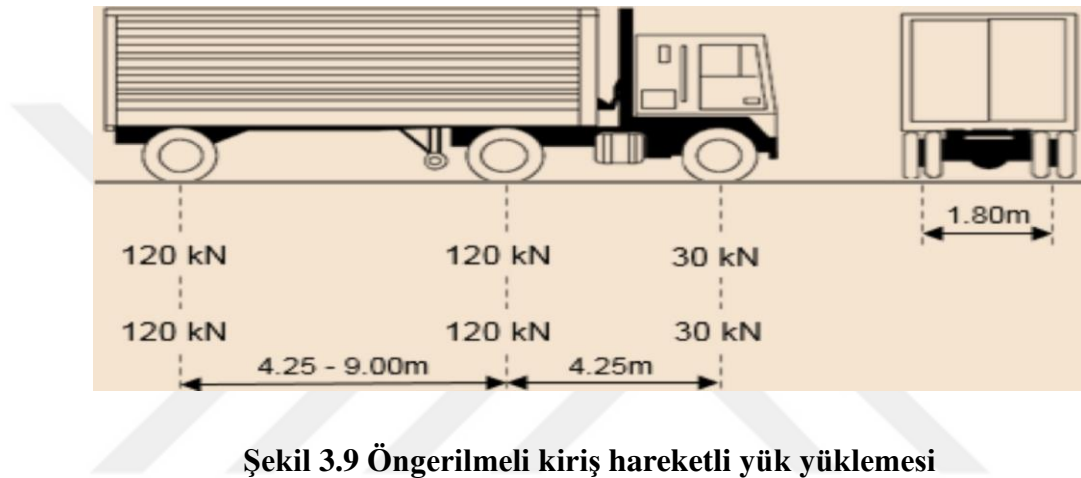
$$q_1 = 13,828 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = 6,475 \text{ kN/m}$$

$$q_3 = 3,476 \text{ kN/m}$$

3.4.2. Hareketli Yükler

Yaya yükleri hareketli yük sınıfına dâhil olmalarına rağmen bu hesaplarda kolaylık sağlanabilmesi için zati yükler kısmında alınmıştır. Vasıta sınıfı olarak H30-S24 standart kamyon yükü seçilmiştir.



Şekil 3.9 Öngerilmeli kiriş hareketli yük yükleme

Dinamik etki katsayısı (impact katsayısı) (Φ), araçların titreşiminden meydana gelen ilave etkileri göz önüne alan darbe etkisidir.

$$\Phi = 1 + \frac{15}{L+37} \text{ , bağlantısından hesaplanan dinamik etki katsayı değeri } \Phi = 1,242$$

olarak hesaplanmıştır.

Yük dağılımı ve titreşim etkileri dikkate alınarak hareketli kamyon ön ve arka teker yükleri bir kirişe aşağıda hesaplanan değerce etkir.

$$\text{Enine dağılım katsayısı(edk)} = \frac{S}{1,65} \text{ , formülizasyonunda } S, \text{ kirişler arası aks}$$

mesafesini ifade eder.

Bu sonuçların ardından enine dağılım katsayısı;

$$\text{EDK} = \frac{1,295}{1,65} \Rightarrow \text{EDK} = 0,785 \text{ olarak sonuçlanmıştır.}$$

Bir kirişe etki eden H30-S24 tekerlek yükü kamyon ağırlığı 300kN kabul edildiğinde;
bir arka tekerlek yükünün ağırlığı;

$$P_a = 0,4 * 300 * 1,242 * 0,785 = 116,974 \text{ kN}$$

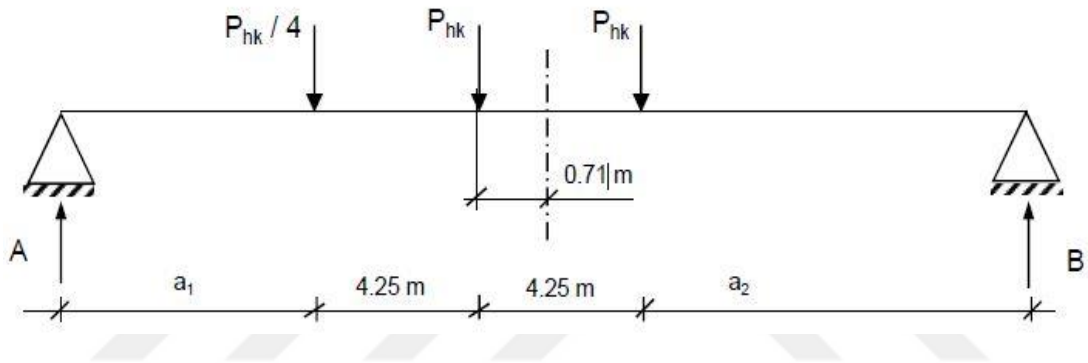
olarak belirlenir. Bir tekerlek yükünün ön ağırlığı ise;

$$P_o = 0,1 * 300 * 1,242 * 0,785 = 29,243 \text{ kN olarak hesaplanmıştır.}$$

3.4.2.1. H30-S24 Standart Kamyon Yükleme

Dinamik etki katsayısı ve enine dağılım katsayısı etkililmiş, hesaplarda kullanılan H30-S24 standart kamyon yükleme hesabı aşağıda verilmiştir.

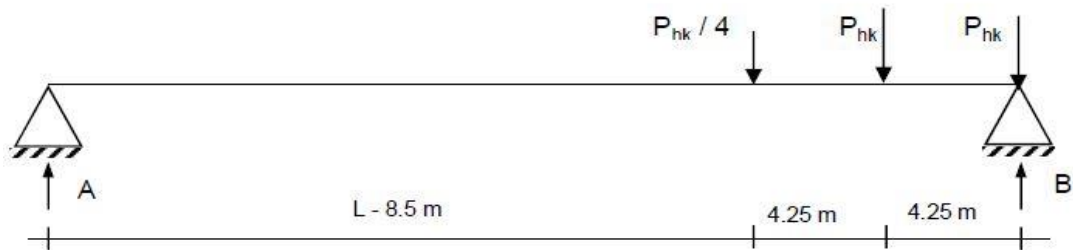
3.4.2.1.1. Eğilme Momenti İçin H30-S24 Standart Kamyon Yükleme



Şekil 3.10 Eğilme momenti için H30-S24 standart kamyon yükleme

$$\begin{aligned} a_1 &= 7,54 \text{ mt} & a_2 &= 8,96 \text{ mt} \\ A &= 124,15 \text{ kN} & B &= 139,03 \text{ kN} \\ M_{hk} &= 1339,51 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

3.4.2.1.2. Kesme Kuvveti İçin H30-S24 Standart Kamyon Yükleme



Şekil 3.11 Kesme kuvveti için H30-S24 standart kamyon yükleme

$$\begin{aligned} A &= 29,83 \text{ kN} & B &= 233,36 \text{ kN} \\ V_{hk} &= 233,36 \text{ kN} \end{aligned}$$

3.4.2.2. Şerit Yükleme

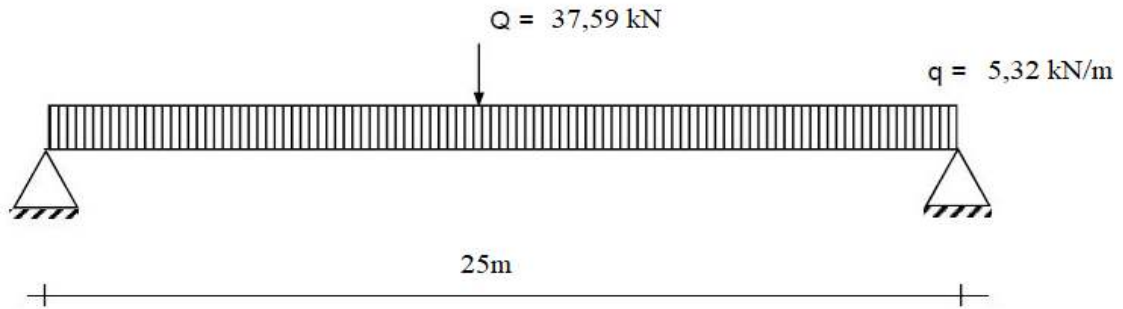
Dinamik etki katsayısı ve enine dağılım katsayısı etkiliterak elde edilen eşdeğer şerit yükü, aşağıdaki değerlerce hesaplanacaktır.

$$Q_{\text{eğilme}} = \frac{135 \times S \times \Phi}{3,5} = \frac{135 \times 0,785 \times 1,242}{3,5} \rightarrow Q_{\text{eğilme}} = 37,59 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{kesme}} = \frac{195 \times S \times \Phi}{3,5} = \frac{195 \times 0,785 \times 1,24}{3,5} \rightarrow Q_{\text{kesme}} = 54,31 \text{ kN}$$

$$q_{\text{şerit}} = \frac{15 \times \Phi}{3,5} = \frac{15 \times 1,242}{3,5} \rightarrow q_{\text{şerit}} = 5,32 \text{ kN/m}$$

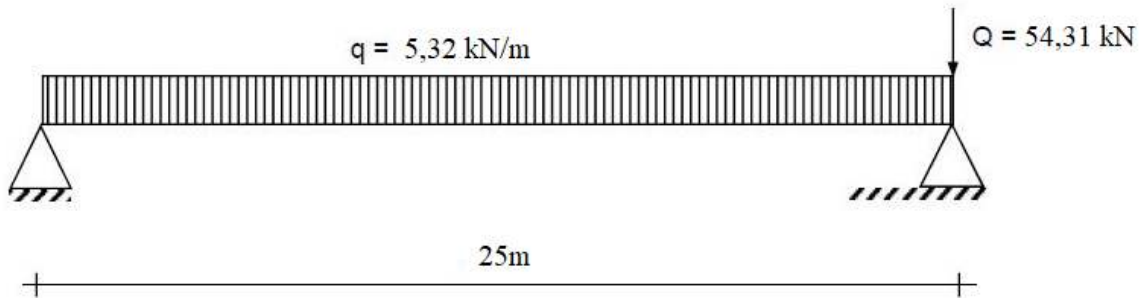
3.4.2.2.1. Eğilme Momenti İçin Şerit Yükleme



Şekil 3.12 Eğilme momenti için şerit yüklemesi

$$M_{h\text{şerit}} = 650,84 \text{ kNm}$$

3.4.2.2.2. Kesme Kuvveti İçin Şerit Yükleme



Şekil 3.13 Kesme kuvveti için şerit yüklemesi

$$V_{h\text{şerit}} = 120,84 \text{ kN}$$

3.5.Emniyet Gerilmeleri

Emniyet gerilmesi, yapı kesitinde betonarme çeliği olup olmaması, yapı korozyonlu bölgede olup olmaması ya da aderans donatısının bulunması durumu göz önünde bulundurularak AASHTO 9.15' e göre verilmiştir.

3.5.1.Rötre ve Sünmeden Önce Geçici Emniyet Gerilmeleri (Öngerilme Uygulama Anında)

- a. İlk öngerme anında betonun basınç mukavemeti;

$$0.6f_{ci}' = 18.9 \text{ Mpa}$$

- b. Çekme gerilmesi;

Öngerme uygulanan kiriş bölgesinde çekme gerilmesine müsaade edilmemiştir. Diğer bölgedeki çekme gerilmesi betonarme çeliği kullanılması durumunda(1) ve betonarme çeliği kullanılmaması durumunda(2) olmak üzere iki farklı şekilde gösterilmiştir;

$$0.623\sqrt{f_{ci}'} = 3.50 \text{ Mpa(1)}$$

$$0.249\sqrt{f_{ci}'} = 1.41 \text{ Mpa(2)}$$

3.5.2.Kayıplardan Sonra Emniyet Gerilmeleri (Servis Yükleri Altında)

- a. Basınç gerilmesi;

$$0.4f_{ci}' = 18.0 \text{ Mpa}$$

- b. Çekme gerilmesi;

Öngerme uygulanan kiriş bölgesinde çekme gerilme değerleri aşağıda verilmiştir. Betonarme çeliği kullanılması durumunda(1) ve korozyonlu bölgelerde(2) olmak üzere iki farklı şekilde ve diğer bölgedeki çekme gerilmesi değerleri betonarme çeliği kullanılması durumunda(3) ve betonarme çeliği kullanılmaması durumunda(4) olmak üzere aşağıda gösterilmiştir;

$$0.498\sqrt{f_{ci}'} = 3.34 \text{ Mpa(1)}$$

$$0.249\sqrt{f_{ci}'} = 1.67 \text{ Mpa(2)}$$

$$0.623\sqrt{f_{ci}'} = 4.18 \text{ Mpa(3)}$$

$$0.249\sqrt{f_{ci}'} = 1.67\text{Mpa}(4)$$

3.6.Kesit Tesirlerinin Hesaplanması

3.6.1.Zati Yüklerden Dolayı Oluşan Yüklerin Hesabı

$$q_1 = \text{Kiriş zati ağırlığı} = 13,828 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = \text{Döşeme zati ağırlığı} = 6,475 \text{ kN/m}$$

$$q_3 = \text{İlave zati ağırlığını(Kaplama+ bordür+ korkuluk+ yaya)} = 3,476 \text{ kN/m temsil etmektedir.}$$

$$M_{q1} = \text{Öngerilmeli kiriş zati ağırlığı ile oluşan moment değeri.}$$

$$M_{q2} = \text{Öngerilmeli kiriş ile tabliyenin zati ağırlığı ile oluşan moment değeri.}$$

$$M_{q3} = \text{Öngerilmeli kiriş ile tabliyenin zati ağırlığı dışındaki tüm ilave yüklerden oluşan moment değeri.}$$

$$V_{q1} = \text{Öngerilmeli kiriş zati ağırlığı ile oluşan kesme kuvveti değeri.}$$

$$V_{q2} = \text{Öngerilmeli kiriş ile tabliyenin zati ağırlığı ile oluşan kesme kuvveti değeri.}$$

$$V_{q3} = \text{Öngerilmeli kiriş ile tabliyenin zati ağırlığı dışındaki tüm ilave yüklerden oluşan kesme kuvveti değeri.}$$

