

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİLİMSEL DENGELİ KONSOL YÖNTEMİ İLE İNŞA EDİLEN KÖPRÜ
ÜSTYAPISININ YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Shamil NURI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİLİMSEL DENGELİ KONSOL YÖNTEMİ İLE İNŞA EDİLEN KÖPRÜ
ÜSTYAPISININ YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Shamil NURI
(501151078)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Necmettin GÜNDÜZ

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151078 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Shamil NURI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DİLİMSEL DENGELİ KONSOL YÖNTEMİ İLE İNŞA EDİLEN KÖPRÜ ÜSTYAPISININ YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Abdullah Necmettin GÜNDÜZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ali SARI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YAZICI
İstanbul Kültür Üniversitesi

Teslim Tarihi : 03 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 14 Haziran 2019





Anneme, Babama, Eşime ve Biricik Kızım Ayla'ma,



ÖNSÖZ

Dilimsel dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprü üstyapısının yapım aşamalarına göre analizi yönelik olarak yapılan bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın başından sonuna kadar her aşamasında güler yüzünü ve bilgi birikimini benden esirgemeyen, tecrübesiyle yol gösteren ve bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Abdullah Necmettin GÜNDÜZ’e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu yaşıma kadar bana bir kelime dahi olsa öğreten, bana olan davranışlarıyla ve öğrettikleriyle beni bu noktalara getiren, eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Bu tezin hazırlanması sırasında bana her açıdan destek olan 2015-2018 yılları arasında birlikte çalıştığım “Sanat Yapıları Tasarım Grubu” çalışma arkadaşlarıma yürekten teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında beni her konuda destekleyen, yol gösteren, yardımcı olan, hem maddi hemde manevi olarak hiç bir eksiklik hissettirmeyen, eğitimim için hiç bir fedakarlıktan kaçınmayan ve her zaman yanımda olduklarını bildiğim başta canım annem ve canım babam olmak üzere tüm aileme şükranlarımı sunarım.

Tanıştığımız günden bu güne kadar eğitim hayatıma göstermiş olduğu anlayıştan ve bilhassa bu tezin hazırlanışı esnasında içinde bulunulan genel maddi sıkıntılı dönemde dahi desteğini esirgemeyen ve her zaman bana karşı göstermiş olduğu sabırdan ötürü canım eşime çok teşekkür ederim.

Haziran 2019

Shamil Nuri
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY... ..	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam.....	2
2. DİLİMSSEL DENGELİ KONSOL KÖPRÜ YAPIM YÖNTEMİ.....	5
2.1 Yapım Tekniği.....	5
2.1.1 Boykesit ve enkesit	7
2.1.2 Yapım süreleri.....	11
3. TASARIM FELSEFESİ	15
3.1 Yüklerin Tanımı Ve Yük Birleşimleri	15
3.2 Kesit Ön Boyutlandırması	15
3.3 Gerekli Halat Adedinin Hesaplanması.....	17
4. MALZEME MODELLERİ VE ZAMANA BAĞLI ETKİLER.....	21
4.1 Malzeme Modelleri	21
4.1.1 CEB-FIP MC90-99 modeli	21
4.1.1.1 Büzülme etkisi.....	21
4.1.1.2 Sünme etkisi	24
4.1.2 ACI 209R-92 modeli.....	26
4.1.2.1 Büzülme etkisi.....	26
4.1.2.2 Sünme etkisi	29
4.1.3 AASHTO LRFD 2012 modeli	32
4.1.3.1 Büzülme etkisi.....	32
4.1.3.2 Sünme etkisi	33
4.1.4 Tez çalışmasında ele alınacak malzeme modeli	34
4.2 Zamana Bağlı Beton Basınç Dayanımı Değişimi.....	37
4.3 Zamana Bağlı Beton Elastisite Modülü Değişimi.....	38
4.4 Efektif ve Yaşa Göre Düzeltilmiş Elastisite Modülü	39
4.5 AASHTO LRFD'e göre Öngerilme Kayıplarının Hesaplanması.....	44
4.5.1 Ani öngerilme kayıplarının hesabı.....	44
4.5.2 Zamana bağlı öngerilme kayıplarının ayrıntılı hesap yöntemi	45
4.5.2.1 Dönüştürme katsayısı Kid çıkarılışı ve büzülme kaybı.....	45
4.5.2.2 Sünme kaybı.....	47
4.5.2.3 Hesaplarda dikkate alınacak hacim/yüzey oranları.....	48

4.5.2.4 Öngerme çeliğinin gevşemesi kaybı	52
5. YAPIM AŞAMALARINA GÖRE KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ANALİZİ.....	55
5.1 Artımsal Zaman Adımı Yöntemi.....	55
5.2 Kesit Tesirleri	57
5.2.1 Dilimlerin kendi ağırlığından dolayı meydana gelen momentler.....	57
5.3 Kesitlerde Meydana Gelen Gerilme Tahkikleri	63
5.4 Döküm Eğrisi Takibi için Yerdeğiştirme Tahkikleri.....	83
5.4.1 Öndöküm metodu ile teğet ekleme yerleştirme tekniği	84
5.4.2 Yerinde dökme metodu ile dilimlerin yerleştirme tekniği	85
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ... ..	103



KISALTMALAR

AASHTO LRFD	: American Association of State Design Highway and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design
ACI	: American Concrete Institute
ACI 209R-92	: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASTM C512	: Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression
CEB	: European International Concrete Committee
FIP	: International Federation for Prestressing
CEB-FIP MC90-99	: European Creep and Shrinkage Concrete Model



SEMBOLLER

c	: Beton birleşimindeki çimento miktarı
CE	: Gezici kalıp arabası ağırlığı (80-100 ton)
CLL	: Yapım aşamasında köprü üstyapısının genişliğine bağlı olarak yapım hareketli yükü (0.5kN/m^2 bir konsolda ve 0.25kN/m^2 diğer konsolda)
CR	: Köprü üstyapısı analizinde sünme etkisi
d	: Boyut faktörü sabiti
DC	: Köprü üstyapısı analizinde ele alınan dilimlerin kendi ağırlığı
DIFF	: Köprü üstyapısı analizinde sabit yükün bir konsolda diğer konsola göre %2 oranında fazla olduğu kabulü yükü
$E_c(t)$	: Zamana bağlı beton tanjant elastisite modülü değişimi
$E_{c,AAEM}(t)$	: Yaşa göre düzeltilmiş beton elastisite modülü değişimi
$E_{c,eff}(t)$	: Zamana bağlı beton efektif elastisite modülü değişimi
f	: Boyut faktörü sabiti
f'_c	: Beton karakteristik silindrik basınç dayanımı
f_{ci}	: İlk yükleme anındaki beton basınç dayanımı
f_{cm28}	: 28 günlük ortalama beton silindrik basınç dayanımı
f_{cm0}	: Yükleme başladığı andaki ortalama beton silindrik basınç dayanımı
$g(x)$	: Önboyutlandırma hesaplarında yayılı yük ifadesi
h	: Ortamın bağıl nem oranı
h_0	: Ortamın referans bağıl nem oranı, 1'e eşit alınmaktadır
H_1	: Köprü üstyapısı mesnet üzerinde kesit yüksekliği
H_2	: Köprü üstyapısı açıklık ortasında kesit yüksekliği
IE	: Gezici kalıp arabasının çalışır durumda dinamik etkisi (%10)
$k_c(t)$	: Sünme için geliştirilen eleman boyut faktörü
K_{id}	: Dönüştürme katsayısı
k_f	: Beton basınç dayanımının etkisi için faktör
k_{hc}	: Sünme etkisi için bağıl nem faktörü
k_{hs}	: Büzülme etkisi için bağıl nem faktörü
k_{la}	: Yükleme yaşı faktörü
$k_s(t)$	: Büzülme için geliştirilen eleman boyut faktörü

$k_{td}(t)$	: İlerleyen zamana bağlı beton basınç dayanımının değişimi faktörü
L_{orta}	: Köprü üstyapısı orta açıklığı
s	: Taze betonun mm cinsinden çökme değeri
SH	: Köprü üstyapısı analizinde büzülme etkisi
t	: Büzülme birim kısalmasının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşı
$T(x)$	: Önboyutlandırma hesaplarında kesme kuvveti ifadesi
t_0	: İlk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşı
t_1	: Gün cinsinden referans beton yaşı, 1'e eşit alınmaktadır
t_c	: Beton nem kürünün bittiği ve ya beton kurumasının başladığı gündeki gün cinsinden beton yaşı
$M(x)$	: Önboyutlandırma hesaplarında eğilme momenti ifadesi
(V/S)	: Kesit hacminin açık hava etkisindeki yüzey alanına oranı
$(V/S)_0$	: Referans oran, 50 mm'e eşit alınmaktadır
α	: Beton birleşimindeki yüzde cinsinden hava miktarı; Zaman fonksiyon sabiti
α_1	: Beton ortalama basınç dayanımına bağlı katsayı
α_2	: Beton ortalama basınç dayanımına bağlı katsayı
α_3	: Beton ortalama basınç dayanımına bağlı katsayı
α_{as}	: Çimento türüne bağlı katsayı
α_{ds1}	: Çimento türüne bağlı katsayı
α_{ds2}	: Çimento türüne bağlı katsayı
$\beta(f_{cm28})$	: Beton dayanım değerlerine bağlı düzeltme katsayısı
$\beta(t_0)$	: İlk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşını dikkate alan çarpan
$\beta_{as}(t)$	: Otojen büzülmenin zamanla gelişimini ifade eden fonksiyon
$\beta_c(t - t_0)$	: Sünmenin beton yükleme sonrası zamana bağlı gelişimi çarpanı
$\beta_{ds}(t - t_c)$	: Kuruma büzülmesinin zamanla gelişimi fonksiyonu
β_h	: Bağlı nemi, eleman boyut faktörünü ve beton basınç dayanımını dikkate alan boyutsuz çarpan
$\beta_{RH}(h)$	: Kuruma büzülmesinin bağlı nem çarpanı
β_{s1}	: Yüksek dayanımlı betonlar için elemanın serbest kuruma çarpanı
γ_c	: Kümülatif düzeltme çarpanını
$\gamma_{c,RH}$	: Bağlı nem faktörünü
$\gamma_{c,s}$	: Taze betonun çökme faktörü
$\gamma_{c,t0}$	: Yükleme yaşı faktörünü
$\gamma_{c,vs}$	: Eleman boyut faktörünü

$\gamma_{c,a}$	: Hava miktarı faktörü
$\gamma_{c,\psi}$	: İnce agregata faktörü
γ_{sh}	: Kümülatif düzeltme çarpanını
$\gamma_{sh,RH}$	: Ortamın bağıl nem faktörü
$\gamma_{sh,s}$	: Taze betonun çökme faktörü
$\gamma_{sh,tc}$	: Nemli kür faktörü çarpanı
$\gamma_{sh,vs}$	: Eleman boyut faktörü çarpanı
$\gamma_{sh,a}$	: Hava miktarı faktörünü
$\gamma_{sh,c}$	: Çimento miktarı faktörünü
$\gamma_{sh,\psi}$	: İnce agregata faktörü
Δf_{pCR}	: Sünmeden dolayı meydana gelen öngerilme kaybı
Δf_{pSR}	: Büzülmeden dolayı meydana gelen öngerilme kaybı
Δf_{pR1}	: Öngerme çeliğinin gevşemesinden dolayı meydana gelen öngerilme kaybı
$\epsilon_{bid}(t)$	: Büzülme birim kısalması
$\epsilon_{cas}(t)$	: Otojen büzülmeden kaynaklanan birim kısalma
$\epsilon_{caso}(f_{cm28})$	: Nominal otojen büzülme çarpanı
ϵ_{cb}	: Kesit alt lifinde birim şekildeğiştirme, birim kısalma ve/ve ya birim uzama
$\epsilon_{cds}(t, t_c)$	: Kuruma büzülmesinden kaynaklanan birim kısalma
ϵ_{ct}	: Kesit üst lifinde birim şekildeğiştirme, birim kısalma ve/ve ya birim uzama
$\epsilon_{cdso}(f_{cm28})$	: Nominal kuruma büzülmesi çarpanı
$\epsilon_{sh}(t, t_c)$	: Toplam büzülme birim kısalması
ϵ_{shu}	: Maksimum büzülme birim kısalması
$\sigma_{basınç}$	: Elastik analizde çekme gerilmesi
$\sigma_{çekme}$	: Elastik analizde çekme gerilmesi
$\phi_{28}(t, t_0)$	: 28 günlük sünme katsayısı
ϕ_0	: Nominal (boyutsuz) sünme katsayısı
$\phi_{RH}(h)$	: Nominal sünme katsayısının düzeltme çarpanı
ϕ_u	: Maksimum sünme katsayısı
ψ	: İnce agreganın ağırlık olarak toplam agregaya yüzde cinsinden oranı; Sünme katsayısının hesabında zaman fonksiyon sabiti
$\psi(t, t_i)$	: İlk yükleme anından itibaren zamana bağlı gelişen sünme katsayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Köprü üstyapısı enkesit özellikleri.....	11
Çizelge 2.2 : Köprü üstyapısı yapım süreleri.	13
Çizelge 3.1 : Açıklık boylarına göre kesit yükseklik oranları.	16
Çizelge 4.1 : Çimento türüne bağlı katsayılar.	23
Çizelge 4.2 : Boyut faktörü.....	31
Çizelge 4.3 : Büzülme ve sünme modelleri için gerekli parametreler.....	35
Çizelge 4.4 : CEB-FIP MC90-99 büzülme ve sünme modeli için parametreler.	35
Çizelge 4.5 : ACI209R-92 büzülme ve sünme modeli için parametreler.....	35
Çizelge 4.6 : AASHTO LRFD 2012 büzülme ve sünme modeli için parametreler..	36
Çizelge 4.7 : ACI 209R-92 modeli a ve b katsayıları.....	37
Çizelge 4.8 : Dilimlerin kümülatif hacim/yüzey oranları ve kayıp yüzdeleri.	50
Çizelge 4.9 : Kesitlerin öngerilme kayıpları hesabında dikkate alınacak hacim/yüzey oranları.	52
Çizelge 5.1 : Dilim ağırlık değerleri ve ağırlık merkezlerinin başlangıç enkesitine mesafesi.....	61
Çizelge 5.2 : 0 numaralı kesitte meydana gelen negatif mesnet moment değerleri. .	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-1.	5
Şekil 2.2 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-2.	6
Şekil 2.3 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-3.	6
Şekil 2.4 : Köprü boykesiti.	7
Şekil 2.5 : Köprü üstyapısına ait dilim düzeni.	7
Şekil 2.6 : Köprü üstyapısına ait kablo yerleşimi.	8
Şekil 2.7 : Köprü üstyapısı tabliye tip enkesiti.	8
Şekil 2.8 : Mesnet bölgesine yakın dilimlerde yaklaşık kablo yerleşimi.	9
Şekil 2.9 : Açıklık ortasına yakın dilimlerde yaklaşık kablo yerleşimi.	9
Şekil 2.10 : Mesnet dilim kesitinde ardgerme kablo kanalları yerleşimi ve numaralandırılması.	10
Şekil 2.11 : Ayaklardan açıklığa doğru işlem sırası.	12
Şekil 3.1 : Mesnet üzerinde ve açıklık ortasında kesit yükseklikleri.	16
Şekil 3.2 : Köprü açıklığı boyunca enkesit alanlarının mesafeye göre değişiminin şematik gösterimi.	18
Şekil 3.3 : Ardgermeli kutu kesitte meydana gelen gerilmeler.	20
Şekil 4.1 : Farklı büzülme modellerine göre büzülme birim kısalmasının zamanla değişimi.	36
Şekil 4.2 : Farklı sünme modellerine göre sünme katsayısının zamanla değişimi.	36
Şekil 4.3 : Zamana göre beton basınç dayanımı değişimi.	38
Şekil 4.4 : Zamana göre elastisite modülü değişimi.	39
Şekil 4.5 : Sünmeden dolayı birim kısalmanın zamanla değişimi.	40
Şekil 4.6 : Sünmeden dolayı zamana bağlı elastisite modülü değişimi.	41
Şekil 4.7 : Zamanla gelişen sünmeden dolayı efektif elastisite modülü.	42
Şekil 4.8 : Zamanla gelişen sünmeden dolayı yaşa göre düzeltilmiş ve efektif elastisite modülü.	43
Şekil 4.9 : Öngerilme kayıplarının sınıflandırılması.	44
Şekil 4.10 : Büzülme kaybına esas kesitte meydana gelen şekildeğiştirmeler.	45
Şekil 4.11 : 1 nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.	49
Şekil 4.12 : 1 nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.	49
Şekil 4.13 : n nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.	51
Şekil 5.1 : Farklı yapım aşamaları sonunda uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri-tabliye profil görüntüsü.	56
Şekil 5.2 : Farklı yapım aşamaları sonunda uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri-tabliye plan görüntüsü.	57
Şekil 5.3 : Köprü üstyapısı dilimlerin ölü yük dağılımı.	58
Şekil 5.4 : Dilim enkesit alanına bağlı olarak ölü yük hesabı.	58
Şekil 5.5 : Dilim başlangıç ve bitil enkesit alanına bağlı ağırlık merkezi yeri hesap örneği.	59
Şekil 5.6 : Dilim başlangıç ve bitil enkesit alanına bağlı ağırlık merkezi yeri hesap örneği.	60

Şekil 5.7 : İlerleyen yapım aşamalarında dilim ölü yüklerinden dolayı meydana gelen moment diyagramı.....	61
Şekil 5.8 : Kesitlerde ilerleyen yapım aşamalarında meydana gelen negatif konsol moment ifadeleri.	62
Şekil 5.9 : 0.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	64
Şekil 5.10 : 0.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	64
Şekil 5.11 : 1.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	65
Şekil 5.12 : 1.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	65
Şekil 5.13 : 2.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	66
Şekil 5.14 : 2.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	66
Şekil 5.15 : 3.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	67
Şekil 5.16 : 3.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	67
Şekil 5.17 : 4.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	68
Şekil 5.18 : 4.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	68
Şekil 5.19 : 5.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	69
Şekil 5.20 : 5.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	69
Şekil 5.21 : 6.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	70
Şekil 5.22 : 6.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	70
Şekil 5.23 : 7.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	71
Şekil 5.24 : 7.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	71
Şekil 5.25 : 8.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	72
Şekil 5.26 : 8.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	72
Şekil 5.27 : 9.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	73
Şekil 5.28 : 9.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	73
Şekil 5.29 : 10.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	74
Şekil 5.30 : 10.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	74
Şekil 5.31 : 11.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	75
Şekil 5.32 : 11.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	75
Şekil 5.33 : 12.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	76
Şekil 5.34 : 12.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	76
Şekil 5.35 : 13.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	77
Şekil 5.36 : 13.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	77
Şekil 5.37 : 14.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	78
Şekil 5.38 : 14.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	78
Şekil 5.39 : 15.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	79
Şekil 5.40 : 15.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	79
Şekil 5.41 : 16.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	80
Şekil 5.42 : 16.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	80
Şekil 5.43 : 17.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	81
Şekil 5.44 : 17.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	81
Şekil 5.45 : 18.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	82
Şekil 5.46 : 18.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.	82
Şekil 5.47 : Köprü dilimlerini yapım sırasında yerleştirme teknikleri.	84
Şekil 5.48 : Teget ekleme yerleştirme tekniği.	84
Şekil 5.49 : Yerinde dökme yerleştirme tekniği.	85
Şekil 5.50 : Moment-alan yöntemi ile sehim hesabı.....	86
Şekil 5.51 : Kesitlerde eğrilik hesabı.	87
Şekil 5.52 : Köprü boykesiti boyunca meydana gelen sehim diyagramları.....	88

DİLİMSEL DENGELİ KONSOL YÖNTEMİ İLE İNŞA EDİLEN KÖPRÜ ÜSTYAPISININ YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ

ÖZET

Dilimsel dengeli konsol yapım yöntemi dünyada uzun zamandır kullanılan ve birçok örneği bulunan köprü inşaa yöntemidir. İç açıklıkları 300 metreyi bulan ve köprü toplam uzunluğu birkaç kilometreye ulaşan, ayrıca orta açıklıklar 80-200 metre arasında etkili olmakta olup kutu kesitli ardgermeli beton tabliyeler için öncelikli bir yapım yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Açıklıklar belli uzunluklara sahip dilim şeklinde kolon üstü diliminden itibaren açıklık ortalarına doğru sağa ve sola ilerlemektedir. Bu halde sistem dengeli konsol şeklinde çalışmaktadır. Sistem açıklık ortasında kapatma dilimi döküldükten sonra sürekli hale gelmektedir. Böylece, dilimsel yapım yöntemi ile inşaa edilen köprünün tasarım ve projelendirilmesinde iki ayrı aşama dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada köprü üstyapısının yapım aşamaları anlatılmış, tasarımda dikkate alınacak yük ve yük kombinasyonları verilmiş, ve köprü üstyapısının dengeli konsol durumu analizi için gerekli yükler hesaplanmıştır.

Köprü üstyapısı farklı geometriye sahip dilimlerden oluştuğundan dolayı, ver herbir dilimin ardgerme tekniği yapım süresine bağılı olarak dilimlerin farklı beton yaşlarında uygulandığından zamana bağılı gelişen etkiler dikkate alınmalıdır. Dünyaca kabul edilen köprü tasarım yönetmeliği AASHTO LRFD hükümleri doğrultusunda dilimsel dengeli konsol köprülerin analizi malzeme modelleri ele alınarak incelenmelidir.

Yürütölen tez kapsamında CEB FIP MC90-99, ACI209R-92 ve AASHTO LRFD tarafından sünme ve büzölme etkilerinin hesabı için bağıntılar ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Bir çok parametreye bağılı sünme ve büzölme modelleri kullanarak sünme katsayıları ve büzölme birim kısalmaları elde edilmiş, ve çok daha az girdi parametresi gerektiren ve tasarım için yeterli mertebede sonuçlar veren AASHTO LRFD modeli tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında ele alınmıştır.

İncelenen malzeme modellerinin dilimsel dengeli konsol köprüde kullanma amacındaki bir başka husus artımsal zaman adımli hesap yöntemini kullanan özel köprülerin yapım aşamalarına göre analizini yapan bilgisayar yazılımları için kolay programlanabilmesi açısından uygun olmasıdır.

Zamanla gelişen sünme ve büzölme gibi etkilerden ve yüksek mukavemetli öngerme çeliğinin gevşemesinden dolayı kayıplar malzeme modelleri kullanarak incelenmiş ve hesapları yapılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle dilimlerin yapım aşamaları artımsal zaman adımli analiz yöntemine göre incelenmiştir ve her bir kesitte her bir dilimin yapımı tamamlandıktan sonra meydana gelen gerilmelerin tahkiki yapılmıştır. Yapım

aşaması süresi boyunca hiçbir kesitte meydana gelen gerilmeler yönetmelikle belirlenen izin verilen gerilme sınırlarını aşmamıştır.



CONSTRUCTION STAGE ANALYSIS OF SEGMENTAL BALANCED CANTILEVER BRIDGE SUPERSTRUCTURE

SUMMARY

Segmental balanced cantilever construction method is a bridge construction method which has been used for a long time in the world and has many examples. The main spans can reach up to 300 meters and the overall length of the bridge can reach up to several kilometers. But as a priority in terms of economical construction method and adequate design for box-section post-tensioned concrete decks, the effective main span length may vary between 80-200 meters. Furthermore, this method is easily adaptable to irregular bridge arrangement, congested project sites, rough and water terrain, and environmentally sensitive areas.

The bridge spans are divided into segments with variable length. For cast-in-situ method of construction segments range between 3 and 5 meters in length. The basic concept of segmental balanced cantilever construction is to attach the segments in an alternate manner at opposite ends of cantilevers supported by piers. The cantilever determinate system is subjected to changes during adding segments at each construction stage and after casting cast-in-place closure stitch segment the system become continuous and statically indeterminate system. As a result, the analysis and design of the structure must follow the construction stages. At construction stage negative moments occurred at pier section will be resisted by temporary tendons, placed at top of sections, and for continuous system positive moments occurred at span region are resisted by continuity tendons, placed at bottom of sections.

In general, this special type of bridges are designed and analyzed by softwares. The aim of this study to understand the main behaviour principles by performing hand calculations based on the theoretical background given in design specifications.

In this study the construction stages of bridge superstructure are explained by figures, load and load combinations to be considered in the design are given, and internal forces occurred at each construction stage during determinate balanced cantilever system are calculated. Previously designed balanced cantilever bridge will be analysed in this study. For preliminary design check purposes section heights at top of piers and at midspans are checked by span over depth ratios. Also strands number is checked by preliminary method of analysis.

Since the bridge superstructure consists of segments having different geometries and unusual dimensions, level of posttensioning, construction aging, and concrete age at time of posttensioning for new erected segments, a refined method for time-dependent effects estimation shall be used. This method of estimation of prestressing losses due to each time-dependent source, such as creep, shrinkage, or prestressing steel relaxation, can lead to a better estimate of total losses compared with the approximate estimation method of time-dependent losses. AASHTO LRFD is used as the basis for the analysis of segmental balanced cantilever bridge analysis and

reference material models indicated in this document shall be taken into a consideration during refined method of analysis.

Within the scope of the thesis, the expressions given in CEB FIP MC90-99, ACI209R-92 and AASHTO LRFD model codes were examined in detail. Creep coefficients and shrinkage strains were obtained by using creep and shrinkage material models which are dependent on many parameters. As a result of this examination AASHTO LRFD material model, which requires less input parameters and provides sufficient results for design, has been decided to be used in following stages of the thesis.

For segmental construction method and multi-stage posttensioning during the construction, calculations for loss of prestress should be made in accordance with an incremental time-step method. This method models the design life of a structure through discrete intervals of time. The deformations, stresses, and internal forces that develop in response to external loads and time-dependent material effects are computed for each time interval. The response of the structure at the end of any time interval is taken to be the summation of the responses of the preceeding intervals. For this purpose, computer softwares are used in practice in the construction stage analysis of balanced cantilever bridges. Creep coefficient and concrete shrinkage strain expressions given in reference material model codes can be easily used for computer software programming.

The time-dependent prestress losses given in specification are analyzed seperately by researching theoreticall background. Remarkable growth of high strength concrete applications especially in bridges has been seen the last thirty years. The aim of refined prestress loss investigations is to quantify the loss of prestress of high strength concrete bridge and to find justifications on increasing usage of high strength concrete for bridges.

Elastic modulus variation over time has been analyzed during the thesis. The first elastic modulus type taken into consideration is tangent elastic modulus. This parameted is given in specifications using specified compressive strength of concrete. Instead of using this value strength variation over time is used in elastic modulus calculations.

Time-dependent creep gain should be taken into account. For these purpose, various types of elastic modulus was improved by researchers. The main two are using in time-dependent calculation. The first one, effective elastic modulus is used in time-dependent deflection calculation. The second one, age adjusted elastic modulus was improved by adding aging coeeficient. The last one is used in time-dependent prestress loss calculations and given in the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Within the scope of the thesis, an analysis program has been developed by using Mathcad and Microsoft Excel Visual Basic for Applications (VBA) programming languages in order to ensure ease of calculations and to prevent the loss of time because of the continuous repetition of the mathematical operations. This program has been developed in accordance with the AASHTO LRFD material model code provisions and all the required parameters are taken into account.

Bending moments occured due to selfweight of segments, formwork traveler movement, and construction live load, are calculated seperately for each segment beginning and end sections. By using incremental time-step method stresses occured

at top and bottom of each section at the end of each construction stage are calculated. Shear effects have not been taken into consideration. All the stress variations are given on the graphs and it is concluded that all the compressive and tensile stresses do not exceed allowable stress limits given in AASHTO LRFD provisions. As a result, uncracked section properties are used in deflection calculations. Also examining stress variation it can be seen that almost all the sections considered in the analysis are under compression during bridge construction before erecting closure stitch segment.

In this study only elastic analysis has been performed for high strength concrete posttensioned sections. Bending moment values have been calculated using service load combinations. These sections may be checked by ultimate limit state flexural analysis using load combinations given in AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Also, shear analysis may be performed for the segment mid and end sections.

Pier head segment has not been taken into consideration during this thesis. This segment has been assumed as a rigid member as it is connected to the pier and supported by diaphragm wall in the box section. An analysis for this segment may be performed by softwares using finite element method.

For the construction of cast-in-situ and prefabricated segments, it is necessary to analyze each phase in the construction of the cantilever and to determine the deformation curve for each cantilever element, phase-by-phase. For both of construction method different segment placing techniques are used for estimation of deformation trajectory followed by the end of the cantilever at each phase of construction. By modifying the angular positions of the segments and making corrections during the erecting the modified profile is obtained which can effectively compensate for the future deformations occurred during construction stages.

In this study an analysis has been performed only for balanced cantilever bridge superstructure during the construction stage. Time-dependent effects, multi-stage posttensioning, load variation and continuously increasing internal forces at this stage have been analyzed. As pier columns for this type of bridge are very high, performance analysis may be performed at each construction stage for pier columns. Also, as cantilever lengths at construction stage and span lengths for continuous system are very high, the vertical design response spectrum should be used in seismic calculations.

1. GİRİŞ

Köprü ulaşım engel olan vadi ve benzeri büyük oylumların üzerinden geçen, arazideki ve bir kentsel yerleşme dokusundaki boşlukları geçerek iki uç hedef noktasını bağlayan bir yapısal sistemdir. Köprü arazi ve çevreyle uyum sağlayan yapı türüdür, ve bu uyumun gereği olarak köprü estetiği köprünün başlangıç aşamasında köprü tipini belirler. Daha sonraki projelendirme aşamalarında yapı geometrisi ortaya çıkarılmasıyla beraber ve yapım maliyet unsurunu da göz önünde tutarak köprü yapım teknolojisi seçimi yapılır.

Köprü mühendisliğinin özel uygulamalarından olan dengeli konsol yöntemi çok büyük açıklıklarından geçilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapım tekniğidir. Çok fazla köprü ayak yapımının köprünün inşa edildiği çevreden ve bununla beraber jeoloji özelliklerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı mümkün olamadığı ve tabliye açıklıklarının 100 m'den daha yüksek olması durumunda dengeli konsol yapım tekniği rakipsiz kalmaktadır.

Yürütülen tez çalışması konusu olan dilimsel dengeli konsol yöntemi köprü üstyapısının boyuna doğrultuda dilimlere bölünmesine dayanan bir yöntemdir. Kolonlardan açıklık ortasına giderek dilim enkesitleri değişken yüksekliklere sahip olduğundan köprü üstyapısı boyuna yönde eğrisellik oluşturmakta ve köprü estetiği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Ardgermeli beton malzemesinden oluşan kutu kesitli dilimlere sahip köprü üstyapısı yapımı diğer yöntemlere göre daha yavaş ilerleyen bir yapım tekniğidir. Beton malzemesinin zamana bağlı oluşan büzülme ve sünme etkileri, ve yüksek mukavemetli öngerme çeliğinin gevşemesi farklı zamanlarda inşa edilen yerinde dökme dilimlerin tasarımında dikkate alınması gereken hususlardır.

Dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprü yapım aşamasında ve daha sonra sürekli sistem oluşturma aşamasında farklı etkilere maruz kalmaktadır. Bu yüzden köprü tasarımı bu iki farklı aşamada meydana gelen etkiler dikkate alınarak yapılmalıdır.

1.1 Amaç

Öncelikle dilimsel dengeli konsol köprüler, yapım yöntemleri ve yapım aşamaları hakkında genel bir bilgi verilmiş olup daha sonrasında ayrıntılı bir şekilde hesaplama yöntemleri ve kabul edilen teoriler, kullanılan yönetmelikler, tasarımda dikkate alınacak yük ve yük birleşimleri, zamana bağlı etkiler, öngerilme kayıpları ve ardgermeli kesit hesabı hakkında bilgi verilmektedir.

Bu çalışmada dengeli konsol köprülerin yapım aşamaları ele alınmış olup köprü tasarımı ve projelendirmesinde iki farklı yapım aşaması dikkate alınması gerektiğini, ve daha dengeli konsol yapım aşamasında iken hesap ve analizlerde zamana bağlı etkilerin göz önünde bulundurulması gerektiğini amaçlandırılmıştır.

Yönetmeliklerde referans gösterilen farklı sünme ve büzülme malzeme modelleri ele alınmış, bağıntılar ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, sünme katsayısı ve büzülme birim kısaltmaları hesaplanmış, ve ele alınan köprü üstyapı düzeni için kıyas yapılmıştır. Hesap kolaylığı açısından ve daha az parametre gerektiren, bununla beraber yeterli mertebede doğru sonuç veren malzeme modeline karar verilmiştir.

Günümüzde gelişen teknoloji ve artan bilgisayar kullanımı ile dengeli konsol köprü gibi özel mühendislik yapılarının tasarımı belli bilgisayar paket yazılımların yardımıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla, bu tip köprülerin davranışını ve tasarımda izlenen yolu anlamak, el ile çözüm yapmak ve yorumlamak hedeflenmektedir. Böylece bilgisayar yazılımlarının analiz sonuçlarını daha sağlıklı bir şekilde anlamak ve yorumlamak için bu tez çalışma konusu üzerinde durulmuştur.

1.2 Kapsam

Bu çalışmada dilimsel dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprü üstyapısı ön boyutlandırması ve dengeli konsol durumunda ayrıntılı analizi ele alınmıştır.

Dengeli konsol köprülerin yapım tekniği, yapım aşamaları, ele alınan köprü enkesit ve boykesiti, kablo profili hakkında genel bilgi Bölüm 2’de verilmiştir.

Dengeli konsol köprü ön boyutlandırmasında ve analizinde dikkate alınacak yük ve yük birleşimleri, ele alınan köprüünün ayrıntılı analizine geçmeden önce ön boyutlandırma açısından yeterli kesitlere ve ardgerme halat adedine sahip olup olmaması kontrolü Bölüm 3’te incelenmiştir.

Zamana bağlı etkilerin hesabı, malzeme modellerinin ayrıntılı incelenmesi ve karşılatırılması, yürütölen tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ele alınacaktır, ve bununla beraber malzeme modeline karar verilmesi Bölüm 4’te yer almaktadır.

Her bir yapım aşamasında meydana gelen eğilme momentleri, öngerilme kayıpları, ve bunlara bağlı olarak her bir adım sonunda kesitlerde meydana gelen gerilme değışimleri Bölüm 5’te hesaplanmıştır.

Yapılan bu çalışmadan çıkarılan sonuç ve öneriler Bölüm 6’da belirtilmiştir.





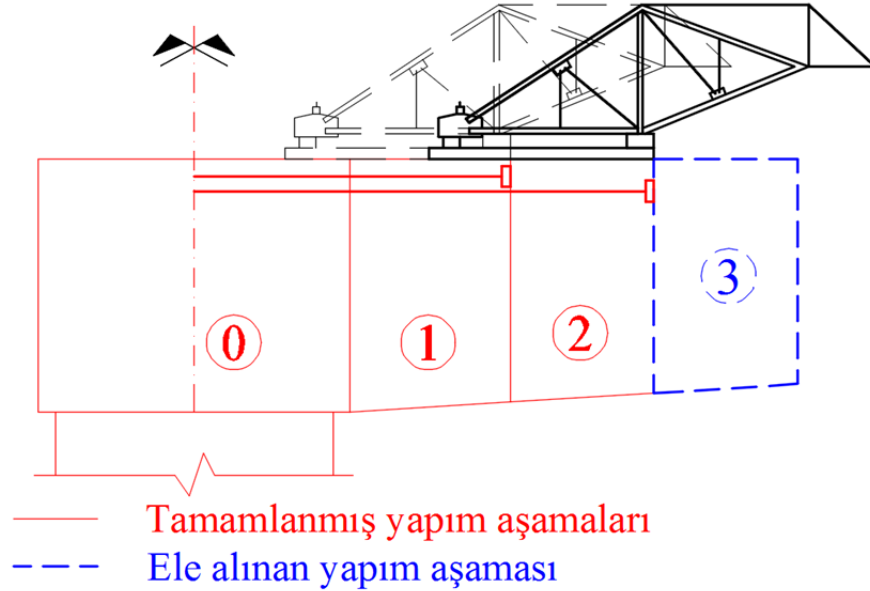
2. DİLİMSEL DENGELİ KONSOL KÖPRÜ YAPIM YÖNTEMİ

2.1 Yapım Tekniği

Dilimsel yapım yöntemi köprü üstyapısının köprü orta ayak üstü mesnet bölgesinden açıklık ortalarına doğru dilimler şeklinde devam eden bir yapım yöntemidir. Dilimler kolon başlarından itibaren iki ters yönde aynı anda uygulanmakta olup ayak üstü mesnet bölgesinde meydana gelen eğilme momentlerini sıfıra indirecek şekilde olacaktır. Bu şekilde inşa edilen bir dengeli konsol sisteminde moment dengesinin sağlanması önem arz etmektedir.