Öngerilmeli kirişin her birisine etkiyecek olan zati yük değerleri ve bu değerlerin etkimesi sonucu öngerilmeli kiriş en kesitlerinde oluşacak olan iç kuvvet değerleri tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.11 Zati yüklerden oluşan moment tesirleri

Moment (kNm)	Değişik Kesitlerde Meydana Gelen Momentler						
	(0 L)	(H L)	(0,1 L)	(0,2 L)	(0,3 L)	(0,4 L)	(0,5 L)
	X=0,00mt Kesiti	X=1,20mt Kesiti	X=2,50mt Kesiti	X=5,00mt Kesiti	X=7,50mt Kesiti	X=10,00mt Kesiti	X=12,50mt Kesiti
M_{q1}	0,00	197,46	388,91	691,40	907,46	1037,10	1080,31
M_{q2}	0,00	92,46	182,11	323,75	424,92	485,63	505,86
M_{q3}	0,00	49,64	97,76	173,80	228,11	260,70	271,56

Tablo 3.12 Zati yüklerden oluşan kesme kuvvetleri

Değişik Kesitlerde Meydana Gelen Kesme Kuvvetleri							
Kesme Kuvvetleri (kN)	(0 L) X=0,00mt Kesiti	(H L) X=1,20mt Kesiti	(0,1 L) X=2,50mt Kesiti	(0,2 L) X=5,00mt Kesiti	(0,3 L) X=7,50mt Kesiti	(0,4 L) X=10,00mt Kesiti	(0,5 L) X=12,50mt Kesiti
V _{q1}	172,85	156,26	138,28	103,71	69,14	34,57	0,00
V _{q2}	80,94	73,17	64,75	48,56	32,38	16,19	0,00
V _{q3}	43,45	39,28	34,76	26,07	17,38	8,69	0,00

3.6.2. Hareketli Yüklerden Dolayı Oluşan Yüklerin Hesabı

Hareketli yük H30-S24 Kamyon ve şerit yükleri alınmıştır. Öngerilmeli kirişlerin her birine etkiyecek olan yükler sonucunda en kesitlerde oluşacak olan iç kuvvet değerleri hesaplanmasıyla ilgili detaylar ve şekiller verilmiştir.

$M_{h-kamyon}$ = H30-S24 Kamyon yükünden oluşan eğilme momenti değeri.

$M_{h-şerit}$ = Eşdeğer şerit yüklemesinden oluşan eğilme momenti değeri.

M_{h-max} = Max eğilme momenti değeridir.

$V_{h-kamyon}$ = H30-S24 Kamyon yükünden oluşan kesme kuvveti değeri.

$V_{h-şerit}$ = Eşdeğer şerit yüklemesinden oluşan kesme kuvveti değerini temsil etmektedir.

Tablo 3.13 Hareketli yüklerden meydana gelen eğilme momenti (Bir kiriş için)

Değişik Kesitlerde Meydana Gelen Momentler							
Moment (tonf-m)	(0 L) X=0,00m t Kesiti	(H L) X=1,20mt Kesiti	(0,1 L) X=2,50mt Kesiti	(0,2 L) X=5,00mt Kesiti	(0,3 L) X=7,50mt Kesiti	(0,4 L) X=10,00mt Kesiti	(0,5 L) X=12,50mt Kesiti
$M_{h-kamyon}$	0,00	280,04	583,41	630,20	996,47	1231,15	1334,23
$M_{h-şerit}$	0,00	118,96	234,30	416,54	546,71	624,81	650,84
M_{h-max}	0,00	280,04	583,41	630,20	996,47	1231,15	1334,23

Tablo 3.14 Hareketli yüklerin oluşan kesme kuvvetleri

Değişik Kesitlerde Meydana Gelen Kesme Kuvvetleri							
Kesme Kuvvetleri (kN)	(0 L) X=0,00mt Kesiti	(H L) X=1,20mt Kesiti	(0,1 L) X=2,50mt Kesiti	(0,2 L) X=5,00mt Kesiti	(0,3 L) X=7,50mt Kesiti	(0,4 L) X=10,00mt Kesiti	(0,5 L) X=12,50mt Kesiti
V _{h-kamyon}	233,36	220,73	207,04	180,72	154,41	128,09	101,77
V _{h-şerit}	120,84	111,85	102,11	83,37	64,63	45,89	27,15

3.7.Yükleme Durumları

Öngerme kablolarının sayısının tespiti, servis yüklemesi aşamasında kiriş alt lifindeki gerilmeler dikkate alınarak en olumsuz kesit tesirlerine göre yapılacaktır.

Gerilme işaretleri; (-) Çekme, (+) Basınç olarak ifade edilmektedir.

f_b = Prekast kirişin alt lifindeki gerilme,

f_t = Prekast kirişin üst lifindeki gerilme,

f_t' = Kompozit kirişin üst lifindeki gerilmeyi ifade etmektedir.

Yükleme Durumu – 1

Prekast kirişin zati ağırlığı altındaki kiriş ortasındaki kesit gerilmeleri;

$$f_{b1} = \frac{M_1}{W_{bb}}, M_1 = 1080,313 \text{ kNm}, W_{bb} = 0,1565 \text{ m}^3$$

$$f_{b1} = \frac{1080,313 \text{ kNm}}{0,1565 \text{ m}^3} = -6901,887 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t1} = \frac{M_1}{W_{bt}}, M_1 = 1080,313 \text{ kNm}, W_{bt} = 0,1949 \text{ m}^3$$

$$f_{t1} = \frac{1080,313 \text{ kNm}}{0,1949 \text{ m}^3} = 5542,954 \text{ kN/m}^2$$

Yükleme Durumu – 2

Prekast kirişin zati ve döşeme ağırlığı altındaki kiriş ortasındaki kesit gerilmeleri;

$$f_{b2} = \frac{M_1 + M_2}{W_{bb}}, M_1 + M_2 = 1586,172 \text{ kNm}, W_{bb} = 0,1565 \text{ m}^3$$

$$f_{b2} = \frac{1586,172 \text{ kNm}}{0,1565 \text{ m}^3} = -10133,715 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t2} = \frac{M_1 + M_2}{W_{bt}}, M_1 + M_2 = 1586,172 \text{ kNm}, W_{bt} = 0,1949 \text{ m}^3$$

$$f_{t2} = \frac{1586,172 \text{ kNm}}{0,1949 \text{ m}^3} = 8138,458 \text{ kN/m}^2$$

Yüklem Durumu – 3

Kompozit kirişin ilave yükler altındaki kiriş ortasındaki kesit gerilmeleri;

$$f_{b3} = \frac{M_3}{W_{cb}}, M_3 = 271,563 \text{ kNm}, W_{cb} = 0,1979 \text{ m}^3$$

$$f_{b3} = \frac{271,563 \text{ kNm}}{0,1979 \text{ m}^3} = -1372,062 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t'3} = \frac{M_3}{W_{ct'}}, M_3 = 271,563 \text{ kNm}, W_{ct'} = 0,2977 \text{ m}^3$$

$$f_{t'3} = \frac{271,563 \text{ kNm}}{0,2977 \text{ m}^3} = 912,098 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t3} = \frac{M_3}{W_{ct}}, M_3 = 271,563 \text{ kNm}, W_{ct} = 0,4636 \text{ m}^3$$

$$f_{t3} = \frac{271,563 \text{ kNm}}{0,4636 \text{ m}^3} = 585,790 \text{ kN/m}^2$$

Yüklem Durumu – 4

Kompozit kirişin hareketli yükler altındaki kiriş ortasındaki kesit gerilmeleri;

$$f_{b4} = \frac{M_H}{W_{cb}}, M_H = 1334,233 \text{ kNm}, W_{cb} = 0,1979 \text{ m}^3$$

$$f_{b4} = \frac{1334,233 \text{ kNm}}{0,1979 \text{ m}^3} = -6741,171 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t'4} = \frac{M_H}{W_{ct'}}, M_H = 1334,233 \text{ kNm}, W_{ct'} = 0,2977 \text{ m}^3$$

$$f_{t'4} = \frac{1334,233 \text{ kNm}}{0,2977 \text{ m}^3} = 4481,295 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t4} = \frac{M_H}{W_{ct}}, M_H = 1334,233 \text{ kNm}, W_{ct} = 0,4636 \text{ m}^3$$

$$f_{t4} = \frac{1334,233 \text{ kNm}}{0,4636 \text{ m}^3} = 2878,085 \text{ kN/m}^2$$

Toplam Gerilmeler

$$f_b = f_{b2} + f_{b3} + f_{b4}$$

$$f_b = (-10133,715) + (-1372,062) + (-6741,171)$$

$$f_b = -18246,948 \text{ kN/m}^2$$

$$f_t = f_{t2} + f_{t3} + f_{t4}$$

$$f_t = (8138,458) + (585,790) + (2878,085)$$

$$f_t = 11602,333 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t'} = f_{t'3} + f_{t'4}$$

$$f_{t'} = (912,098) + (4481,295)$$

$$f_{t'} = 5393,393 \text{ kN/m}^2$$

Öngerme Gerilme Sınırları

Öngerme Aşamasında;

$$\text{Kiriş Alt Lifindeki Gerilme} = -6901,887 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{İzin Verilen Basınç Gerilmesi} = 20250,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\Sigma = 27151,887 \text{ kN/m}^2 \text{ İzin Verilen Öngerme Gerilmesi}$$

$$\text{Kiriş Üst Lifindeki Gerilme} = 5542,954 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{İzin Verilen Çekme Gerilmesi} = -1447,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\Sigma = -6989,954 \text{ kN/m}^2 \text{ İzin Verilen Öngerme Gerilmesi}$$

Servis Yüklemesi Aşamasında;

$$\text{Kiriş Alt Lifindeki Gerilme} = -18246,948 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{İzin Verilen Çekme Gerilmesi} = -3341,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\Sigma = 14905,948 \text{ kN/m}^2 \text{ Kayıplardan Sonra Gerekli Öngerme Gerilmesi}$$

$$\text{Kiriş Üst Lifindeki Gerilme} = 11602,333 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{İzin Verilen Basınç Gerilmesi} = 18000,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\Sigma = 6397,667 \text{ kN/m}^2 \text{ Kayıplardan Sonra Gerekli Öngerme Gerilmesi}$$

3.8.Öngerme Halat Sayılarının Tespiti

Öngerme halatlarının sayısının tespit edilmesi servis yüklemesi durumunda giriş alt lifindeki gerilmeler göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Kayıplardan sonraki giriş alt lifindeki gerekli öngerme gerilmesi 14905,948 kN/m² olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P_s}{A_b} + \frac{P_s \times e_c}{W_b} = 14905,948 \text{ kN/m}^2$$

$A_b=0,5531\text{m}^2$, $W_{bb}=0,156524\text{m}^3$ olarak hesaplanmış ve halatların ağırlık merkezi tabandan 0,581m yukarı kabul edilirse;

$P_s = 2700,453 \text{ kN}$ olarak bulunur.

$f_s' = \text{minimum kopma yükü} = 270000 \text{ lib/in}^2 = 18,6 \text{ ton/cm}^2 = 1862 \text{ Mpa}$

Hesaplarda kullanılacak başlangıçta uygulanacak gerilme = $0,75 \times 1862 = 1396,5 \text{ Mpa}$

Öngerme halatlarında müsaade edilen ilk öngerme kuvveti = $1396,5 \times 140 / 1000 = 195,51 \text{ kN}$

Kayıplar %16 kabul edilirse;

Bir kablo için bütün kayıplardan sonra izin verilen öngerme kuvveti = $195,51 \times (1 - 0,16) = 164,815 \text{ kN}$ olarak hesaplanmaktadır.

N, gerekli öngerme halatı olmak üzere halat sayısı = $\frac{2700,453}{164,815} = 16,38 = \sim 17$ halat seçilmiştir.

3.9.Öngerme Kayıpları

Öngerme kayıplarının hesabı AASHTO 9.16.2 'ye göre yapılacaktır.

3.9.1.Elastik Kısılma Kaybı

Beton elastik kısılmasından kaynaklı oluşacak öngerilme kayıpları (AASHTO 9.16.2.1.2.)

$$ES = \frac{E_s}{E_{ci}} \times f_{c,ir}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada bilinmeyen $f_{c,ir}$;

$$f_{cir} = \frac{P}{A_p} + \frac{P \times e^2}{I_x} - \frac{M_{q1} \times e}{I_x}$$

ile hesaplanıp kablo kuvveti P;

Kablo Kuvveti = P = 0,69 x f_s x N x A_{kablo} ile bulunmaktadır.

Kablo Kuvveti = P = 0,69 x 1862 x 17 x 140 / 1000 = 3057,776 kN olarak hesaplanmıştır.

$$f_{cir} = \frac{3057,776}{0,553125} + \frac{3057,776 \times 0,581^2}{0,104170} - \frac{1080,31 \times 0,581}{0,104170} = 9411,507 \text{ kN/m}^2$$

$$ES = \frac{193000000}{31081000} \times 9411,507 = 58442 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Elastik kısıalma kaybı} = \frac{58442}{0,75 \times 1862 \times 1000} = \%4,18 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Tablo 3.15 Betonun elastik kısılmasından kaynaklı öngerilme kayıpları

x	Aktif Kablo	M _{q1} kNm	e (m)	P (kN)	f _{cir} (kN/m ²)	ES (kN/m ²)	Kayıp Oranı (α) (%)
0	10	0,000	0,582	1798,692	9100,601	56511	4,05
H	10	197,464	0,582	1798,692	7997,363	49660	3,60
0,1 L	10	388,913	0,582	1798,692	6927,732	43018	3,08
0,2 L	10	691,400	0,582	1798,692	5237,723	32524	2,33
0,3 L	13	907,453	0,578	2338,300	6691,445	41551	2,98
0,4 L	16	1037,100	0,576	2877,907	8634,426	53616	3,84
0,5 L	17	1080,313	0,581	3057,776	9411,507	58442	4,18

3.9.2. Rötire Kaybı

Beton büzülmesinden kaynaklı oluşacak öngerilme kayıpları (AASHTO 9.16.2.1.1.);

$$SH = 117,21 - 1,034 \times RH$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. RH, yüzde olarak çevreye bağlı bağlı nem oranını göstermektedir. Bu çalışma için bağlı nem(RH) %60 alınmıştır.

$$SH = 117,21 - 1,034 \times 60 = 55170 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Rötre Kayıp Oranı} = \frac{55170}{0,75 \times 1862 \times 1000} = \%3,95 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

3.9.3. Sünme Kaybı

Beton sünmesinden kaynaklı oluşacak öngerilme kayıpları (AASHTO 9.16.2.1.3.);

$$CR_c = 12 \times f_{cir} - 7 \times f_{cds}$$

İle hesaplanmaktadır. Burada bilinmeyen f_{cds} , öngerme uygulandığı anda var olan zati yük dışındaki tüm zati yüklerden dolayı öngermeli çeliğin ağırlık merkezinde beton gerilmesini temsil etmektedir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$f_{cds} = \frac{M_{g2} \times e}{I_x} - \frac{M_{g3} \times e_c}{I_{cx}}$$

$M_{g2} = 505,86 \text{ kNm}$, $M_{g3} = 271,56 \text{ kNm}$, $e = 0,581\text{m}$, $e_c = 0,756$, $I_x = 0,104170 \text{ m}^4$, $I_{xc} = 0,166445 \text{ m}^4$ olarak bilinmektedir. Bilinenler ile hesaplandığında f_{cds} değeri $4054,846 \text{ kN/m}^2$ olarak tespit edilmiştir.

Formüldeki e öngerme kablo merkezinin prefabrike kesit tarafsız eksenini ile mesafesini, e_c kablo merkezinin kompozit kesit tarafsız eksenini ile mesafesini ifade etmektedir.

$$CR_c = 84554 \text{ kN/m}^2 \text{ olarak bulunmuştur. Sünme kaybı;}$$

$$\text{Sünme Kayıp Oranı} = \frac{84554}{0,75 \times 1862 \times 1000} = \%6,05 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Tablo 3.16 Betonun sünmesinden kaynaklı öngerilme kayıpları

x	Aktif Kablo	Mq2 (kNm)	Mq3 (kNm)	e (m)	e _c (m)	f _{cir} (kN/m ²)	f _{cds} (kN/m ²)	CR _c (kN/m ²)	Kayıp Oranı (%)
0	10	0,000	0,000	0,582	0,757	9100,601	0,000	109207	7,82
H	10	92,46	49,64	0,582	0,757	7997,363	742,347	90772	6,50
0,1 L	10	182,11	97,76	0,582	0,757	6927,732	1462,080	72898	5,22
0,2 L	10	323,75	173,80	0,582	0,757	5237,723	2599,254	44658	3,20
0,3 L	13	424,92	228,11	0,578	0,753	6691,445	3389,722	56569	4,05
0,4 L	16	485,63	260,70	0,576	0,751	8634,426	3861,512	76583	5,48
0,5 L	17	505,86	271,56	0,581	0,756	9411,507	4054,846	84554	6,05

3.9.4. Öngerme Çeliğinin Gevşeme Kayıpları

Öngerme çeliğinin gevşemesinden kaynaklı oluşacak öngerilme kayıpları (AASHTO 9.16.2.1.4.);

$CR_s = 34475 - 0,1 \times ES - 0,05 \times (SH + CR_c)$ İle hesaplanmaktadır.

$$CR_s = 34475 - 0,1 \times 58442 - 0,05 \times (55170 + 84554) = 21645 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Öngerme Çelik Gevşeme Kaybı Oranı} = \frac{21645}{0,75 \times 1862 \times 1000} = \%1,55$$

Tablo 3.17 Öngerme çeliğinin gevşeme kayıpları

x	0	H	0,1 L	0,2 L	0,3 L	0,4 L	0,5 L
Aktif Kablo	10	10	10	10	13	16	17
CR _s (kN/m ²)	20605	22212	23770	26231	24733	22526	21645
Kayıp Oranı (%)	1,48	1,59	1,70	1,88	1,77	1,61	1,55

3.9.5. Tüm Öngerilme Kayıpları Özeti

Tablo 3.18 Tüm kesitler için öngerilme kayıpları

x	Aktif Kablo	SH	ES	CRc	CRs	(β) Toplam Kayıp
0	10	55170	56511	109207	20605	17,3
H	10	55170	49660	90772	22212	15,6
0,1 L	10	55170	43018	72898	23770	14,0
0,2 L	10	55170	32524	44658	26231	11,4
0,3 L	13	55170	41551	56569	24733	12,7
0,4 L	16	55170	53616	76583	22526	14,9
0,5 L	17	55170	58442	84554	21645	15,7

Seçilen kayıp oranı uygundur.(max 27,58MPa AASHTO 9.16.2.2.)

Toplam kayıp; 219811 kN/m² , %15,7 olarak tespit edilmiştir.

3.10. Eğilme Dayanımı Taşıma Kapasitesi Tahkiki

Eğilme mukavemeti AASHTO 3.22 Grup-1 yüklemesi esas alınarak hesaplanacaktır. Maksimum momentlerin kombinasyonundan oluşan moment değeri Mu;

$$M_u = 1,3 \times (DL + 1,67 \times LL) = 1,3 \times (1857,734 + 1,67 \times 1334,233)$$

$$= 5311,674 \text{ kNm (Servis Durumu)}$$

Taşıma gücü direnme momenti AASHTO 9.17. kısımdaki veriler doğrultusunda,

$$\phi M_n = A_s^* \times f_{su}^* \times d \left(1 - 0,6 \times \frac{p^* \times f_{su}^*}{f_c} \right) \text{ formülizasyon ile hesaplanmaktadır.}$$

Buradaki As* betonarme eğilme donatısı alanını, f_{su}* öngerme çeliği azaltılmış hesap dayanımını, d faydalı yükseklik, f_c betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir.

$$\text{Formülde bilinmeyen } f_{su}^* = f_s' \times \left(1 - \frac{\gamma^*}{\beta_1} \cdot p^* \cdot \frac{f_s'}{f_c} \right) \text{ bağlantısı ile bulunur.}$$

γ* öngerme halatı tip faktörü, β₁ beton mukavemet faktörü, f_s' öngerme çeliği karakteristik kopma dayanımını göstermektedir.

Diğer bilinmeyen $p^* = \frac{As^*}{b \times d}$ ile hesaplanmaktadır.

$$p^* = \frac{As^*}{b \times d} = \frac{0,00238 \text{ m}^2}{1,275 \text{ m} \times 1,315 \text{ m}} = 0,00142 \text{ mm}$$

$$f_{su}^* = 1862000 \text{ kN/m}^2 \times \left(1 - \frac{0,28}{0,729} \cdot 0,00142 \cdot \frac{1862000 \text{ kN/m}^2}{45000 \text{ kN/m}^2}\right) = 1819989 \text{ kN/m}^2$$

Öngerme kablolarının ve betonarme donatısının beraber kullanılması durumunda

$$\phi M_n = 0,00238 \text{ m}^2 \times 1819989 \text{ kN/m}^2 \times 1,315 \text{ m} \times \left(1 - 0,6 \times \frac{0,00142 \text{ mm} \times 1819989 \text{ kN/m}^2}{45000 \text{ kN/m}^2}\right)$$

$$\phi M_n = 5500,974 \text{ kNm} > M_u = 5311,674 \text{ kNm}$$

Flanşlı Kesitlerde öngerme kablolarının ve betonarme donatısının beraber kullanılması durumunda

$$\phi M_n = 0,00238 \text{ m}^2 \times 1819989 \text{ kN/m}^2 \times 1,315 \text{ m} \times \left(1 - 0,6 \times \frac{0,00327 \text{ m}^2 \times 1819989 \text{ kN/m}^2}{45000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 0,2 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}}\right)$$

$$+ 0,85 \times 45000 \text{ kN/m}^2 \times (1,275 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}) \times 0,25 \text{ m} \times (0,2 \text{ m} - 0,5 \times 0,25 \text{ m})$$

$$\phi M_n = 12235,852 \text{ kNm} > M_u = 5311,674 \text{ kNm}$$

Kesit eğilme mukavemeti bakımından yeterlidir.

3.11. Süneklilik Limitleri

Süneklilik limit hesapları AASHTO 9.18'e göre yapılacaktır.

3.11.1. Maksimum Donatı Kontrolü

Öngerilmeli beton elemanlar, çeliğin nihai kapasitesine ulaşıldığında akacağı şekilde projelendirilmiştir. Maksimum donatı kontrolü AASHTO 9.18.1'e göre yapılacaktır.

$$\frac{p^* \times f_{su}^*}{f_c} \leq 0,36 \beta_1$$

$$\frac{0,00142 \text{ mm} \times 1819989 \text{ kN/m}^2}{45000 \text{ kN/m}^2} = 0,05743 \leq 0,26244$$

Kesit maksimum donatı oranı yönünden yeterlidir.

3.11.2. Minimum Donatı Kontrolü

Maksimum donatı kontrolü AASHTO 9.18.2'ye göre yapılacaktır. Öngerilmeli kiriş kritik kesitinde öngerme halatları ve betonarme donatıları ile sağlanan toplam kırılma momenti aynı kesitteki çatlama momentinin 1.2 katı kadar büyük olması taşıma kapasitesi oluşturmak için yeterli olmalıdır. Çatlama momenti;

$$M'_{cr} = \left(fr + \frac{P}{Ac} + \frac{P \times e}{Wb} \right) Wcb - M_{DL} \left(\frac{Wcb}{Wb} - 1 \right) \text{ bağıntısı ile bulunur.}$$

Wb prefabrik kirişin mukavemet momenti, W_{cb} kompozit kirişin mukavemet momenti, M_{DL} kiriş ve döşemeden oluşan maksimum moment değeridir.

$$M_{DL} = 1080,31 \text{ kNm} + 505,86 \text{ kNm} = 1586,17 \text{ kNm}$$

$$fr = 0,623 \times 1000 \times \sqrt{f'c} = 0,623 \times 1000 \times \sqrt{33,8} = 3619,303 \text{ kN/m}^2$$

$$M'_{cr} = \left(3619,303 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + \frac{17 \times 164,815}{0,553125 \text{ m}^2} + \frac{17 \times 164,815 \times 0,581}{0,156524 \text{ m}^3} \right) 0,197923 \text{ m}^3 - 1586,17 \text{ kNm} \left(\frac{0,197923 \text{ m}^3}{0,156524 \text{ m}^3} - 1 \right)$$

$$M'_{cr} = 3357,83 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 5500,974 \text{ kNm} > 1,2 \times M'_{cr} = 4029,40 \text{ kNm}$$

Kesit minimum donatı yönünden yeterlidir.

3.12. Gerilme Tahkikleri

Gerilme tahkikleri her bir 0,1L mesafesi için yapılacak ve sınır değerleri ile kontrol edilecektir. Kesitlerdeki aktif öngerilmeli donatı sayısı bu kontrollerden sonra elde edilecektir.

Öngerilmeli prefabrik kirişin altında oluşacak gerilme;

$$\sigma = \frac{Pi}{Ab} + \frac{Pi \times eb}{Wb} - \frac{M}{Wb}$$

Öngerilmeli prefabrik kirişin üstünde oluşacak gerilme;

$$\sigma = \frac{Pi}{Ab} - \frac{Pi \times eb}{Wt} + \frac{M}{Wt}$$

Öngerilmeli kompozit kesitin altında oluşacak gerilme;

$$\sigma = \frac{Pf}{Ac} + \frac{Pf \times ec}{Wcb} - \frac{M}{Wcb}$$

Öngerilmeli kompozit kesitin üstünde oluşacak gerilme;

$$\sigma = \frac{Pf}{Ac} - \frac{Pf \times ec}{Wct} + \frac{M}{Wct}$$

Öngerilmeli kompozit kirişin üstünde oluşacak gerilme;

$$\sigma = \frac{Pf}{Ac} - \frac{Pf \times ec}{Wbt} + \frac{M}{Wbt}$$

Tip2 kirişi için her bir 0,1L 'deki gerilme tahkikleri aşağıda hesaplanarak gösterilmiştir.

Gerilme işaretleri; (-) Çekme, (+) Basınç olarak ifade edilmektedir.