Ayağın iki tarafındaki dilimlerin imal edilmesi yaklaşık bir haftada tamamlanmaktadır ve aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

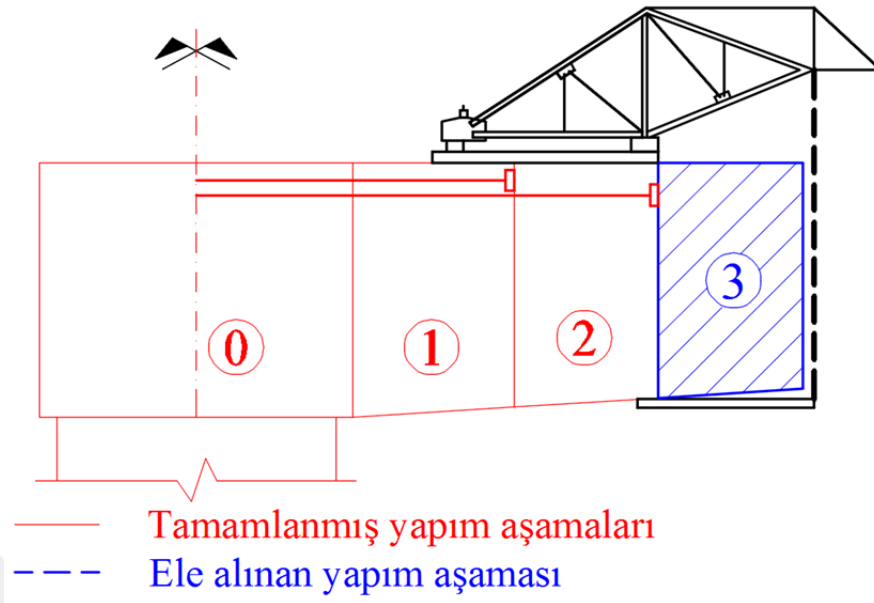
- Kalıp arabasının imalatı tamamlanmış dilimlerden sökülüp bir sonraki dilimin yapılması için ilerlemesi (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-1.

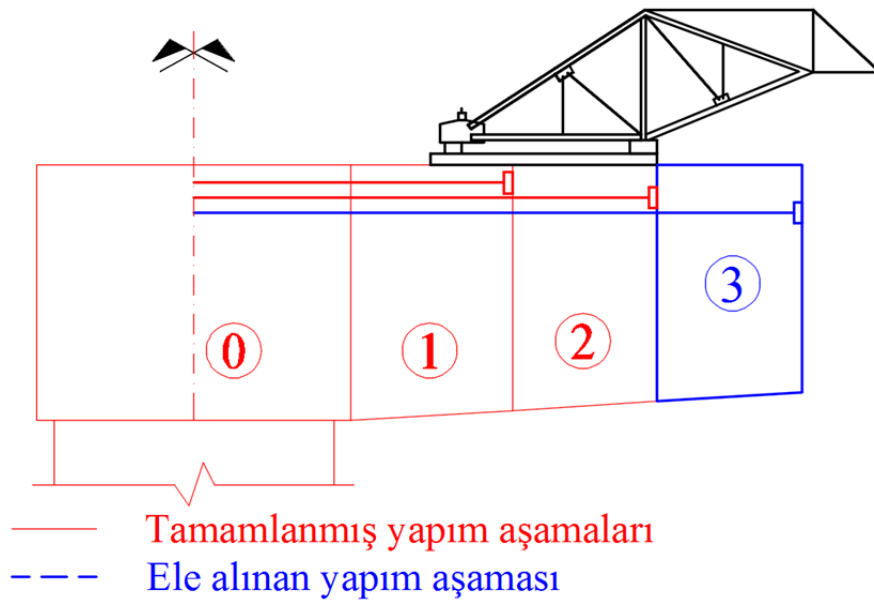
- Alt flanş ve gövde donatılarının yerleşmesi, iç kalıbın ilerlemesi, üst flanş donatısının, kılıfların ve demetlerin yerleşmesi.

- Dilim betonun dökülmesi (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-2.

- Betonun priz alması ve betonun tasarımda belirlenen mukavemetini kazandıktan sonra ardgerme tekniğinin uygulanması (Şekil 2.3).

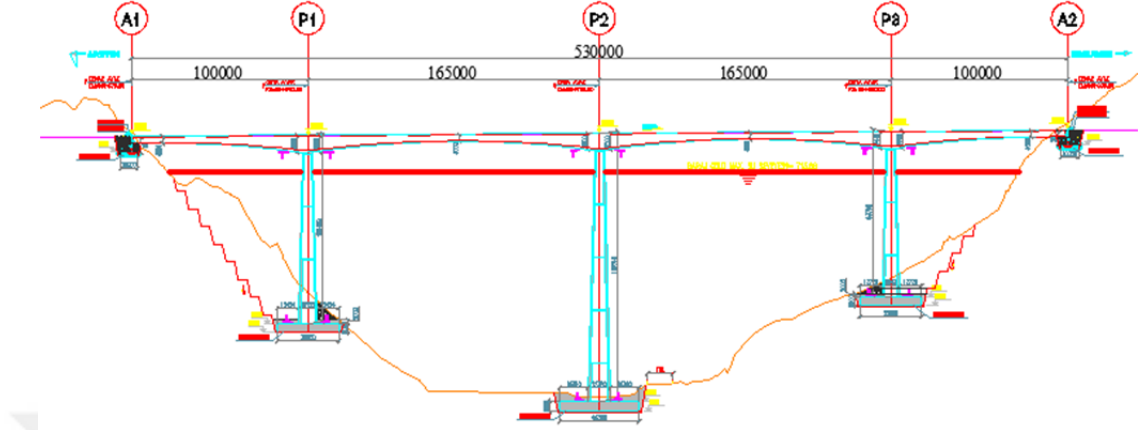


Şekil 2.3 : Dilimsel dengeli konsol üstyapısının şematik olarak yapım aşamaları-3.

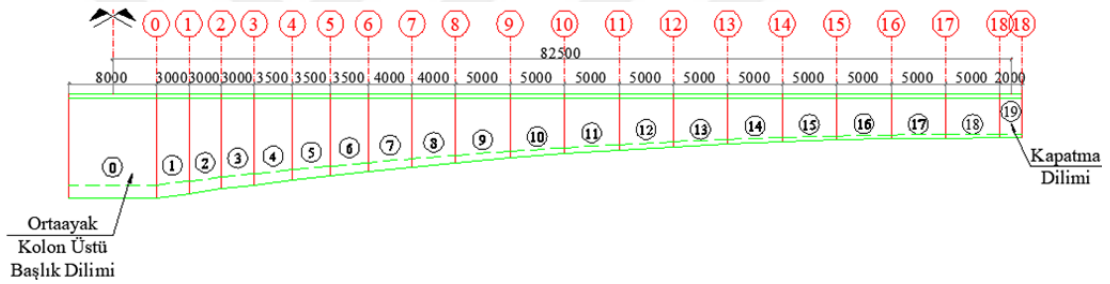
- Kalıp arabasının bir sonraki dilime geçmesi.

2.1.1 Boykesit ve enkesit

Tez kapsamında ele alınacak dengeli konsol köprüsüne ait boykesit Şekil 2.4’de verilmektedir. Köprü üstyapısı $100+2*165+100=530$ m açıklık düzenine sahiptir.



Şekil 2.4 : Köprü boykesiti.

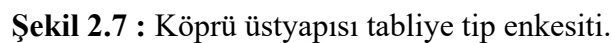


Şekil 2.5 : Köprü üstyapısına ait dilim düzeni.

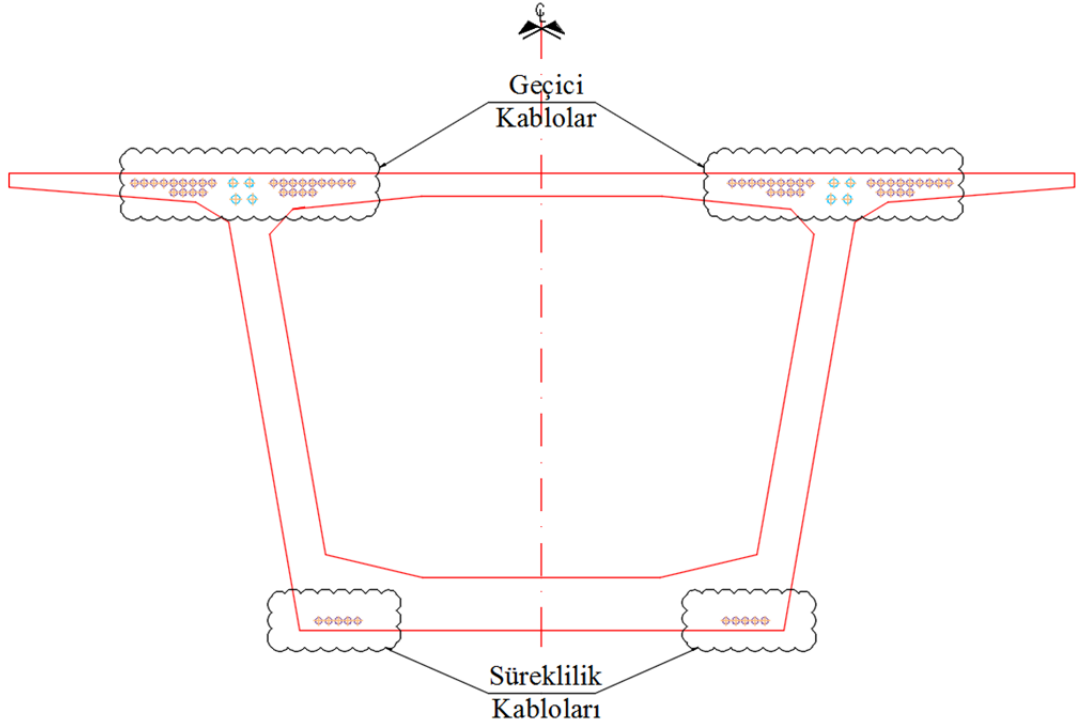
Şekil 2.5’den görüleceği üzere köprü orta ayağına göre simetri oluşturan köprü üstyapısı ayak ekseninden kapatma dilimin ortasına, yani açıklık ortasına kadar toplam açıklığın yarısını oluşturmaktadır. Dengeli konsol yapım yöntemi ile inşa edilen köprü kenar açıklıkta geçici iskeleler kurularak geriye kalan yerinde dökme $100-82.5=17.5$ m’lik kısmı tamamlanmaktadır. Arazi uygunluğuna göre 20 m’ye kadar iskeleler kurularak ortaayak dilim simetrisi oluşturulduktan sonra dilimler kenar ayağa kadar devam ettirilebilir.

Şekil 2.5’ten de görüleceği üzere kesit yükseklikleri orta ayak dilim kesitinden açıklık kapatma dilimine doğru giderek azalmaktadır. Orta ayaklar üzerinde kesit yüksekliği 9.5 m olmak üzere açıklık ortasında ve kenar ayaklarda 4.0 m’ye düşmektedir. Köprü boykesitinden de görüleceği üzere her bir dilim farklı kesit yüksekliğine sahip olduğundan orta ayaktan açıklık ortasına doğru yaklaşık parabolik

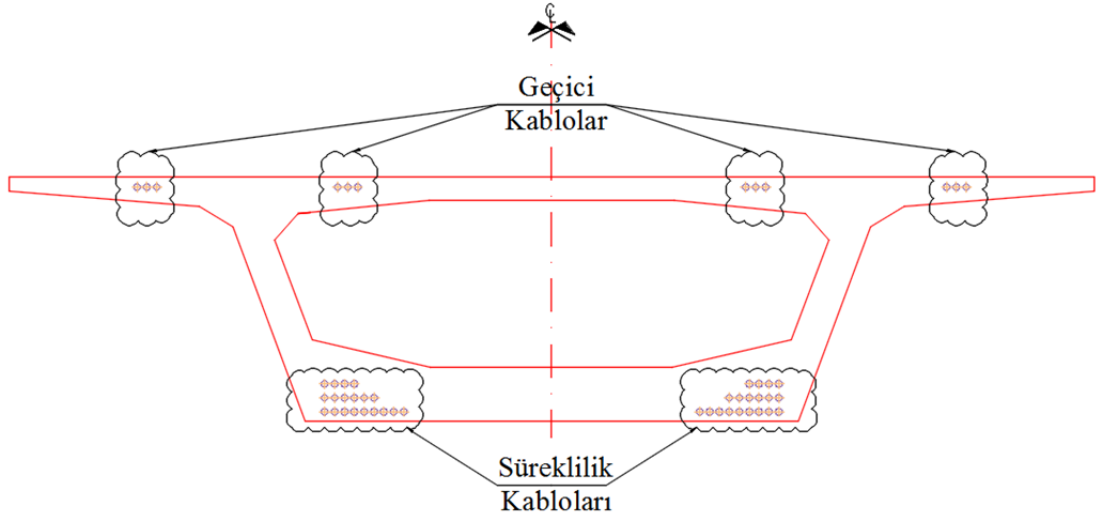
Köprü dilimsel yapım yöntemi ile inşa edilirken dengeli konsol aşamasında geçici kablolar ile ardgerme tekniği uygulanıyor. Kapatma dilimi imal edildikten sonra ve sistem sürekli çerçeve durumuna geçtikten sonra Şekil 2.6'den görüleceği gibi süreklilik kablolarının ardgermesi uygulanıyor. Bu şekilde dengeli konsol halinde negatif momentleri karşılamak için geçici kablolar, sürekli sistem durumunda pozitif açıklık momentini karşılayabilmek için ise süreklilik kablolarına ihtiyaç duyulmaktadır.



8

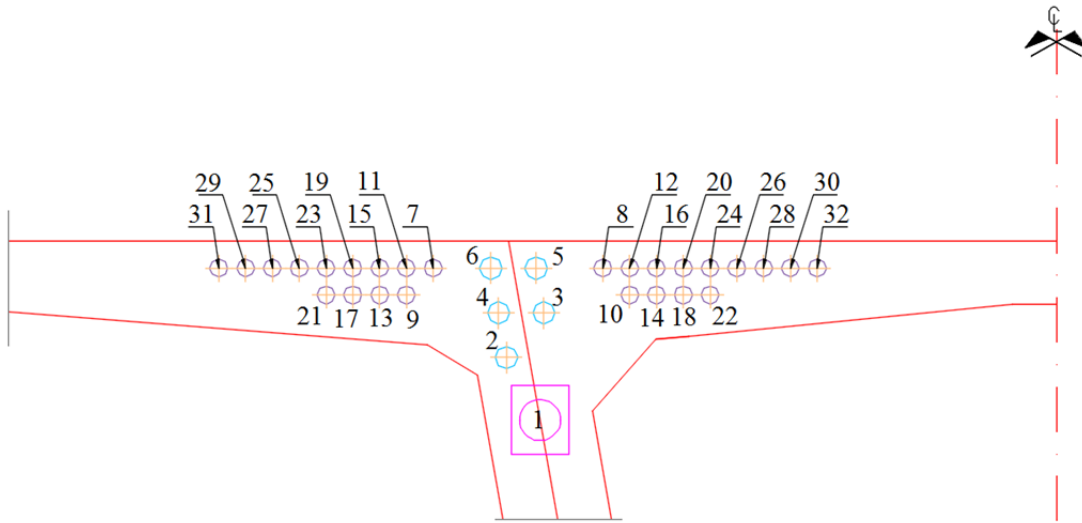


Şekil 2.8 : Mesnet bölgesine yakın dilimlerde yaklaşık kablo yerleşimi.



Şekil 2.9 : Açıklık ortasına yakın dilimlerde yaklaşık kablo yerleşimi.

Ele alınan köprü üstyapısı için kolon üstü başlık diliminden itibaren ilk 6 dilim için geçici kablolar 31 adet 15.7 mm'lik halat kullanılırken, geriye kalan dilimler için ise hem geçici, hem de süreklilik kablolarında 19 adet 15.7 mm'lik halat kullanılmıştır. Geçici kablolar için kesitteki yerleşimi ve numaralandırılması Şekil 2.10'te verilmiştir.



Şekil 2.10 : Mesnet dilim kesitinde ardgerme kablo kanalları yerleşimi ve numaralandırılması.

Şekilden de görüleceği üzere 1-6 numaralı ardgerme halatları ilk 6 dilimin ardgermesi için kullanılmış olup yukarıda da belirtildiği gibi daha büyük enkesit alanına sahiptir. 15.7 mm'lik halat (0.625 inç) 150 mm² enkesit alanına sahip olduğundan 31 halatlık kablolar toplam 4650 mm², 19 halatlık kablolar ise toplam 2850 mm² enkesit alanına sahiptir. Genellikle üreticiler tarafından tipik 9, 12, 15, 19, 22, 27, 31 halatlık yüksek dayanımlı özel çelik malzemesinden ardgerme plakaları üretilmektedir.

Her bir dilim kesitinde kendinden sonra inşa edilen tüm dilimlerin ardgermesi uygulanmak üzere kabloların geçişi için kablo kanalları bırakılmıştır. Böylece her bir dilim inşaatı tamamlandıktan sonra ardgerme kabloları orta ayağa göre simetrisindeki bulunan dilim sonuna kadar boydan boya kanallardan geçirilerek devam etmektedir.

Köprü üstyapısına ait kutu formuna sahip enkesit özellikleri Çiz.2.1 verilmiştir. Yapım aşamalarına göre köprü üstyapısı analizinde, başlıca kesitlerde meydana gelen gerilme değişimleri hesaplarında çizelgede verilen değerler kullanılacaktır. Gerilme değişimi hesabı kesit üstü ve kesit altında yapılacağından mukavemet momentlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 2.1 : Köprü üstyapısı enkesit özellikleri.

Enkesit Numarası	Enkesit Alanı (m ²)	Enkesit Çevresi (m)	Enkesit Atalet Momenti (m ⁴)	Enkesit Üstü Mukavemet Momenti (m ³)	Enkesit Altı Mukavemet Momenti (m ³)
0	34.75	48.33	389.85	83.39	80.80
1	24.34	47.63	301.23	65.91	66.76
2	23.63	46.95	268.88	61.97	61.93
3	22.94	46.31	239.74	58.25	57.34
4	22.14	45.57	208.91	54.09	52.27
5	21.38	44.91	182.86	50.40	47.68
6	20.65	44.26	159.62	46.89	43.42
7	18.72	43.57	133.80	42.28	38.17
8	18.02	42.93	114.74	39.07	34.23
9	17.21	42.20	94.97	35.48	29.89
10	16.46	41.55	79.00	32.32	26.15
11	15.79	40.97	66.30	29.59	23.01
12	15.20	40.47	56.27	27.24	20.40
13	14.69	40.05	48.50	25.29	18.28
14	14.28	39.70	42.66	23.71	16.62
15	13.95	39.43	38.38	22.48	15.36
16	13.71	39.24	35.48	21.62	14.48
17	13.58	39.12	33.81	21.11	13.97
18	13.52	39.05	33.25	20.94	13.78

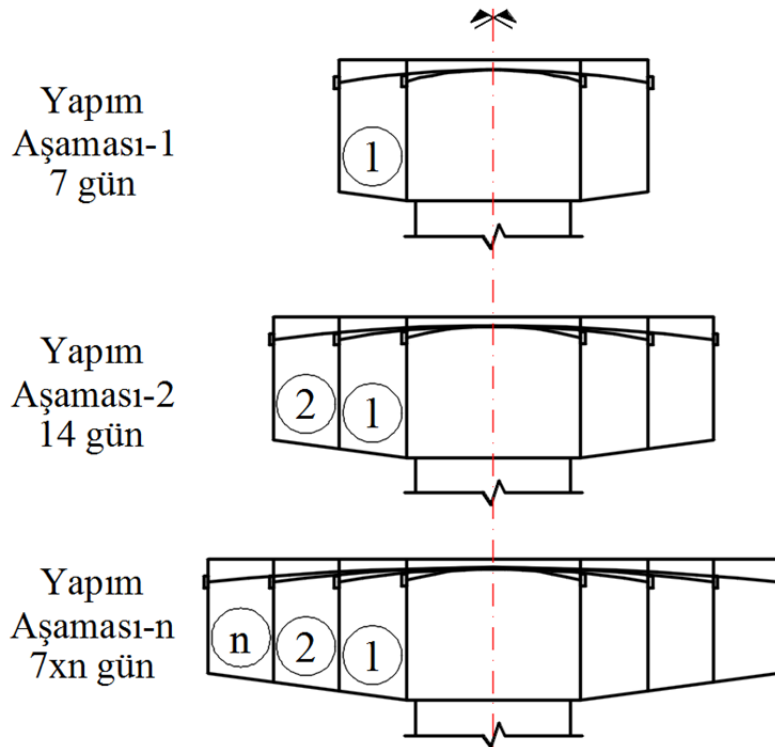
2.1.2 Yapım süreleri

Yürütülen tez kapsamında sadece köprü üstyapısı ele alındığından yapım süreleri ve günleri boykesitte “0” ile numaralandırılmış kolon üstü başlık dilim yapımının bitiminden itibaren hesaplanacaktır. Daha önce de belirtildiği üzere dilimler bir hafta süre ile imal edilmektedir. Boykesitten de görüleceği üzere kolondan açıklık ortasına doğru kapatma dilimi hariç toplam 18 adet dilim bulunmaktadır. Kapatma dilimi diğer ortaayak inşaatının bitiminden sonra dilimlerin açıklık ortasında kavuşması ve sistemin sürekli halde çalışmasını sağlamak amacıyla döküldüğünden öngerilme kayıp hesaplarında ilave yük olarak dikkate alınmaktadır.

Dilimler ortaayaklardan itibaren sağa-sola köprü ortaayak eksenine göre simetrik şekilde ilerlemektedir. Yürütülen tez çalışması için körpü eksenine göre simetri oluşturan ve her bir yapım aşaması sonunda meydana gelen dilim takımı için yapım süresi aynı kabul edilmektedir. Her bir yapım aşaması ve dilim takımı için yapım süresi 7 gün olmak kaydıyla yapım aşamasına göre üstyapı analizinde öngerilme kayıp hesabı $7 \times 19 = 133$ gün için yapılacaktır (Şekil 2.11).

Beton yerinde döküldükten sonra ardgerme tekniğinin uygulanması için tasarımda belirtilen mukavemete erişmesi gerekmektedir. Yönetmeliklerce ardgerme tekniğinin uygulanması sırasında beton basınç dayanımı karakteristik basınç dayanımının %80'e eşit olması beklenmektedir. Bölüm 4'te farklı malzeme modelleri incelenmekte olup yönetmelikçe öngörülen basınç dayanımı değişimi için bağıntılar incelenmiştir. Yapılan analiz sonucu seçilen çimento türüne ve kütleme yöntemine bağlı olarak gerekli dayanıma beton döküldükten itibaren 3.gün sonunda ulaşıldığı görülmektedir. Öngerilme kayıpları hesabı için girdi parametresi olan gün cinsinden beton yaşı 3 güne eşit alınacaktır. Her bir ardgerme kuvveti bileşeni ve kesitlere etkidiği andaki dilim beton yaşları EK D'de verilmektedir.

Yapım aşamaları ve toplam köprü üstyapısı yapım süresi Çiz.2.2'de verilmiştir. Ayrıca her bir kesitte meydana gelen zamana bağlı etkilerin hesabı için geçen süre de Çiz.2.2'de yer almaktadır. Tüm kesitlerin hesabında dikkate alınacak geçen süreler EK D'de verilmektedir.



Şekil 2.11 : Ayaklardan açıklığa doğru işlem sırası.

Çizelge 2.2 : Köprü üstyapısı yapım süreleri.

Yapım Aşaması	Toplam Yapım Süresi (gün)	1.Kesit Geçen Süre (gün)	2.Kesit Geçen Süre (gün)	...18.Kesit Geçen Süre (gün)
YA-0	0	0	-	-
YA-1	7	7	0	-
YA-2	14	14	7	-
YA-3	21	21	14	-
YA-4	28	28	21	-
YA-5	35	35	28	-
YA-6	42	42	35	-
YA-7	49	49	42	-
YA-8	56	56	49	-
YA-9	63	63	56	-
YA-10	70	70	63	-
YA-11	77	77	70	-
YA-12	84	84	77	-
YA-13	91	91	84	-
YA-14	98	98	91	-
YA-15	105	105	98	-
YA-16	112	112	105	-
YA-17	119	119	112	-
YA-18	126	126	119	7
YA-19	133	133	126	14

Kapatma dilimleri tüm ortaayakların oluşturduğu dengeli konsol durum inşaatları tamamlandıktan sonra dökülerek sistem sürekli çerçeve haline getirilmektedir. Tablodan da görüleceği üzere 19 numaralı dilimin bir önceki 18 numaralı dilimin ardgerme işemi tamamlandıktan hemen sonra yapımına geçilmiştir. Böylece sadece ikinci dengeli konsol durumunun bitimi dikkate alınacaktır.



3. TASARIM FELSEFESİ

3.1 Yüklerin Tanımı Ve Yük Birleşimleri

Köprü yapım aşamasında dengeli konsol durumunda iken mesnet üstü negatif momentleri karşılamak amacıyla kesit üst life yakın bölgelere kablolar yerleştirilmektedir. Kablo adedini tahmin etmek için köprü analizinde kullanılan ve en kritik durumu temsil eden yük birleşimi aşağıda verilmektedir:

$$DC + DIFF + CLL + (CE + IE) \quad (3.1)$$

Burada,

DC: dilimlerin kendi ağırlığı,

DIFF: sabit yükün bir konsolda diğer konsola göre %2 oranında fazla olduğu kabul edilir

CLL: yapım aşamasında köprü üstyapısının genişliğine bağlı olarak yapım hareketli yükü (0.5kN/m^2 bir konsolda ve 0.25kN/m^2 diğer konsolda)

CE: gezici kalıp arabası (80-100 ton), tez kapsamında 80 tona eşit alınacaktır,

IE: gezici kalıp arabasının çalışır durumda dinamik etkisi, ağırlığın %10 kadar alınmaktadır.

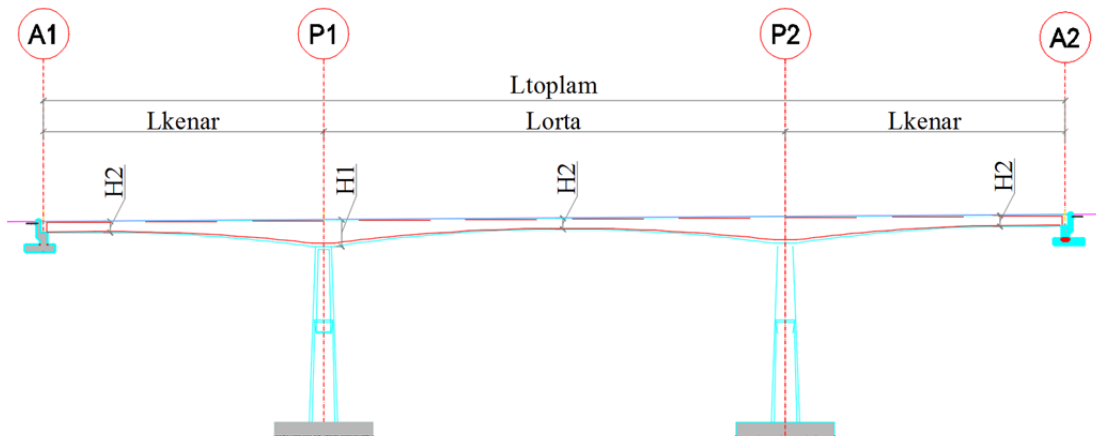
Yapım aşaması sırasında oluşan yükler ve buna bağlı olarak kesitlerde meydana gelen etkiler aşağıdaki yük birleşimine göre hesaplanacaktır. Bu yük birleşimin bir öncekine göre CR, sünme ve SH, rötre etkileri de dahil edilmiştir:

$$DC + DIFF + CLL + CR + SH + (CE + IE) \quad (3.2)$$

3.2 Kesit Ön Boyutlandırması

Kutu formuna sahip köprü üstyapı tabliyesi daha önce de belirtildiği gibi açıklık ortasından mesnetlere doğru eğrisel geometrili bir değişim göstermektedir. Bu bölümde öntasarım için köprü üstyapısı kesit altında parabol gibi düşünülmekte olup uygun formüllerle eğrisellik ifade edilecektir. Kesit yüksekliği H ile, köprü orta

Çiz.3.1’den de görüleceği üzere orta açıklıklarının büyümesiyle ön boyutlandırmada kullanılan oransal değerler değişmekte olup birbirlerine oranlanmasıyla elde edilen sayısal değerler de değişmektedir. Ayrıca, açıklıklar büyüdükçe orta ayaküstü mesnet kesit yükseklikleri oransal olarak fazla değişmemekle beraber, açıklık ortası oransal değerler ciddi bir azalma göstermektedir. Ön tasarım için gerekli parametreler Şekil 3.1’de verilmektedir.



Köprü üstyapısı ön boyutlandırması için SETRA kurumu tarafından önerilen ampirik bağıntılar kullanılabilir:

$$\frac{L_{orta}}{H_1} = 14 + \frac{L_{orta}}{45} \quad (3.3)$$

Açıklık ortasında,

$$\frac{L_{orta}}{H_2} = 19 + \frac{L_{orta}}{7} \quad (3.4)$$

Yürütülen tez kapsamında ele alınan köprü orta açıklığı 165m değerine sahiptir. Yukarıda verilen oransal değerler doğrultusunda ön boyutlandırma aşağıdaki gibidir:

Mesnet üzerinde,

1.Yol

$$H_1 = \frac{165}{20} = 8.25m \quad (3.5)$$

2.Yol

$$\frac{165}{H_1} = 14 + \frac{165}{45} \quad (3.6)$$

$$H_1 = 9.34m \quad (3.7)$$

Ele alınan köprü için mesnet üzerinde kesit yüksekliği 9.5m olduğundan ön boyutlandırma için belirlenen şartlara uyum sağlamaktadır.

Açıklık ortasında,

1.Yol

$$H_2 = \frac{165}{42} = 3.93m \quad (3.8)$$

$$H_2 = \frac{165}{45} = 3.67m \quad (3.9)$$

2.Yol

$$\frac{165}{H_2} = 19 + \frac{165}{7} \quad (3.10)$$

$$H_2 = 3.88 \quad (3.11)$$

Ele alınan köprü için mesnet üzerinde kesit yüksekliği 4.0m olduğundan ön boyutlandırma için belirlenen şartlara uyum sağlamaktadır.

3.3 Gerekli Halat Adedinin Hesaplanması

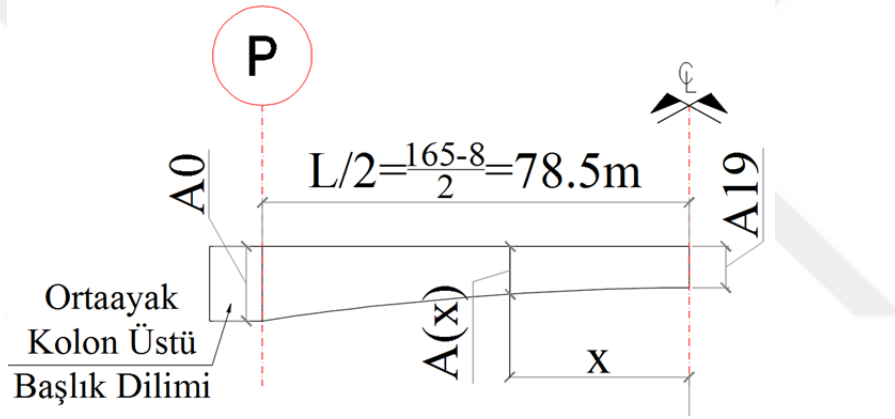
Ön boyutlandırma için daha önce de belirtildiği gibi köprü üstyapısı boykesiti parabol bağıntıları ile ifade edilecektir. Böylece, kesit yükseklikleri ve buna bağlı her bir kesitin alanı parabol bağıntıları ile ifade edildiği halde açıklık ortasından mesnet

kesitine doğru ilerlerken x mesafesine bağlı olarak bulunabilir. Enkesit alanlarına bağlı olarak dilim kendi yayılı ağırlıklarını bulmak için enkesit alanlarının beton birim hacim ağırlığına çarpılacaktır. Hesaplarda beton birim hacim ağırlığı 25kN/m^3 'e eşit alınacaktır.

Mesnet üzerinde enkesit alanı $A_0 = 34.75\text{m}^2$, açıklık ortasında $A_{19} = 13.52\text{m}^2$ olmak üzere, parabolik bağıntı açıklık ortasından mesnete doğru ilerleyen x mesafesine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir (Şekil 3.2):

$$A(x) = A_{19} + (A_0 - A_{19}) \times \left(\frac{2x}{L}\right)^2 \quad (3.12)$$

$$A(x) = 13.52 + 21.23 \times \left(\frac{x}{78.5}\right)^2 = 13.52 + 0.00345x^2 \quad (3.13)$$



Şekil 3.2 : Köprü açıklığı boyunca enkesit alanlarının mesafeye göre değişiminin şematik gösterimi.

Yayılı yük ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$g(x) = 25 \times A(x) = 338 + 0.08625x^2 \quad (3.14)$$

Kesme kuvveti ifadesi:

$$T(x) = \int_0^x g(x)dx = 338x + 0.02875x^3 \quad (3.15)$$

Eğilme momenti ifadesi:

$$M(x) = \int_0^x T(x)dx = 169x^2 + 0.0071875x^4 \quad (3.16)$$

Böylece, köprü üstyapısının herhangi bir kesitinde meydana gelen eğilme momenti değerini ilgili kesitin x mesafesi değerini kullanarak elde etmek mümkündür. Gerekli halat sayısının hesabı için köprü üstyapısı yapım aşaması halinde, diğer bir değişle

dengeli konsol durumunda mesnet kesitinde meydana gelen en yüksek eğilme momenti değerine ihtiyaç vardır:

$$M(78.5m) = 1313971.4 \text{ kNm} \quad (3.17)$$

Bu değer parabol eğrisel değişimi yaklaşımı ile bulunduğundan gerçek yapısal analiz sonucu ile kıyasla az daha büyük olacaktır. Bulunan değer ön boyutlandırma açısından yeterli mertebede olduğu görülmektedir.

Kalıp arabasının ağırlığından ve yapım esnasında tasarımda göz önüne alınan hareketli yapım yüklerinden mesnet kesitinde meydana gelen eğilme momenti değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

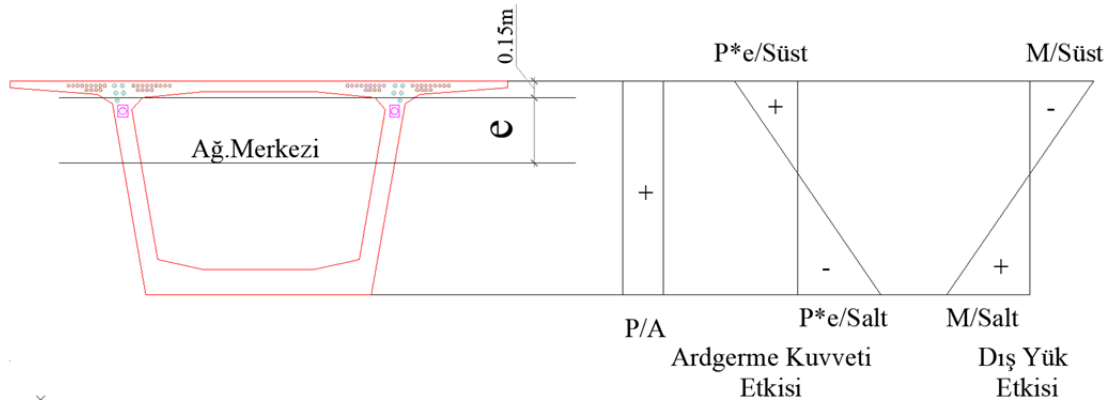
$$M(77.5m)_{kalıp} = 800kN \times 1.10 \times 77.5m = 68200 \text{ kNm} \quad (3.18)$$

$$M(77.5m)_{yapım \text{ yükleri}} = \frac{0.5kN}{m^2} \times 16.50 \times 0.5 \times 77.5^2 = 24775.8 \text{ kNm} \quad (3.19)$$

Böylece, önboyutlandırma için dikkate alınan eğilme momenti değeri servis durumunda aşağıdaki gibidir:

$$M_{servis} = 1313971.4 + 68200 + 24775.8 = 1406947.2kNm \quad (3.20)$$

Kesitlerde dış yüklerden ve ardgerme kuvvetinden meydana gelen gerilmeler izin verilen çekme gerilmesi sınırı ile sınırlandırılacaktır. Bu yüzden gerekli halat adedinin hesabı için meydana gelen gerilme değerinden çekme gerilmesi sınırı değeri düşürülerek işlem yapılacaktır. Dış yüklerin etkisi altında mesnet kesitinde negatif moment, dolayısı ile çekme gerilmeleri kesit üstünde meydana gelecektir. Ardgermeli kesit hesabına esas kesitte oluşan gerilmeler aşağıdaki gibi dikkate alınacaktır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Ardgermeli kutu kesitte meydana gelen gerilmeler.

İzin verilen çekme gerilmesi sınırı AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından aşağıdaki şekilde belirlenecektir:

$$\sigma_{çekme} > -0.24\sqrt{f_{ci}} = -0.24\sqrt{36} = -1.44MPa \quad (3.21)$$

Toplam ardgerme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanacaktır:

$$P = \frac{\frac{M}{S_{üst}} + \sigma_{çekme}}{\frac{1}{A} + \frac{e}{S_{üst}}} = \frac{\frac{1406947.2}{83.39} - 1.44 \times 1000}{\frac{1}{34.75} + \frac{4.675}{83.39}} = 181896.5kN \quad (3.22)$$

Ardgerme halatları kopma dayanımının %75'e eşit miktarda gerildiğinden ve bir halatın enkesit alanı $150mm^2$ olduğundan ve zamana bağlı öngerilme kayıplarının yaklaşık %15 mertebesinde olduğu düşünülerek bir halatın taşıdığı ardgerme kuvvetini aşağıdaki gibi elde ederiz:

$$P_1 = 0.75 \times 0.85 \times 1862MPa \times 150mm^2 = 178 kN \quad (3.23)$$

Gerekli halat adedi toplam ardgerme kuvvetinin sadece tek halata etkiyen ardgerme kuvveti değerine bölünmesiyle elde edilecektir:

$$N_{gerekli} = 181896.5/178 = 1022 adet \quad (3.24)$$

Ele alınan köprü üstyapısının dengeli konsol durumunda negatif momentleri karşılamak için tasarlanan geçici halat adedi aşağıdaki gibidir:

$$N_{mevcut} = 31 \times 2 \times 5 + 19 \times 4 \times 13 = 1298adet \quad (3.25)$$

Köprü üstyapısında bulunan geçici halat adedi ön boyutlandırma hesap sonucu elde edilen halat adedinden daha fazladır, ve böylece halat adedi yeterli olduğundan köprü üstyapısının ayrıntılı analizine geçilebilir.

4. MALZEME MODELLERİ VE ZAMANA BAĞLI ETKİLER

Dilimsel dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprülerin zamana bağlı etkilerinin hesabı için AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından önerilen üç farklı büzülme ve sünme malzeme modelleri bu bölümde ayrıntılı şekilde incelenecektir.

Artımsal zaman adımı yöntemini kullanarak ve yapım sürelerine bağlı olarak zamana bağlı etkilerin hesabı gerekmektedir. Her bir adım için kesit tahkiklerinde ve sehim hesabında dikkate alınacak öngerilme kayıpları büzülme birim kısalma değeri ve sünme katsayısına bağlı olarak hesaplanır. Bazı malzeme modelleri toplam öngerilme kayıp değerlerini doğrudan hesapladığından dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen özel köprüler için uygun olmamaktadır.

Bu bölümün sonunda tez kapsamında analizi yapılacak köprü için büzülme birim kısalma değerleri ve sünme katsayıları hesaplanacak ve değerler karşılaştırılmalı olarak çizelgelerde verilecektir. Hesapta dikkate alınacak malzeme parametreleri ve köprü enkesit alanları ve buna bağlı olarak dilimlerin toplam hacim ve açık hava etkisindeki yüzey alanları belirtilecektir. Üç farklı malzeme modellerinin hesap sonuçları ve bir birine yakınlık dereceleri ölçülüp yürütülen tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ele alınacak malzeme modeline karar verilecektir.

4.1 Malzeme Modelleri

4.1.1 CEB-FIP MC90-99 modeli

4.1.1.1 Büzülme etkisi

Toplam büzülme birim kısalması otojen ve kuruma büzölmelerinden kaynaklanan birim kısaltmaların toplamı gibi düşünölebilir ve 4.1 nolu eşitliğı ile aşağıda verilmiştir. Eşitlikteki t_c beton nem kürününün bittiğı ve ya beton kurummasının başladığı gündeki gün cinsinden beton yaşı, t ise büzölme birim kısaltmasının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşıdır.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c) \quad (4.1)$$

4.1 eşitliği ile verilen $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ toplam büzülme birim kısılmasını, $\varepsilon_{cas}(t)$ otojen büzülmeden kaynaklanan birim kısılmayı ve $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$ herhangi bir zaman diliminde kuruma büzülmesinden kaynaklanan birim kısılmayı tanımlamaktadır.

Otojen büzülmeden kaynaklanan birim kısılma 4.2 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t) \quad (4.2)$$

4.2 eşitliği ile verilen $\varepsilon_{caso}(f_{cm28})$ nominal otojen büzülme çarpanı olarak tanımlanmakta olup 4.3 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm28}/f_{cmo}}{6+f_{cm28}/f_{cmo}} \right)^{2.5} \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

$$f_{cm28} = f'_c + 8.0 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

4.3 ve 4.4 eşitlikler ile verilen f_{cm28} 28 günlük ortalama silindirik basınç dayanımı ve f'_c karakteristik silindirik basınç dayanımını ifade etmektedir. f_{cmo} değeri ise yüklemenin başladığı andaki betonun ortalama silindirik basınç dayanımını ifade etmektedir ve yaklaşık olarak 10 MPa'a eşit olarak kabul edilmiştir.

4.3 eşitliği ile verilen α_{as} çarpanı için değer ise çimento türüne bağlı olarak Çiz.4.1 aracılığıyla bulunacaktır.

4.2 eşitliği ile verilen $\beta_{as}(t)$ otojen büzülmenin zamanla gelişimini ifade eden fonksiyondur ve 4.5 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte yer alan t hesapta dikkate alınan zaman diliminde gün cinsinden beton yaşını ifade etmektedir, t_1 ise referans gün sayısı olarak 1'e eşit alınmaktadır.

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0.2(t/t_1)^{0.5})} \quad (4.5)$$

Otojen büzülme bileşeni çevre koşullarından ve elemanın boyutlarından bağımsız şekilde hesaplanmakta olup kuruma büzülmesine göre çok daha hızlı gelişmektedir.

Kuruma büzülmesi $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$ 4.6 eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Otojen büzülmeden farklı olarak kuruma büzülmesinin hesabında bağıl nem ve kurumaya maruz kalan eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranına bağlı şekilde ele alınmaktadır.

$$\varepsilon_{cds}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28})\beta_{RH}(h)\beta_{ds}(t - t_c) \quad (4.6)$$

4.6 eşitliği ile verilen $\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$ nominal kuruma büzülmesi çarpanı olarak tanımlanmaktadır ve 4.7 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + 110\alpha_{ds1})e^{(-\alpha_{ds2}f_{cm28}/f_{cmo})}] \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

4.7 eşitliği ile verilen α_{ds1} ve α_{ds2} çarpanları için değerler ise çimento türüne bağlı olarak Çiz.4.1 aracılığıyla bulunacak. Bu değerler Eurocode 2'den alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Çimento türüne bağlı katsayılar.

Eurocode 2'ye göre çimento türü	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
SL (Yavaş sertleşen çimentolar)	800	3	0.13
N ve ya R (normal ve ya hızlı sertleşen çimentolar)	700	4	0.12
RS (hızlı sertleşen yüksek dayanımlı çimentolar)	600	6	0.12

4.6 eşitliğindeki $\beta_{RH}(h)$ çarpanı ise bağıl nemin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisini dikkate almaktadır ve h bağıl nem değerine bağlı olarak 4.8 ve 4.9 eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

$$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_o} \right)^3 \right] \text{ eğer } 0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1} \quad (4.8)$$

$$\beta_{RH}(h) = 0.25 \text{ eğer } h > 0.99\beta_{s1} \quad (4.9)$$

Yukarıdaki formüllerde bağıl nem değerinin aralığı için belirlenen kıyas çarpanı β_{s1} yüksek dayanımlı betonlar için elemanın serbest kuruma özelliğini dikkate alır ve 4.10 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Söz konusu beton dayanımı olduğu için formülde 28 günlük ve yüklemenin başladığı andaki betonun ortalama silindir basınç dayanımları yer almaktadır.

$$\beta_{s1} = \left(\frac{3.5f_{cmo}}{f_{cm28}} \right)^{0.1} \leq 1.0 \quad (4.10)$$

4.6 eşitliğindeki $\beta_{ds}(t - t_c)$ kuruma büzülmesinin zamanla gelişimini ifade eden fonksiyondur ve 4.11 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikte yer alan t hesapta dikkate alınan zaman diliminde gün cinsinden beton yaşını ifade etmektedir, t_1 ise referans gün sayısı olarak 1'e eşit alınmaktadır. Ayrıca otojen büzülmeden farklı olarak beton kürü uygulandıktan sonra betonun kurumaya başladığı andaki t_c ile

ifade edilen beton yaşı da dikkate alınmaktadır. (V/S) ise daha önce de belirtildiği gibi eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranını ifade etmektedir. $(V/S)_o$ referans oran olarak tanımlanmakta olup 50mm'e eşit alınacaktır.

$$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_o]^2 + (t-t_c)/t_1} \right]^{0.5} \quad (4.11)$$

4.1.1.2 Sünme etkisi

CEB MC90-99 modelinde yer alan sünme etkisi betonarme ve öngerilmeli beton yapılarda işletme durumunda beton basınç gerilmeleri izin verilen gerilmelerden düşük olması durumunda, diğer bir ifade ile $\sigma_c \leq 0.40f_{cmto}$ olması durumunda geçerlidir. f_{cmto} yük uygulandığı andaki beton ortalama basınç değerini ifade etmektedir.

Öngerilmeli beton yapılarda yukarıda belirtilen şartlar sağlandığından ve daha önce de belirtildiği gibi ele CEB MC90-99 modeli yüksek dayanımlı beton için geliştirildiğinden bu bölümde verilen bağıntılar bu tez kapsamında yapılan çalışma için geçerlidir.

Sünme etkisi 28 günlük sünme katsayısı yardımıyla göz önüne alınmaktadır ve 4.12 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikteki t_0 beton kürününün bittiği ve beton kurumasının başladığı gündeki gün cinsinden beton yaşı, t ise büzülme birim kısalmasının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşıdır.

$$\phi_{28}(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (4.12)$$

4.13 eşitliğindeki ϕ_0 nominal (boyutsuz) sünme katsayısı olup 4.13 eşitliği ile aşağıda verilmiştir.

$$\phi_0 = \phi_{RH}(h) \beta(f_{cm28}) \beta(t_0) \quad (4.13)$$

$\phi_{RH}(h)$ nominal sünme katsayısının düzeltme çarpanı olup bağıl nem oranına bağlı olarak 4.14 eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\phi_{RH}(h) = \left[1 + \frac{1-h/h_0}{\sqrt[3]{0.1[(V/S)/(V/S)_o]}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad (4.14)$$

α_1 ve α_2 beton ortalama basınç dayanımına bağlı katsayılar olup 4.15 ve 4.16 eşitlikleriyle hesaplanmaktadır. CEB MC90 modelinde $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ alınmaktadır.

$$\alpha_1 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}} \right]^{0.7} \quad (4.15)$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}} \right]^{0.2} \quad (4.16)$$

Nominal sünme katsayısının hesabında beton dayanım değerlerine bağlı düzeltme katsayısı olup 4.17 eşitliğiyle verilen bir büyüklüktür.

$$\beta(f_{cm28}) = \frac{5.3}{\sqrt{f_{cm28}/f_{cm0}}} \quad (4.17)$$

Betonun ilk yüklemedeki t_0 ile ifade edilen gün cinsinden yaşını dikkate alan değişken 4.18 eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Eşitlikteki $t_1=1$ gün olarak ele alınacaktır.

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (4.18)$$

28 günlük sünme katsayısı $\phi_{28}(t, t_0)$ hesabı için verilen eşitlikte $\beta_c(t - t_0)$ büyüklük sünmenin betonun yüklendikten sonraki zamana bağlı gelişimini göz önünde bulunduran çarpandır ve 4.19 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_h + (t-t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (4.19)$$

4.19 eşitliğindeki β_h değeri boyutsuz bir değer olup ortamın bağıl nemini, eleman boyut faktörünü ve beton basınç dayanımını dikkate alan büyüklüktür ve 4.20 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\beta_h = 150[1 + (1.2 \cdot h/h_0)^{18}] (V/S)/(V/S)_o + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \quad (4.20)$$

Yukarıda verilen eşitlikteki α_3 beton ortalama basınç dayanımına bağlı katsayı olup 4.21 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha_3 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}} \right]^{0.5} \quad (4.21)$$

Bu bölümde CEB MC90-99 modelinin önerdiği büzülme ve sünme etkilerinin hesabı için bağıntılar dikkate alınmıştır. Kür uygulama türü ve kür süresi dikkate alınmamakta olup bunun yerine ortamın bağıl nem oranı ve eleman boyut faktörü dikkate alınmıştır. Ayrıca, betonun kurumaya başladığı gün cinsinden yaşı, betonun yükleme uygulama anındaki gün cinsinden yaşı, eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranı, ortalama basınç dayanım değeri ve çimento türü gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.1.2 ACI 209R-92 modeli

4.1.2.1 Büzülme etkisi

Büzülme birim kısalması $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ 4.22 eşitliği ile aşağıda verilmiştir. Eşitlikteki t_c beton kürününün bittiği ve beton kurumasının başladığı gündeki gün cinsinden beton yaşı, t ise büzülme birim kısalmasının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşıdır.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)^\alpha}{f+(t-t_c)^\alpha} \varepsilon_{shu} \quad (4.22)$$

Standart koşullar altında belirli büzülme verilerinin olmadığı durumlarda ve bağıl nemin %40 olmak üzere maksimum büzülme birim kısalması ε_{shu} için önerilen ortalama değer 4.23 eşitliği ile aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} mm/mm \quad (4.23)$$

4.22 eşitliğinde yer alan f değeri için ise ACI209R-92 büzülme modeli tarafından 7 günlük nem kürü uygulanması durumunda 55, 1-3 günlük buhar kürü uygulanması durumunda ise 35 değerleri önerilmektedir. Ayrıca betonun kurumaya başladığı andan itibaren hesaplanan süre için belirlenen α sabiti 1.0 olarak alınmaktadır. Zaman fonsiyonu f ile α değerleri sabit kabul edildiğinden dolayı eleman boyutundan bağımsız hesaplanmaktadır. Boyut etkisini göz önünde bulundurmamak için ise ACI209R-92 tarafından önerilen f ifadesi 4.24 eşitliği ile aşağıda verilmiştir.

$$f = 26.0e^{\{0.0142(V/S)\}} \quad (4.24)$$

4.24 eşitliğinde bulunan (V/S) eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranı ifade etmektedir.

Standart dışı koşullar altında eleman şekli, ortam koşulları ve daha ayrıntılı beton özellikleri gibi bilgi sahibi olunması durumunda maksimum büzülme birim kısalması için önerilen ortalama değerinin 7 adet faktör ile çarpılarak değiştirilmesi gerekir. Bu faktörler yukarıda belirtilen bilgiler doğrultusunda hesaplanıp kümülatif düzeltme çarpanı şeklinde 4.25 eşitliği ile verilen değiştirilmiş maksimum büzülme birim kısalması ifadesinde kullanılacaktır.

$$\varepsilon_{shu} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} mm/mm \quad (4.25)$$

4.25 eşitliğinde bulunan γ_{sh} maksimum büzülme birim kısalması için kümülatif düzeltme çarpanını ifade etmekte olup aşağıda verilen 4.26 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\Psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (4.26)$$

4.26 eşitliğindeki ilk çarpan $\gamma_{sh,tc}$ nemli kür faktörünü ifade etmektedir. 7 günlük nem kürü uygulanması durumunda geçerli olup 4.27 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eşitlikteki t_c daha önce de belirtildiği gibi beton nem kürününün bittiği ve ya beton kurummasının başladığı gündeki gün cinsinden beton yaşını göstermektedir. 1-3 günlük buhar kürü uygulanması durumunda $\gamma_{sh,tc} = 1$ gün olarak ele alınacaktır.

$$\gamma_{sh,tc} = 1.202 - 0.2337 \log(t_c) \quad (4.27)$$

4.26 eşitliğindeki ikinci çarpan $\gamma_{sh,RH}$ ortamın bağıl nem faktörünü ifade etmektedir. Eşitlikteki h ortamın bağıl nem oranını göstermektedir. Verilen h değer aralıkları için $\gamma_{sh,RH}$ 0 ile 1 değerleri arasında değişmektedir. ACI209R-92 büzülme modeli $\gamma_{sh,RH} = 0$ 'dan daha düşük, yani negatif değer şeklinde ifade edilen şişmeyi öngörmemektedir.

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1.40 - 0.02h, & 0.40 \leq h \leq 0.80 \\ 3.00 - 3.00h, & 0.80 \leq h \leq 1.00 \end{cases} \quad (4.28)$$

4.26 eşitliğindeki üçüncü çarpan $\gamma_{sh,vs}$ eleman boyut faktörünü ifade etmektedir ve formülde bulunan (V/S) eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranı ile eleman şekil ve boyutlarını dikkate almaktadır. (V/S) oranının 38mm'den büyük olması durumunda 4.29 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılması öngörülmüştür.

$$\gamma_{sh,vs1} = 1.2e^{\{-0.00472(V/S)\}} \quad (4.29)$$

Bununla beraber elemanın kurumaya başladığı andan itibaren bir sene içerisinde, başka ifadeyle $(t - t_c) < 1$ yıl ve (V/S) oranına bağlı olarak ve bu oranın 38mm'den büyük olması durumunda 4.30 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılabilir.

$$\gamma_{sh,vs2} = 1.23 - 0.006(V/S) \quad (4.30)$$

Kuruma süresinin 1 yıldan büyük olması durumunda ise (V/S) oranına bağlı olarak ve bu oranın 38mm'den büyük olması durumunda 4.31 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılabilir.

$$\gamma_{sh,vs3} = 1.17 - 0.00456(V/S) \quad (4.31)$$

Yapılan hesap sonucu yukarıda verilen üç farklı formüller ile hesaplanan eleman şekil faktörlerinin bir birine oldukça yakın değer verdikleri gözlenmiştir. Bu yüzden, yürütülen çalışma kapsamında 4.29 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılmaktadır.

Ayrıca, (V/S) oranının 38mm'den küçük olması durumunda $\gamma_{sh,vs}$ Çiz.4.2 verilen değerlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Tablo gelecek

4.26 eşitliğindeki dördüncü çarpan $\gamma_{sh,s}$ taze betonun çökme faktörünü ifade etmektedir ve 4.32 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki s mm cinsinden taze betonun çökme değerini tanımlamaktadır.

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s \quad (4.32)$$

4.26 eşitliğindeki beşinci çarpan $\gamma_{sh,\psi}$ ince agrega faktörünü ifade etmektedir ve 4.33 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki ψ oranı ince agreganın ağırlık olarak toplam agregaya oranını yüzde cinsinden tanımlamaktadır.

$$\gamma_{sh,\psi} = \begin{cases} 0.30 + 0.014\psi, & \psi \leq 50\% \\ 0.90 + 0.002\psi, & \psi > 50\% \end{cases} \quad (4.33)$$

4.26 eşitliğindeki altıncı çarpan $\gamma_{sh,c}$ çimento miktarı faktörünü ifade etmektedir ve 4.24 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki c kg/m³ cinsinden çimento miktarını tanımlamaktadır.

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00061c \quad (4.34)$$

4.26 eşitliğindeki yedinci ve sonuncu çarpan $\gamma_{sh,\alpha}$ hava miktarı faktörünü ifade etmektedir ve 4.35 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki α kg/m³ yüzde cinsinden beton içindeki hava miktarını tanımlamaktadır.

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0.95 + 0.008\alpha \geq 1 \quad (4.35)$$

Yukarıda verilen açıklamalar doğrultusunda ve ASTM C512 yönetmeliği (Basınç Altındaki Betonun Sünme Ölçümü için Standart Metotlar) tarafından belirlenen

gerekli verilere sahip olunması durumunda maksimum büzülme birim ksalmasının ε_{shu} kümülatif düzeltme çarpanı γ_{sh} ile beraber kullanılması tavsiye edilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere standart koşullar altında ve yeterli bilgi sahibi olunmadığı durumlarda 4.23 eşitliği ile verilen değerinin kullanılması zorunludur.

4.1.2.2 Sünme etkisi

Sünme etkilerinin hesabında kullanılacak snme katsayısı $\phi(t, t_0)$ 4.36 eşitliği ile aşağıda verilmiştir. Eşitlikteki t_0 elemana ilk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşını ifade etmekte olup, t ise sünme katsayısının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşını göstermektedir.

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t-t_0)^\psi}{d+(t-t_0)^\psi} \phi_u \quad (4.36)$$

Standart koşullar altında 4.36 eşitliğinde yer alan d ve ψ ortalama değerleri için ise ACI209R-92 sünme modeli sırasıyla 10 ve 0.6 değerlerini önermektedir. Sünme katsayısının hesabında yer alan zaman fonsiyonu d ile ψ önerilen değerler kullanılması durumunda eleman boyutundan bağımsız hesaplanmaktadır. Boyut etkisini dikkate almak için 4.36 eşitliğinde yer alan d değeri büzülme birim ksalmasının hesabında kullanılan f değerine eşit alınmaktadır. Ayrıca boyut etkisini dikkate alındığı durumlarda ve d değerinin hesabı için aşağıda verilen 4.37 eşitliği kullanılması durumunda ψ sabiti 1'e eşit alınmaktadır.

$$d = f = 26.0e^{\{0.0142(V/S)\}} \quad (4.37)$$

Standart koşullar altında maksimum snme katsayısı ϕ_u için önerilen ortalama değer 4.38 eşitliği ile aşağıda verilmiştir.

$$\phi_u = 2.35 \quad (4.38)$$

Standart dışı koşullar altında eleman şekli, ortam koşulları ve daha ayrıntılı beton özellikleri gibi bilgi sahibi olunması durumunda maksimum snme katsayısı için önerilen ortalama değerin 6 adet faktör ile çarpılarak değiştirilmesi gerekir. Faktörlere bağlı büzülme birim ksalmasının hesabında olduğu gibi kümülatif düzeltme çarpanı uygulanmaktadır ve 4.39 eşitliği ile değiştirilmiş snme katsayısı aşağıda verilmiştir.

$$\phi_u = 2.35\gamma_c \quad (4.39)$$

4.39 eşitliğindeki bulunan γ_c maksimum sünme katsayısı için kümülatif düzeltme çarpanını ifade etmekte olup aşağıda verilen 4.40 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_c = \gamma_{c,to} \gamma_{c,RH} \gamma_{c,vs} \gamma_{c,s} \gamma_{c,\psi} \gamma_{c,\alpha} \quad (4.40)$$

4.40 eşitliğindeki ilk çarpan $\gamma_{c,to}$ yükleme yaşı faktörünü ifade etmektedir. Nem kürü uygulanması ve buhar kürü uygulanması durumunda sırasıyla 4.41 ve 4.42 eşitlikleriyle ile hesaplanmaktadır. Eşitlikteki t_0 elemana ilk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşını ifade etmektedir.

$$\gamma_{c,to} = 1.25 t_0^{-0.118} \quad (4.41)$$

$$\gamma_{c,t0} = 1.13 t_0^{-0.094} \quad (4.42)$$

4.40 eşitliğindeki ikinci çarpan $\gamma_{c,RH}$ bağıl nem faktörünü ifade etmektedir. 4.43 eşitliğindeki h ortamın bağıl nem oranını göstermekte olup ondalık şeklinde alınacaktır. Ortamın bağıl nemi h %40'dan daha küçük olması durumunda $\gamma_{c,RH}$ faktörü için 1'den büyük değerler uygulanacaktır.

$$\gamma_{c,RH} = 1.27 - 0.67h \quad (4.43)$$

4.40 eşitliğindeki üçüncü çarpan $\gamma_{c,vs}$ eleman boyut faktörünü ifade etmektedir ve formülde bulunan (V/S) eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranı ile eleman şekil ve boyutlarını dikkate almaktadır. (V/S) oranının 38mm'den küçük olması durumunda 4.44 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılması öngörülmüştür.

$$\gamma_{c,vs1} = \frac{2}{3} (1 + 1.13 e^{\{-0.0213(V/S)\}}) \quad (4.44)$$

Bununla beraber elemanın kurumaya başladığı andan itibaren bir sene içerisinde, başka ifadeyle $(t - t_c) < 1$ yıl ve (V/S) oranına bağlı olarak ve bu oranın 38mm'den büyük olması durumunda 4.45 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılabilir.

$$\gamma_{c,vs2} = 1.14 - 0.00363(V/S) \quad (4.45)$$

Kuruma süresinin 1 yıldan büyük olması durumunda ise (V/S) oranına bağlı olarak ve bu oranın 38mm'den büyük olması durumunda 4.46 eşitliği ile verilen boyut faktör ifadesi kullanılabilir.

$$\gamma_{c,vs3} = 1.10 - 0.00268(V/S) \quad (4.46)$$

Ayrıca, (V/S) oranının 38mm'den küçük olması durumunda $\gamma_{sh,vs}$ Çiz.4.2'de verilen değerlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Çizelge 4.2 : Boyut faktörü.

V/S oranı (mm)	$\gamma_{c,vs}$
12.5	1.30
19	1.17
25	1.11
31	1.04
38	1.00

4.40 eşitliğindeki dördüncü çarpan $\gamma_{c,s}$ taze betonun çökme faktörünü ifade etmektedir ve 4.47 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki s mm cinsinden taze betonun çökme değerini tanımlamaktadır.

$$\gamma_{c,s} = 0.82 + 0.00264s \quad (4.47)$$

4.40 eşitliğindeki beşinci çarpan $\gamma_{c,\psi}$ ince agrega faktörünü ifade etmektedir ve 4.48 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki ψ oranı ince agreganın ağırlık olarak toplam agregaya oranını yüzde cinsinden tanımlamaktadır.

$$\gamma_{c,\psi} = 0.88 + 0.0024\psi \quad (4.48)$$

4.40 eşitliğindeki altıncı ve sonuncu çarpan $\gamma_{c,\alpha}$ hava miktarı faktörünü ifade etmektedir ve 4.49 eşitliği ile verilmiştir. Eşitlikteki α kg/m³ yüzde cinsinden beton içindeki hava miktarını tanımlamaktadır.

$$\gamma_{c,\alpha} = 0.46 + 0.09\alpha \geq 1 \quad (4.49)$$

Maksimum büzülme birim kısalması için ve ASTM C512 yönetmeliği gereği belirlenen gerekli verilere sahip olunması durumunda maksimum sünme katsayısı ϕ_u kümülatif düzeltme çarpanı γ_c ile beraber kullanılması tavsiye edilmektedir. Standart koşullar altında ve yeterli bilgi sahibi olunmadığı durumlarda 4.38 eşitliği ile verilen değerinin kullanılması zorunludur.

Bu bölümde ACI209R-92 modelinin önerdiği büzülme ve sünme etkilerini hesabı için bağıntılar dikkate alınmıştır. Daha ayrıntılı hesap için betonun kurumaya başladığı gün cinsinden yaşı, betonun yükleme uygulama anındaki gün cinsinden yaşı, kür uygulama türü, ortamın bağıl nem oranı, eleman hacminin V açık hava

etkisindeki yüzey alanına S oranı, taze betonun çökme değeri, beton karışımındaki ince agrega oranı, çimento miktarı ve hava miktarı gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.1.3 AASHTO LRFD 2012 modeli

4.1.3.1 Büzülme etkisi

AASHTO LRFD yönetmeliğinin önerdiği büzülme ve sünme malzeme modelleri ACI209R-92 modeline esaslanmış olup yapılan bazı araştırmalar doğrultusunda geliştirilmiştir. Bu modelde büzülme birim kısalması ve sünme katsayısının hesabı için önerilen yöntemler ilk kez Huo ve diğ. (2001), Al-Omaishi (2001), Tadros (2003) tarafından yapılan çalışmalara dayanan ve 2003 yılında yayınlanan NCHRP Report 496 isimli raporda yer almıştır.

Büzülme birim kısalması $\varepsilon_{bid}(t)$ 4.50 eşitliği ile aşağıda verilmiştir. Eşitlikteki t ise büzülme birim kısalmasının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşıdır.

$$\varepsilon_{bid}(t) = 480\gamma_{sh} \times 10^{-6} mm/mm \quad (4.50)$$

Standart dışı koşullar altında eleman şekli, ortam koşulları ve ilk yükleme anındaki beton basınç dayanımı gibi bilgilere esaslanarak maksimum büzülme birim kısalması için önerilen ortalama değerinin 4 adet faktör ile çarpılarak değiştirilmesi gerekir. AASHTO LRFD tarafından geliştirilen modelde ACI209R-92'ye karşın çimento miktarı, hava miktarı, ince agrega miktarı gibi daha az etkili faktörler dikkate alınmamıştır.

4.50 eşitliğinde bulunan γ_{sh} maksimum büzülme birim kısalması için kümülatif düzeltme çarpanını ifade etmekte olup aşağıda verilen 4.51 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_{sh} = k_s(t)k_{hs}k_fk_{td}(t) \quad (4.51)$$

4.51 eşitliğindeki ilk çarpan $k_s(t)$ büzülme için geliştirilen eleman boyut faktörünü göstermektedir. Dilimsel yapım yöntemiyle inşa edilen özel yapılar için büzülme gelişimi üzerinde eleman boyut etkisinin zamana bağlı ve kür uygulama türü ile beraber hesaplanması gerekmektedir. ACI209R-92 tarafından büzülme birim kısalması için geliştirilen zaman fonksiyonu formülünde yer alan f değeri için 7 günlük nem kürü uygulanması durumunda 55, 1-3 günlük buhar kürü uygulanması

durumunda ise 35 değerleri önerilmektedir. $k_s(t)$ boyut faktöründe ise f değeri için bu iki değerlerin ortalaması olan 45 kullanılmış. Ayrıca f değerinin hesabında boyut etkisini dikkate almak için (V/S) oranına bağlı formül 4.52 eşitliğinde de bulunmaktadır.

$$k_s(t) = \left(\frac{\frac{t}{26.0e^{[0.0142(V/S)]+t}}}{\frac{t}{45+t}} \right) \left[\frac{1064-3.70(V/S)}{923} \right] \quad (4.52)$$

Gerçekte büyük kesitler aynı betondan yapılmış küçük laboratuvar test nümunelere göre çok daha fazla büzülme etkisine maruz kalmaktadır.

4.51 eşitliğindeki ikinci çarpan k_{hs} büzülme etkisi için bağıl nem faktörünü ifade etmektedir. Eşitlikteki H ortamın bağıl nem oranını göstermektedir. k_{hs} faktörü ACI209R-92 tarafından büzülme birim kısalması için geliştirilen ortamın bağıl nem faktörü $\gamma_{sh,RH}$ formülleri esas alınmış olup AASHTO LRFD yönetmeliğinin önerdiği H ortamın tasarım bağıl nem oranı %70'e oranla geliştirilmiştir.

$$k_{hs} = 2.00 - 0.014H \quad (4.53)$$

4.51 eşitliğindeki üçüncü çarpan k_f beton basınç dayanımının etkisi için faktörünü ifade etmektedir. Eşitlikteki f_{ci} ilk yükleme anındaki beton basınç dayanımını tanımlamaktadır.

$$k_{td}(t) = \frac{35}{7+f_{ci}} \quad (4.54)$$

4.51 eşitliğindeki dördüncü çarpan $k_{td}(t)$ ilerleyen zamana bağlı beton basınç dayanımının değişimi faktörünü ifade etmektedir.

$$k_{td}(t) = \left(\frac{t}{61-0.58f_{ci}+t} \right) \quad (4.55)$$

4.1.3.2 Sünme etkisi

Sünme etkilerinin hesabında kullanılacak sünme katsayısı $\psi(t, t_i)$ 4.56 eşitliği ile aşağıda verilmiştir. Eşitlikteki t_i elemana ilk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşını ifade etmekte olup, t ise sünme katsayısının hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşını göstermektedir. Maksimum sünme katsayısı ACI209R-92 sünme modelinde 2.35'e eşit kabul edilmekte olup NCHRP Report 496 sünme katsayısı için önerilen değer 1.9'a eşit alınmaktadır.

$$\psi(t, t_i) = 1.9\gamma_c \quad (4.56)$$

4.56 eşitliğindeki bulunan γ_c maksimum sünme katsayısı için kümülatif düzeltme çarpanını ifade etmekte olup aşağıda verilen 4.57 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_c = k_c(t)k_{hc}k_fk_{td}(t)k_{la} \quad (4.57)$$

4.57 eşitliğindeki ilk çarpan $k_c(t)$ sünme için geliştirilen eleman boyut faktörünü göstermektedir. Büzülme için geliştirilen faktörde olduğu gibi (V/S) oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca büzülme birim kısalmasının düzeltme katsayısının geliştirilmesindeki dikkate alınan esaslar $k_c(t)$ için de geçerlidir.

$$k_c(t) = \left(\frac{\frac{t}{26.0e^{[0.0142(V/S)]+t}}}{\frac{t}{45+t}} \right) \left[\frac{1.80+1.77e^{-0.213(V/S)}}{2.587} \right] \quad (4.58)$$

4.57 eşitliğindeki ikinci çarpan k_{hc} büzülme etkisi için bağıl nem faktörünü ifade etmektedir. Eşitlikteki H ortamın bağıl nem oranını göstermektedir.

$$k_{hc} = 1.56 - 0.008H \quad (4.59)$$

4.57 eşitliğindeki üçüncü ve dördüncü çarpan sırasıyla k_f ve k_{td} büzülme etkisinin hesabında dikkate alınan katsayılar olup aynı şekilde sünme hesabı için de kullanılmaktadır.

4.57 eşitliğindeki beşinci çarpan k_{la} yükleme yaşı faktörünü ifade etmektedir. ACI209R-92 tarafından sünme katsayısı için geliştirilen yükleme yaşı $\gamma_{c,to}$ faktörüne oldukça benzerdir.

$$k_{la} = t_i^{-0.118} \quad (4.60)$$

Bu bölümde AASHTO LRFD modelinin önerdiği büzülme ve sünme etkilerini hesabı için bağıntılar dikkate alınmıştır. Daha ayrıntılı hesap için betonun ilk yüklemedeki gün cinsinden yaşı, ortamın bağıl nem oranı, eleman hacminin V açık hava etkisindeki yüzey alanına S oranı gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.1.4 Tez çalışmasında ele alınacak malzeme modeli

Büzülme ve sünme modelleri ayrıntılı olarak incelenmiş olup büzülme birim kısalması ve sünme katsayısının hesabında ihtiyaç duyulan parametreler Çiz.4.3'de listelenmiştir.

Çizelge 4.3 : Büzülme ve sünme modelleri için gerekli parametreler.