İlk Öngerme Anındaki Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -2.073 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 9.724 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{tH} = -1.060 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{bH} = 8.462 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.1L)} = -78 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.1L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.1L)} = 7.239 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.2L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.2L)} = 1.474 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.2L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.2L)} = 5.307 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.3L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.3L)} = 2.008 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.3L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.3L)} = 6.785 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.4L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0,4L)} = 2.091 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,4L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,4L)} = 8.824 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,5L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_l / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,5L)} = 2.034 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,5L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,5L)} = 9.609 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde İlk Öngerme Halinde Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,528L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_l / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,528L)} = 2.016 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,528L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,528L)} = 9.632 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,67L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_l / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,67L)} = 1.383 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,67L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.67L)} = 10.419 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -1.942 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 9.108 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{tH} = 257 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{bH} = 5.590 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.1L)} = 2.457 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.1L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.1L)} = 2.018 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.2L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.2L)} = 5.001 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.2L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.2L)} = -1.440 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.3L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.3L)} = 6.997 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.3L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.3L)} = -2.914 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.4L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.4L)} = 8.005 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.4L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.4L)} = -2.794 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.5L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.5L)} = 8.315 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,5L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0,5L)} = -2.781 \text{ kN/m}^2 < 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,528L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0,528L)} = 8.299 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,528L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0,528L)} = -2.771 \text{ kN/m}^2 < 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

tahkiklerin sonucu hesaplanarak analizi tamamlanmıştır.

Gerilme değerleri izin verilen sınırları aştığından toronlarda kılıflama gerekmektedir. Kılıflamadan sonraki toron yerleşimi ve buna bağlı kiriş alt mesafeleri, prefabrik ve kompozit kesitin eksantriklikleri ve öngerme yükleri belirtilmiştir.

Tablo 3.19 Kılıflamadan sonra toron yerleşimi

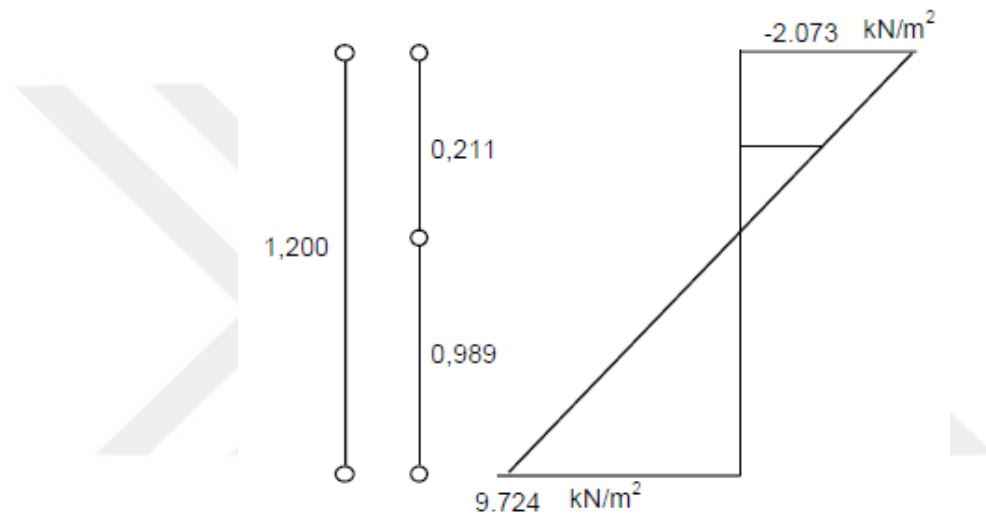
	0,0 L	H	0,1 L	0,2 L	0,3 L	0,4 L	0,5 L
n (adet)	10	10	10	10	13	16	17
x (m)	0,084	0,084	0,084	0,084	0,088	0,090	0,085
e _b (m)	0,582	0,582	0,582	0,582	0,578	0,576	0,581
e _c (m)	0,757	0,757	0,757	0,757	0,753	0,751	0,756
P _i (kN)	1759,59	1759,59	1759,59	1759,59	2287,47	2815,34	2991,30
P _f (kN)	1648,15	1648,15	1648,15	1648,15	2142,59	2637,04	2801,85

Toronların yerleşiminden sonra tekrar hesaplanan gerilme değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

3.13. Kiriş Aderans Donatısı Hesaplama

AASHTO 9.15.2.1. 'e göre ilk öngerme aşamasında çekme bölgesinde çekme gerilmesine izin verilmemiştir. Kılıflamadan sonra kalan çekme gerilmeleri betonarme donatısı ile karşılanacaktır.

3.13.1. Kiriş Üzerinde Kullanılacak Betonarme Demirinin (Aderans Donatısı) Hesaplanması



Şekil 3.14 Öngerilmeli kiriş üzerindeki betonarme donatısı gerilme değerleri

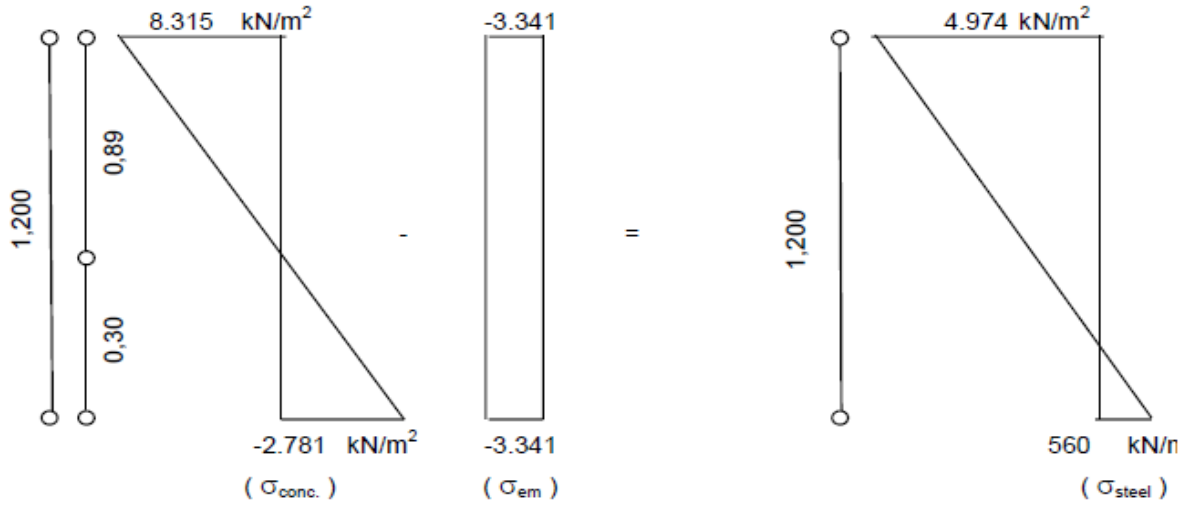
Tablo 3.20 Öngerilmeli kiriş üzerindeki betonarme demiri çekme gerilmesi kuvveti

h (m)	f_t	b	T (kN)
0,1	-2.073	1,275	201,7
	-1.091		
0,124	-1.091	1,275	53,1
	0,0	0,480	

Toplam çekme gerilmesi(T), 254,80 kN olarak hesaplanmıştır. S420 yumuşak donatı $f_s=168000 \text{ kN/m}^2 = 1.713 \text{ kgf/cm}^2$ olarak işlem görecektir ve donatı alanı;

$A_s = \frac{T}{f_s} = 0,00152 \text{ m}^2; 15,17 \text{ cm}^2$ 'yi ifade eder. Seçilen konstrüktif donatı 8Ø16 (16,08 cm^2).

3.13.2. Kiriş Altında Kullanılacak Betonarme Demirinin (Aderans Donatısı) Hesaplanması



Şekil 3.15 Öngerilmeli kiriş altındaki betonarme donatısı gerilme değerleri

Öngerilmeli betonarme kirişin altında oluşan çekme gerilmesi emniyet sınırları dâhilinde olduğundan ilave donatı ihtiyacı doğmamıştır.

3.14. Kayma Mukavemeti Kontrolleri

3.14.1. Düşey Kayma Mukavemeti Kontrolleri

Kiriş kesme mukavemetinin tespiti AASHTO 3.22 Grup-1 yüklemesi esas alınarak yapılacaktır.

$$V_u \leq f \times V_n \quad f=0,9 \text{ (AASHTO 9.14)}$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = \text{Min} (V_{ci}, V_{cw})$$

$$V_{ci} = (0,6 \times \bar{\sigma}_c \times b' \times d) + V_d + \left(\frac{V_i \times M_{cr}}{M_{max}} \right) \geq 1,7 \times \bar{\sigma}_{ci} \times b' \times d$$

$$V_{cw} = (3,5 \times \bar{\sigma}_c + 0,3 \times f_{pc}) \times b' \times d + V_p$$

$$V_p = P \times \sin \alpha, \quad V_p=0,0 \text{ (Düz Halat)}$$

$$V_u = 1,3 \times (V_{DL} + 1,67 \times V_{LL})$$

Yukarıda belirtilen,

V_u = Kesitteki faktörlü kesme kuvveti.

V_n = İtibari kesme gerilmesi.

V_c = Beton tarafından karşılanan itibari kesme gerilmesi.

V_{cw} = Diyagonal çatlakların moment ve kesme etkilerinin sonucunda oluşması durumunda betonun kesme kuvveti taşıma kapasitesi

V_{ci} = Diyagonal çatlakların gövdedeki asal çekme gerilmelerinin sonucunda oluşması durumunda betonun kesme kuvveti taşıma kapasitesi

V_s = Kesme donatısı tarafından karşılanan itibari kesme gerilmesi.

V_d = Faktörsüz ölü yüklerden oluşan kesitteki kesme gerilmesi;
 $= (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_H)$

V_i = M_{max} olduğu anda dışarıdan uygulanan yüklerden dolayı oluşan faktörlü kesme kuvveti.

M_{cr} = Kesitte dışarıdan uygulanan yüklerden dolayı oluşan eğilme çatlamasının neden olduğu moment; $= \left(\frac{I}{Y_t}\right) \times (6 \times \bar{\sigma}_c + f_{pe} - f_d)$.

f_{pe} = Kayıplardan sonra efektif öngerme kuvvetinden dolayı kesit altındaki beton gerilmesi; $= \left(\frac{P_i}{A_b}\right) + \left(\frac{e \times P_i}{Z_b}\right)$.

f_d = Faktörsüz ölü yüklerden dolayı kesit altındaki beton gerilmesi; $= \frac{M_d}{Z_b}$.

f_{pc} = Dıştan uygulanan yüklere karşı gelen en kesitin ağırlık merkezindeki basınç gerilmesini ifade eder.

Tablo 3.21 Tip2 kirişi moment ve kesme kuvveti özetleri

YÜKLEME		x = 0,00 L	H	x = 0,10 L
L= (metre)		0,00	1,20	2,50
Kiriş Zati Ağırlığı	M1	0,000 kNm	197,46 kNm	388,91 kNm
	V1	172,85 kN	156,26 kN	138,28 kN
Tabliye Ağırlığı	M2	0,000 kNm	92,46 kNm	182,11 kNm
	V2	80,938 kN	73,17 kN	64,75 kN
İlave Yükler	M3	0,000 kNm	49,64 kNm	97,76 kNm
	V3	43,450 kN	39,28 kN	34,76 kN
Hareketli Yükler	M4	0,000 kNm	280,04 kNm	583,41 kNm
	V4	233,36 kN	220,73 kN	207,04 kN

3.14.2. Mesnetlenme Ekseni Kesitinde Kayma Tahkiki

$$h = 1,2m$$

$$b' = 0,2m$$

$$d = 1,315 m > 0,8 \times h = 0,960m, \quad d=1,315m$$

$$W_{cb} = \frac{I_{xc}}{Y_t} = 0,197923 m^3$$

$$A_c = 0,764525 m^2$$

$$f'_c = 45000 kN/m^2$$

$$e_c = 0,757m$$

$$P_e = 1648 kN$$

$$V_u = 1,3(V_D + 1,67 \times V_L) \Rightarrow V_u = 893,04 kN$$

$$M_{max} = 1,3(M_D + 1,67 \times M_L) \Rightarrow M_{max} = 0,00 kN.m$$

$$Y_{cb} = 0,840960 \text{ m}$$

$$X_b = \text{Tarafsız eksenin tabana mesafesi}$$

$$f_{t(0,0L)} = -1942 \text{ kN/m}^2, \quad f_{b(0,0L)} = 9108 \text{ kN/m}^2$$

$$X_b = 0,989 \text{ m}$$

$$f_{pc} = 1364 \text{ kN/m}^2$$

$$V_i = 1,3(V_D + 1,67V_L); \quad V_i = V_u = 893,04 \text{ kN}$$

$$f_{pe} = \left(\frac{P_i}{A_b}\right) + \left(\frac{e \times P_i}{W_{cb}}\right) \Rightarrow f_{pe} = 8459 \text{ kN/m}^2$$

$$f_d = \frac{M_d}{W_{cb}}, \quad M_d = 0,00 \text{ kN.m} \Rightarrow f_d = 0,00 \text{ kN/m}^2$$

$$0,498 \times \sqrt{f'_c} = 3341 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \sqrt{f'_c} = 6708,2 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{cr} = \left(\frac{I}{Y_t}\right) \times (0,5 \times \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \Rightarrow 2338 \text{ kN.m}$$

$$V_d = 297,2 \text{ kN}$$

$$V_{ci} = (0,498 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d) + V_d + \left(\frac{V_i \times M_{cr}}{M_{max}}\right) \geq 0,1411 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d$$

$$V_{ci} = 1176,1 \text{ kN} \geq 248,9924 \text{ kN}$$

$$V_{cw} = (0,2905 \times \sqrt{f'_c} + 0,3 \times f_{pc}) \times b' \times d + V_p$$

$$0,2905 \times \sqrt{f'_c} = 1948,7 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{cw} = 620,3 \text{ kN}$$

$$V_c = 620,3 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{V_u}{f} - V_c$$

$$V_s = 372,0 \text{ kN} < V_s = 0,664 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d = 1171,70 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s}$$

$$A_v = \frac{s \times V_s}{f_y \times d}, \quad s=0,10 \text{ m}$$

$$A_v = 0,67 \text{ cm}^2 < 2,26 \text{ cm}^2 (\text{Ø12 Çift kollu etriye})$$

$$\text{Min } A_v = \frac{0,345 \times b' \times s}{f_y}, \text{ Min } A_v = 0,164 \text{ cm}^2$$

3.14.2.1. Mesnetlenme Ekseninden (H)L Mesafedeki Kesitte Kayma Tahkiki

$$h = 1,2 \text{ m}$$

$$b' = 0,2 \text{ m}$$

$$d = 1,315 \text{ m} > 0,8 \times h = 0,960 \text{ m}, \quad d=1,315 \text{ m}$$

$$W_{cb} = \frac{I_{xc}}{Y_t} = 0,197923 \text{ m}^3$$

$$A_c = 0,764525 \text{ m}^2$$

$$f'_c = 45000 \text{ kN/m}^2$$

$$e_c = 0,757 \text{ m}$$

$$P_e = 1648,1 \text{ kN}$$

$$V_u = 1,3(V_d + 1,67 \times V_l) \Rightarrow V_u = 828,52 \text{ kN}$$

$$M_{\max} = 1,3(M_d + 1,67 \times M_l) \Rightarrow M_{\max} = 1049,4 \text{ kN.m}$$

$$Y_{cb} = 0,840960 \text{ m}$$

$$X_b = \text{Tarafsız eksenin tabana mesafesi}$$

$$f_{t(H)} = 256,8 \text{ kN/m}^2, \quad f_{b(H)} = 5590 \text{ kN/m}^2$$

$$X_b = 1,258 \text{ m}$$

$$f_{pc} = 1852 \text{ kN/m}^2$$

$$V_i = 1,3(V_D + 1,67V_L) \quad V_i = V_u = 828,518 \text{ kN}$$

$$f_{pe} = \left(\frac{P_i}{A_b}\right) + \left(\frac{e \times P_i}{W_{cb}}\right) \Rightarrow f_{pe} = 8459 \text{ kN/m}^2$$

$$f_d = \frac{M_d}{W_{cb}}, \quad M_d = 339,56 \text{ kN.m} \Rightarrow f_d = 1715,60 \text{ kN/m}^2$$

$$0,498 \times \sqrt{f'_c} = 3341 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \sqrt{f'_c} = 6708,2 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{cr} = \left(\frac{I}{Y_t}\right) \times (0,5 \times \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \Rightarrow 1999 \text{ kN.m}$$

$$V_d = 268,70 \text{ kN}$$

$$V_{ci} = (0,498 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d) + V_d + \left(\frac{V_i \times M_{cr}}{M_{max}}\right) \geq 0,1411 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d$$

$$V_{ci} = 1934 \text{ kN} \geq 248,9924 \text{ kN}$$

$$V_{cw} = (0,2905 \times \sqrt{f'_c} + 0,3 \times f_{pc}) \times b' \times d + V_p$$

$$0,2905 \times \sqrt{f'_c} = 1948,7 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{cw} = 658,80 \text{ kN}$$

$$V_c = 658,80 \text{ kN}$$

$$V_s = V_u / \phi - V_c$$

$$V_s = 261,8 \text{ kN} < V_s = 0,664 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d = 1171,729 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s}$$

$$A_v = \frac{s \times V_s}{f_y \times d}, \quad s=0,10 \text{ m}$$

$$A_v=0,47 \text{ cm}^2 < 2,26 \text{ cm}^2 (\text{Ø12 Çift kollu etriye})$$

$$\text{Min } A_v = \frac{0,345 \times b' \times s}{f_y}, \quad \text{Min } A_v = 0,164 \text{ cm}^2$$

3.14.2.2. Mesnetlenme Ekseninden 0,10L Mesafedeki Kesitte Kayma Tahkiki

$$h = 1,2\text{m}$$

$$b' = 0,2\text{m}$$

$$d = 1,315\text{ m} > 0,8 \times h = 0,960\text{m}, \quad d=1,315\text{m}$$

$$W_{cb} = \frac{I_{xc}}{Y_t} = 0,197923\text{ m}^3$$

$$A_c = 0,764525\text{ m}^2$$

$$f'_c = 45000\text{ kN/m}^2$$

$$e_c = 0,757\text{ m}$$

$$P_e = 1648,15\text{ kN}$$

$$V_u = 1,3(V_d + 1,67 \times V_l) \Rightarrow V_u = 758,62\text{ kN}$$

$$M_{\max} = 1,3(M_d + 1,67 \times M_l) \Rightarrow M_{\max} = 2136\text{ kN.m}$$

$$Y_{cb} = 0,840960\text{ m}$$

$$X_b = \text{Tarafsız eksenin tabana mesafesi}$$

$$f_{t(0,1L)} = 2457,2\text{ kN/m}^2, \quad f_{b(0,1L)} = 2018,25\text{ kN/m}^2$$

$$X_b = -5,517\text{ m}$$

$$f_{pc} = 2326\text{ kN/m}^2$$

$$V_i = 1,3(V_D + 1,67V_L) \quad V_i = V_u = 758,619\text{ kN}$$

$$f_{pe} = \left(\frac{P_e}{A_c}\right) + \left(\frac{e_c \times P_e}{W_{cb}}\right) \Rightarrow f_{pe} = 8459,49\text{ kN/m}^2$$

$$f_d = \frac{M_d}{W_{cb}}, \quad M_d = 339,56\text{ kN.m} \Rightarrow f_d = 1715,64\text{ kN/m}^2$$

$$0,498 \times \sqrt{f'_c} = 3341\text{ kN/m}^2 \Rightarrow \sqrt{f'_c} = 6708,2\text{ kN/m}^2$$

$$M_{cr} = \left(\frac{I}{Y_t}\right) \times (0,5 \times \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \Rightarrow 1998,6176 \text{ kN.m}$$

$$V_d = 268,70 \text{ kN}$$

$$V_{ci} = (0,498 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d) + V_d + \left(\frac{V_i \times M_{cr}}{M_{max}}\right) \geq 0,1411 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d$$

$$V_{ci} = 1066,76 \text{ kN} \geq 248,9924 \text{ kN}$$

$$V_{cw} = (0,2905 \times \sqrt{f'_c} + 0,3 \times f_{pc}) \times b' \times d + V_p$$

$$0,2905 \times \sqrt{f'_c} = 1948,73 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{cw} = 696,20 \text{ kN}$$

$$V_c = 696,20 \text{ kN}$$

$$V_s = V_u / \phi - V_c$$

$$V_s = 146,70 \text{ kN} < V_s = 0,664 \times \sqrt{f'_c} \times b' \times d = 1171,729 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s}$$

$$A_v = \frac{s \times V_s}{f_y \times d}, \quad s=0,10\text{m}$$

$$A_v=0,27 \text{ cm}^2 < 2,26\text{cm}^2 (\text{Ø12 Çift kollu etriye})$$

$$\text{Min } A_v = \frac{0,345 \times b' \times s}{f_y}, \quad \text{Min } A_v = 0,164\text{cm}^2$$

Mesnetlenme ekseninden itibaren 2,5m'ye kadar 0,10m aralıklı Ø12 Çift kollu etriye, kirişin diğer kesimlerinde ise 0,15m aralıklı Ø12 Çift kollu etriye kullanılacaktır.

3.14.3. Yatay Kayma Mukavemeti Kontrolleri

Prekast kirişlerde yerinde dökme tabliye arasındaki kesme mukavemetinin sağlanması AASHTO 9.20.4 esas alınarak hesaplar yapılacaktır.

$$V_u \geq \phi \times V_{nh}, \quad \phi = 0,9 \text{ (AASHTO 9.14)}$$

$$V_{nh} = 0,552 \times b_v \times d \quad (\text{AASHTO 9.20.4.3 (b)})$$

$$b_v = 1,275\text{m}$$

$$d = 1,315\text{m}$$

$$V_{nh} = 925,70\text{kN}$$

$$\Phi \times V_{nh} = 833,1 \text{ kN}$$

$$V_u = 893,04 \text{ kN}$$

Donatı ile karşılanacak olan kesme kuvveti = $893,04 - 833,10 = 59,90 \text{ kN}$

$$A_v = \frac{V_s \times s}{f_s \times d}, \quad s = 0,10\text{m}$$

$$A_v = 0,027 \text{ cm}^2 \text{ (Gerekli etriye alanı)}$$

$$\text{Min } A_v = \frac{0,345 \times b' \times s}{f_y} = 1,047\text{cm}^2 \text{ (Minimum etriye alanı)}$$

Prekast kiriş etriyeleri yerinde dökme tabliye içinde de devam ettirileceğinden;

$$A_v = 2,26 > \text{Min } A_v = 1,047$$

Değeri sağladığından, prekast kiriş için kullanılan etriye yeterlidir.

3.15. Şehim Ve Ters Şehim Hesapları Ve Kontrolü

Hesaplamalar Amerikan Öngerilmeli Beton Enstitüsü (PCI) yayınlarına uygun şekilde yapılacaktır.

Tipik elemanlarda uzun zamanda oluşacak olan şehim ve ters şehimlerin tahmininde uygulanacak tavsiye edilen katsayılar;

Tablo 3.22 Tipik öngerilmeli kirişlerde uzun zamanda oluşacak sehim ve ters sehimlerin tahmininde uygulanacak tavsiye edilen katsayılar

	Dikkate Alınacak Olan Sehim		Kompozit Başlıksız Kesit	Kompozit Başlıklı Kesit
MONTAJ'DA	1-Sehim Çarpanı : Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↓	1,85	1,85
	2-Ters Sehim Çarpanı : Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↑	1,80	1,80
SERVİS'TE	3-Sehim Çarpanı : Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↓	2,70	2,40
	4-Ters Sehim Çarpanı : Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↑	2,45	2,20
	5-Sehim Çarpanı : Kirişe Gelen İlave Yüklerden Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↓	3,00	3,00
	6-Sehim Çarpanı : Kirişte Kompozit Başlıktan Dolayı Oluşan Elastik Sehimde Uygulanır	↓	-	2,30

3.15.1. Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme δ_1, ϕ_1

$$\delta_1 = \frac{5 \times G_k \times L^4}{384 \times E \times I}, \quad \phi_1 = \frac{G_k \times L^3}{24 \times E \times I}$$

$$G_k = 13,828 \text{ kN/m}, \quad \phi_1 = 0,0028 \text{ Rad}$$

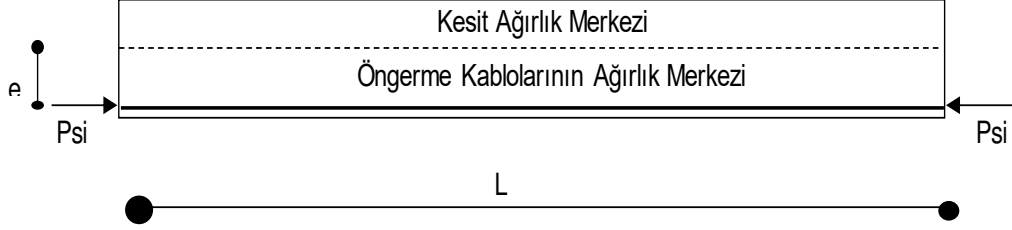
$$E = 31081000 \text{ kN/m}^2$$

$$L = 25,00 \text{ m}$$

$$I = 0,1042 \text{ m}^4$$

$$\delta_1 = 0,0217 \text{ m} \quad \Downarrow$$

3.15.2. Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Sehım Ve Dönme δ_2, ϕ_2



Şekil 3.16 Öngerilmeli Kiriş En Kesiti Ve Öngerme Halatının Ağırlık Merkezi

$$\delta_2 = \frac{\text{Psi} \times e_p \times L^2}{8 \times E \times I}, \phi_2 = \frac{\text{Psi} \times e_p \times L}{2 \times E \times I}$$

$$\text{Psi} = 2991,30 \text{ kN}, \phi_2 = -0,0067 \text{ Rad}$$

$$e_p = 0,581 \text{ m}$$

$$E = 31081000 \text{ kN/m}^2$$

$$L = 25,00 \text{ m}$$

$$I = 0,1042 \text{ m}^4$$

$$\delta_2 = -0,0419 \text{ m} \quad \uparrow$$

3.15.3. Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Ve Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Sehım Ve Dönme $\delta_1+\delta_2, \phi_1+\phi_2$

$$\delta_1 = 0,0217 \text{ m} \quad \downarrow, \quad \phi_1 = 0,0028 \text{ Rad}$$

$$\delta_2 = -0,0419 \text{ m} \quad \uparrow, \quad \phi_2 = -0,0067 \text{ Rad}$$

$$\delta_1+\delta_2 = -0,0202 \text{ m} \quad \uparrow, \quad \phi_1+\phi_2 = -0,0039 \text{ Rad}$$