Gerekli Parametreler	CEB-FIP MC90-99	ACI209R-92	AASHTO LRFD 2012
Kür metodu		X	
Betonun kür sonundaki yaşı	X	X	
Betonun ilk yüklemedeki yaşı	X	X	X
Betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı	X		
Betonun ilk yüklemedeki basınç dayanımı			X
Çimento türü	X	X	
Ortamin bağıl nem katsayısı	X	X	X
Eleman V/S oranı	X	X	X
Taze betonun çökme değeri		X	
Beton bileşimindeki ince agrega miktarı		X	
Beton bileşimindeki çimento miktarı		X	
Beton bileşimindeki hava miktarı		X	

Ele alınan köprü dilimleri çok büyük olduğundan ve her bir dilimin kurumaya başladığı ve/veya yük uygulama anındaki gün cinsinden beton yaşı farklı olduğundan malzeme modeli seçimi analizi yapılacak köprü konfigürasyonunu ele alarak karar vermek doğru olmaz. Toplam büzülme birim kısalması ve sünme katsayısının zamana bağlı değişimini grafiklerini oluşturmak için kullanıcak parametreler aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.4 : CEB-FIP MC90-99 büzülme ve sünme modeli için parametreler.

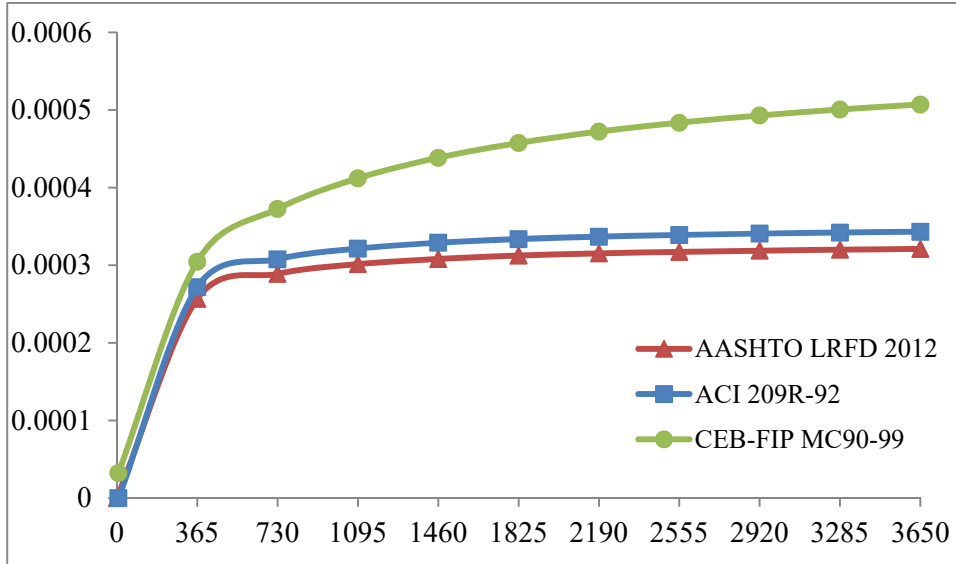
t_c (gün)	t_0 (gün)	f'_c (MPa)	f_{cm28} (MPa)	Çimento türü	h	(V/S) (mm)
7	15	45	48	RS	0.70	100

Çizelge 4.5 : ACI209R-92 büzülme ve sünme modeli için parametreler.

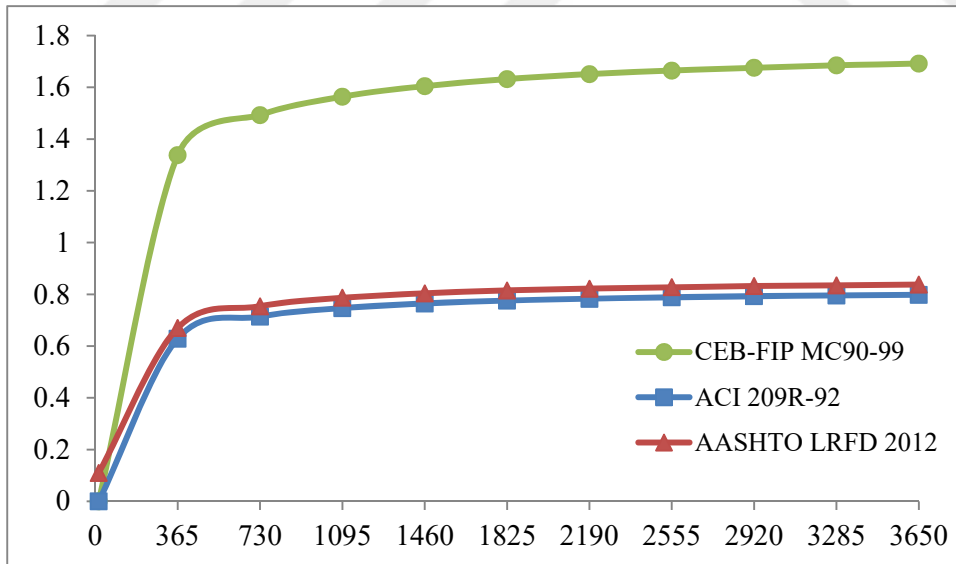
Kür metodu	t_c (gün)	t_0 (gün)	f'_c (MPa)	Çimento türü	h	(V/S) (mm)	s (mm)	ψ	c (kg/m ³)	α (%)
Nem	7	15	45	RS	0.7	100	75	40	420	2

Çizelge 4.6 : AASHTO LRFD 2012 büzülme ve sünme modeli için parametreler.

t_i (gün)	f'_c (MPa)	f_{ci} (MPa)	H	(V/S) (mm)
7	45	36	0.70	100



Şekil 4.1 : Farklı büzülme modellerine göre büzülme birim kısalmasının zamanla değişimi.



Şekil 4.2 : Farklı sünme modellerine göre sünme katsayısının zamanla değişimi.

Şekil 4.1 ve 4.2’den de görüleceği üzere, AASHTO LRFD 2012 büzülme ve sünme malzeme modeli daha az girdi parametresi kullanarak yönetmelik tarafından referans malzeme modeli olarak belirtilen ACI209R-92 model sonuçlarına yakın değerler elde etmek mümkündür. ACI 209R-92 ve CEB-FIP malzeme modellerinde beton bileşimi

gibi bilgilere ihtiyaç duyulduğundan çok fazla işlem yapılmaktadır. Dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen köprü üstyapısının çözümlemesinde gerekli hassasiyet ve mertebede sonuç veren AASHTO LRFD 2012 malzeme modeli tercih edilecektir.

4.2 Zamana Bağlı Beton Basınç Dayanımı Değişimi

Yürütülen tez kapsamında bir önceki bölümde de açıklandığı üzere zamana bağlı etkilerin hesabında AASHTO LRFD büzülme ve sünme modeli kullanılacaktır. Zamana bağlı etkiler ile beraber beton basınç dayanımı da değişim göstermektedir. AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından basınç dayanımı değişimi için her hangi bir bağıntı verilmediğinden ACI209R-92 tarafından önerilen değişim bağıntısı ele alınacaktır. ACI209R-92’de bu değişim aşağıdaki gibidir:

$$f'_c(t) = \left[\frac{t}{a+bt} \right] f'_c(28) \quad (4.61)$$

Burada,

$f'_c(28)$: 28 günlük beton basınç dayanımı; beton karakteristik silindir basınç dayanımı

$f'_c(t)$: Her hangi bir t zamanındaki beton basınç dayanımı

a ve b : Çimento ve kütleme metoduna bağlı olarak verilen katsayılar (Çiz.4.7).

Çizelge 4.7 : ACI 209R-92 modeli a ve b katsayıları.

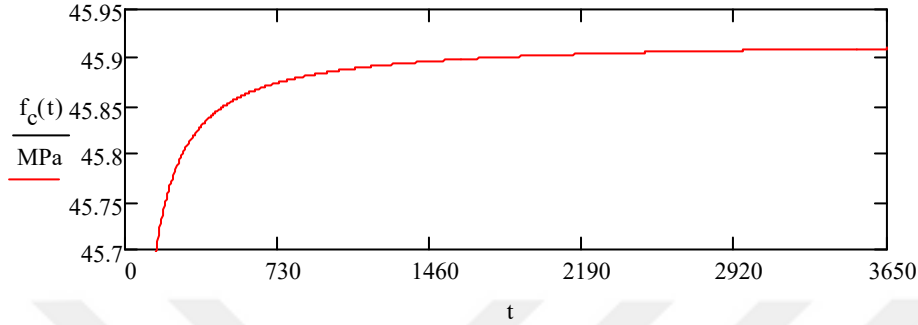
Çimento Türü	Nem Kürü		Buhar Kürü	
	a	b	a	b
I	4	0.85	1.0	0.95
III	2.3	0.92	0.70	0.98

İncelenen dengeli konsol köprünün üstyapısında C45 beton basınç dayanım sınıfı kullanılmıştır. Karakteristik beton basınç dayanımı bu durumda:

$$f'_c(28) = f'_c = 45MPa \quad (4.62)$$

Dengeli konsol köprüsünün her bir dilimi için yapım süresi kalıp kurulumu, demir montajı, beton dökümü ve belli bir mukaveme ulaşması, ve sonrasında ardgerme tekniğinin uygulanması toplam 7 gün olarak ele alınmıştır. Bu durumda normalde uygulama şekli 7 gün olan nem kürü yerine çok yüksek erken dayanımlarının gerekli

hallerde olduğu hallerde 1-3 gün arası uygulanan buhar kürü yönteminin kullanılması öngörülmüştür. Ayrıca kür sıcaklığının yüksek olması dayanım kazanma hızını artırdığından betonun erken yaşta mukavemet kazanmasını sağlar. Bu yüzden hesaplarda kullanılacak a ve b katsayı değerleri buhar kürü ve çimento türü III'e bağlı olarak sırasıyla 0.70 ve 0.98 olarak ele alınacaktır.



Şekil 4.3 : Zamana göre beton basınç dayanımı değişimi.

Şekil 4.3'ten görüleceği üzere ilerleyen zamana bağlı olarak beton basınç dayanımı giderek artmaktadır ve karakteristik dayanımına asimptotik olarak yaklaşım göstermektedir.

Ardgerme tekniğinin kullanılması için betonun belli mukavete erişmesi gerekmektedir. AASHTO LRFD ve diğer ilgili tasarım yönetmelikleri tarafından önerilen basınç dayanımı karakteristik dayanımının %80'ne eşit olmaktadır. Kullanılan çimento türü ve kürleme yöntemine göre beton dayanımı 3.günde 37.09 MPa değerine ulaşmaktadır.

4.3 Zamana Bağlı Beton Elastisite Modülü Değişimi

AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından tasarım sekant elastisite modülü değerinin hesabı için önerilen bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$E_c = 0.043(\gamma_c)^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (4.63)$$

Burada,

E_c : Sekant elastisite modülü

γ_c : Beton birim hacim ağırlığı, 2500kg/m³ eşit alınacaktır

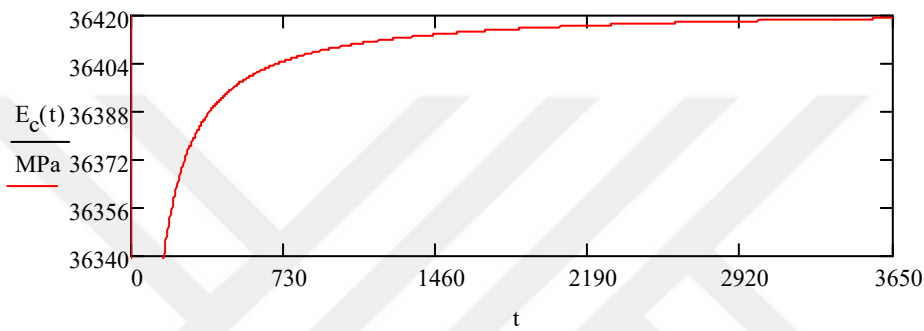
f'_c : Beton karakteristik silindir basınç dayanımı

Beton basınç dayanımı zamana bağlı değişim gösterdiğinden beton elastisite modülü buna bağlı olarak da değişmektedir. Bu durumda zamana bağlı elastisite modülü değişimi aşağıdaki gibidir:

$$E_c(t) = 0.043(\gamma_c)^{1.5} \sqrt{f'_c(t)} \quad (4.64)$$

Bir önceki bölümde verilen zamana bağlı basınç dayanımı değişimi için kullanılan zaman fonksiyonu elastisite modülü değişiminde kullanılmak üzere:

$$E_c(t) = 0.043(\gamma_c)^{1.5} \sqrt{f'_c} \sqrt{\frac{t}{a+bt}} = E_c \sqrt{\frac{t}{a+bt}} \quad (4.65)$$



Şekil 4.4 : Zamana göre elastisite modülü değişimi.

Şekil 4.4'ten görüleceği üzere ilerleyen zamana bağlı olarak elastisite modülü giderek artmaktadır ve beton karakteristik dayanımına ulaştıktan sonra asimptotik olarak yaklaşım göstermektedir.

4.61 eşitliği ile hesaplanan elastisite modülü değeri 36057MPa eşit olmak üzere 4.63 eşitliği ile 28 gün için hesaplanan elastisite modülü değeri 35966.8MPa bulunmuştur. Görüldüğü gibi değerler oldukça yakındır ve zaman adımlı kesit hesaplarında ve gerilme değişimine bağlı olarak düşey sehim hesaplarında 4.63 eşitliği ile elastisite modülü bağıntısını kullanmak amaca uygun olacaktır.

4.4 Efektif ve Yaşa Göre Düzeltilmiş Elastisite Modülü

Birçok öngerilmeli ve ardgerilmeli yapıların tasarımı işletme yükleri altında kesitlerde meydana gelen gerilmelerin malzeme dayanımına bağlı olarak yönetmeliklerce izin verilen gerilmelerin altında tutularak yapılır. Öngerilme tekniği kullanılan köprü türü yapılarda gerilmelerin tahkiki yanısıra sehim tahkiki yapılması gerekmektedir.

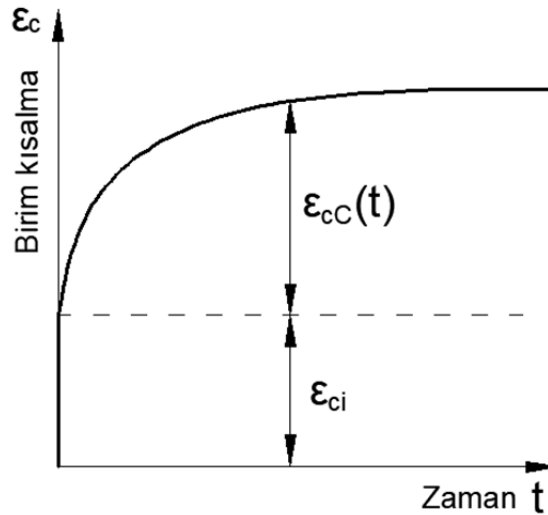
Sehim işletme yüklerinden meydana gelen basit eğilme altındaki yapı elemanında düşey deplasman miktarına denir. Öngerilme kuvvetinden meydana gelen yukarı doğru deplasman ise ters sehim olarak denmektedir. Basit kirişli köprülerde işletme yükleri altında meydana gelen maksimum sehim açıklık ortasında, dengeli konsol köprülerde ise kolondan açıklık ortasına ilerleyen dilimlerin her yapım aşaması için konsol ucunda dikkate alınır. Sehim miktarı her bir yapım aşaması için sınırlandırılmaktadır.

Yapı elemanında her hangi bir zaman diliminde meydana gelen sehim miktarı iki parçaya ayrılarak incelenebilir: ilk yüklemekten meydana gelen ani sehim ve kalıcı yüklerden oluşan ve zamanla gelişen ilave sehim.

$$\delta(t) = \delta_i + \delta_{ilave}(t) \quad (4.66)$$

Yapı elemanda oluşan ilave sehim betonun zamana bağlı şekildeğişimleri göz önüne alınır. Bu etkiler yönetmeliklerce verilen kalıcı yük süre katsayılarının kalıcı yüklerden meydana gelen sehim ile çarpılarak dikkate alınır. Bu yaklaşım betonda zamana bağlı gelişen sünmenin betonun gerilme-birim şekildeğiştirme bağıntısının üzerindeki etkisine esaslanmaktadır.

Sünmeden meydana gelen birim şekildiğiştirmenin zamana bağlı değişimi Şekil.4.5’de verilmektedir.

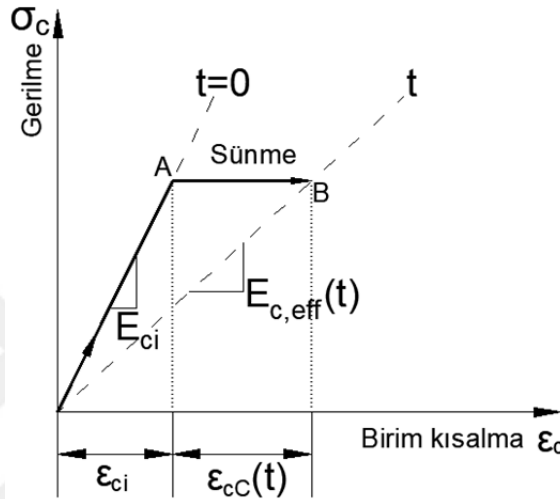


Şekil 4.5 : Sünmeden dolayı birim kısalmanın zamanla değişimi.

Zamana bağlı gelişen sünme şekildiğiştirme kalıcı yüke maruz elemanın ilk yüklemekte meydana gelen birim şekildiğiştirmesinin zamana bağlı aynı gerilme altında gelişen sünme katsayısına çarpılarak bulunur.

$$\varepsilon_{cc}(t) = \varepsilon_{ci} \times \psi(t) \quad (4.67)$$

Bu bağıntıya esasen belirli gerilme düzeyi için betonun elastik sınırlar içinde davranışını ele alındığında toplam birim kısalma iki parçada incenebilir. Şekil 4.5’de görüleceği üzere toplam birim kısalma ilk yüklemdeki betonda meydana gelen ani elastik kısalma ve zamana bağlı sünme kısalma şeklinde ifade edilebilir. Şekil 4.6’de E_{ci} ile malzeme elastik elastisite modülünü, $E_{c,eff}(t)$ ise betonda zamanla gelişen sünmeden dolayı zamana bağlı elastisite modülü değişimini göstermektedir.



Şekil 4.6 : Sünmeden dolayı zamana bağlı elastisite modülü değişimi.

Şekil 4.6’den de görüleceği üzere sünmeden dolayı malzeme elastisite modülü giderek azalmaktadır. Zamana bağlı değişim aşağıda verilen 4.68 eşitliği ile ifade edilebilir.

$$E_{c,eff}(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c(t)} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ci} + \varepsilon_{cc}(t)} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ci} + \varepsilon_{ci}\psi(t)} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ci}(1 + \psi(t))} \quad (4.68)$$

İlk yüklemde meydana gelen birim kısalma ve buna bağlı olarak elastik elastisite modülü 4.69 eşitliği ile ifade edilebilir.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ci}} \quad (4.69)$$

Zamana bağlı ve sünmeden kaynaklanan betonun elastisite modülü değişimi 4.68 ve 4.69 eşitliklerini sadeleştirerek 4.70 eşitliği ile ifade edilebilir.

$$E_{c,eff}(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \psi(t)} \quad (4.70)$$

4.70 eşitliği ile verilen efektif elastisite modülü ilk yüklemekten itibaren herhangi bir t anında bulunmaktadır. Bölüm 4.3’te zamana bağlı elastisite modülü değişimi

$$E_{c,eff}(t) = \frac{E_c(t)}{1 + \psi(t, t_i)} \quad (4.71)$$

Şekil 4.7’de beton efektif elastisite modülü zamana bağlı değişimi yukarıda verilen açıklamalar doğrultusunda elastik davranış ve bunun sonrasında aynı gerilme düzeyi altında gelişen sünmeyi dikkate alınarak verilmektedir.



42

Dış yüklerden dolayı kesitlerde meydana gelen gerilme ani değişim şeklinde gelişmiyorsa, sünmeden kaynaklı birim kısalma daha küçük olacaktır. Şekil 4.8’de gerilme değişimi üç aşamada verilmiştir ve sünme birim kısalmasının basamaklı gerilme artışı durumunda ani değişimine göre daha küçük olacağı gösterilmiştir. Eskime katsayısını dikkate alarak aşamalı gerilme artışı durumunda zamana bağlı değişen yaşa göre düzeltilmiş elastisite modülü 4.72 eşitliği ile verilmiştir.

$$E_{c,AAEM} = \frac{E_c}{1+\chi[\psi(t,t_i)]} \quad (4.72)$$

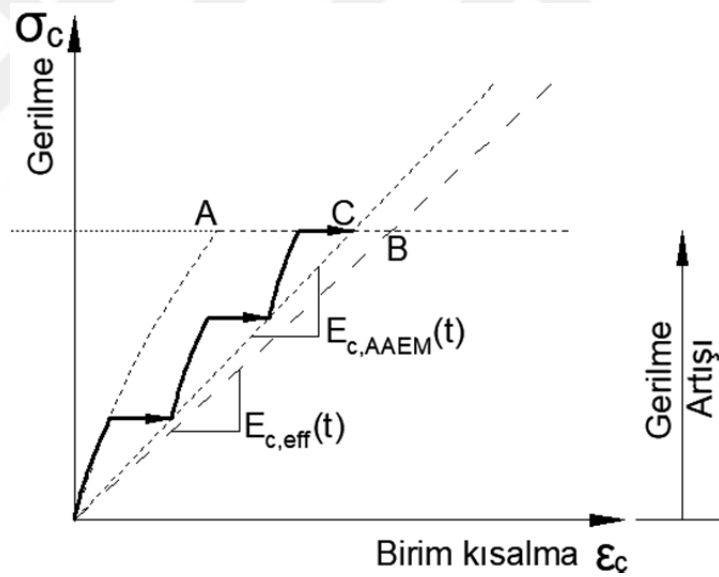
Burada,

E_c : Beton elastisite modülü

$\psi(t, t_i)$: t_i ilk yüklemedeki betonun t gününde gelişen sünme katsayısı

χ : Eskime katsayısı

$E_{c,AAEM}$: Yaşa göre düzeltilmiş beton elastisite modülü



Şekil 4.8 : Zamanla gelişen sünmeden dolayı yaşa göre düzeltilmiş ve efektif elastisite modülü.

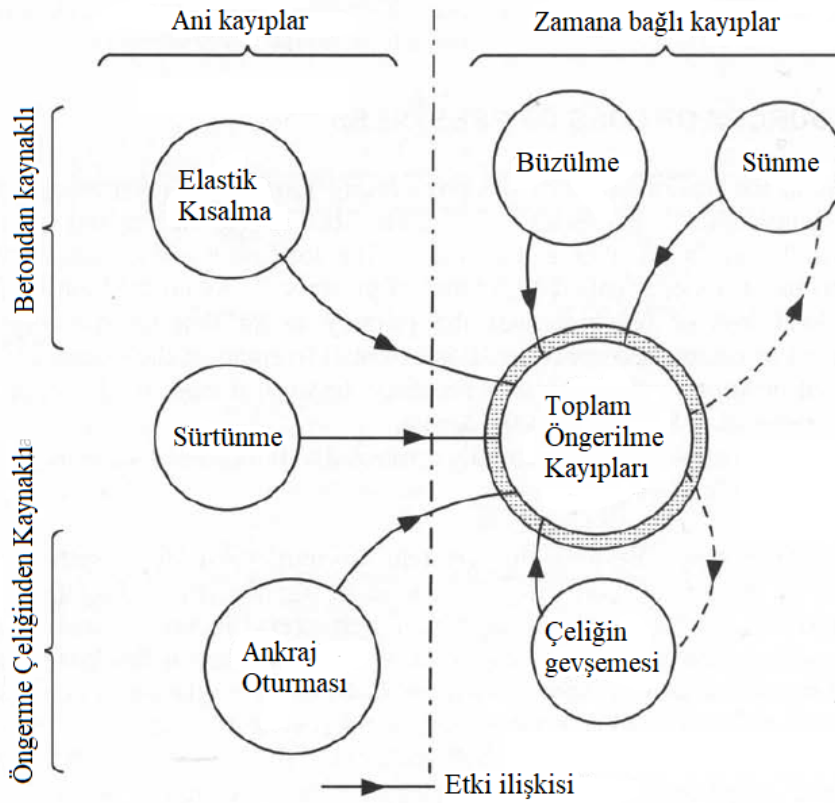
Eskime katsayısı χ ilk kez Trost (1967) çalışmasında sunulmuş ve daha sonra Bazant ve Dilger tarafından geliştirilerek 0.7’e eşit alınmıştır. Bölüm 4.5’de anlatılan zamana bağlı öngerilme kayıplarının hesaplarında 4.73 eşitliği ile verilen zamana göre düzeltilmiş elastisite modülü kullanılacaktır. Ayrıca elastisite modülü de zamana bağlı değişim gösterdiğinden E_c yerine $E_c(t)$ kullanılacaktır.

$$E_{c,AAEM}(t) = \frac{E_c(t)}{1+0.7[\psi(t,t_i)]} \quad (4.73)$$

4.5 AASHTO LRFD'e göre Öngerilme Kayıplarının Hesaplanması

Öngerilmeli ve ardgermeli beton elemanlarda öngerme yüksek mukavemetli halatlardaki kuvvet zamanlara giderek azalmaktadır. Belli bir süre sonra öngerilme kayıpları asimptotik olarak devam etmekte olup eleman servis ömrü sonuna kadar nihai değere ulaşır. Böylece elemana uygulanan öngerme kuvveti tüm kayıplar meydana geldikten sonra efektif öngerme kuvveti olarak ifade edilir ve kullanılabilirlik sınır durumunda kesitlerde meydana gelen gerilme tahkiklerinde ve sehim hesaplarında kullanılmaktadır.

Öngerilme kayıpları ani ve zamana bağlı öngerilme kayıpları şeklinde incelenecektir (Şekil 4.9). Ani öngerilme kayıpları elastik kısalma, sürtünme ve ankraj kayması, zamana bağlı gelişen öngerilme kayıpları ise beton büzülmesi, sünmesi ve öngerme çeliğinin gevşemesinden ileri gelmektedir.



Şekil 4.9 : Öngerilme kayıplarının sınıflandırılması.

4.5.1 Ani öngerilme kayıplarının hesabı

Ani öngerilme kayıpları ardgerme kuvvetinin uygulanmasından hemen sonra meydana gelmektedir ve ardgermeli elemanlar için elastik kısalma kaybı, sürtünme ve ankraj oturması kaybı olarak sınıflandırılmaktadır. Tüm diğer kayıp türlerinin

hesabında basit kiriş yaklaşımı ani kayıplarının hesabında da geçerli olup toplam ani kayıp mertebesi yürütülen tez çalışması kapsamında hesap kolaylığı açısından %10'a eşit alınmaktadır.

4.5.2 Zamana bağlı öngerilme kayıplarının ayrıntılı hesap yöntemi

4.5.2.1 Dönüştürme katsayısı K_{id} çıkarılışı ve büzülme kaybı

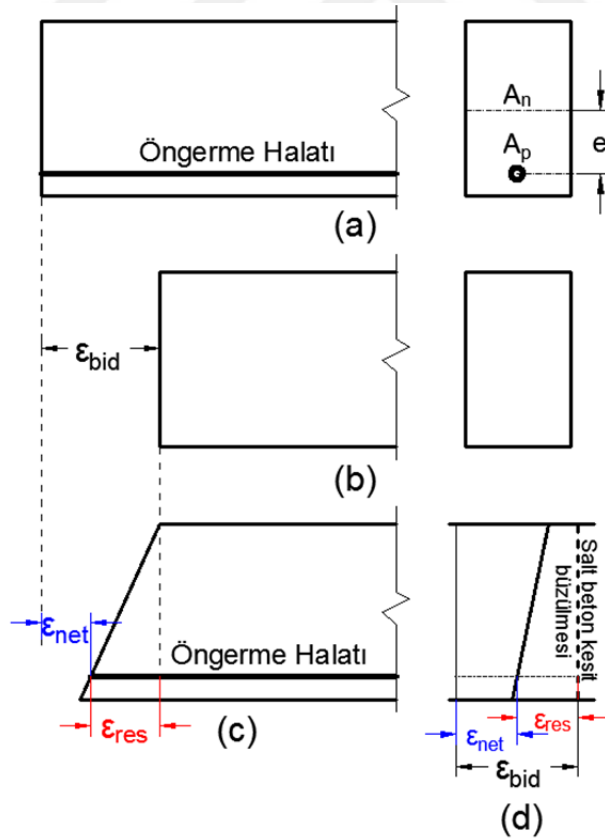
Öngerme çeliği ve betonda rötreden meydana gelen şekildeğiştirme uyumluluk şartı aşağıdaki gibidir:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_c \quad (4.74)$$

Burada,

$\Delta \varepsilon_p$: Öngerme çeliğinde betonun büzülme kısılmasından dolayı meydana gelen birim şekildeğiştirme

$\Delta \varepsilon_c$: Öngerme çeliği ağırlık merkezi seviyesinde betonda büzülmeden dolayı meydana gelen birim kısılma



Şekil 4.10 : Büzülme kaybına esas kesitte meydana gelen şekildeğiştirmeler.

Şekil 4.10'den görüleceği üzere rötreden meydana gelen birim kısalmayı tahmin etmek için salt beton kesiti ve öngerilmeli beton kesiti kullanılmıştır. Salt beton kesitinde rötreden dolayı oluşan birim kısalma ε_{bid} terimi ile ifade edilmiştir. Öngerilmeli beton kesitinde öngerme çeliği rötreden dolayı kısalmadığı için rötreye kısalmasına direnç göstermektedir. Öngerilme çeliği ağırlık merkezi seviyesinde direnç miktarı ε_{res} , ve net beton birim kısalması ε_{net} terimleri ile ifade edilmiştir. Birim şekildiğiştirmelerin uyumluluk şartı gereği salt beton kesitinde meydana gelen birim kısalma öngerilme çeliğinin direnci ve net beton birim kısalması toplamı gibi düşünülmektedir:

$$\varepsilon_{net} = \varepsilon_{bid} - \varepsilon_{res} \quad (4.75)$$

$$\varepsilon_{bid} = \varepsilon_{res} + \varepsilon_{net} \quad (4.76)$$

Öngerilme çeliği ağırlık merkezi seviyesinde net beton birim kısalması aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\varepsilon_{net} = \frac{\Delta P_p}{A_p E_p} \quad (4.77)$$

Burada,

ΔP_p : Öngerme çeliğinde betonun rötreye kısalmasından dolayı meydana gelen kuvvet değişimi

$$\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} = \frac{\Delta P_p}{A_g} + \frac{\Delta P_p e p g^2}{I_g} \quad (4.78)$$

$$\Delta P_p = \frac{\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} A_g}{1 + \frac{A_g e p g^2}{I_g}} = \frac{\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} A_g}{\alpha_n} \quad (4.79)$$

$$\Delta P_p = \frac{\varepsilon_{res} E_c A_g}{\alpha_n \{1 + 0.7 [\psi(t, t_i)]\}} \quad (4.80)$$

$$\varepsilon_{res} = \frac{\Delta P_p \alpha_n \{1 + 0.7 [\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.81)$$

Büzülme kısalması ifadesi birim kısaltmaların toplamı şeklinde aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\varepsilon_{bid} = \varepsilon_{net} + \varepsilon_{res} = \frac{\Delta P_p}{A_p E_p} + \frac{\Delta P_p \alpha_n \{1 + 0.7 [\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.82)$$

$$\varepsilon_{bid} E_p = \frac{\Delta P_p}{A_p} + \frac{E_p \Delta P_p \alpha_n \{1 + 0.7 [\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.83)$$

$$\varepsilon_{bid} E_p = \frac{\Delta P_p}{A_p} \left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c} \right) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\} \right] \quad (4.84)$$

Rötreden dolayı öngerme çeliğinde meydana gelen öngerilme kaybı aşağıdaki gibi hesaplanacaktır:

$$\Delta f_{pSR} = \frac{\Delta P_p}{A_p} = \frac{\varepsilon_{bid} E_p}{\left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c} \right) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\} \right]} \quad (4.85)$$

$$\Delta f_{pSR} = \frac{\Delta P_p}{A_p} = \frac{\varepsilon_{bid} E_p}{\left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c} \right) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \left(1 + \frac{A_g e_p g^2}{I_g} \right) \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\} \right]} = \varepsilon_{bid} E_p K_{id} \quad (4.86)$$

$$K_{id} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c} \right) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \left(1 + \frac{A_g e_p g^2}{I_g} \right) \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\} \right]} \quad (4.87)$$

4.5.2.2 Sünme kaybı

Sünme kaybı için dikkate alınan birim kısaltmalarının toplamı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{res} + \varepsilon_{net} \quad (4.88)$$

$$\varepsilon_{net} = \frac{P_p}{A_p E_p} \quad (4.89)$$

$$\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} = \frac{P_p}{A_g} + \frac{P_p e_p g^2}{I_g} \quad (4.90)$$

$$P_p = \frac{\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} A_g}{1 + \frac{A_g e_p g^2}{I_g}} = \frac{\varepsilon_{res} E_{c,AAEM} A_g}{\alpha_n} \quad (4.91)$$

$$E_{c,AAEM} = \frac{E_c}{1 + \chi[\psi(t, t_i)]} \approx \frac{E_c}{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]} \quad (4.92)$$

$$P_p = \frac{\varepsilon_{res} E_c A_g}{\alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}} \quad (4.93)$$

$$\varepsilon_{res} = \frac{P_p \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.94)$$

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{net} + \varepsilon_{res} = \frac{P_p}{A_p E_p} + \frac{P_p \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.95)$$

$$\varepsilon_{cr} E_p = \frac{P_p}{A_p} + \frac{E_p P_p \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}}{E_c A_g} \quad (4.96)$$

$$\varepsilon_{cr} E_p = \frac{P_p}{A_p} \left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c} \right) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\} \right] \quad (4.97)$$

$$\Delta f_{pCR} = \frac{P_p}{A_p} = \frac{\varepsilon_{cr} E_p}{\left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c}\right) \left(\frac{A_p}{A_g}\right) \alpha_n \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}\right]} \quad (4.98)$$

$$\Delta f_{pCR} = \frac{P_p}{A_p} = \frac{\varepsilon_{cr} E_p}{\left[1 + \left(\frac{E_p}{E_c}\right) \left(\frac{A_p}{A_g}\right) \left(1 + \frac{A_g e p g^2}{I_g}\right) \{1 + 0.7[\psi(t, t_i)]\}\right]} = \varepsilon_{cr} E_p K_{id} \quad (4.99)$$

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{ci} \psi(t, t_i) = \frac{f_{cgp}}{E_{ci}} \psi(t, t_i) \quad (4.100)$$

$$\Delta f_{pCR} = \varepsilon_{cr} E_p K_{id} = \frac{f_{cgp}}{E_{ci}} \psi(t, t_i) E_p K_{id} \quad (4.101)$$

$$\Delta f_{pCR} = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \psi(t, t_i) K_{id} \quad (4.102)$$

4.5.2.3 Hesaplarda dikkate alınacak hacim/yüzey oranları

Yapım aşaması-1 olarak tanımlanan ve Dilim-1'in yerinde dökülerek ve sonrasında ardgerme uygulama sonucu meydana gelen geçici sistem Şekil 4.11'de verilmiştir.

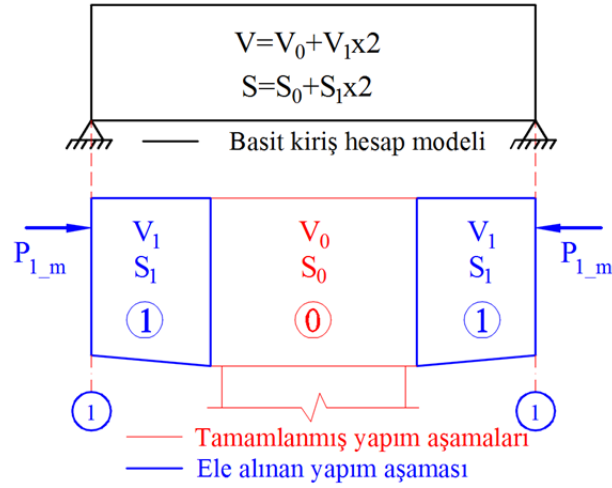
$$V_0 = 277.976 m^3$$

$$S_0 = 386.623 m^2$$

$$V_1 = 88.628 m^3$$

$$S_1 = 143.93 m^2$$

Herhangi bir dilime yapım aşamasında uygulanacak öngerme halatları o dilimden ve o dilime kadar dökülmüş dilimlerden geçerek kolona göre simetrisi olan dilimin ucuna kadar devam ettirilecektir. Beton sünmesi ve büzülmesinden kaynaklanan öngerilme kayıplarının hesabında ilgili halatın bir ankraj ucundan diğer ankraj ucuna kadar olan bölgede kalan tüm dilimler dikkate alınacaktır. Meydana gelen geçici sistem için hesap modeli uzunluğu bir ankraj ucundan diğer ankraj ucuna kadar olan mesafede ele alınacak eşdeğer basit kiriştir.