3.15.4. Depolama Sırasında Montaja Kadar Oluşacak Ters Sehım Ve Dönme Δ_1, ϕ_d

$$\Delta_1 = 1,8 \times -0,0202 = -0,0364 \text{ m}$$

$$\phi_d = 1,8 \times -0,0039 = -0,0071 \text{ Rad}$$

3.15.5. Tabliye Ağırlığından Dolayı Sehim Ve Dönme δ_3, ϕ_3

$$\delta_3 = \frac{5 \times G_t \times L^4}{384 \times E \times I}, \quad \phi_3 = \frac{G_t \times L^3}{24 \times E \times I}$$

$$G_k + G_t = 6,475 \text{ kN/m}, \quad \phi_3 = 0,0013 \text{ Rad}$$

$$E = 31081000 \text{ kN/m}^2$$

$$L = 25,00 \text{ m}$$

$$I = 0,1042 \text{ m}^4$$

$$\delta_3 = 0,0102 \text{ m} \quad \Downarrow$$

3.15.6. Kompozit Kesite Etkiyen İlave Yüklerden Dolayı Sehim Ve Dönme δ_4, ϕ_4

$$\delta_4 = \frac{5 \times G_t \times L^4}{384 \times E \times I_c}, \quad \phi_4 = \frac{G_t \times L^3}{24 \times E \times I_c}$$

$$G_t = 3,476 \text{ kN/m}, \quad \phi_4 = 0,0004 \text{ Rad}$$

$$E = 31081000 \text{ kN/m}^2$$

$$L = 25,00 \text{ m}$$

$$I_c = 0,1664 \text{ m}^4$$

$$\delta_4 = 0,0034 \text{ m} \quad \Downarrow$$

3.15.7. Uzun Zaman Diliminde Sabit Yüklerden Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme

Δ_2, ϕ_y

$$\delta_1 = 0,0217 \times 2,40 = 0,0521, \quad \phi_1 = 0,0028 \times 2,40 = 0,0067$$

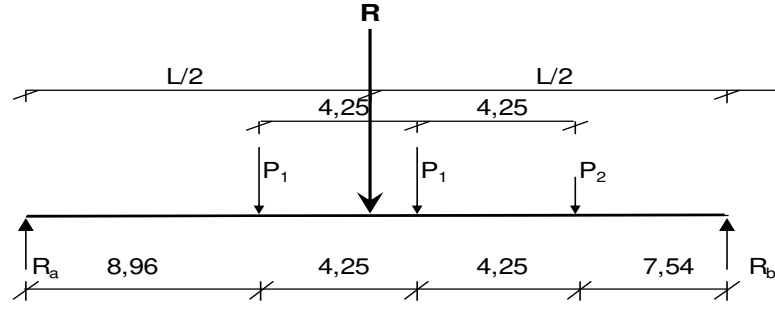
$$\delta_2 = -0,0419 \times 2,20 = -0,0923, \quad \phi_2 = -0,0067 \times 2,20 = -0,0148$$

$$\delta_3 = 0,0102 \times 2,30 = 0,0234, \quad \phi_3 = 0,0013 \times 2,30 = 0,0030$$

$$\delta_4 = 0,0034 \times 3,00 = 0,0103, \quad \phi_4 = 0,0004 \times 3,00 = 0,0013$$

$$\Delta_2 = -0,0065 \quad \Uparrow, \quad \phi_y = -0,0038$$

3.15.8. Hareketli Araç Yüklerinden Dolayı Oluşan Sehim Ve Dönme δ_H , ϕ_H



Şekil 3.17 Öngerilmeli Kirişe Etki Eden Hareketli Yükler

$$P = R = 263,191 \text{ kN}, P_1 = 116,974 \text{ kN}, P_2 = 29,243 \text{ kN}$$

$$\delta_H = \frac{R \times L^3}{48 \times E \times I_c}, \quad \phi_H = \frac{R \times L^2}{16 \times E \times I_c}$$

$$E = 31081000 \text{ kN/m}^2, \quad \phi_H = 0,0020 \text{ Rad}$$

$$L = 25,00 \text{ m}$$

$$I_c = 0,1664 \text{ m}^4$$

$$\delta_H = 0,0166 \text{ m} \quad \Downarrow$$

3.15.9. Toplam Yüklerden Dolayı Oluşan Sonuç Sehim Ve Dönme Δ_S , ϕ_S

$$\Delta_S = \Delta_2 + \delta_H, \quad \phi_S = \phi_y + \phi_H$$

$$\Delta_S = -0,0065 + 0,01656, \quad \phi_S = -0,0038 + 0,0020$$

$$\Delta_S = 0,0101 \text{ m} \quad \Uparrow, \quad \phi_S = -0,0018 \text{ Rad}$$

$$L/800 = 0,0313$$

$$\Delta_S < L/800$$

$$0,0101 < 0,0313$$

şartları sağlanmaktadır.

3.16. Tip Kirişler Gerilme Tahkik Detayları

- Tip1 kirişi için her bir 0,1L 'deki gerilme tahkikleri aşağıda hesaplanarak gösterilmiştir.

Gerilme işaretleri; (-) Çekme, (+) Basınç olarak ifade edilmektedir.

İlk Öngerme Anındaki Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -2.651 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 11.524 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{tH} = -1.532 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{bH} = 10.186 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.1L)} = -29 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.1L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.1L)} = 8.388 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.2L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.2L)} = 2.011 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.2L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.2L)} = 5.949 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.3L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.3L)} = 3.468 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.3L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.3L)} = 4.207 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.4L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.4L)} = 2.365 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.4L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.4L)} = 11.373 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.5L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.5L)} = 2.435 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede giriş altında:

$$f_{b(0.5L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.5L)} = 12.124 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde İlk Öngerme Halinde Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede giriş üstünde:

$$f_{t(0.528L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_l/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.528L)} = 2.412 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede giriş altında:

$$f_{b(0.528L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.528L)} = 12.152 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede giriş üstünde:

$$f_{t(0.67L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_l/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.67L)} = 1.581 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede giriş altında:

$$f_{b(0.67L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_l/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.67L)} = 13.147 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde giriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -2.410 \text{ kN/m}^2 > 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 10.474 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{tH} = -103 \text{ kN/m}^2 > 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{bH} = 7.004 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.1L)} = 3.087 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.1L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.1L)} = 2.141 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.2L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.2L)} = 6.339 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.2L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.2L)} = -2.101 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.3L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.3L)} = 9.499 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.3L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.3L)} = -6.963 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.4L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.4L)} = 9.636 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.4L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.4L)} = -2.499 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.5L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.5L)} = 10.142 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.5L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.5L)} = -2.636 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.528L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.528L)} = 10.120 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.528L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.528L)} = -2.619 \text{ kN/m}^2 < 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

tahkiklerin sonucu hesaplanarak analizi tamamlanmıştır.

- Tip3 kirişi için her bir 0,1L 'deki gerilme tahkikleri aşağıda hesaplanarak gösterilmiştir.

Gerilme işaretleri; (-) Çekme, (+) Basınç olarak ifade edilmektedir.

İlk Öngerme Anındaki Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -2.085 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 8.868 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{tH} = -1.036 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{bH} = 7.700 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0,1L)} = -411 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,1L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_i / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,1L)} = 7.004 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,2L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_i / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,2L)} = 890 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,2L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_i / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,2L)} = 5.554 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,3L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_i / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,3L)} = 1.820 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,3L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_i / W_{bb}))$$

$$f_{b(0,3L)} = 4.519 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,4L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_i / W_{bt}))$$

$$f_{t(0,4L)} = 1.999 \text{ kN/m}^2 > 0,623\sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,4L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_i / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.4L)} = 5.510 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.5L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.5L)} = 1.976 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.5L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.5L)} = 6.130 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde İlk Öngerme Halinde Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.528L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.528L)} = 1.961 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.528L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.528L)} = 6.147 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.67L)} = ((P_i / A_b) - (P_i * e_p / W_{bt}) + (M_1/W_{bt}))$$

$$f_{t(0.67L)} = 1.431 \text{ kN/m}^2 > 0,623 \sqrt{f_{ci}} = -3.619 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,67L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.67L)} = ((P_i / A_b) + (P_i * e_p / W_{bb}) - (M_1/W_{bb}))$$

$$f_{b(0.67L)} = 6.738 \text{ kN/m}^2 < 0,60 \times f_{ci} = 20.250 \text{ kN/m}^2$$

Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmeleri

Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde:

$$f_{t(0.0L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}))$$

$$f_{t(0.0L)} = -2.029 \text{ kN/m}^2 > 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetlenme ekseninde kiriş altında:

$$f_{b(0.0L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}))$$

$$f_{b(0.0L)} = 8.631 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş üstünde:

$$f_{tH} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{tH} = 130 \text{ kN/m}^2 > 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten H mesafede kiriş altında:

$$f_{bH} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{bH} = 5.663 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.1L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.1L)} = 1.458 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,1L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.1L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.1L)} = 3.814 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.2L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0,2L)} = 3.481 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,2L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,2L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0,2L)} = 1.388 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,3L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0,3L)} = 5.490 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,3L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,3L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0,3L)} = -1.425 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,4L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0,4L)} = 6.352 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,4L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,4L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0,4L)} = -1.592 \text{ kN/m}^2 > 0,498 \sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0,5L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0,5L)} = 6.601 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,5L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0,5L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.5L)} = -1.447 \text{ kN/m}^2 < 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

Kritik Kesitlerde Tüm Kayıplardan Sonra Beton Gerilmelerinin Tahkiki

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş üstünde:

$$f_{t(0.528L)} = ((P_e / A_b) - (P_e * e_p / W_{bt}) + (M_d/W_{bt}) + (M_4+M_H)/W_{ct})$$

$$f_{t(0.528L)} = 6.588 \text{ kN/m}^2 < 0,40 \times f_{ci} = 18.000 \text{ kN/m}^2$$

Mesnetten 0,528L mesafede kiriş altında:

$$f_{b(0.528L)} = ((P_e / A_b) + (P_e * e_p / W_{bb}) - (M_d/W_{bb}) - (M_4+M_H)/W_{cb})$$

$$f_{b(0.528L)} = -1.438 \text{ kN/m}^2 < 0,498\sqrt{f_c} = -3.341 \text{ kN/m}^2$$

tahkiklerin sonucu hesaplanarak analizi tamamlanmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çağdaş mühendisliğin en önemli çalışmalarından birisi olan öngerilmeli beton, kullanım alanının fazla olmasından ötürü günümüz Türkiye’inde sıkça kullanılmaya başlanılan bir sistem haline gelmiştir.

Son yıllarda kullanımı artmakta olan öngerilme imalatlarında teknolojiler gün geçtikçe ilerlemektedir. Bu teknolojiler ile birlikte mühendisliğinde her an üzerine ekleyip teknoloji ile birlikte daha ekonomik daha emniyetli daha ergonomik yapılar tasarlaması gerekmektedir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda yapılardaki farklı gerilmelere karşı bir takım önlemler alınmakta.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, öngerilmeli prefabrik kirişler üzerinde analitik çalışmalar yapılmıştır. Öngerilmeli prefabrik kirişler ile alakalı genel bilgiler, ülkemiz ve dünyadaki kullanımı ve gelişimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Aynı malzeme özelliklerine sahip tek açıklıklı ve farklı genişliğe sahip öngerilmeli prefabrik kirişlerin değişik iç ve dış etkiler altındaki davranışlarına bağlı olarak analizleri yapılmıştır. Zati, hareketli ve ilave yüklerin kombinasyonuna bağlı olarak yapılan hesap ve analizler sonucunda kesit özellikleri, kesit tesirleri, öngermeli halat sayısı, öngermeli halatların öngerilmeli prefabrike kiriş üzerindeki yerleşim planı, kılıflanacak halat sayısı, çatlakların sınıflandırılması ve süneklik amacıyla maksimum-minimum donatı kontrolleri ve sehim parametreleri kontrol edilerek gerekli bilgilerin toplanması amaçlanmıştır.

Tip kirişlerin hesap ve tasarımı için “American Association of State Highway and Transportation Officials” tarafından yayımlanmış “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” adlı yönetmelikte yer alan koşullar büyük ölçüde dikkate alınmıştır.

Analizler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda en uygun halat sayısı ve halat dizilimi yapılmıştır ve analitik çalışmalar ile sehim sınırları karşılaştırılmıştır. Farklı gerilmeler karşısında öngerilmeli prefabrik kirişlerin göstermiş olduğu sehim davranışları için hesaplamalar yapılmıştır.

Bu çalışmada yapılan analizler sonucu yapılan değerlendirmeler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Bu yüksek lisans tez çalışmasında kirişlerin tasarımı ve analizi için “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” yönetmeliği tarafından tavsiye edilen çekme ve basınç emniyet gerilmeleri esas alınarak yapılmıştır.

- Öngerilmeli kiriş analizinde kullanılabilirliği hesaplamak için var olan ve oluşabilecek yüklerin hesabı ve bu yüklerin belirlenmesi ile birlikte öngerilmeli kirişte ortaya çıkacak kesit tesirleri ve bu kesitlerin özellikleri belirlenip değerlendirilmiştir. Ardından öngerilmeli kirişteki çatlak oluşumunu engelleyebilmek, mikro çatlakları en aza indirmek ve sünekliğin sağlanabilmesi için maksimum ve minimum sınır değerlerine ve sehim sınırları gibi kurallara uyulmuştur.
- Seçilen tip kirişlerde prefabrik ve kompozit öngerilmeli kirişin alt ve üst liflerinde oluşan çekme ve basınç gerilmeleri etkisinde kalmaktadır. Yönetmelikte belirlenen sınır değerler içerisindeki durumunu gözlemledikten sonra seçilen kirişlerde kullanılacak öngerme halat sayısı, çekme gerilmesi dikkate alınarak yönetmelikte belirtilen sınır değerleri aşmayacak şekilde seçilmiştir.
- Ülkemiz standartlarında tasarım hesaplarında kullanılan $H_{30}S_{24}$ tipi standart tasarımı ele alındığında en elverişsiz yükleme durumu tasarım kamyonu yükleme altında elde edilmiştir.
- Öngerme halatları belirlendikten sonra yükleri belirlenen tip kirişlerin taşıma kapasite kontrolleri yönetmelikte belirtilen yüklemeler esas alınarak yapılmıştır. Yüklere maruz kalan seçilen tip kirişlerin öngerme kablolarındaki ortalama gerilmeleri hesaplanmış ve eğilme mukavemet değerlerinin (taşıma kapasitesi) yönetmelikte verilen sınır değerlerin içerisinde kaldığı hesaplanmıştır.
- Hesaplanan belirli açıklıklarda kablolarla aktarılan öngerme kuvveti yalnızca öngerilme kiriş zati yükünün mevcut olduğu öngerme aşamasında öngerilme kirişin alt kısmında, servis durumunda öngerilmeli kirişin üstünde emniyet gerilmesi sınır değerlerini aşan meydana gelen basınç gerilmelerinin oluşmasına neden olmuştur. Bu durumlarda öngerilmeli kirişin kesiti büyütülmüştür.
- Öngerilmeli prefabrik kirişlerin mesnet bölgelerinde oluşacak olan gerilmeler, zati ve hareketli yüklerden oluşan momentin çok küçük olması sebebiyle öngerilmeli kirişin boyunun tamamında düz olarak yerleştirilen öngerme halatlarından kaynaklanan gerilmeler olduğu ortaya çıkmaktadır. Mesnet bölgelerinde oluşan bu gerilmeleri öngerme halatları kılıflanarak istenilen seviyeye getirilmiştir.

- Eğilme mukavemeti açısından tüm 3 tip kesitte yetersizlik göstermemektedir. Tip kirişler etki edecek tüm yükleri öngerme halatlarının sayısının arttırılması ile taşıyabilmektedir. Kirişin alt başlığına montajı yapılan öngerme halatının sayısına bağlı olarak artış olmaktadır. Öngerilmeli kirişe etkiyecek zati, hareketli ve ilave yüklerden oluşacak olan gerilmeleri istenilen seviyeye getirebilmek için halat sayısı arttırıla bilinmektedir. Halat sayısındaki bu artışın emniyet gerilmelerini geçebilecek basınç ve çekme gerilmelerini ortaya çıkartacağı unutulmamalıdır.
- Öngerme donatı sayısı yapılan analizler sonrasında yeterli olduğu tespit edilmiştir.
- Öngerilmeli kirişlerde oluşacak olan öngerme kayıpları yönetmelikteki sınır değeri geçmeyip güvenli tarafta kaldığı tespit edilmiştir. Öngerme kaybı öngerilmeli kirişin her tip en kesiti azaldıkça doğru orantılı bir şekilde azalmakta, üstyapı en kesitinin genişlediği durumlarda da genel itibari ile azalış gösterdiği fakat üstyapı en kesitinin sabit ya da daraldığı ve açıklığında arttığı durumlarda ise öngerme halat sayısı ile doğru orantılı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Öngerilmeli kirişin alt başlık kısmına yerleşimi yapılan öngerme halatlarındaki gerilmelerin kirişe aktarma evresinde kirişte oluşacak olan gerilmeler ele alındığında kirişte mesnet bölgelerinde gerilme yığılmaları oluşumu tespit edilmiştir. Bu tespitler sonucunda etkin yönetmelik tarafından belirlenmiş gerilme değerlerine ulaşabilmek için gerilme yığılması oluşan bölgede belirlenen miktarda öngerme halatında kılıflama gereksinimi doğmuştur.
- Bu yüksek lisans tez çalışmasında, tip kirişler aynı açıklıkta olduğu için mesnet bölgesinde oluşan emniyet gerilme değerlerinden fazla oluşan gerilmelerin azaltılması ve alt başlığa montajı yapılan öngerme halat sayısından ötürü oluşan gerilmeleri azalması için yani fazla olan gerilmeleri sınır değerler içerisine gelmesi için gerekli olacak kılıf sayısının arttığı tespit edilmiştir.
- Öngerilmeli kiriş için yapılan analizler sonrasında tespit edilen öngerme halatlarının betona aktarma evresinde öngerilmeli kirişte normal sehim davranışının tersi oluşmuştur. Bu yukarı yönlü sehim öngerilmeli kirişin alt başlığına montajı yapılan öngerme halatlarının sayısının ve etki eden yüklerin azalması ya da artması ile doğru orantılı bir şekilde sehim miktarda artmakta veya azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

- Maksimum momentin olduğu eksene yaklaştıkça sehim miktarının arttığı görülmüştür.

4.1. Tip Kirişleri Moment Tesirleri Özetleri

Tablo 4.1 Tip Kirişler zati ağırlığından meydana gelen moment (M_{g1}) tesirleri

Tip Kirişler Zati Ağırlığından Meydana Gelen Moment Tesirleri (M_{g1}) (kNm)			
L(m)	TİP1	TİP2	TİP3
0,0L	0,00	0,00	0,00
H	138,76	197,46	275,39
0,1L	325,21	388,91	439,45
0,2L	578,15	691,40	781,25
0,3L	758,82	907,46	1025,39
0,4L	867,23	1037,10	1171,88
0,5L	903,36	1080,31	1220,70

Tablo 4.2 Tip kirişler döşeme ağırlığından meydana gelen moment (M_{g2}) tesirleri

Tip Kirişler Döşeme Ağırlığından Meydana Gelen Moment (M_{g2}) Tesirleri			
L(m)	TİP1	TİP2	TİP3
0,0L	0,00	0,00	0,00
H	58,20	92,46	107,51
0,1L	136,41	182,11	171,56
0,2L	242,50	323,75	305,00
0,3L	318,28	424,92	400,31
0,4L	363,75	485,63	457,50
0,5L	378,91	505,86	476,56

Tablo 4.3 Tip kirişler ilave yüklerden meydana gelen moment (M_{g3}) tesirleri

Tip Kirişler İlave Yüklerden Meydana Gelen Moment (M_{g3}) Tesirleri			
L(m)	TİP1	TİP2	TİP3
0,0L	0,00	0,00	0,00
H	39,02	49,64	60,28
0,1L	91,46	97,76	96,19
0,2L	162,60	173,80	171,00
0,3L	213,41	228,11	224,44
0,4L	243,90	260,70	256,50
0,5L	254,06	271,56	267,19

Tablo 4.4 Tip kirişler standart kamyon yükünden meydana gelen moment (M_{g4-h}) tesirleri

Tip Kirişler Standart Kamyon Yükünden Meydana Gelen Moment (M_{g4-h}) Tesirleri			
L(m)	TİP1	TİP2	TİP3
0,0L	0,00	0,00	0,00
H	174,80	280,04	329,77
0,1L	436,99	583,41	549,62
0,2L	472,04	630,20	593,70
0,3L	746,39	996,47	938,76
0,4L	922,17	1231,15	1159,85
0,5L	999,38	1334,23	1256,96

Tablo 4.5 Tip kirişler eşdeğer şerit yükünden meydana gelen moment ($M_{g4-ş}$) tesirleri

Tip Kirişler Eşdeğer Şerit Yükünden Meydana Gelen Moment ($M_{g4-ş}$) Tesirleri			
L(m)	TİP1	TİP2	TİP3
0,0L	0,00	0,00	0,00
H	90,91	118,96	143,76
0,1L	213,07	234,30	229,40
0,2L	378,79	416,54	407,83
0,3L	497,17	546,71	535,27
0,4L	568,19	624,81	611,74
0,5L	591,87	650,84	637,23

4.2. Tip Kirişleri Öngerme Özetleri**Tablo 4.6 Tip1 kiriş öngerme özetleri**

L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
N(adet)	10	10	10	10	13	17	18
As*(m ²)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0018	0,0024	0,0025
d'(m)	0,090	0,090	0,090	0,090	0,088	0,085	0,087
e _p (m)	0,455	0,455	0,455	0,455	0,457	0,460	0,458
e _c (m)	0,596	0,596	0,596	0,596	0,599	0,602	0,600
P(kN)	1798,69	1798,69	1798,69	1798,69	2338,30	3057,78	3237,65
α(%)	95,30	95,80	96,50	98,20	96,60	95,10	94,80
β(%)	81,00	82,70	85,00	88,10	86,50	82,60	81,80
P _i (kN)	1759,59	1759,59	1759,59	1759,59	2287,47	2991,30	3167,26
P _e (kN)	1599,27	1599,27	1599,27	1599,27	2079,05	2718,76	2878,69

Tablo 4.7 Tip2 kiriş öngerme özetleri

L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
N(adet)	10	10	10	10	13	16	17
As*(m ²)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0018	0,0022	0,0024
d'(m)	0,084	0,084	0,084	0,084	0,088	0,090	0,085
e _p (m)	0,582	0,582	0,582	0,582	0,578	0,576	0,581
e _c (m)	0,757	0,757	0,757	0,757	0,753	0,751	0,756
P(kN)	1798,69	1798,69	1798,69	1798,69	2338,30	2877,91	3057,78
α(%)	95,95	96,40	96,92	97,67	97,02	96,16	95,82
β(%)	82,70	84,40	86,00	88,60	87,30	85,10	84,30
P _i (kN)	1759,59	1759,59	1759,59	1759,59	2287,47	2815,34	2991,30
P _e (kN)	1648,15	1648,15	1648,15	1648,15	2142,59	2637,04	2801,85

Tablo 4.8 Tip3 kiriş öngerme özetleri

L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
N(adet)	11	11	11	11	11	13	14
As*(m ²)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0018	0,0020
d'(m)	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,088	0,086
e _p (m)	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,705
e _c (m)	0,899	0,899	0,899	0,899	0,899	0,898	0,900
P(kN)	1978,56	1978,56	1978,56	1978,56	1978,56	2338,30	2518,17
α(%)	96,26	96,72	97,00	97,57	97,98	97,54	97,28
β(%)	83,50	85,10	86,00	87,90	89,30	88,30	87,60
P _i (kN)	1935,55	1935,55	1935,55	1935,55	1935,55	2287,47	2463,43
P _e (kN)	1883,93	1883,93	1883,93	1883,93	1883,93	2226,47	2397,73

4.3. Tip Kirişleri Taşıma Kapasitesi ve Minimum Donatı Kontrolleri

Tablo 4.9 Tip1 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri

Tip1 Kiriş Taşıma Kapasitesi Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
Prefabrik Kiriş							
M_u	0,000	686,256	1667,705	2303,015	3298,075	3919,364	4166,849
ΦM_n	2740,852	2740,852	2740,852	2740,852	3514,133	4509,097	4740,706
Kompozit Kiriş							
M_u	0,000	686,256	1667,705	2303,015	3298,075	3919,364	4166,849
ΦM_n	7431,138	7431,138	7431,138	7431,138	7448,682	7471,385	7456,479

Tablo 4.10 Tip1 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri

Tip1 Kiriş Minimum Donatı Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
ΦM_n	2740,852	2740,852	2740,852	2740,852	3514,133	4509,097	4740,706
$1.2 \cdot M_{cr}$	2285,17	2246,90	2195,80	2126,07	2546,12	3088,09	3203,48

Tablo 4.11 Tip2 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri

Tip2 Kiriş Taşıma Kapasitesi Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
Prefabrik Kiriş							
M_u	0,000	1049,39	2135,99	2913,79	4191,98	4991,28	5311,67
ΦM_n	3316,47	3316,47	3316,47	3316,47	4253,97	5173,41	5500,97

Kompozit Kiriş							
M_u	0,000	1049,39	2135,99	2913,79	4191,98	4991,28	5311,67
ΦM_n	12243,11	12243,11	12243,11	12243,11	12205,15	12181,43	12235,85

Tablo 4.12 Tip2 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri

Tip2 Kiriş Minimum Donatı Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
ΦM_n	3316,47	3316,47	3316,47	3316,47	4253,97	5173,41	5500,97
$1.2 \cdot M_{cr}$	2981,77	3316,47	2885,21	2810,97	3335,52	3846,07	4029,40

Tablo 4.13 Tip3 kiriş taşıma kapasitesi kontrolleri

Tip3 Kiriş Taşıma Kapasitesi Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
Prefabrik Kiriş							
M_u	0,00	1292,07	2112,59	2923,34	4183,23	4969,66	5282,65
ΦM_n	4476,15	4476,15	4476,15	4476,15	4476,15	5258,52	5653,80
Kompozit Kiriş							
M_u	0,00	1292,07	2112,59	2923,34	4183,23	4969,66	5282,65
ΦM_n	14226,39	14226,39	14226,39	14226,39	14226,39	14222,38	14241,29

Tablo 4.14 Tip3 kiriş minimum donatı kontrolü hesap değerleri

Tip3 Kiriş Minimum Donatı Kontrolü Hesap Değerleri							
L(m)	0,0L	H	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
ΦM_n	4476,15	4476,15	4476,15	4476,15	4476,15	5258,52	5653,80
$1.2 \cdot M_{cr}$	4123,96	4073,00	4040,82	3974,64	3853,77	4388,90	4622,00