Şekil 4.11 : 1 nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.

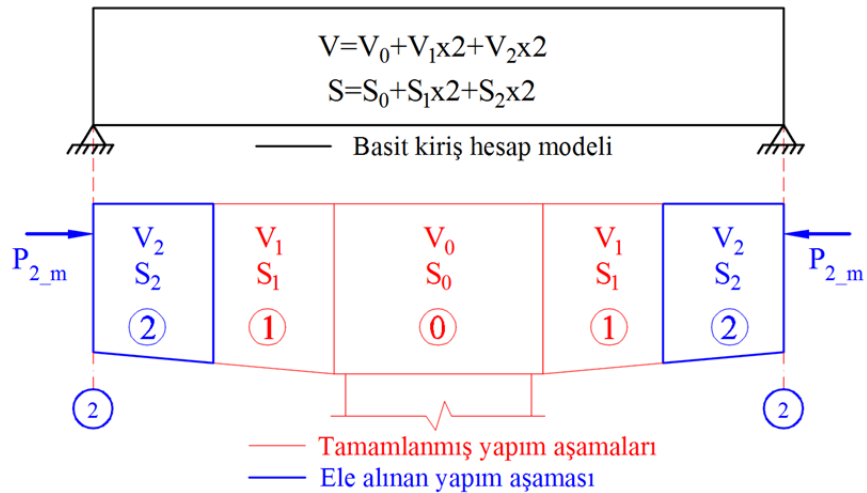
Öngerilme kayıplarının hesaplarında Böl.4.5 anlatıldığı üzere eleman hacminin yüzey hacmine oranı ele alınacaktır. Şek. Görüldüğü üzere Halat-1 için dikkate alınacak hacmin ve yüzey alanlarının toplamı ve Yapım Aşaması-1 için hesaplarda ele alınacak hacim/yüzey oranı aşağıdaki gibidir:

$$V = V_0 + 2 \times V_1 = 277.976 + 2 \times 88.628 = 455.232m^3$$

$$S = S_0 + 2 \times S_1 = 386.623 + 2 \times 143.93 = 674.484m^2$$

$$V/S = 455.232/674.484 = 0.675m = 675mm$$

Diğer yapım aşamaları için de hacim ve yüzey alan hesabında izlenecek yol yukarıda anlatıldığı gibidir. Yapım aşaması-2 sonucu meydana gelen basit kiriş hesap modeli Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : 1 nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.

Yukarıda verilen oranla hesap sonucu bulunan sünme ve büzülme öngerilme kayıpları halatın tamamında meydana gelecektir. Fakat halatın sadece belli bir bölümünü kapsayan ilgili dilimin öngerilmeli kesit hesabında dikkate alınacak öngerilme kaybı ele alınan dilimin hacim/yüzey oranı ile orantılı şekilde ele alınacaktır. Dilim-1'in kesit hesaplarında dikkate alınacak öngerilme kaybı oranı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$(Oran)_1 = \frac{(V/S)_1}{(V/S)_1 \times 2 + (V/S)_0} = \frac{0.616}{0.616 \times 2 + 0.719} = 0.316$$

Tüm diğer yapım aşamaları için bulunacak öngerilme kayıplarının hesabında ele alınacak hacim/yüzey oranları ve ilgili dilim kesit hesaplarında dikkate alınacak öngerilme kayıp oranları yukarıda gösterilen şekilde hesaplamak.

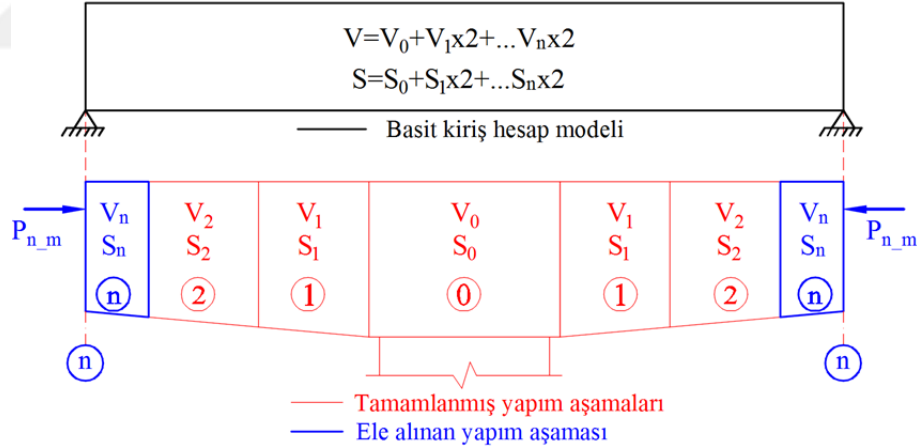
Dilimlere ait hacim ve yüzey alanları, hacim/yüzey oranları, ve yapım alamalarında sünmeden ve büzülmeden meydana gelen öngerilme kayıplarının ilgili dilimler için yüzdelik olarak oranları Çiz.4.8'de listelenmiştir. Geriye kalan dilimler için öngerilme kayıp payları yüzdelik olarak aynı hesap yaklaşımı izlenerek elde edilir.

Çizelge 4.8 : Dilimlerin kümülatif hacim/yüzey oranları ve kayıp yüzdeleri.

Dilimler	Hacim (V) _i (m ³)	Yüzey Alan (S) _i (m ²)	Oran (V/S) _i (m)	Kümülatif Or. Σ(V/S) _i (m)	Kayıp pay %
Dilim-0	277.98	386.62	0.719	0.719	100
Dilim-1	88.63	143.93	0.616	1.951	31.57
Dilim-2	71.95	141.87	0.507	2.965	17.10
Dilim-3	69.85	139.89	0.499	3.963	12.59
Dilim-4	78.89	160.78	0.491	4.945	9.93
Dilim-5	76.17	158.33	0.481	5.907	8.14
Dilim-6	73.55	156.04	0.471	6.850	6.88
Dilim-7	78.74	175.67	0.448	7.746	5.78
Dilim-8	73.49	173.01	0.425	8.596	4.94
Dilim-9	88.08	212.83	0.414	9.423	4.39
Dilim-10	84.17	209.37	0.402	10.227	3.93
Dilim-11	80.63	206.30	0.391	11.009	3.55
Dilim-12	77.48	203.60	0.381	11.770	3.24
Dilim-13	74.74	201.29	0.371	12.513	2.96
Dilim-14	72.44	199.37	0.363	13.239	2.74
Dilim-15	70.58	197.83	0.357	13.953	2.56
Dilim-16	69.16	196.68	0.352	14.656	2.40
Dilim-17	68.22	195.91	0.348	15.352	2.27
Dilim-18	67.75	195.53	0.346	16.045	2.16

Yukarıda anlatılan her bir dilim için zamana bağlı büzülme ve sünme etkilerinin hesap yöntemi işlem kolaylığı sağlamak ve yaklaşık mertebede kayıp hesaplamak amacıyla izlenebilir. Bu şekilde uygulanan hesap yönteminde ilgili dilim için sadece kayıp pay cinsinden işlem yapılmaktadır ve hesaplarda beton yaşı dikkate alınmamaktadır. Zaman adımı hesap yöntemini doğru uygulamak için ilgili yapım aşamasında ardgerme tekniği uygulanan halatın ilgili kesitlerde meydana gelen bileşenleri cinsinden işlem yaparak kesitlerin gün cinsinden yaşını dikkate almak mümkün olacaktır.

Şekillerde gösterilmiş kuvvet kesite uygulanan ardgerme kuvvet bileşenini ifade etmektedir. Birinci alt indis hesap yapılan ilgili kesitin numarasını ve ana halat ardgerme kuvvetinin bileşenini, ikinci alt indis ise ilgili yapım aşaması sonucu uygulanan ana halatın numarasını belirtmektedir. Şekil 4.13’de verilen tüm kesit ve ardgerme kuvvet bileşenleri için kayıp hesabına esas basit kiriş hesap modeli verilmiştir. Böylece her bir kesit ve ardgerme kuvveti bileşenlerinin hacim/yüzey oranı için o kesit ile köprü ortaayak eksenine göre simetrisinde bulunan kesit sınırları içinde kalan dilimler dikkate alınacaktır.



Şekil 4.13 : n nolu kesite etkiyen ardgerme kuvveti bileşeni hacim/yüzey oranı.

Öngerilme kayıplarının hesabına esas basit kiriş hesap modeliyle ele alınacak yapım aşamalarına göre kümülatif hacim ve yüzey alanları, ayrıca hacim/yüzey oranları aşağıda Çiz.4.9’de verilmiştir. Yukarıda anlatıldığı üzere birinci alt indisle ifade edilen kesitlere etkiyen ardgerme kuvvet bileşenleri için çizelgede verilen hacim/yüzey oranları kullanılacaktır.

Çizelge 4.9 : Kesitlerin öngerilme kayıpları hesabında dikkate alınacak hacim/yüzey oranları.

Dilimler/ Yapım Aşaması	Hacim (V) _i (m ³)	Yüzey Alanı (S) _i (m ²)	Kümülatif Hacim $\sum(V)_i$ (m ³)	Kümülatif Yüzey Alanı $\sum(S)_i$ (m ²)	(V) _i /(S) _i (m)
Dilim-0/YA-0	277.98	386.62	277.98	386.62	0.719
Dilim-1/YA-1	88.63	143.93	455.23	674.48	0.675
Dilim-2/YA-2	71.95	141.87	599.13	958.22	0.625
Dilim-3/YA-3	69.85	139.89	738.82	1237.99	0.597
Dilim-4/YA-4	78.89	160.78	896.60	1559.56	0.575
Dilim-5/YA-5	76.17	158.33	1048.94	1876.22	0.559
Dilim-6/YA-6	73.55	156.04	1196.04	2188.31	0.547
Dilim-7/YA-7	78.74	175.67	1353.51	2539.64	0.533
Dilim-8/YA-8	73.49	173.01	1500.48	2885.66	0.520
Dilim-9/YA-9	88.08	212.83	1676.65	3311.33	0.506
Dilim-10/YA-10	84.17	209.37	1844.99	3730.07	0.495
Dilim-11/YA-11	80.63	206.30	2006.24	4142.67	0.484
Dilim-12/YA-12	77.48	203.60	2161.20	4549.87	0.475
Dilim-13/YA-13	74.74	201.29	2310.67	4952.46	0.467
Dilim-14/YA-14	72.44	199.37	2455.54	5351.2	0.459
Dilim-15/YA-15	70.58	197.83	2596.71	5746.86	0.452
Dilim-16/YA-16	69.16	196.68	2735.03	6140.22	0.445
Dilim-17/YA-17	68.22	195.91	2871.47	6532.05	0.440
Dilim-18/YA-18	67.75	195.53	3006.97	6923.1	0.434

4.5.2.4 Öngerme çeliğinin gevşemesi kaybı

Yüksek mukavemetli öngerme çeliğinin zamanla oluşan gevşemesi kaybı

$$\Delta f_{pR1} = \frac{f_{pt}}{K_L} \left(\frac{f_{pt}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (4.103)$$

Burada,

f_{pt} : Öngerme kuvvetinin aktarılmasından hemen sonra öngerme çeliğinde meydana gelen gerilme

f_{py} : Öngerme çeliğinin akma dayanımı

K_L : Düşük gevşemeli 7 telli öngerme çeliği için değer, 30'a eşit alınmaktadır.

Çeliğin gevşemesi kaybı betonun zamanla gelişen büzülme ve sünmesi de dikkate alınırsa aşağıda verilen 4.104 eşitliği ile hesaplanır:

$$\Delta f_{pR1} = \left[\frac{f_{pt}}{K'_L} \frac{\log(24t_i)}{\log(24t_i)} \left(\frac{f_{pt}}{f_{pt}} - 0.55 \right) \right] \left[1 - \frac{3(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})}{f_{pt}} \right] K_{id} \quad (4.104)$$

Burada,

t : Öngerme çeliğinin gevşeme kaybı hesabında ele alınan gün cinsinden beton yaşı

t_i : İlk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşı

Δf_{pSR} : Büzülme kaybı

Δf_{pCR} : Sünme kaybı

K_{id} : Dönüştürme katsayısı

Eşitlikteki büzülme ve sünme kaybının ayrıntılı hesap sonucu çıkan değerleri kullanmak yerine yönetmelik tarafından öngörülen zamana bağlı büzülme ve sünme etki faktörü 4.105 eşitliği ile verilen değer kullanılabilir.

$$\left[1 - \frac{3(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR})}{f_{pt}} \right] = 0.67 \quad (4.105)$$

Zaman adımlı hesap yöntemi ile büzülme ve sünmeden dolayı kayıplar ayrıntılı olarak hesaplandığından yönetmelik tarafından öndörülen yaklaşık değer yerine hesaplanmış kayıp değerleri ile işlem yapılacaktır.

Dönüştürme katsayısı için ise yaklaşık olarak 4.106 eşitliği ile verilen ve AASHTO LRFD şartnamesi tarafından öngörülen değer dikkate alınabilir.

$$K_{id} = 0.8 \quad (4.106)$$

Yönetmelik tarafından kullanılması tavsiye edilen 0.8 değeri yerine sünme kaybı hesaplarında elde edilen dönüştürme katsayısı değeri öngerme çeliğinin gevşemesi kaybı hesabında kullanılacaktır.



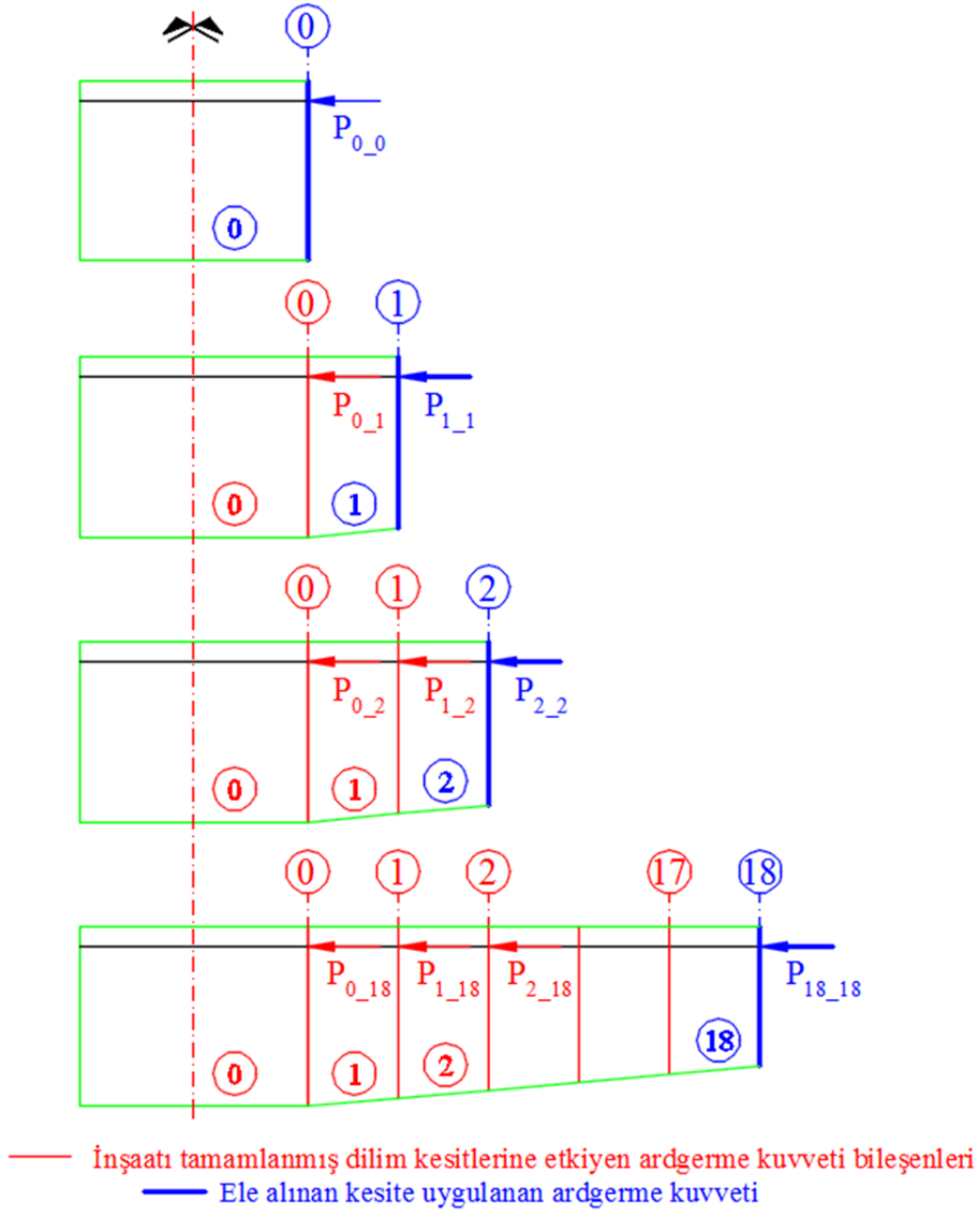
5. YAPIM AŞAMALARINA GÖRE KÖPRÜ ÜSTYAPISININ ANALİZİ

5.1 Artımsal Zaman Adımı Yöntemi

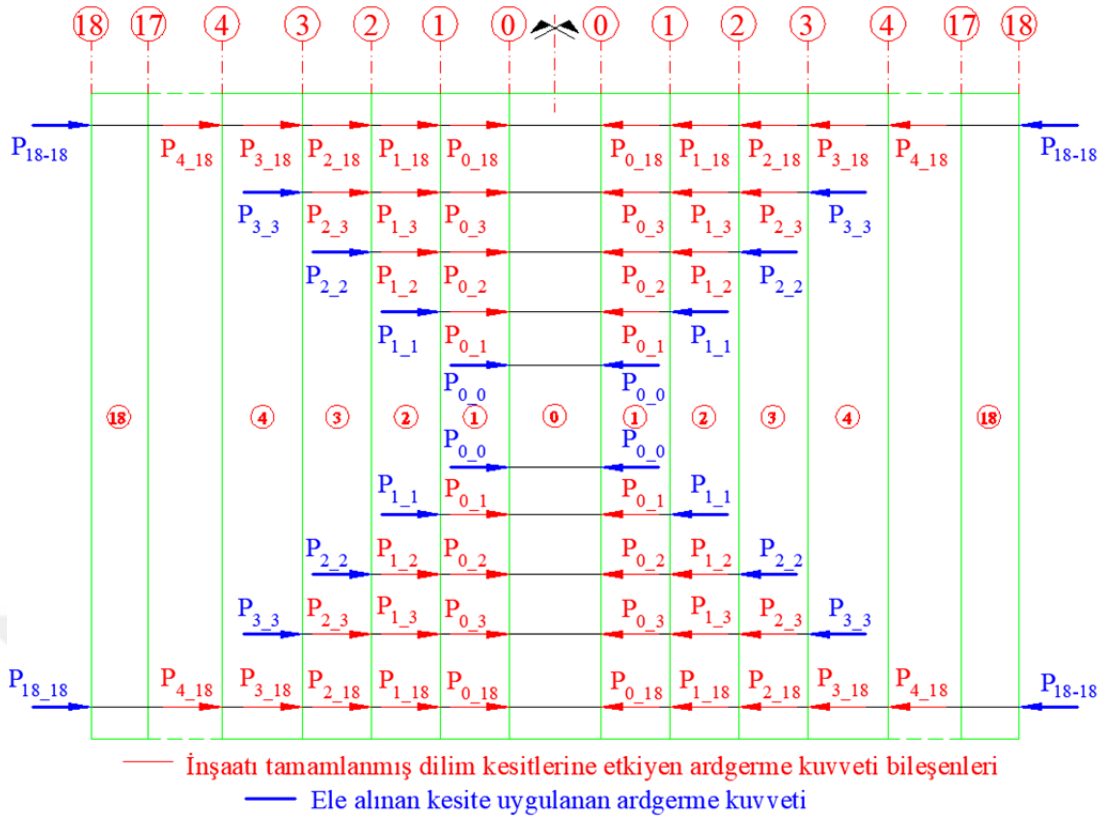
Dilimsel dengeli konsol yapım yöntemi ile inşa edilen köprü üstyapısı farklı geometriye ve ardgerme kuvveti uygulama anında farklı gün cinsinden beton yaşına sahip olduğundan dilimler zamana bağlı etkiler altında basit açıklıklı kirişlere göre farklı davranış göstermektedir. Kesit yükseklikleri büyük ve dilim boyları yüksek olduğundan kesitlerde meydana gelen gerilme değişimleri özel hesap gerektirmektedir. Her bir yapım aşamasının süresine ve dilimlere ardgerme kuvvetinin uygulama anındaki beton yaşına bağlı olarak kesitlere etkileyen ardgerme kuvveti bileşenleri için zamana bağlı meydana gelen kayıplar ayrı-ayrı hesaplanmaktadır. Ayrıca bu yöntem kesitlerde her bir zaman adımıyla meydana gelen eğrilik ve buna bağlı hesaplanan düşey yerdeğiştirme için çok büyük önem arz etmektedir. Yapım süreleri ve köprü açıklığı yeterli sayıda parçalara bölünmek üzere köprünün döküm esnasında geometri kontrolü gerekli hassasiyetle takip edilebilir. Yürütülen tez kapsamında 7 günlük yapım süreleri zaman adımı olarak, dilim boyları ise büyük açıklığa sahip köprünün bölünmesi hedeflenen parça boyları olarak ele alınacaktır.

Zamana bağlı öngerilme kayıplarının hesabı ve betonda meydana gelen etkiler köprü servis ömrünün sonundaki süreye göre hesaplanarak dikkate alınırsa çok doğru sonuçlar elde etmek mümkün olmayacaktır. Bu yüzden her bir dikkate alınan zaman dilimi sonunda zamana bağlı etkilere bağlı olarak elde edilen öngerme kuvveti bir sonraki zaman dilimi için başlangıç değeri olarak alınacaktır. Böylece her bir kesit için çok sayıda ardgerme kuvveti bileşeni bulunduğundan artımsal zaman adımı yöntemini kullanmak amaca uygun olacaktır. Bu hesap yöntemi özel köprülerin inşaat aşamalarına göre analizini yapan bilgisayar programlarının temeli oluşturmaktadır.

Farklı yapım aşamalarının sonunda dilimlere uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri tabliye profili ve planı üzerindeki dağılımı sırasıyla Şekil 5.1 ve 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.1 : Farklı yapım aşamaları sonunda uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri-tabliye profil görüntüsü.



Şekil 5.2 : Farklı yapım aşamaları sonunda uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri-tabliye plan görüntüsü.

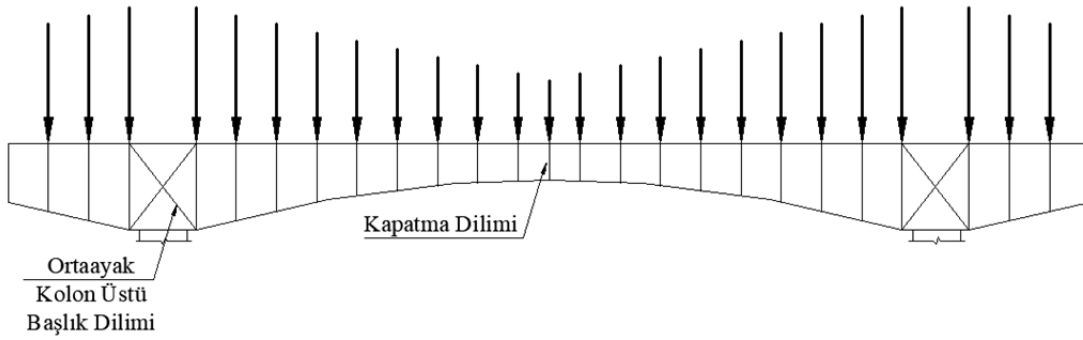
Şekil 5.1 ve 5.2'den de görüleceği üzere her bir yapım aşaması sonunda kesitlere etkiyen ardgerme kuvvet bileşen sayısı giderek artmaktadır ve beton yaşı ve ilerleyen yapım sürelerine ve zamana bağlı olarak her biri kendi içinde değişim göstermektedir. Kuvvet ifadesindeki ilk alt indis ilgili kesiti, ikinci alt indis ise ele alınan kesite montajı yapılan ana halatı, dolayısıyla ele alınan kesite uygulanan ardgerme kuvvet bileşenini belirlemektedir.

5.2 Kesit Tesirleri

5.2.1 Dilimlerin kendi ağırlığından dolayı meydana gelen momentler

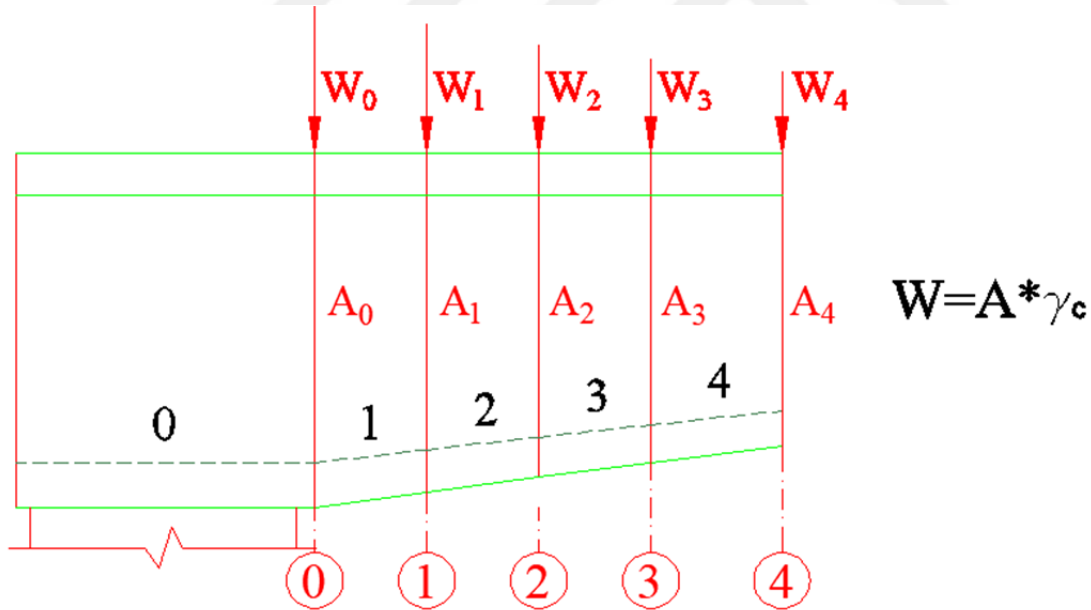
Her bir dilim boyuna yönde farklı geometriye sahip olduğundan başlangıç ve bitiş kesitleri farklı özelliklere sahiptir. Dilimlerin üzerinde ölü yük dağılımı trapez yayılı yük olacağından başlangıç ve bitiş kesitleri dikkate alınacaktır. Daha önce ön boyutlandırma aşamasında köprü üstyapısı boykesiti geometrik olarak parabolik değişime sahip olduğu yaklaşımı ile hesap yapılmıştır. Geliştirilen parabolik bağıntı yardımıyla açıklık ortasından itibaren mesafeye bağlı olarak her hangi bir kesitte meydana gelen eğilme momenti değeri bulunabilir. Bu bölümde ayrıntılı köprü

üstyapısı analizi yapılacağından dolayı dilimler ayrı-ayrı dikkate alınmıştır. Köprü üstyapısı üzerinde ölü yük dağılımı Şekil 5.8'deki gibidir.



Şekil 5.3 : Köprü üstyapısı dilimlerin ölü yük dağılımı.

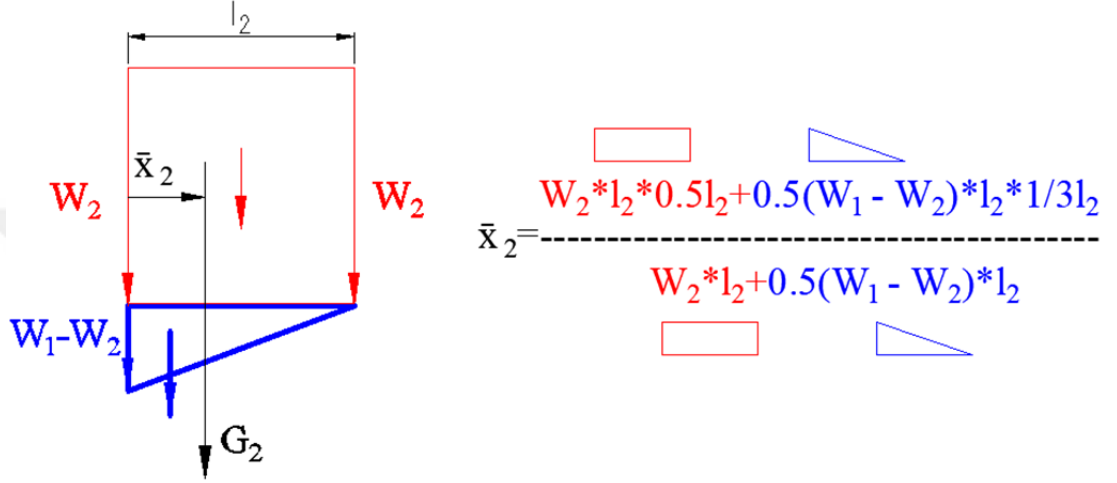
Şekil 5.3'den de görüleceği üzere her bir dilimin başlangıç ve bitiş enkesit alanlarına bağlı olarak köprü üstyapısı üzerinde dilimlerin ölü yük dağılımı parabolik değildir. Üstyapı için ayrıntılı analiz hesap sonucu bulunan eğilme momenti değerleri parabolik yaklaşımla bulunan değerlerden daha küçük olacaktır. Her bir dilimin enkesit alanına bağlı olarak birim yükler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



Şekil 5.4 : Dilim enkesit alanına bağlı olarak ölü yük hesabı.

Şekil 5.4'den de görüleceği üzere, ayrıntılı analiz durumunda her bir dilim için enkesit alanı değerine bağlı olarak ölü yük hesabı yapılacaktır. Burada W kN/m cinsinden enkesit ağırlığını, A enkesit alanını ve γ_c ise kN/m³ cinsinden beton birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Dilim ağırlık hesaplarında $\gamma_c = 25\text{kN/m}^3$ olarak hesaplarda ele alınacaktır.

İlerleyen yapım aşamalarında her bir dilim ağırlığından dolayı kesitlerde meydana gelen eğilme momenti değerinin hesabı için dilim ağırlık değerlerine ve dilim boyuna yönde ağırlık merkezinin yerine ihtiyaç duyulmaktadır. Başlangıç ve bitiş enkesit alanlarına bağlı birim kuvvetleri her bir dilim için trapez yük dağılımı gibi düşünülmekte olup, ağırlık merkezi yük dağılımında aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Şekil 5.5’de hesap örneği verilmek üzere 2 numaralı dilim ele alınmıştır.

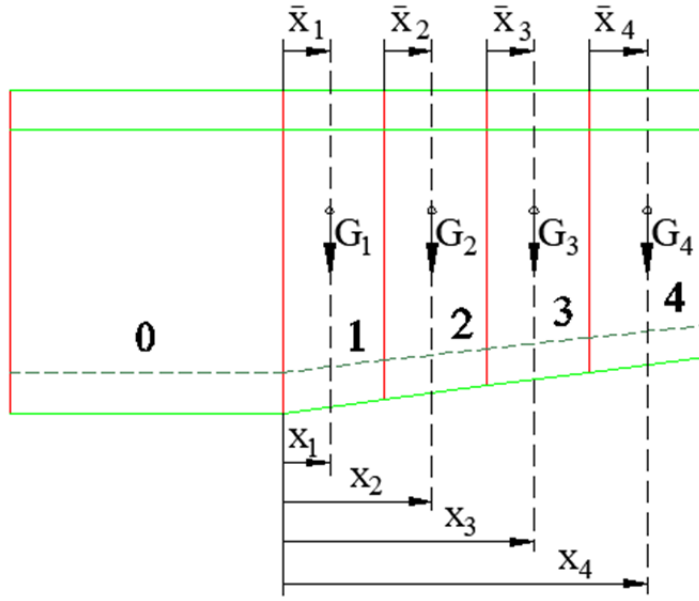


Şekil 5.5 : Dilim başlangıç ve bitiş enkesit alanına bağlı ağırlık merkezi yeri hesap örneği.

Burada G_2 , 2 numaralı dilimin kN cinsinden ağırlığını göstermektedir. Dilim hacimleri V_n belli olduğundan dolayı her bir dilimin ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$G_n = V_n \gamma_c \quad (5.1)$$

Şekil 4.18’den görüleceği üzere her bir dilimin ağırlık merkezinin yeri dilim başlangıç enkesitine olan mesafe şeklinde hesaplanmaktadır. Bu değer yanısıra köprü boyuna yönünde dilim boyları dikkate alınarak her bir dilim ağırlık merkezinin yeri analizi yapılan kesite göre moment kolu hesaplanması gerekmektedir. Hesap için gerekli parametreler şematik olarak boykesit üzerinde ilk 4 dilim için Şekil 5.6’de gösterilmiştir:



Şekil 5.6 : Dilim başlangıç ve bitil enkesit alanına bağlı ağırlık merkezi yeri hesap örneği.

Burada,

$\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$: ilgili dilimin ağırlık merkezinin başlangıç enkesitine göre moment kolu,

$x_1, x_2, \dots, x_n$: ilgili dilimin ağırlık merkezinin ele alınan kesite göre moment kolu,

$G_1, G_2, \dots, G_n$: ilgili dilimin kN cinsinden ağırlığı.

Dilim başlangıç enkesitlerinde dilim ölü yükünden dolayı meydana gelen negatif konsol momentleri aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır:

$$M_{n-1} = G_n \bar{x}_n \quad (5.2)$$

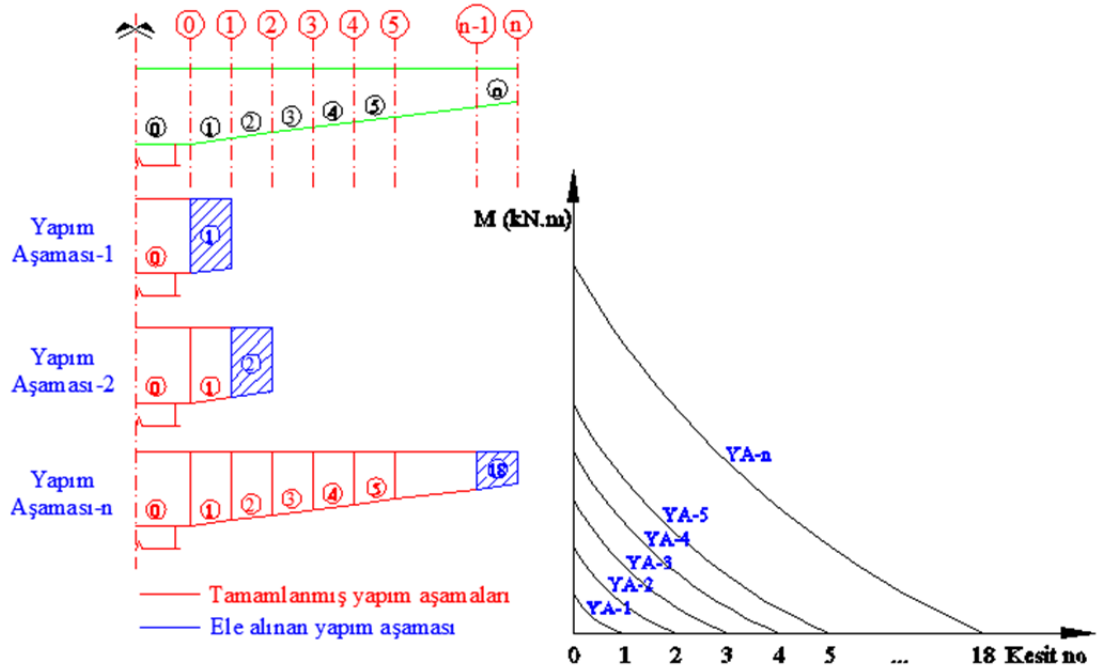
Herhangi bir kesitte ilerleyen yapım aşamalarında dökümü tamamlanan dilim ölü yükünden dolayı meydana gelen konsol momentleri aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır:

$$M_{mn} = G_n x_{nm} \quad (5.3)$$

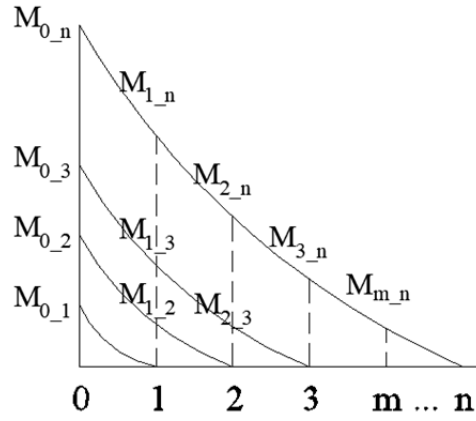
Böylece, köprü üstyapısı için kapatma dilimi dökülmeden önceki dengeli konsol durumunda ayrıntılı ölü yük analizi rahatlıkla yapılabilmektedir. Yukarıda anlatılan hesap yaklaşımları doğrultusunda ilerleyen yapım aşamasına göre ilgili dilimlerin kesitlerinde kendinden sonra beton dökümü tamamlanan dilimlerden dolayı meydana gelen eğilme momenti hesabı yapılacaktır. Dilim ağırlık değeri ve ağırlık merkezlerinin başlangıç enkesitlerine göre yerleri Çiz.5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Dilim ağırlık değerleri ve ağırlık merkezlerinin başlangıç enkesitine mesafesi.