4.4. Şehim ve Dönme Hesap Detayları

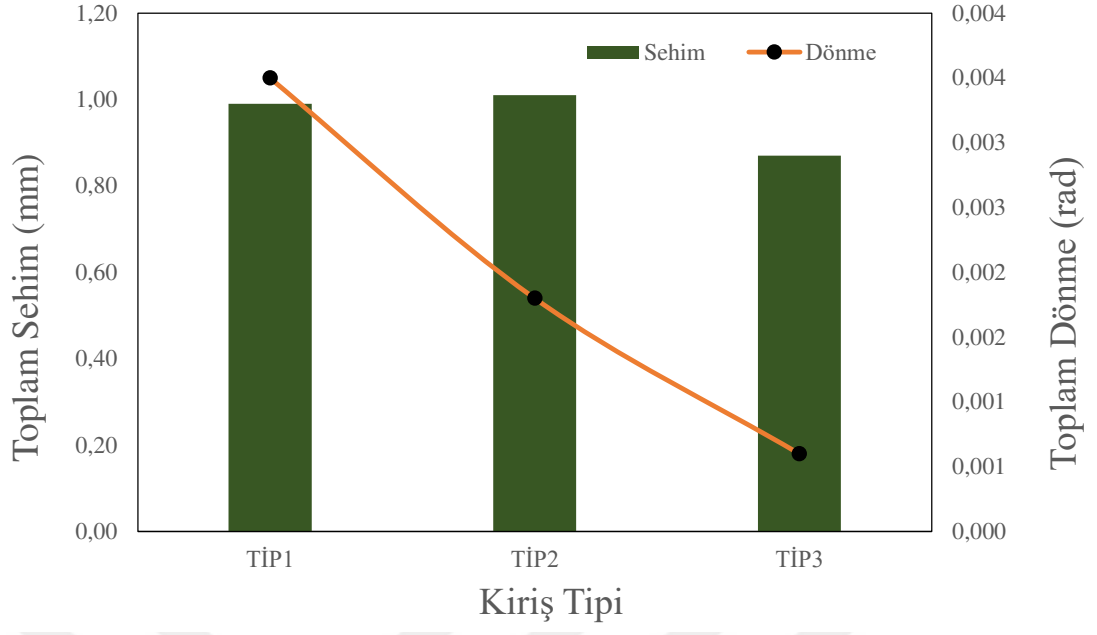
- δ_1 = Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Şehim
 ϕ_1 = Öngerme Anında Kiriş Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Dönme
 δ_2 = Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Şehim
 ϕ_2 = Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Dolayı Oluşan Dönme
 $\delta_1 + \delta_2$ = Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Ve Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Şehim
 $\phi_1 + \phi_2$ = Öngerme Anında Öngerme Kuvvetinden Ve Kendi Ağırlığından Dolayı Oluşan Dönme
 Δ_1 = Depolama Sırasında Montaja Kadar Oluşacak Ters Şehim
 ϕ_d = Depolama Sırasında Montaja Kadar Oluşacak Dönme
 δ_3 = Tabliye Ağırlığından Dolayı Şehim
 ϕ_3 = Tabliye Ağırlığından Dolayı Dönme
 δ_4 = Kompozit Kesite Etkiyen İlave Yüklerden Dolayı Şehim
 ϕ_4 = Kompozit Kesite Etkiyen İlave Yüklerden Dolayı Dönme
 Δ_2 = Uzun Zaman Diliminde Sabit Yüklerden Dolayı Oluşan Şehim
 ϕ_y = Uzun Zaman Diliminde Sabit Yüklerden Dolayı Oluşan Dönme
 δ_H = Hareketli Araç Yüklerinden Dolayı Oluşan Şehim
 ϕ_H = Hareketli Araç Yüklerinden Dolayı Oluşan Dönme
 Δ_s = Toplam Yüklerden Dolayı Oluşan Sonuç Şehim
 ϕ_s = Toplam Yüklerden Dolayı Oluşan Sonuç Dönme

Tablo 4.15 Tip kirişler sehîm hesap değeri

Tip Kirişler Sehîm Değeri			
	TİP1	TİP2	TİP3
$\delta_1(m)$	0,0335	0,0217	0,0137
$\delta_2(m)$	-0,0646	-0,0419	-0,0234
$\delta_1+\delta_2(m)$	-0,0311	-0,0202	-0,0097
$\Delta_1(m)$	-0,0559	-0,0364	-0,0175
$\delta_3(m)$	0,0141	0,0102	0,0054
$\delta_4(m)$	0,0057	0,0034	0,0020
$\Delta_2(m)$	-0,0122	-0,0065	-0,0004
$\delta_H(m)$	0,0221	0,0166	0,0091
$\Delta_S(m)$	0,0099	0,0101	0,0087

Tablo 4.16 Tip kirişler dönme hesap detayları

Tip Kirişler Dönme Değeri			
	TİP1	TİP2	TİP3
$\phi_1(rad)$	0,0043	0,0028	0,0018
$\phi_2(rad)$	-0,0103	-0,0067	-0,0037
$\phi_1+\phi_2(rad)$	-0,0060	-0,0039	-0,0020
$\phi_d(rad)$	-0,0109	-0,0071	-0,0036
$\phi_3(rad)$	0,0018	0,0013	0,0007
$\phi_4(rad)$	0,0007	0,0004	0,0003
$\phi_y(rad)$	-0,0061	-0,0038	-0,0017
$\phi_H(rad)$	0,0027	0,0020	0,0011
$\phi_S(rad)$	-0,0035	-0,0018	-0,0006



Şekil 4.1 Tip kirişler sehim ve dönme değerleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Öngerme anında öngerilmeli kirişin kendi ağırlığından oluşan sehım miktarının öngerilmeli kiriş tip kiriş en kesiti arttıkça azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Maksimum sehım miktarı sırası ile Tip1-Tip2-Tip3 olarak sıralanmaktadır.
- Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan ters sehım miktarı öngerilmeli tip kiriş en kesiti arttıkça doğru orantılı bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Maksimum ters sehım miktarı sırası ile Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Öngerme anında öngerme kuvvetinden ve öngerilmeli kirişin kendi ağırlığından dolayı oluşan sehım miktarı her iki yükten oluşan etkilere maruz kaldığı için her iki yükün kombinasyonu ile öngerilmeli kiriş tip en kesiti arttıkça doğru orantılı bir şekilde artış göstermektedir. Maksimum sehım miktarı sırası ile Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Depolama sırasında montaja kadar oluşacak ters sehım miktarı öngerme anında öngerme kuvvetinden ve öngerilmeli kirişin kendi ağırlıklarının kombinasyonu sonucu oluşan sehım miktarının yaklaşık 1.8 katına değerdir. Bunun sonucunda maksimum ters sehım miktarı sırası ile Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Döşeme ağırlığından dolayı oluşan sehım miktarı öngerilmeli kiriş tip en kesiti arttıkça sehım miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Maksimum sehım miktarı sırası ile Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Kompozit kesite etkiyen ilave yüklerden dolayı oluşan sehım miktarı öngerilmeli kiriş tip en kesiti arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Bu durumda oluşacak maksimum sehım miktarı Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Hareketli araç yüklerinden dolayı oluşan sehım miktarı tekerlek dingil yüklerinin artması ile ters orantılı olarak öngerilmeli kiriş tip kesiti arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Bu durumda maksimum sehım miktarı Tip3-Tip2-Tip1 olarak sıralanmaktadır.
- Genel itibari ile karşılaştırılacak olunursa toplam yüklerden dolayı oluşan sehım miktarı tüm yüklerin toplamından oluşacak olan değerdir. Bu durumda maksimum sehım miktarı Tip2-Tip1-Tip3 olarak sıralanmaktadır.

Bu alışma ile büyük açıklıklı öngerilmeli betonarme kiriş tasarımında kesit geometrisinin oldukça önemli olduğu, minimum maliyet ve maksimum performans açısından kesit optimizasyon önemi ortaya konulmuştur. Ayrıca, kullanılacak malzeme özellikleri, kiriş açıklığı ve yükleme durumlarının öngerilmeli betonarme kirişlerin optimum kesit tasarımı için değişken olarak ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.



6. KAYNAKÇA

- Abdulaliyev, Z., Dönmez, A., Ataoğlu, Ş., 2015. *Öngerilmeli Beton Elemanlarda Fotoelastik Yöntemle Gerilme Analizi*, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 2, No 3, ss. 60-66.
- Aktaş, E., 2010. *Öngerilme Kirişli Bir Köprü Tasarımı ve Performansının Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atmaca, B., 2018. *Öngerilmeli Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımının İrdelenmesi ve Bilgisayar Programının Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Atmaca, B., Ateş, Ş., 2018. *The Effect of Strand Configuration on Stress Distribution and Debonding Parameters of Prestressed Girder After Detensioning*, Düzce University Journal of Science & Technology, 6 (2018), ss. 401-408.
- Atmaca, B., 2019. *Comparison of Dynamic Characteristics of Prestressed and Reinforced Concrete Beams*, Düzce University Journal of Science & Technology, 7 (2019), ss. 37-44.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012. *AASHTO LRFD bridge design specifications*, customary U.S. units. 6th Ed., Washington, D.C.
- Aydın, Z., 2006. *Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üst Yapılarının Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dönmez, A., 2015. *Öngerilmeli İnşaat Elemanlarında Gerilme Analizi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakır, E., 2011. *Öngerilmeli Çelik Kafes Kirişlerin Minimum Ağırlıklı Boyutlandırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Eker, B. N. K., 2018. *Maden Viyadüğü'nün Öngerilmeli Prekast ve Kompozit T Kesitli Köprü Kirişlerinin Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Ekici, Ü., 2017. *Öngerilmeli Demiryolu Köprüleri Üzerine Bir Çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Evirgen, A., 2007. *Sınırlı Öngerilmeli Kirişlerde Betonun Değişik Çekme Modellerinin Yerdeğiştirmelere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Fenercioğlu, T., Sönmez, N., Koçak, A., Uğur, Y., & Sönmez, İ. K., 2007. *Öngermeli Betondan I Kesitli Prefabrike Kirişlerin Demiryolu Köprülerinde Etkin Kullanımı*, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, ss. 315-325. Antalya.
- Gonenli, C., Ozturk, H., Das, O., 2022. *Vibration Analysis of A Pre-Stressed Curved Thin Plate*, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(1), ss. 72-80.
- Heydarinouri, H., Nussbaumer, A., Motavalli, M., Ghafoori, E., 2021. *Multiaxial Fatigue Criteria For Prestressed Strengthening Of Steel Connections*, International Journal of Fatigue, Volume 153, 2021, 106470, ISSN 0142-1123.
- Hilmioğlu, H., 2010. *Çelik Lif Katkılı Öngerilmeli Beton Kirişlerin Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Çözümleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kamran., Iqbal, M. A., 2022. *The Ballistic Evaluation of Plain, Reinforced and Reinforced-Prestressed Concrete, Thin-Walled Structures*, Volume 179, 109707, ISSN 0263-8231.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolu Teknik Şartnamesi*, Ankara, 2013.
- Keyder, E., 2013. *Öngerilmeli Beton*, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- Korkmaz, Ü., 2013. *Kömürhan Köprüsünde Öngerilme Kayıpları*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kozak, M., 2011. *Öngerilmeli Betonlar ve Özelliklerinin Teorik Olarak Araştırılması*, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, ss. 100-106.

- Kunt. B., 2019. *Öngerilmeli Prefabrik Kirişli Betonarme Köprülerin Tasarımında Enkesit ve Açıklık Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Küçükaslan, M. S., 2013. *Öngerilmeli Betondan Kirişsiz Döşemeli Perdeli Yapıların Düşey ve Yatay Yükler Altında Zımbalama Etkisiyle Birlikte Yapay Sinir Ağları İle Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Pekyer, B., 2010. *Öngerilmeli Beton Köprü Kirişlerinin Yapısal Onarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oflazoğlu, M.Z., 2007. *Öngerilmeli Beton Kolonların Analizi ve Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ortaç. E., 2017. *Diferansiyel Gelişim Algoritması Tabanlı Öngerilmeli Beton Köprü Kirişlerinin Optimum Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Öztürk, O. O., 2018. *Öngerilmeli Betonarme Prekast Kirişlerde Farklı Kesit ve Halat Sayısına Bağlı Uygun Açıklığın Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, T., Öztürk, Z. *Öngerilmeli Kompozit Köprü Kirişlerinin Etkin Kullanım Açıklıklarının Belirlenmesi*.
- Uluğ, N. İ., 2008. *Öngerilmeli Bir Köprü Tasarımı ve Performans Açısından Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal, O., Kürklü G., 2007. *Öngerilmeli Beton Teknolojisi*. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt 3, Sayı 2, ss. 26–35.
- Tokgöz, S., DüNDAR, C., 2010. *Eksantrik Yük Altında Öngerilmeli Beton Kolonların Analizi*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı1-2.
- Tokgöz, S., DüNDAR, C., 2010. *Betonarme Kolonların Normal Kuvvet-Moment Etkileşim Diyagramları*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı1-2.

- TS3233, *Ön germeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Türkiye Standartları Enstitüsü, 1979.
- Sciascia, G., Oliveri, V., Weaver, P. M., 2022. *Dynamic Analysis of Prestressed Variable Stiffness Composite Shell Structures*, Thin-Walled Structures, Volume 175, 109193, ISSN 0263-8231.
- Shi, J., Wang, X., Wu, Z., Zhu, Z., 2022. *Optimization of Anchorage and Deviator For Concrete Beams Prestressed With External Fiber-Reinforced Polymer Tendons*, Composite Structures, Volume 297, 2022, 115970, ISSN 0263-8223.
- Sonal, T., Urmil, D., Darshan, B., 2022. *Behaviour of Ambient Cured Prestressed and Non-Prestressed Geopolymer Concrete Beams*, Case Studies in Construction Materials, Volume 16, e00798, ISSN 2214-5095.
- Yanık S., 2007. *Betonarme U Kesitli Sisteme Monte Edilecek Kirişli ve Kirişsiz Öngerilmeli Prefabrik Eleman Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Yecan. E., 2016. *Öngerilmeli Betonarme Köprülerde Zamana Bağlı Yerdeğiştirmeler*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Qiang, X., Wu, K., Xing, Z., Jiang, X., 2022. *Buckling In Prestressed Stayed Beam–Columns and Intelligent Evaluation*, Engineering Structures, Volume 255, 113902, ISSN 0141-0296.
- Wu, K., Xing, Z., Hu, L., 2022. *Prestressed Stayed Beam–Columns Under Eccentric Compression: Behaviour and Prestress Optimization*, Engineering Structures, Volume 256, 113996, ISSN 0141-0296.