Dilimler	Ağırlık (kN)	Ağırlık Merkezinin Yeri (m)
Dilim-0	-	-
Dilim-1	2215.7	1.412
Dilim-2	1798.7	1.493
Dilim-3	1746.2	1.493
Dilim-4	1972.2	1.740
Dilim-5	1904.2	1.740
Dilim-6	1838.8	1.740
Dilim-7	1968.4	1.967
Dilim-8	1837.2	1.987
Dilim-9	2202.1	2.481
Dilim-10	2104.3	2.481
Dilim-11	2015.6	2.483
Dilim-12	1937.0	2.484
Dilim-13	1868.4	2.486
Dilim-14	1810.9	2.488
Dilim-15	1764.6	2.490
Dilim-16	1729.1	2.493
Dilim-17	1705.5	2.496
Dilim-18	1693.7	2.498



Şekil 5.7 : İlerleyen yapım aşamalarında dilim ölü yüklerinden dolayı meydana gelen moment diyagramı.



Şekil 5.8 : Kesitlerde ilerleyen yapım aşamalarında meydana gelen negatif konsol moment ifadeleri.

Şekil 5.7 ve 5.8’den de görüleceği üzere tüm kesitlerde meydana gelen eğilme moment artışları dengeli konsol durumu için dilim ölü yüklerinden meydana gelen gerilme değişimleri hesabında dikkate alınacaktır. Bu şekilde yapılan hesap sonucu her bir dilimin ardgerme tekniği uygulandıktan sonra kesitlerde oluşan izdüşüm ardgerme bileşeni ilgili dilim ağırlığından meydana gelen moment artışını karşılaması beklenmektedir.

Çizelge 5.2 : 0 numaralı kesitte meydana gelen negatif mesnet moment değerleri.

Dilimler	M_{0_n} (kNm)	P_{0_n} (kNm)
Dilim-0	—	—
Dilim-1	3128.4	P_{0_1}
Dilim-2	8081.0	P_{0_2}
Dilim-3	13083.2	P_{0_3}
Dilim-4	21181.0	P_{0_4}
Dilim-5	27115.7	P_{0_5}
Dilim-6	32620.2	P_{0_6}
Dilim-7	42256.3	P_{0_7}
Dilim-8	46824.1	P_{0_8}
Dilim-9	66019.5	P_{0_9}
Dilim-10	73611.8	$P_{0_{10}}$
Dilim-11	80590.2	$P_{0_{11}}$
Dilim-12	87134.2	$P_{0_{12}}$
Dilim-13	93392.3	$P_{0_{13}}$
Dilim-14	99576.7	$P_{0_{14}}$
Dilim-15	105856.6	$P_{0_{15}}$
Dilim-16	112376.6	$P_{0_{16}}$
Dilim-17	119377.8	$P_{0_{17}}$
Dilim-18	127023.9	$P_{0_{18}}$

Dilim ağırlıklarından dolayı tüm kesitlerde meydana gelen eğilme momenti değerleri EK A'de verilmiştir. Kapatma ağırlığından meydana gelen moment 53081.7 kNm olmak üzere “0” numaralı kesitte tüm negatif konsol momentlerinin toplamı 1212331.2 kNm'ye eşittir. Bu değer ön boyutlandırma hesaplarında parabolik değişim yaklaşımı ile yapılan hesap sonucu 1313971.4 kNm olarak bulunmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere değerler birbirilerine oldukça yakındır, ve parabolik boykesit değişimi yaklaşımı ön boyutlandırma aşamasında güvenli mertebede sonuç vermektedir. Ayrıca kalıp arabasının ağırlığından ve hareketli yapım yüklerinden dolayı meydana gelen eğilme momenti değerleri sırasıyla EK B ve EK C'de verilmektedir.

5.3 Kesitlerde Meydana Gelen Gerilme Tahkikleri

Bu bölümde her bir yapım aşaması esnasında ve sonunda ölü yüklerden meydana gelen moment artışları, bir sonraki yapım aşaması için kalıp arabasının ilerlemesi ve yapım hareketli yüklerinin artması dikkate alınarak her bir kesitte oluşan gerilme değişimleri incelenecektir. Köprü dengeli konsol yapım aşaması durumu için Şekil 5.9-5.46'de kesitlerde meydana gelen gerilme değişimleri kesit üst ve alt lifler için verilmiştir. Bu değerler servis durumunda soğuk derzlerde donatı bağlantısı olması durumunda izin verilen gerilme sınırları ile kontrol edilecektir. Bununla beraber kesitlerin doğrusal elastik davranış sergilediklerini göstermek amacıyla kesitlerde meydana gelen basınç gerilmeleri ilgili yönetmelik tarafından belirlenen basınç gerilmesi sınırı ile kontrol edilecektir.

İzin verilen çekme gerilmesi sınırı AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından aşağıdaki şekilde belirlenecektir:

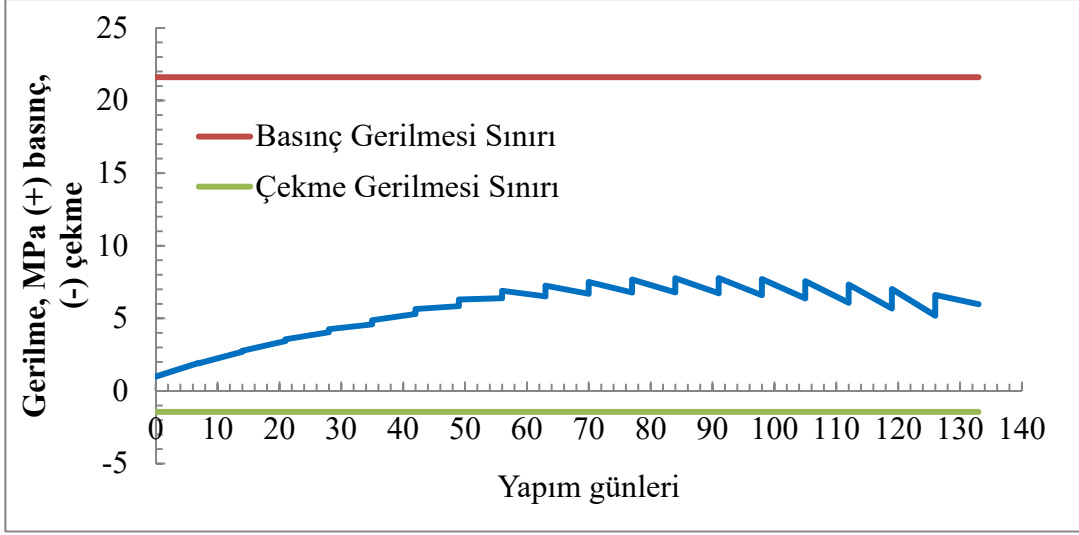
$$\sigma_{\text{çekme}} < 0.24\sqrt{f_{ci}} = 0.24\sqrt{36} = 1.44 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

İzin verilen basınç gerilmesi sınırı AASHTO LRFD yönetmeliği tarafından aşağıdaki şekilde belirlenecektir:

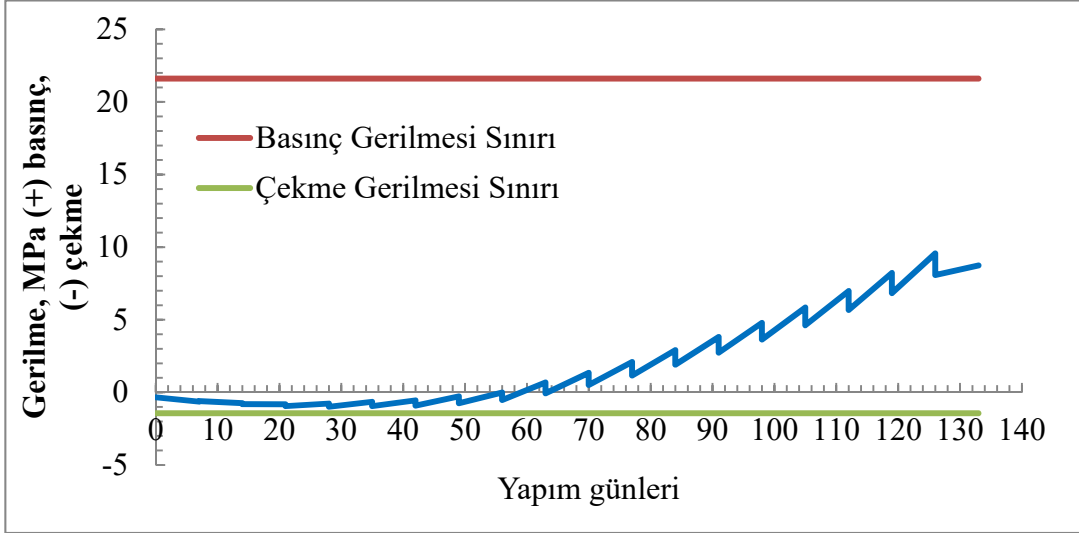
$$\sigma_{\text{basınç}} < 0.6f_{ci} = 0.6 \times 36 = 21.6 \text{ MPa} \quad (5.5)$$

Burada,

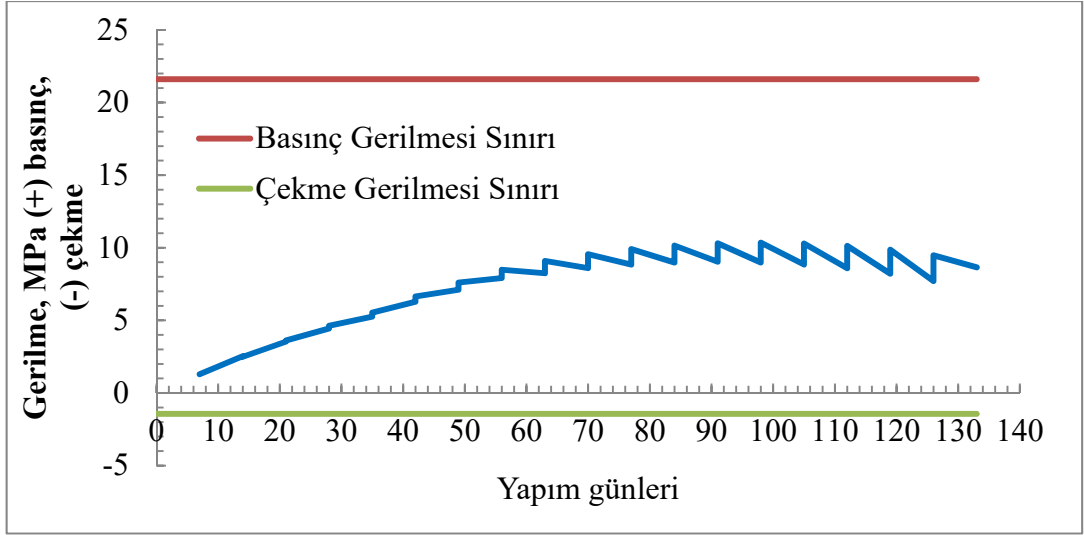
f_{ci} : Ardgerme kuvveti uygulanması sırasında beton basınç dayanımı, $0.8 \times 45 = 36 \text{ MPa}$



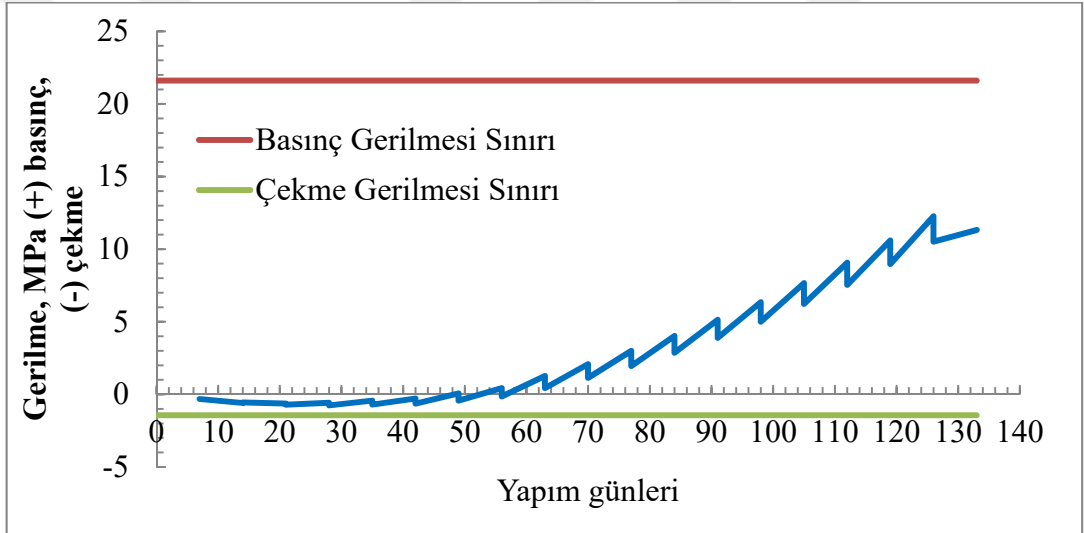
Şekil 5.9 : 0.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



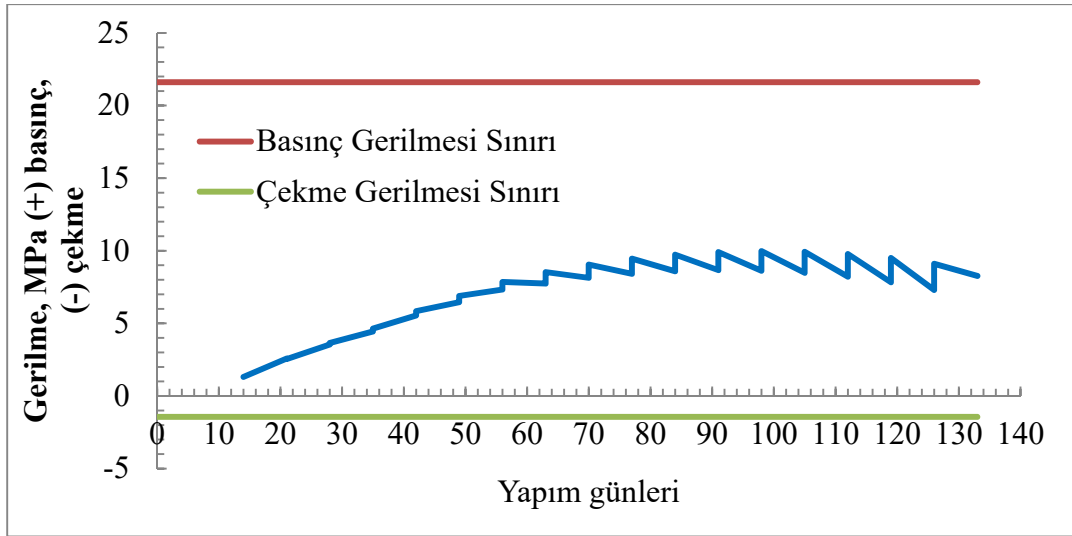
Şekil 5.10 : 0.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



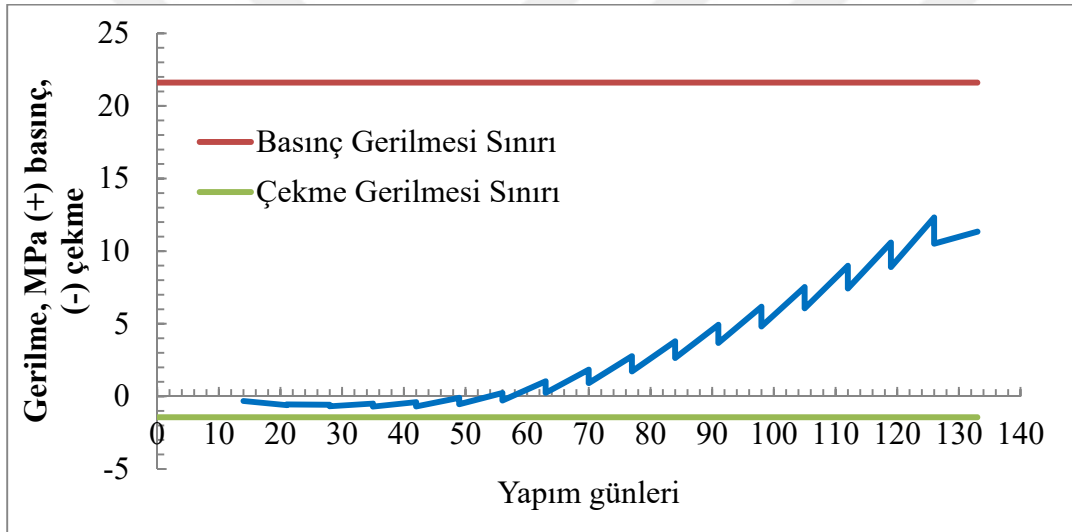
Şekil 5.11 : 1.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



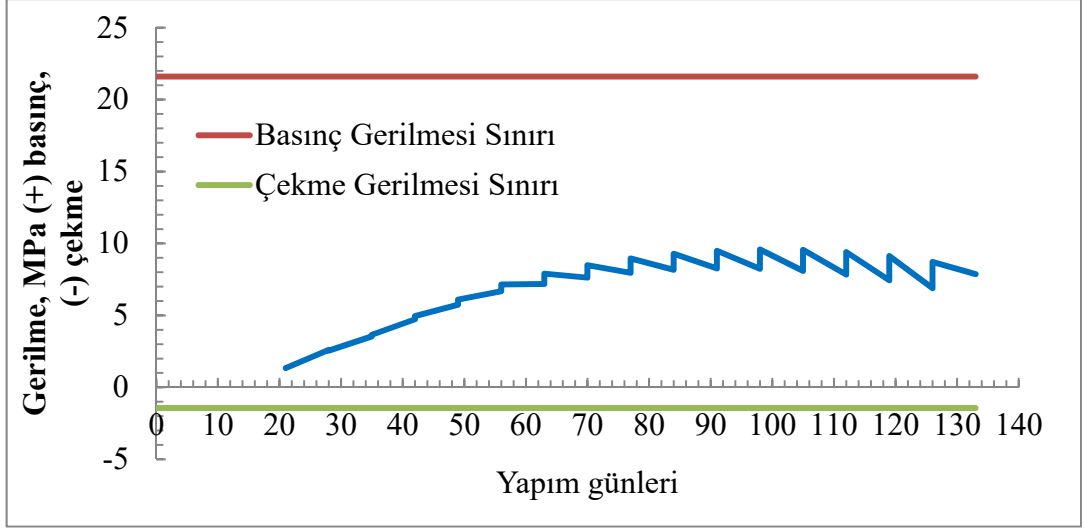
Şekil 5.12 : 1.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



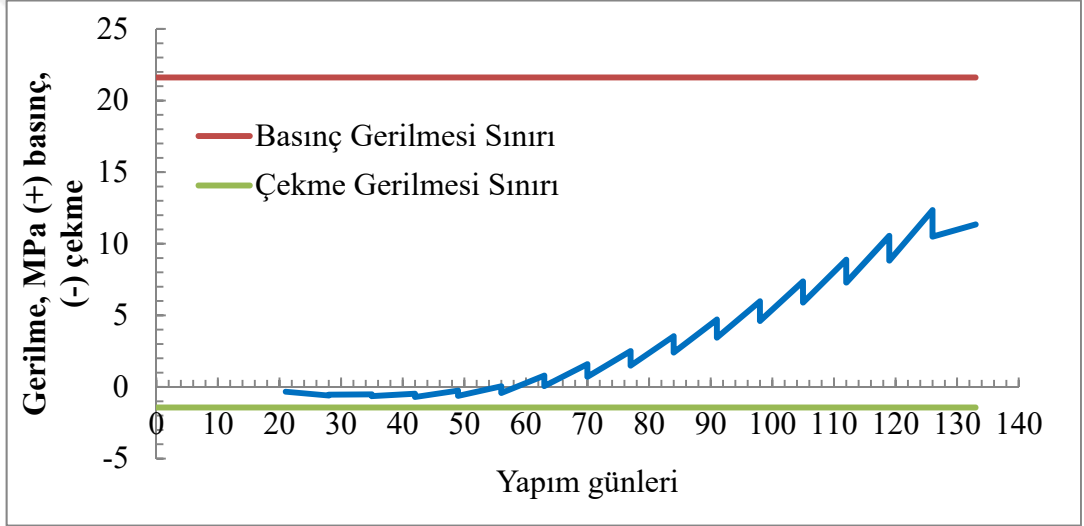
Şekil 5.13 : 2.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



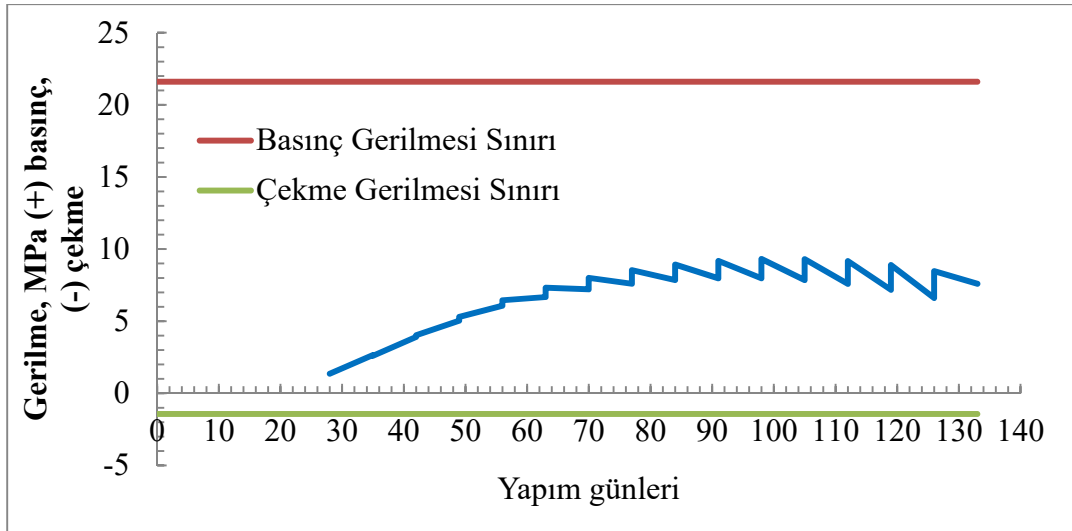
Şekil 5.14 : 2.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



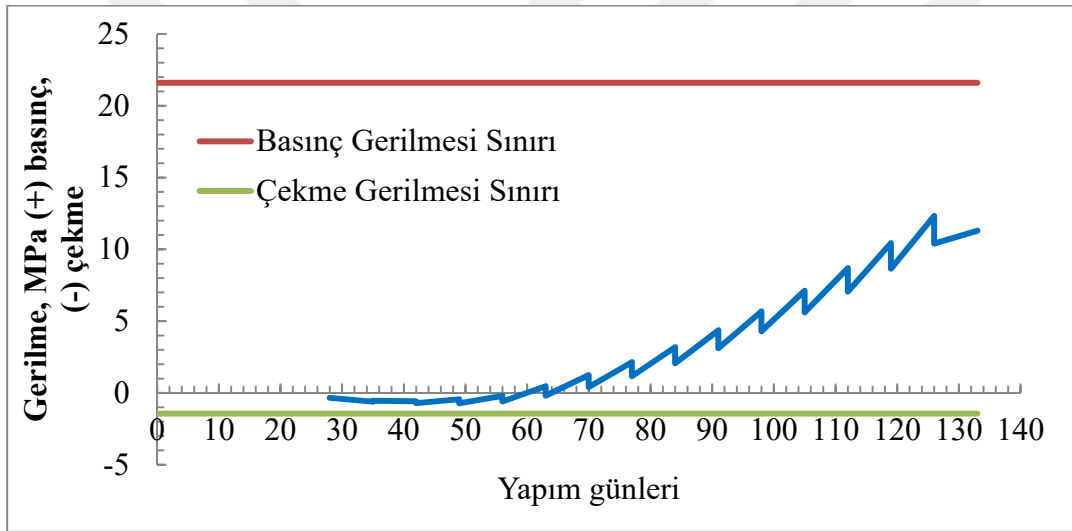
Şekil 5.15 : 3.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



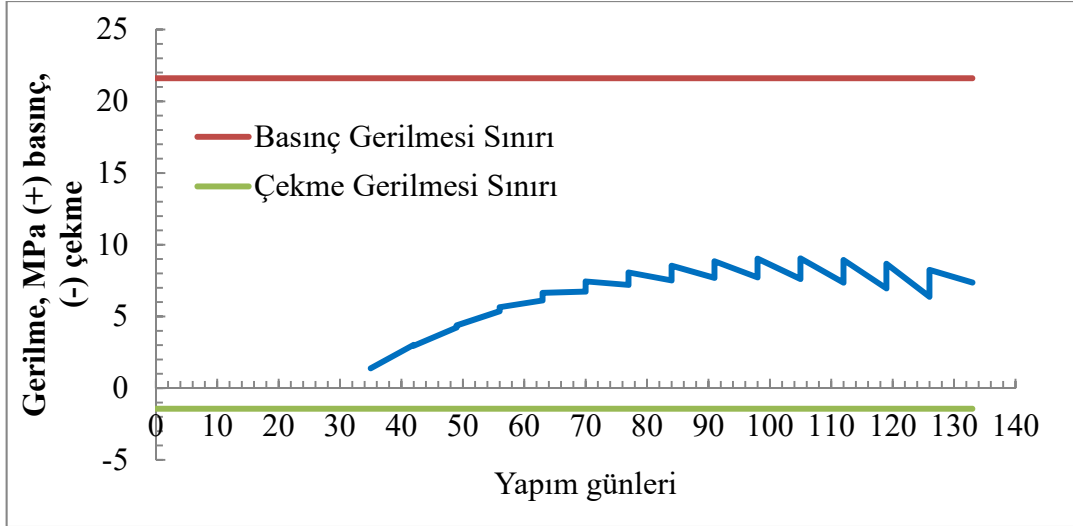
Şekil 5.16 : 3.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



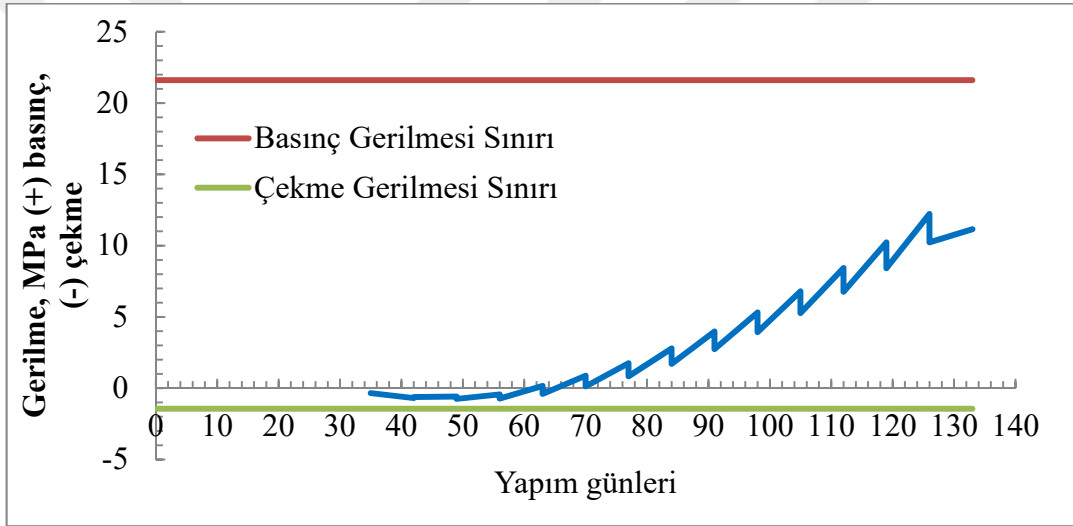
Şekil 5.17 : 4.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



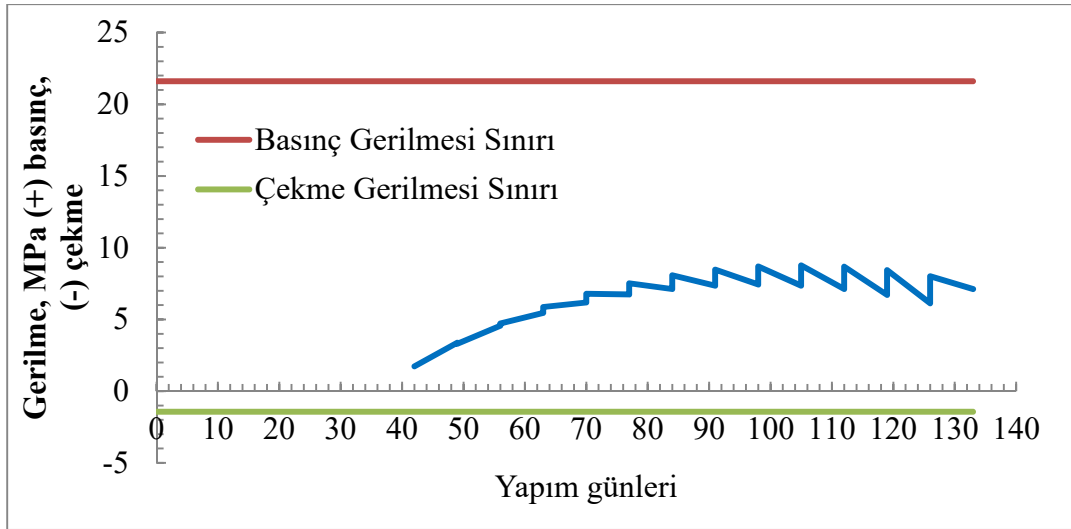
Şekil 5.18 : 4.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



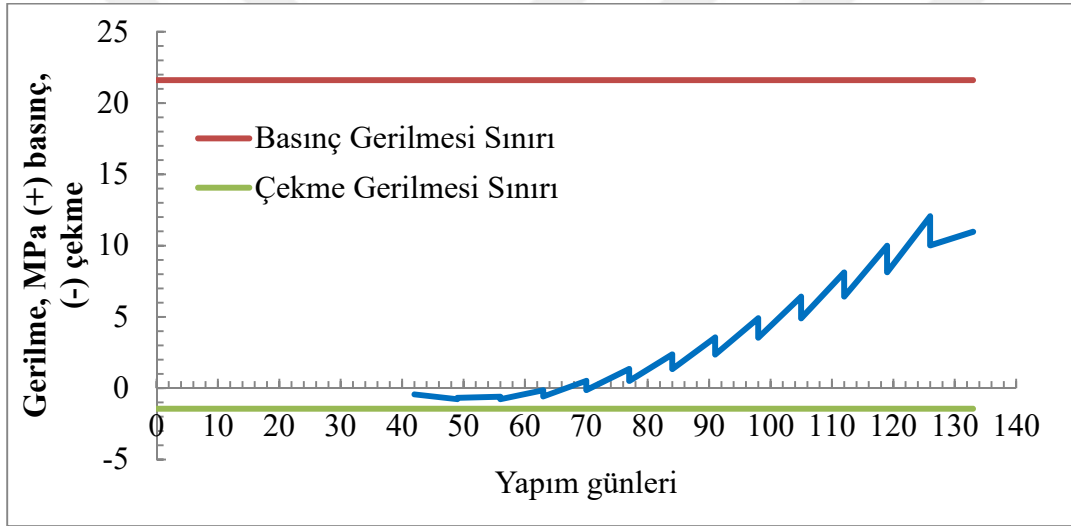
Şekil 5.19 : 5.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



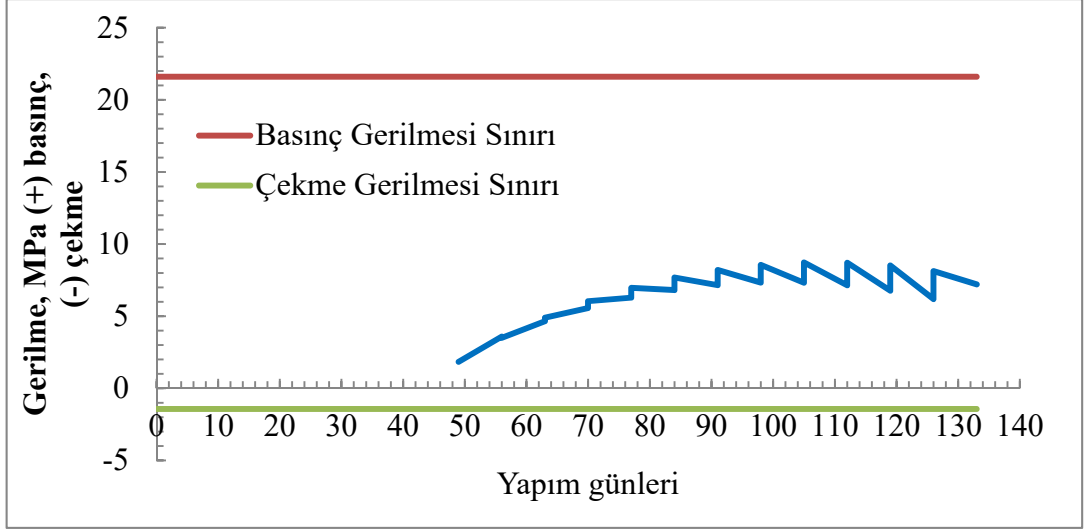
Şekil 5.20 : 5.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



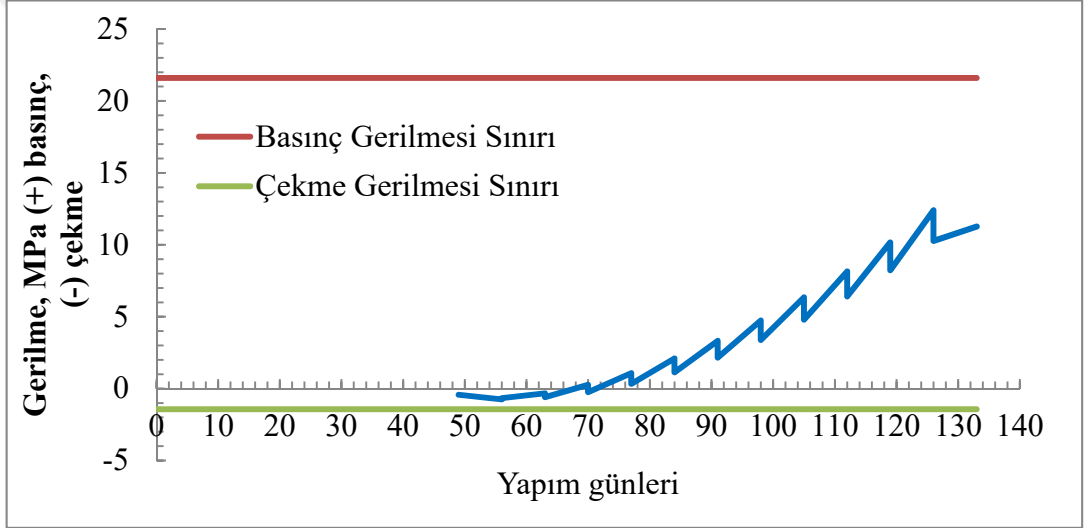
Şekil 5.21 : 6.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



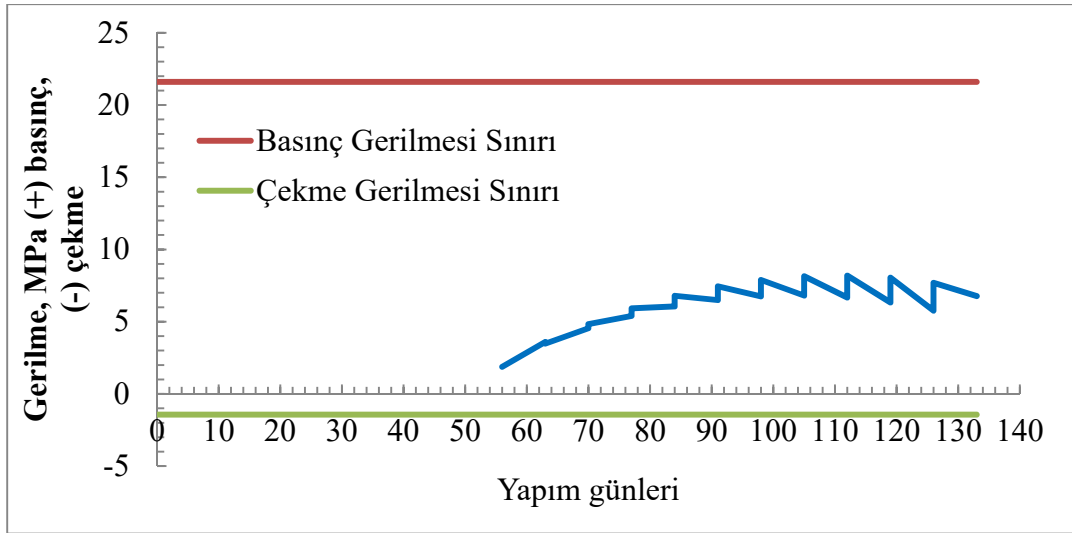
Şekil 5.22 : 6.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



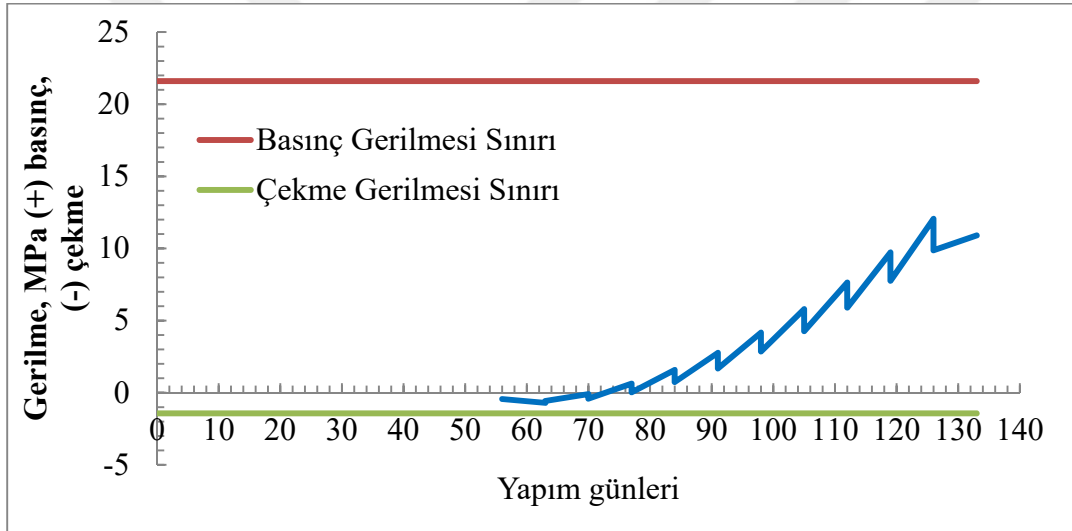
Şekil 5.23 : 7.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



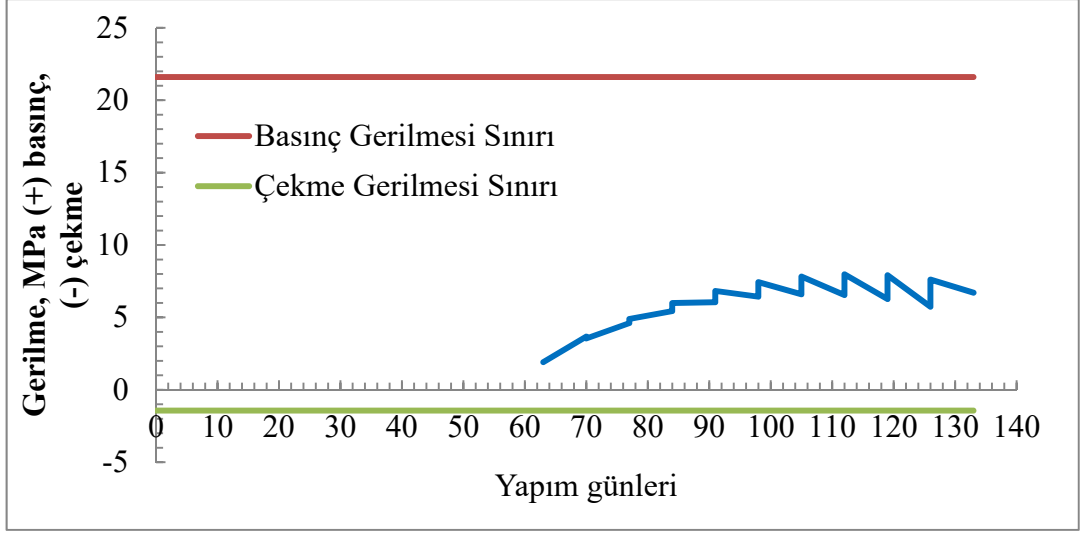
Şekil 5.24 : 7.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



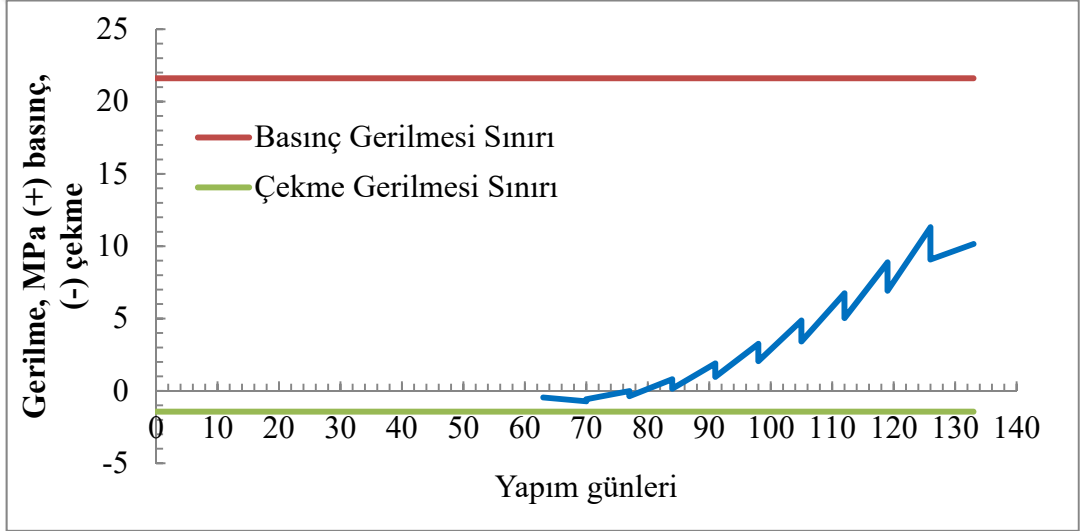
Şekil 5.25 : 8.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



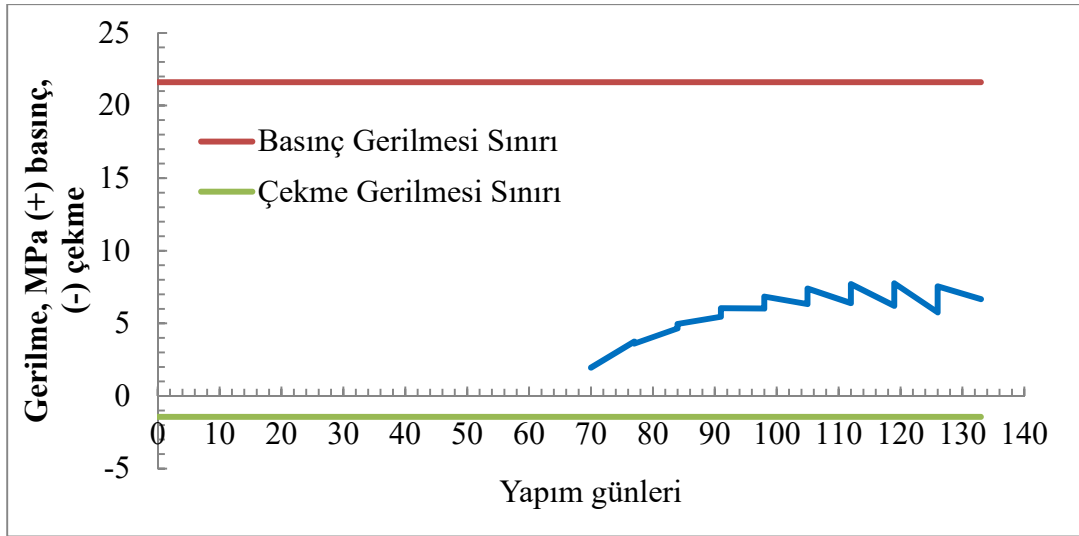
Şekil 5.26 : 8.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



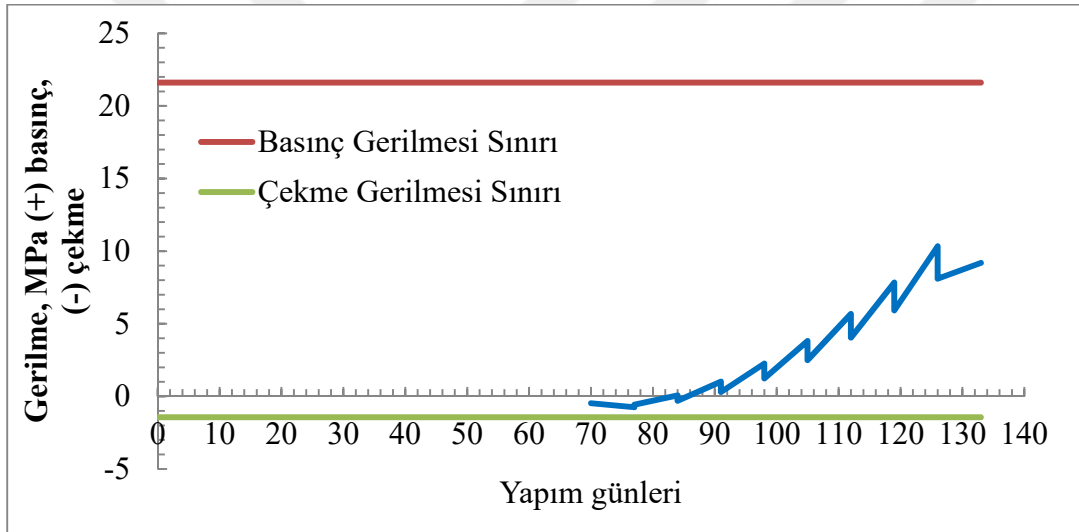
Şekil 5.27 : 9.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



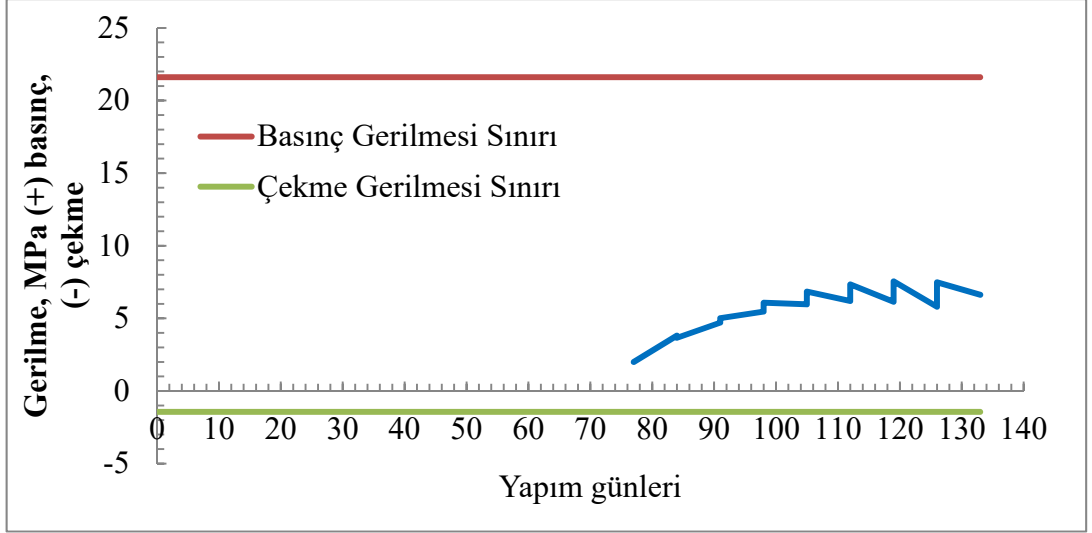
Şekil 5.28 : 9.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



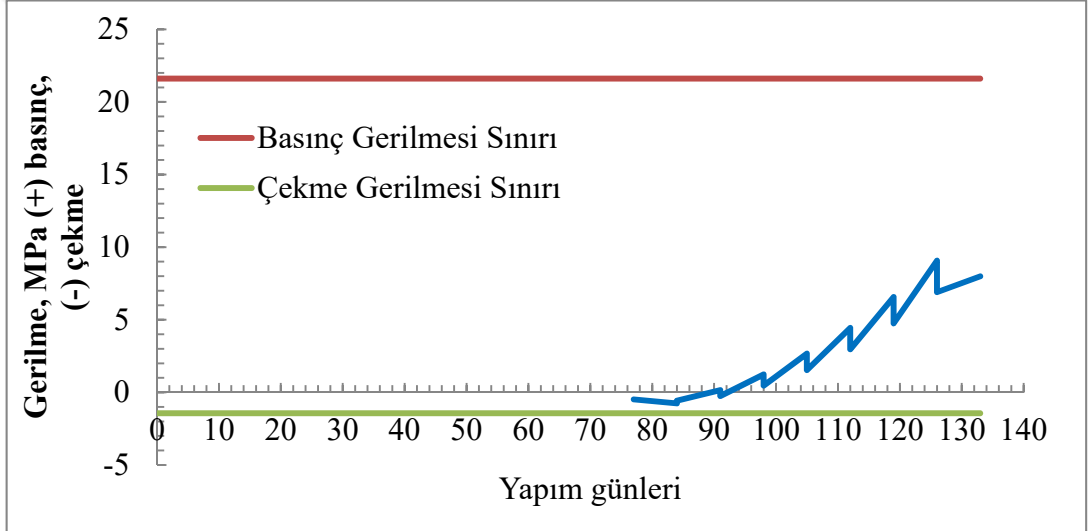
Şekil 5.29 : 10.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



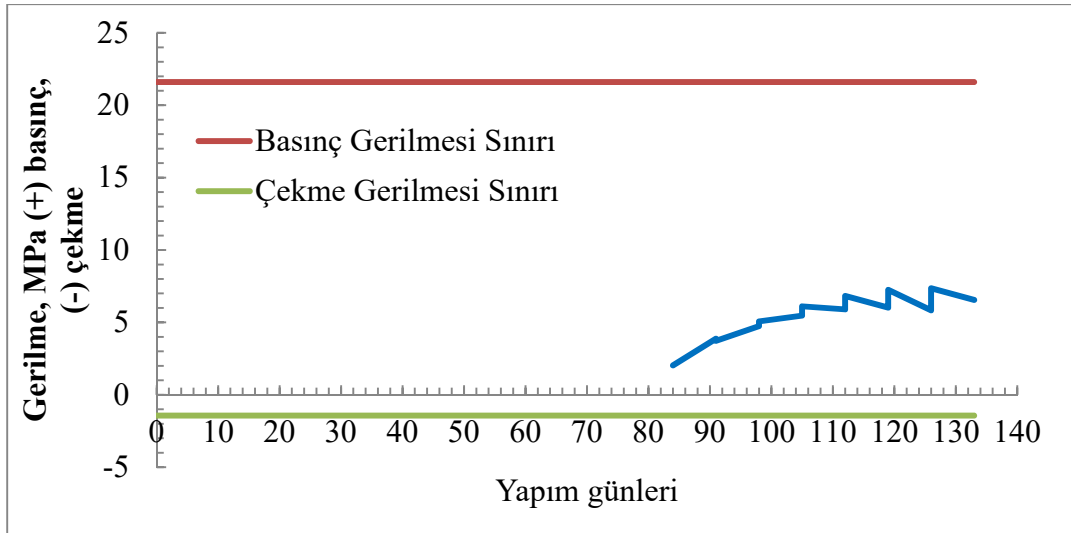
Şekil 5.30 : 10.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



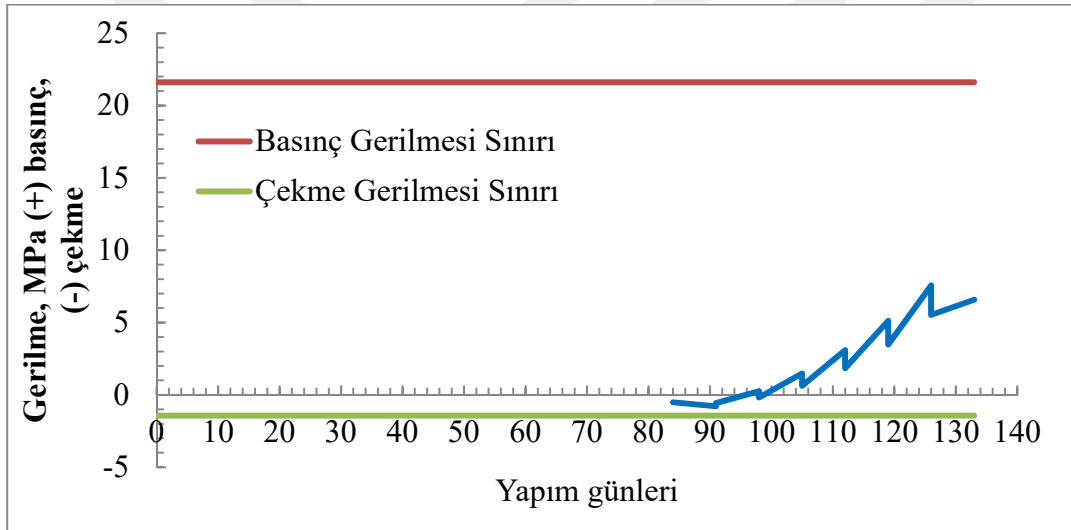
Şekil 5.31 : 11.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



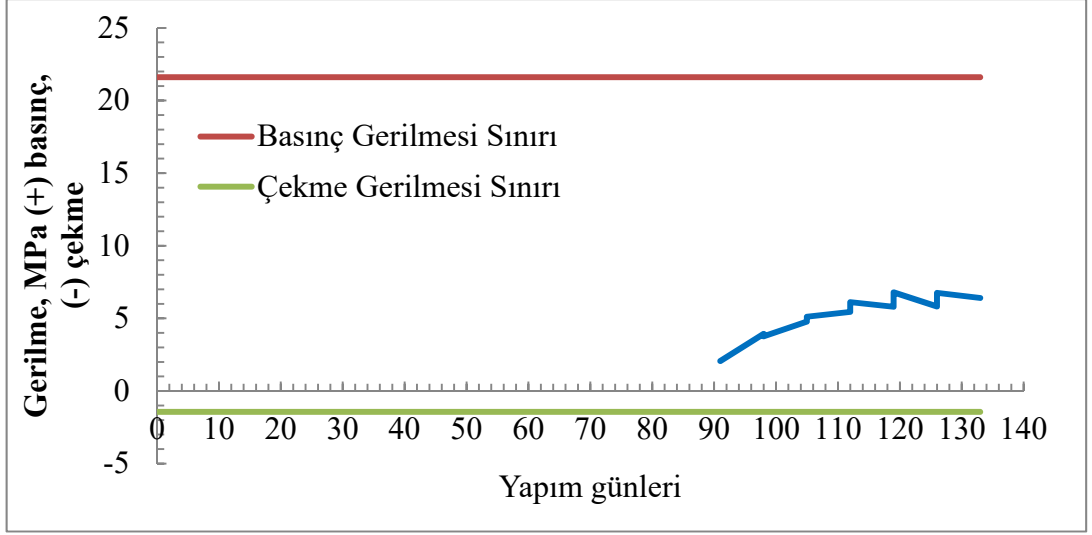
Şekil 5.32 : 11.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



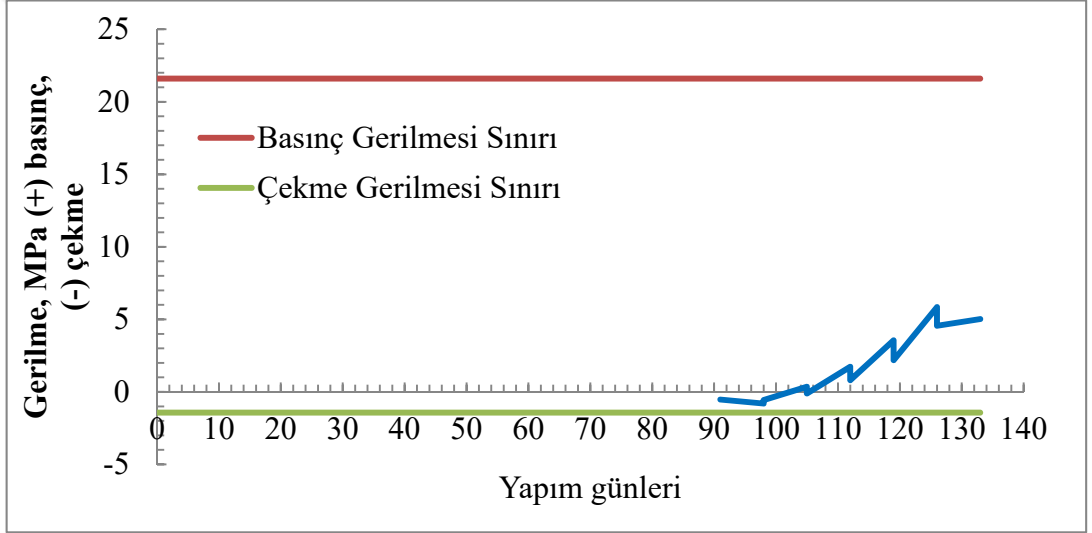
Şekil 5.33 : 12.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



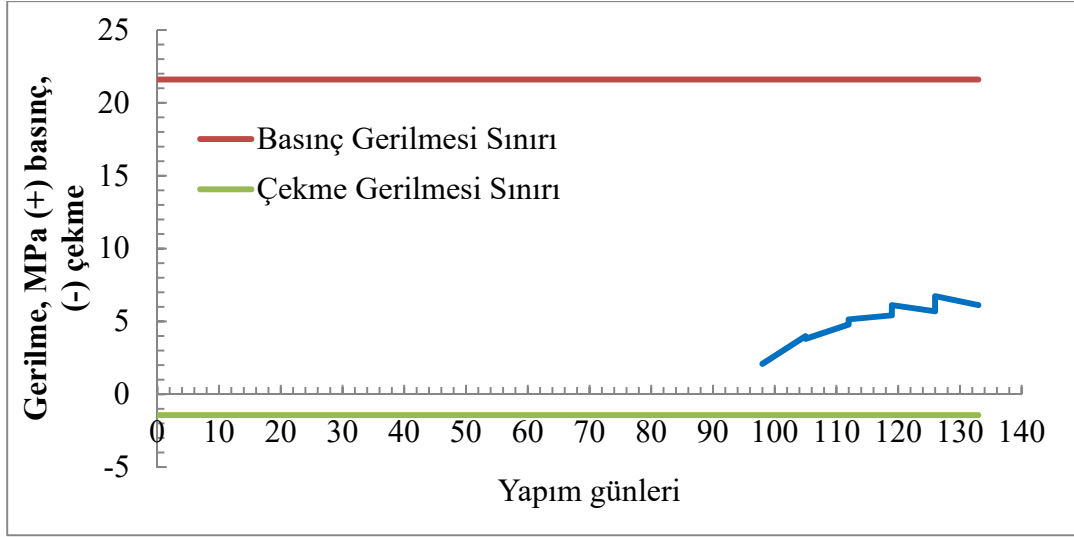
Şekil 5.34 : 12.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



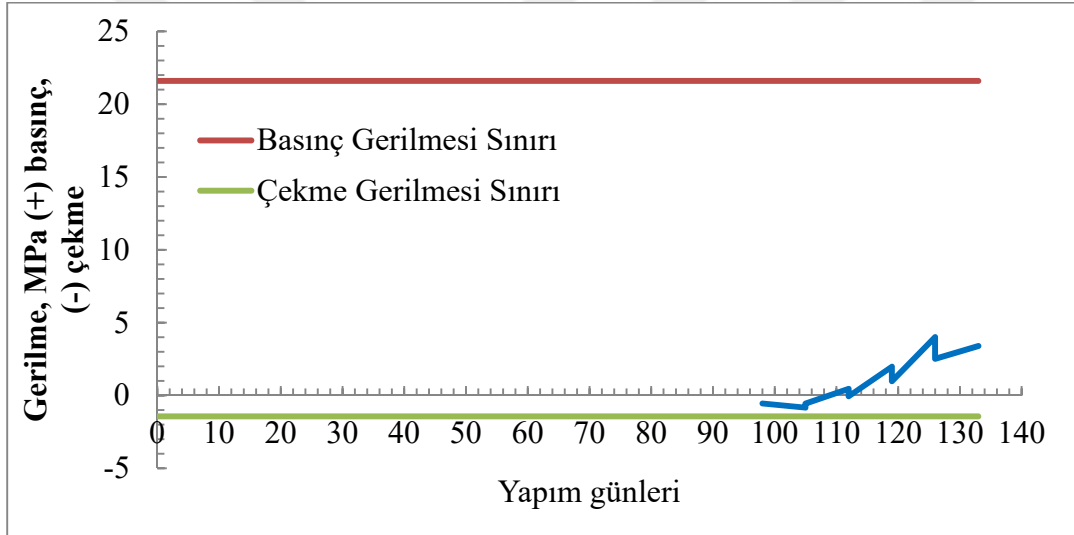
Şekil 5.35 : 13.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



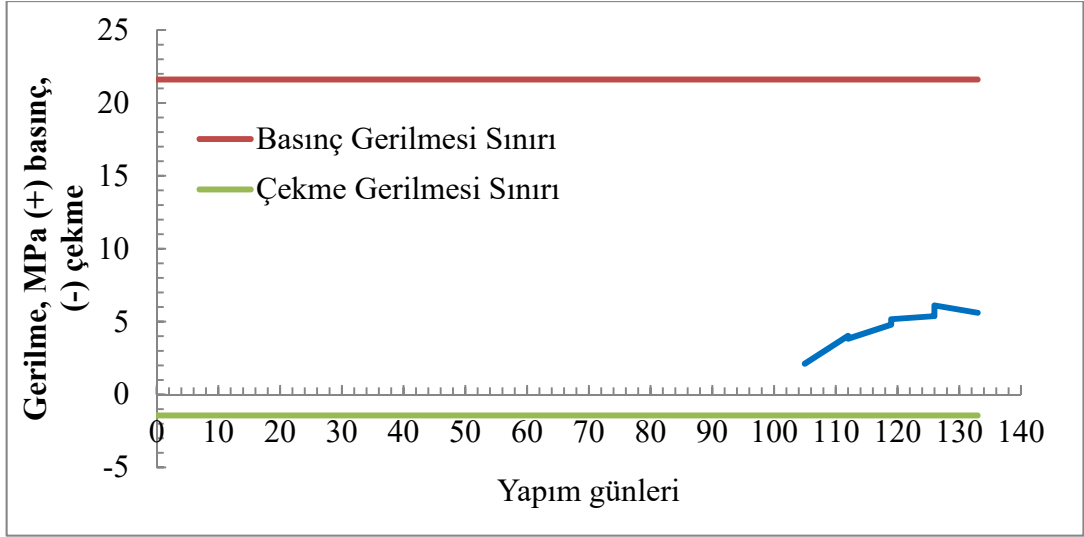
Şekil 5.36 : 13.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



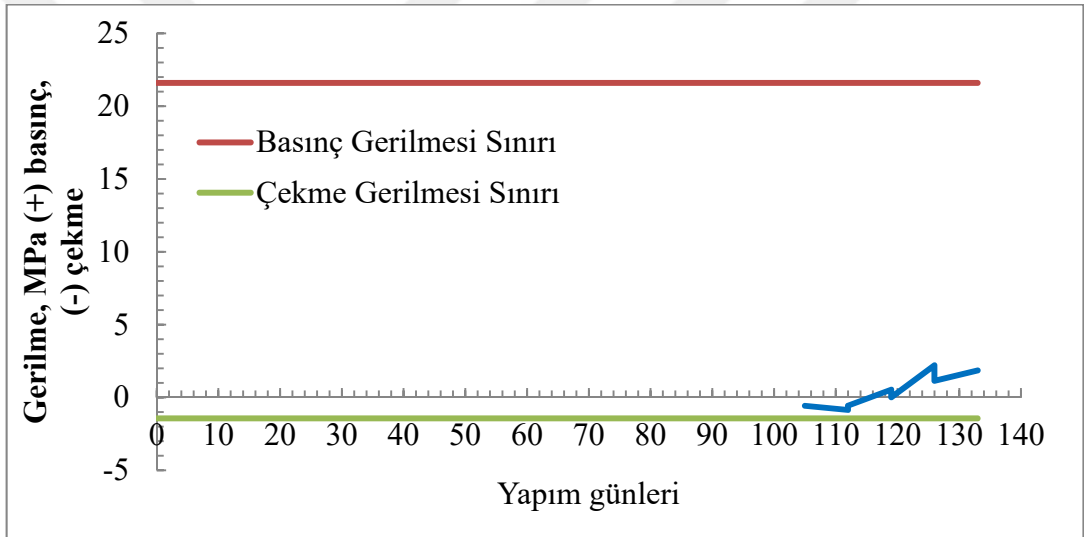
Şekil 5.37 : 14.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



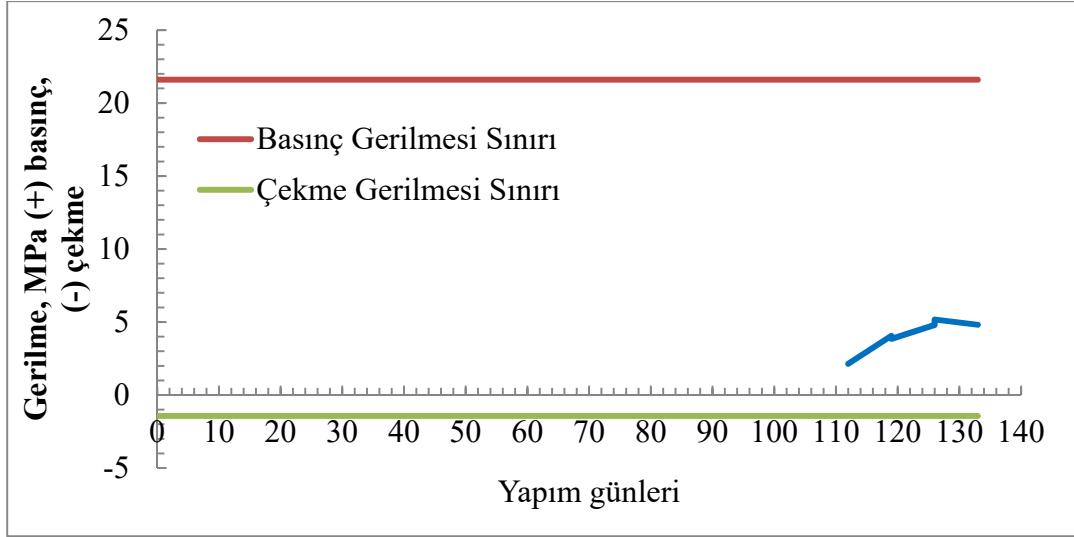
Şekil 5.38 : 14.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



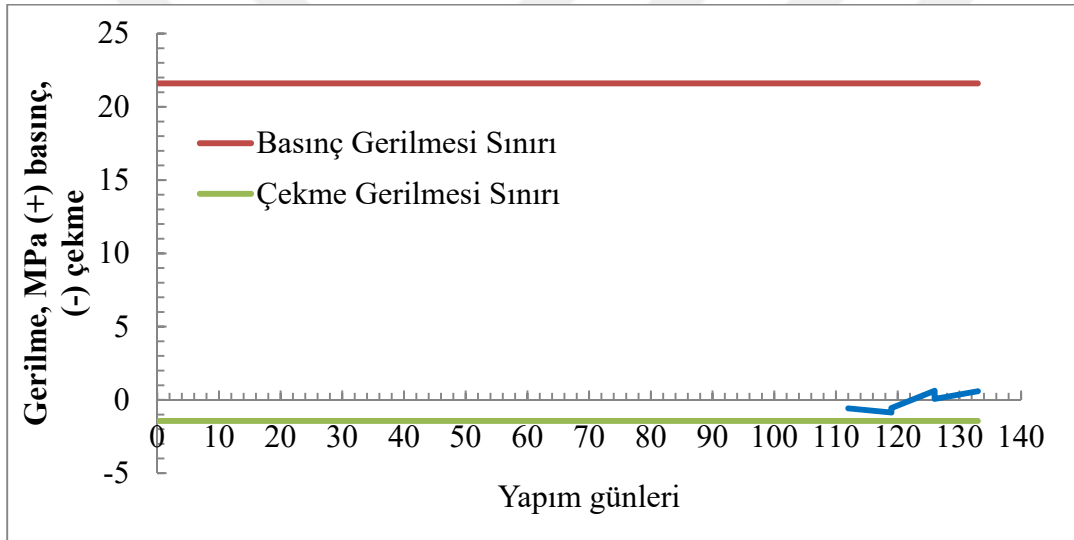
Şekil 5.39 : 15.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



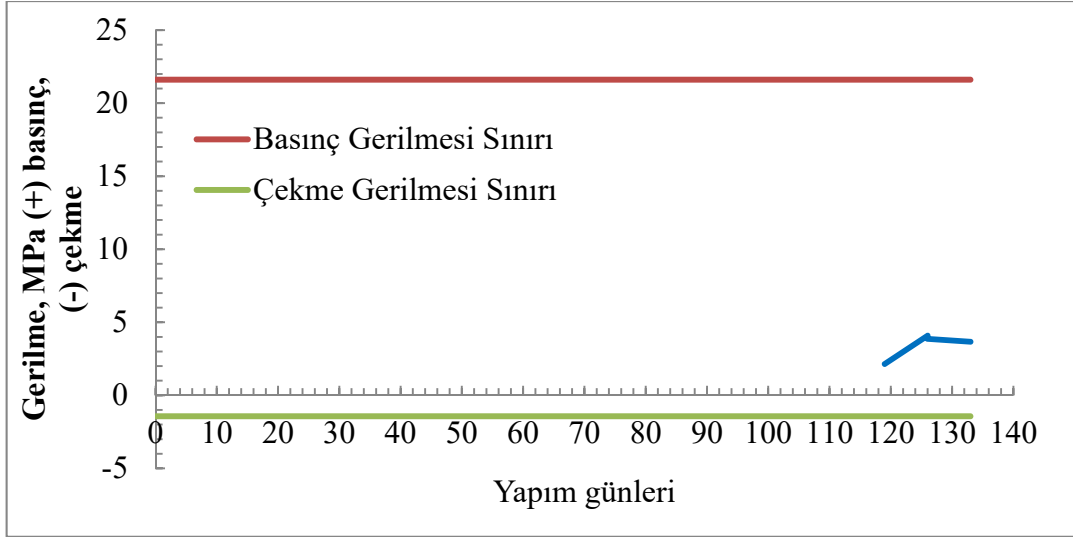
Şekil 5.40 : 15.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



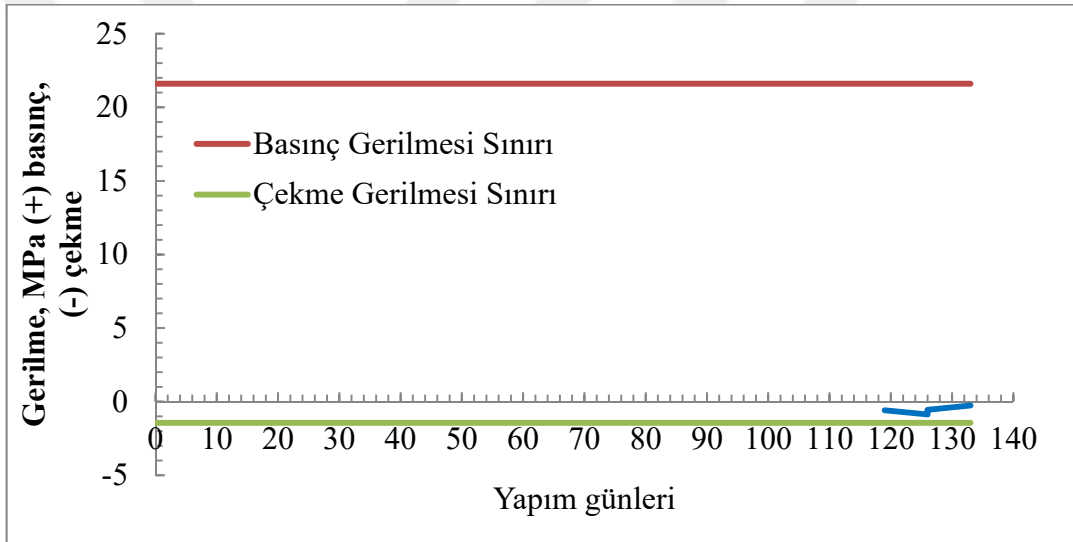
Şekil 5.41 : 16.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



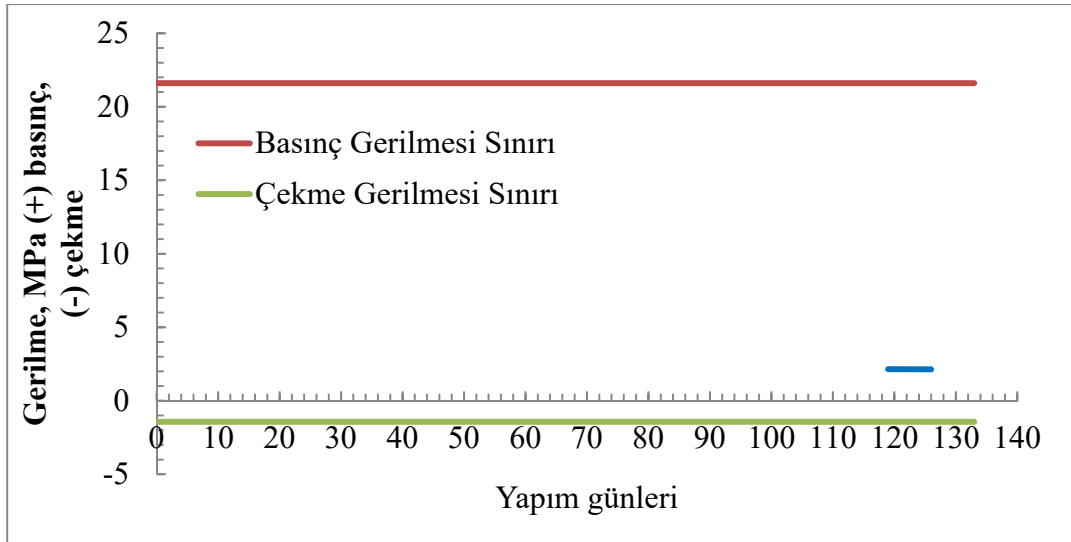
Şekil 5.42 : 16.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



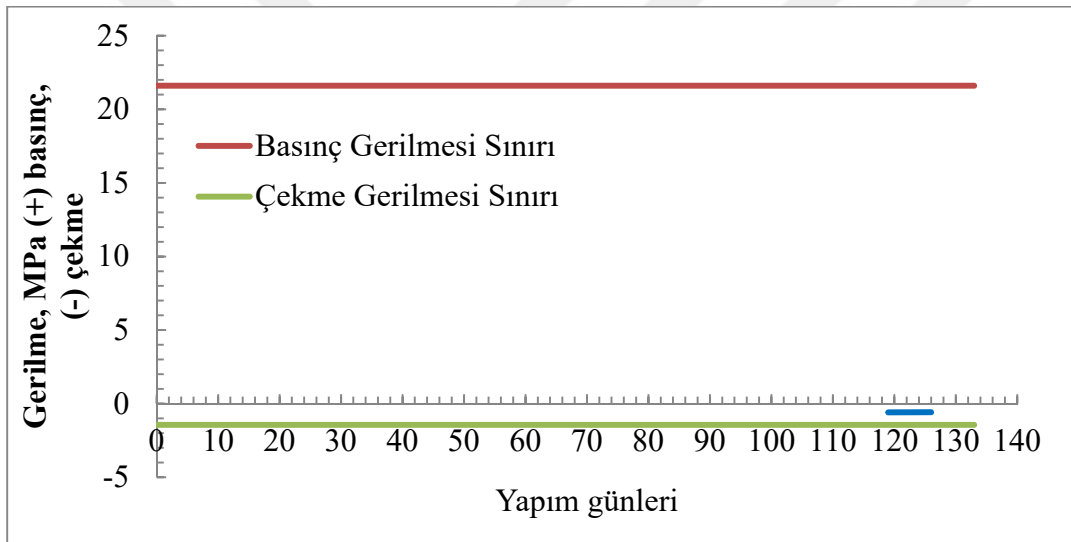
Şekil 5.43 : 17.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



Şekil 5.44 : 17.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



Şekil 5.45 : 18.kesit üst lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.



Şekil 5.46 : 18.kesit alt lif yapım günlerine bağlı gerilme değişimi.

Her bir kesit için kesitlerde meydana gelen çekme gerilmesi güvenilirlik indisi sınırı ile kontrol edilerek kesit uygunluk değerlendirmesi yapılacaktır. Avrupa EN normlarına göre bu değer 4.5 olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerindeki güvenilirlik indisi için kesit uygunluğuna karar verilecektir. Görüldüğü üzere toplam 19 adet dilim için yapım süresi boyunca yapılan analizde herhangi bir kesitte izin verilen çekme gerilmesi değeri aşılmamıştır. Ayrıca kesitlerde meydana gelen basınç gerilmeleri izin verilen değerleri aşmamıştır. Bu yüzden, düşey yerdeğiştirme hesabı kesit davranışı lineer elastik olup çatlamamış kesit kabulü ile yapılacaktır.

5.4 Döküm Eğrisi Takibi için Yerdeğiştirme Tahkikleri

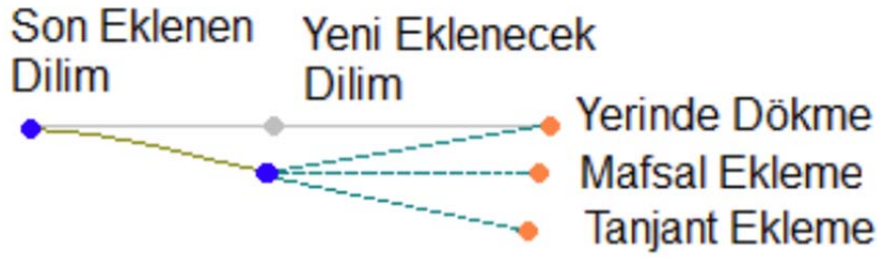
Döküm eğrisi tabliyenin bir zaman sonunda yapacağı deformasyon tersinde verilecek beton döküm kotlarını ifade eder. Bu şekilde yapım aşamasında takip edilen geometri kontrolünün birkaç açıklıktan oluşan dengeli konsol sistem sonucu kapatma dilimlerinin dökümü yapılmadan uygun kotta olmasını sağlamaktır. Böylece köprü daha inşaat aşamasındayken yapım aşamalarının sağlıklı ilerlebilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca belirlenen zaman sonunda köprünün kırmızı kota ulaşmasını sağlamak ve köprü ömründe sağlıklı bir kullanım sunmaktır. Daha önceden tabliyenin yapacağı sehimler tahmin edilmesi durumunda köprünün yapacağı sehime ters işaretle ters sehim verilmektedir. SETRA kurumu tarafından önerilen köprü servis ömrü sonunda yapacağı sehim dikkate alınması gerekmektedir. Bu değer yaklaşık olarak 10000 gün (30 yıl) civarı makul görülmektedir. Zamana bağlı etkiler meydana geldiğinden dolayı köprü servis ömrü boyunca sehim yapacaktır ve öngörülen 30 yıl sonunda kırmızı kotta olacaktır. Aksi takdirde, köprü inşaatı daha yeni tamamlandığında köprü üstyapısı projeye belirlenen kırmızı kotta olursa, 30 yıl içinde ciddi anlamda deforme olacak. Bunun sonucu olarak yol konforu zamanla azalacak, ve sehim değerini sıfıra indirgeyerek yol seviyesini tekrar kırmızı kota getirmek için tekrar asfalt dökülecektir. Bu durumun ve asfaltlama işleminin birçok defa tekrarlanması durumunda tabliye giderek ağırlaşacak ve deformasyonlar öngörüldüğünden çok daha fazla sehim yapacaktır.

Bulunan deplasman eğrisinin tersi beton döküm eğrisine eşittir. Yapılan hesabın sahada doğru uygulanması gerekir. Oluşan farkları kontrol altında tutmak için her inşaat aşamasından önce ve sonra kot okuması yapılmaktadır. Bir dilimin yapım süresi 7 gün olduğundan dolayı, her ne kadar kısa bir süre gibi görünse de, yapım öncesi ve sonrası düşey yerdeğiştirme ve kotlarda farklılıklar oluşabilir. Ayrıca, sıcaklık etkilerini en aza indirmek ve sağlıklı okuma yapılabilmesi için geometri takip süresi boyunca okumalar benzer sıcaklıklarda yapılmalıdır.

Yapım aşamasında köprü üstyapısının geometri kontrolü için tabliyenin yerinde dökme ve ya öndöküm dilimlerden oluşması durumuna bağlı olarak iki farklı yöntem izlenmektedir.

Köprü dilimleri eklenirken Şekil 5.47’de gösterildiği gibi üç değişik sistem kullanılmaktadır. Dengeli konsol inşaatlarında dilimler genelde köprü kırmızı kotunu

izlemek üzere yerinde dökme metoduna uygun yerleştirilirken, hesaplamalarda güvenli tarafta kalmak için tanjant ekleme yolu ile analizler yapılabilmektedir.

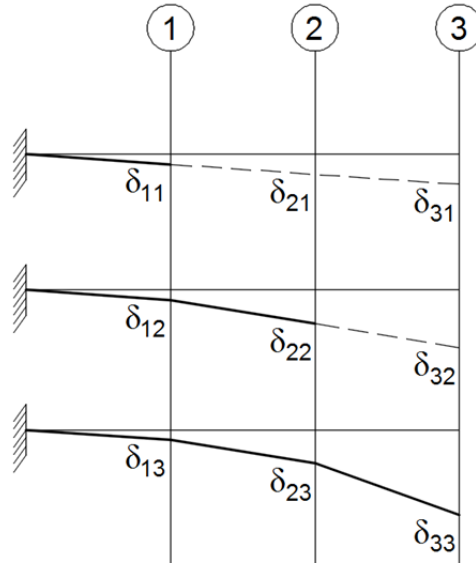


Şekil 5.47 : Köprü dilimlerini yapım sırasında yerleştirme teknikleri.

Öndöküm dilimlerin yerleştirilmesi “tanjant ekleme” yöntemi ile, yerinde dökme dilimlerinin ise “yerinde dökme” yerleştirme yöntemi ile yapılacaktır.

5.4.1 Öndöküm metodu ile teğet ekleme yerleştirme tekniği

Tanjant ekleme yöntemi herhangi bir dilimin yapımından dolayı kendinden önce yapımı tamamlanmış kesitlerin yerdeğiştirmesini oluşturmak, ve en önemlisi, kendinden sonra inşa edilecek dilimler için de tanjant izdüşüm yöntemi ile düşey yerdeğiştirme tahmini yöntemidir.



Şekil 5.48 : Teğet ekleme yerleştirme tekniği.

Şekil 5.48’den de görüleceği üzere her bir dilimden dolayı tüm kesitlerde meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler gösterilmiştir. δ_{mn} düşey yerdeğiştirme ifadesinde ilk indis yer-sebep ilişkisi ile ilgili kesitte bir başka dilimin yapımından dolayı meydana gelen sehim değerini göstermektedir. Teğet (tanjant) ekleme metodu sonucu

kesitlerde yapım sonunda ortaya çıkan toplam düşey yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibidir:

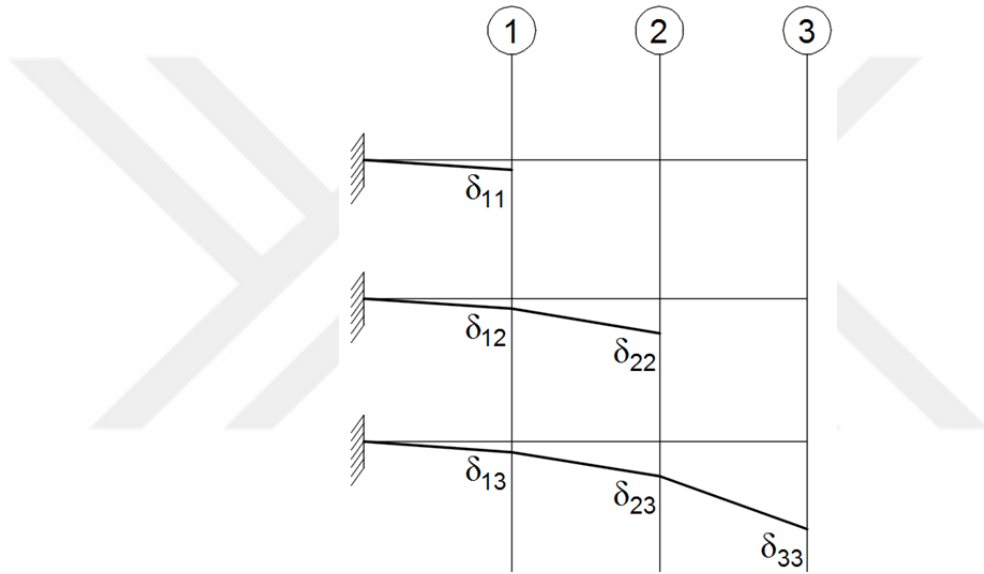
$$\delta_1 = \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} \quad (5.6)$$

$$\delta_2 = \delta_{21} + \delta_{22} + \delta_{23} \quad (5.7)$$

$$\delta_3 = \delta_{31} + \delta_{32} + \delta_{33} \quad (5.8)$$

Bunun sonucu sehım zarfı süreksizlikler olmadan devam eden bir düz çizgi şeklindedir.

5.4.2 Yerinde dökme metodu ile dilimlerin yerleştirme tekniğı



Şekil 5.49 : Yerinde dökme yerleştirme tekniğı.

Yerinde dökme yerleştirme tekniğı ile yapılan hesap sonucu bir dilimin yapımından dolayı kendinden önce yapımı tamamlanmış kesitlerin yerdeğiştirmesini meydana getirerek sehım diyagramı elde edilecektir (Şekil 5.49).

Yerinde dökme yerleştirme tekniğı sonucu kesitlerde yapım sonunda ortaya çıkan toplam düşey yerdeğiştirmeler aşağıdaki gibidir:

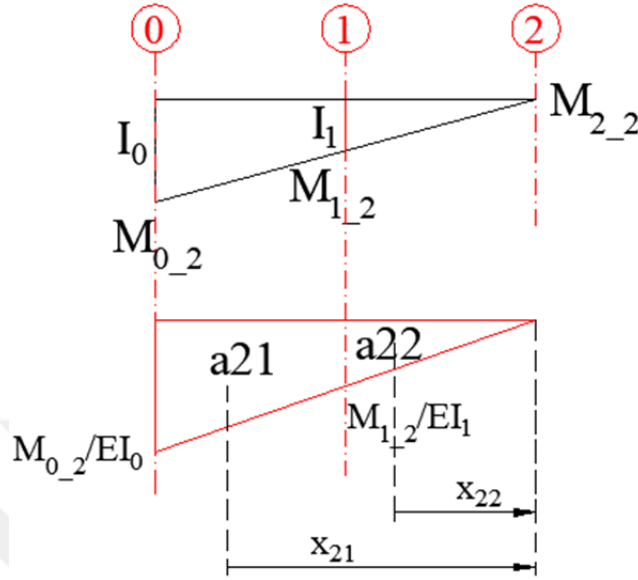
$$\delta_1 = \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} \quad (5.9)$$

$$\delta_2 = \delta_{21} + \delta_{22} \quad (5.10)$$

$$\delta_3 = \delta_{33} \quad (5.11)$$

Her bir yapım aşamasında dilim ölü yüklerinden, kalıp arabasının hareketi ve yapım hareketli gibi dış yüklerden dolayı meydana gelen sehımler “Moment-Alan” yöntemi

ile kolayca hesaplanabilmektedir. Hesap kolaylığı sağlaması açısından hesaplarda kayma alanları terk edilmiştir. Her bir kesit farklı yükseklik ve atalet momentine sahip olduğundan hesap yöntemi aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Şekil 5.50 : Moment-alan yöntemi ile sehım hesabı.

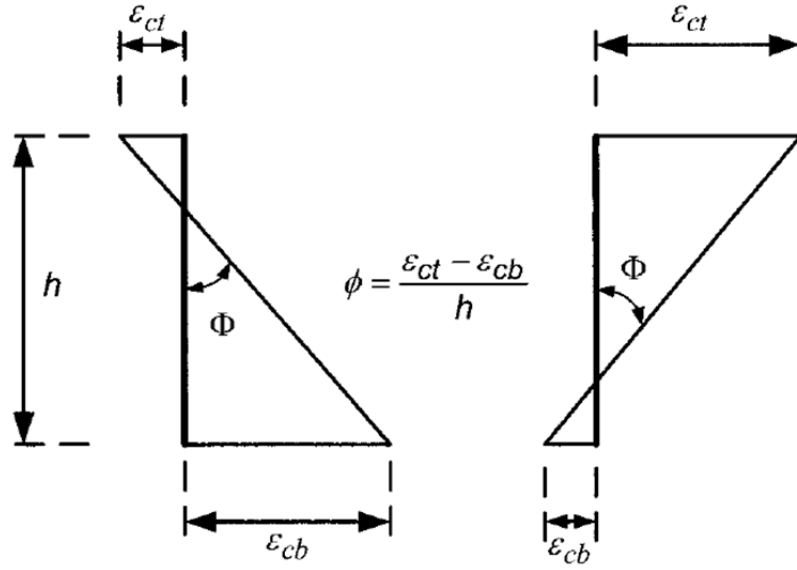
Şekil 5.50’den görüleceği üzere “2” numaralı konsol ucunda dış yüklerden meydana gelen sehım değerini eğrilik diyagramı altında kalan alanını alan ağırlık merkezinden sehım hesabı yapılacak konsol ucuna kadar mesafelere çarpım toplamı gibi ifade edilebilir:

$$\delta_{22} = a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} \quad (5.12)$$

Herbir kesit farklı yüksekliğe sahip olduğundan dolayı ardgerme kablo eksantrisiteleri farklıdır. Ardgerme kuvvetinden dolayı meydana gelen ters sehımın hesabı için kabloların başlangıç ve bitiş enkesitlerindeki eksantrisitelerin ortalaması üzerinden işlem yapılabilir. Bu şekilde kabul edilen yaklaşımla yapılan hesap yaklaşık mertebe sonuç vermektedir.

Böylece, her bir adımda yük değişiminden dolayı meydana gelen sehımler, yapım süresi boyunca meydana gelen zamana bağlı etkiler de dikkate alındığında, bir önceki bölümde verilen gerilme değişimi diyagramlarında olduğu gibi süreksizlikler meydana gelecektir. Daha önce de belirtildiği üzere, ele alınan köprü üstyapısının yapım aşamasına göre gerilme tahkik sonucu her hangi bir kesitte meydana gelen gerilmeler yönetmelikce belirlenen sınırları aşmamıştır. Dolayısıyla, kesitler lineer elastik davranış sergilediklerinden ve çekme gerilme sınırları aşılmadığından düşey

yerdeğiştirme hesabını çatlamamış kesit kabulü ile aşağıdaki gibi yapmak mümkün olacaktır:



Şekil 5.51 : Kesitlerde eğrilik hesabı.

Burada,

ε_{ct} : Kesit üst lifinde birim şekildeğiştirme, birim kısalma ve/ve ya birim uzama,

ε_{cb} : Kesit alt lifinde birim şekildeğiştirme, birim kısalma ve/ve ya birim uzama,

h : Kesit yüksekliği,

Φ : Kesit eğriligi.

Ardgerme kuvveti bileşenleri kesitlere gün cinsinden farklı beton yaşlarında etkiğinden ve köprü yapım süresi boyunca meydana gelen zamana bağlı etkilerden dolayı ardgerme kuvveti için sehim hesabında eğrilik yöntemi izlenebilir (Şekil 5.51). Ayrıca, üstyapı dilimleri sürekli basınç halinde olduğundan sünme etkisine maruz kalmaktadır. Bölüm 4'te zamana bağlı elastisite modülü değişimi anlatılmış olup, sehim hesaplarında efektif elastisite modülü değişimi bağıntısı kullanılacaktır:

$$E_{c,eff}(t) = \frac{E_c(t)}{1 + \psi(t, t_i)} \quad (5.13)$$

Burada,

$E_c(t)$: Zamana bağlı beton elastisite modülü değişimi

$\psi(t, t_i)$: t_i ilk yüklemedeki betonun t gününde gelişen sünme katsayısı

$E_{c,eff}(t)$: Betonun t gününde gelişen efektif elastisite modülü

olarak ifade edilmektedir.

Herhangi bir zaman diliminde kesit üst ve alt liflerinde meydana gelen gerilmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

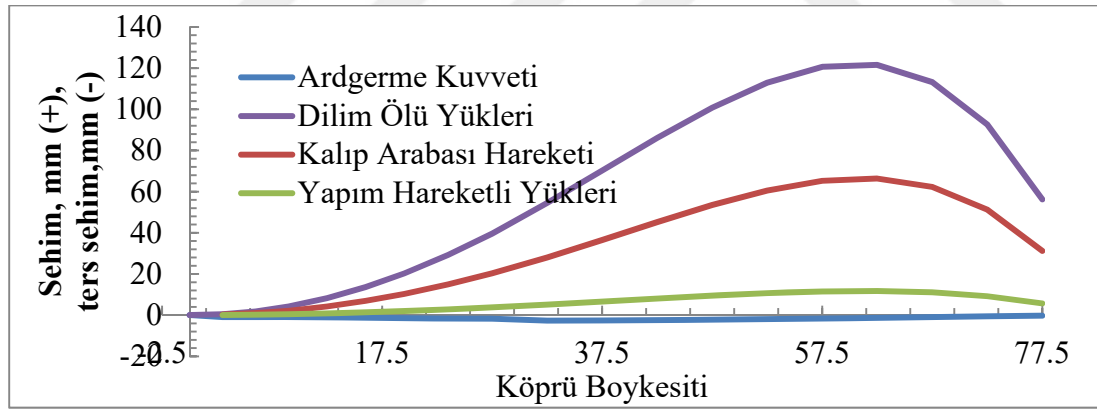
$$\sigma_{üst} = \frac{P(t)}{A} + \frac{P(t)e}{S_{üst}} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{alt} = \frac{P(t)}{A} - \frac{P(t)e}{S_{alt}} \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{\sigma_{üst}}{E_c(t)} \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_{cb} = \frac{\sigma_{alt}}{E_c(t)} \quad (5.17)$$

Öngörme kayıp hesaplarından farklı olarak sünme katsayısı hesabında ilgili dilimin sadece kendi hacmi ve yüzey alanı ve buna bağlı V/S dikkate alınacaktır. Tüm dilimler için ardgerme tekniği uygulandığı ve ardgerme kuvvetinin kesite aktarıldığı ilk yüklemedeki gün cinsinden beton yaşı EK D’de verilmiştir. Buna bağlı olarak dengeli konsol yapım aşamasının sonuna kadar yapım süresi boyunca gelişen sünme katsayısı dikkate alınarak efektif elastisite modülü hesaplarda kullanılmaktadır.



Şekil 5.52 : Köprü boykesiti boyunca meydana gelen sehim diyagramları.

Şekil 5.52’de verilen sehim diyagramı yapım aşamaları dikkate alınarak elde edildiğinden ve daha önce de bahsedildiği gibi sahada kot kontrolü yerinde dökme dilimler için ters sehim verilecektir. Böylece geometri kontrolü takip edilerek köprünün dengeli konsol durumunda sağlıklı yapımını sağlamak mümkün olacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yürütülen tez çalışmasında, dilimsel dengeli konsol yapım yöntemi ile inşa edilen köprü hakkında genel bir bilgi paylaşılmış olup, köprü üstyapısı yapım aşamaları ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Dünyada bu tür köprü yapımı 1960'lı yıllardan tercih edilmekte olup Türkiye'de çok fazla örneği olmamasına rağmen son zamanlarda bu konu üzerinde çalışmalar yürütülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında köprü yapım aşamalarından sadece dengeli konsol durumunda, diğer bir deyişle kapatma diliminin dökülmesiyle beraber köprü üstyapısının sürekli sisteme geçmeden bir önceki yapım aşaması dikkate alınmıştır.

Dünyaca kabul gören AASHTO LRFD köprü tasarım yönetmeliği ve SETRA kurumunun hükümleri doğrultusunda dengeli durum yapım aşamasında dikkate alınacak yük ve yük birleşimleri incelenmiştir. Ayrıntılı analize geçiş yapılmadan önce ön boyutlandırma yapılmış olup ele alınan ve tasarımı daha önce yapılmış bir köprünün mesnet üzerinde ve açıklık ortasında yeterli kesit yüksekliklerine ve güvenli tarafta kalacak şekilde seçilmiş halat adedi bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Kapatma dilimi döküldükten sonra ve devamında açıklık kablolarının ardgerme tekniği uygulandıktan sonra sistem sürekli hale gelmektedir. Dengeli konsol durumunda çok yüksek mertebelerde meydana gelen negatif konsol momentleri sistem sürekli hale geçtikten sonra azalma gösterir ve açıklıkta pozitif momentleri oluşur. Köprü üstyapısı sadece nihai duruma göre tasarım yapılırsa, hesap sonucu dengeli durum için kablo adedi yetersiz kalır ve çok yüksek kesitlere sahip ve çok ağır dilim ölü yükleri altında sistem çöker. Böylece, dilimsel dengeli konsol yapım yöntemi ile inşa edilen köprüler tasarımda iki farklı aşamada incelenmelidir.

Zamana bağlı etkiler her bir dilim betonunun dökülmesi ve prizinin almasıyla beraber meydana geleceğinden ve sürekli geliştiklerinden giderek artan bu etkilerin köprü analizinde dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden, bahsedilen tasarım yönetmeliklerince bu tip özel köprülerin yapım aşamasında artımsal zaman adımlı hesap yönteminin kullanılması tavsiye edilmektedir. Sünme, büzülme ve bunlara

bağlı olarak yüksek mukavemetli öngerme çeliğinin gevşemesi gibi zamana bağlı etkilerin malzeme modelleri esas alınarak hesaplanması gerekmektedir. AASHTO LRFD yönetmelikçe artımsal zaman adımlı analiz yönteminin kullanılabilmesi için 3 adet sünme ve büzülme malzeme modelinin kullanımı önerilmiştir. Bunlar, CEB FIP MC90-99, ACI209R-92 ve AASHTO LRFD malzeme modelleridir. Köprü üstyapısının analizine geçmeden önce malzeme modelleri ayrıntılı şekilde incelenmiş, girdi parametreleri araştırılmış ve tez çalışmasının devamında AASHTO modelinin hesap kolaylığı açısından ve yeterli mertebede sonuç verdiği için dolayı kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, ele alınan malzeme modelleri kolay programlanabilir oldukları ve bilgisayar programlarınca kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Dengeli konsol köprü üstyapısının bir yapım döngüsü 7 gün olarak düşünülmektedir. Beton prizini aldıktan ve yeterli mukavemet kazandıktan sonra ardgerme tekniği uygulanmaktadır. Bu mukavemet değeri yönetmelikçe belirlenen karakteristik basınç dayanımının en %80'e eşit olmak zorundadır. Köprü üstyapısında kullanılan C45 beton dayanım sınıfının buhar kürü uygulanması durumunda %80 dayanımına 3 günde ulaştığı tespit edilmiştir.

Yürütülen tez kapsamında ardgermeli kesit hesapları ve tahkiklerinde MathCAD ve Microsoft Excel Visual Basic for Applications (Excel VBA) bilgisayar programlama dili kullanılarak tasarım ilkelerine uygun analiz programı geliştirilmiş ve kesit gerilme tahkikleri ve öngerme kayıp hesapları bu program ile yapılmıştır.

Kesit gerilme değişimi hesabında dikkate alınacak eğilme momenti hesabı yapılmıştır. Artımsal zaman adımı yönteminin kullanılabilmesi ve düzgün sonuçlar verebilmesi için yapım aşaması süreleri ve ele alınan yapı elemanı yeterli sayıda küçük parçalara bölünmelidir. Her bir dilim için yapım döngüsü olan 7 gün ve köprü orta açıklık 165 metreye oranla küçük dilim boyları (3-5 metre) hesap yönteminin uygulanması açısından hesap kolaylığı sağlamakla beraber yeterli mertebede sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Kesitlerde meydana gelen gerilme değişimi hesabı bahsedilen zamana bağlı etkilerin ele alınmasıyla ve bunun sonucu olarak ardgerme kablolarında oluşan öngerilme kayıplarının her bir yapım döngüsü sonunda hesaplanmasıyla yapılmıştır. Her bir kesit için kesit üstünde ve altında meydana gelen gerilmeler şartnamece belirlenen izin verilen basınç ve çekme gerilme sınırları ile kontrol edilmiştir. Dengeli konsol

durumunda herhangi bir kesitte bu gerilme sınırları aşılmamış ve tüm kesitler neredeyse tamamen basınç altında kaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca çekme gerilmeleri aşılmadığından kesit çatlamadığı kabulü yapılmış ve sehim hesapları çatlamamış brüt kesit özellikleri ile yapılmıştır.

Sürekli basınca maruz kalan elemanlarda zamana bağlı sünme etkisi gelişmekte olup elastisite modülü hesabında malzeme modellerinin önerdiği bağıntılarla hesaplanan sünme katsayısı dikkate alınmıştır. Böylece herhangi bir zaman diliminde gelişen ve sünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan elastisite modülü 2.5 defaya kadar küçüldüğü sonucuna varılmıştır. Sehim hesapları elastisite modülüne bağlı olarak yapıldığından köptü üstyapısı sünmeden dolayı ciddi mertebede düşey yerdeğiştirme yapmaktadır. Bu durum sahada uygulama yapılırken dilimlere ters sehim, diğer bir değişler sürekli kot kontrolü yapılarak elde edilen sehim diyagramının tersi kadar kotlar düzenlenmelidir.

Tez çalışması kapsamında üstyapının analiz sonucu gerilme değişimi açısından elastik sınırlarda kaldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan analizlerde kayma alanları sıfır olarak ele alınmıştır. Analizler için bu kayma etkisini dikkate alınması önerilebilir.

Kolon üstü başlık dilimi rijit diyafram davranışı gösterdiği yaklaşımı ile analizlerde dikkate alınmamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile başlık dilimi göz önünde bulundurularak köprü üstyapısı için yapım aşamasına göre analiz yapılabilir.

Yürütülen tez çalışması kapsamında sadece köprü üstyapısı incelenmiştir. Zamana bağlı etkiler dikkate alınarak dilim kesitlerinde meydana gelen gerilme değişimleri ve her bir yapım aşaması için meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Yapım aşaması sırasında dinamik etkiler göz önünde bulundurularak analiz yapılabilir. Doğrusal olmayan analiz yöntemi ile köprü orta ayakları için de analizler yapılabilir. Ayrıca, dengeli konsol yapım aşamasında iken konsol boyları, ayrıca sistemi sürekli hale geldikten sonra açıklıklar da çok büyük olduğundan sismik tasarımda düşey elastik tasarım spektrumun kullanılması önerilebilir.



KAYNAKLAR

- Nilson, A. H.** (1987). *Design of Prestressed Concrete*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Naaman, A., E.** (2004). *Prestressed Concrete Analysis and Design, Fundamentals*. New York, Techno Press 3000.
- Michael, P., C. & D., M.** (1997). *Prestressed Concrete Structures*. Toronto, Response Publications.
- Edward, G., N.** (2008). *Concrete Construction Engineering, Handbook*. New York, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Edward, G., N.** (2010). *Prestressed Concrete, A Fundamental Approach*. New York, Pearson Higher Education Prentice Hall.
- Benaim, R.** (2008). *The Design of Prestressed Concrete Bridges, Concepts and Principles*. New York, Taylor & Francis Group, LLC.
- Wai-Fah, C. & L, D.** (2000). *Bridge Engineering Handbook, Fundamentals*. New York, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Wai-Fah, C. & L, D.** (2014). *Bridge Engineering Handbook, Fundamentals*. New York, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Wai-Fah, C. & L, D.** (2014). *Bridge Engineering Handbook, Superstructure Design*. New York, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- Karaesmen, E.** (2015). *Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler*. Freysaş-Freyssinet Yapı Sistemleri San. A.Ş. İstanbul, Lord Matbaacılık ve Kağıtçılık Alpaslan Arıbuğa.
- SETRA** (2007). *Design Guide Prestressed Concrete Bridges Built Using the Cantilver Method*. Fransa, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.
- ODTU** (2014). *Türkiye Köprü Mühendisliğinde Tasarım ve Yapıma İlişkin Teknolojilerin Geliştirilmesi Teknik Kılavuzları*. Ankara, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- ACI 209.2R-08** (2008). *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331, Michigan.
- AASHTO LRFD Bridge** (2012). *Design Specifications*. American Association of State Design Highway and Transportation Officials.
- Omaishi, N., A. & T., M. & S., S.** (2009). *Estimating Prestress Loss in Pretensioned High-Strength Concrete Members*. PCI Journal
- Tadros, M., A. & A., G. & W., D.** (1979). *Long-Term Stresses and Deformation of Segmental Bridges*. PCI Journal



EKLER

EK A: Her bir yapım aşaması için dilim ağırlıklarından dolayı kesitlerde meydana gelen eğilme momenti değerleri

Dilim ağırlıklarından dolayı kesitlerde meydana gelen momentler (kN.m). Yatayda kesit no, Düşeyde dilim yapım aşaması no.																				
NO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.0																			
1	3128.4	0.0																		
2	8081.0	2684.8	0.0																	
3	13083.2	7844.7	2606.3	0.0																
4	21181.0	15264.4	9347.7	3431.1	0.0															
5	27115.7	21403.0	15690.4	9977.7	3313.0	0.0														
6	32620.2	27103.8	21587.3	16070.9	9635.0	3199.2	0.0													
7	42256.3	36351.1	30445.9	24540.7	17651.3	10761.9	3872.5	0.0												
8	46824.1	41312.6	35801.2	30289.7	23859.7	17429.7	10999.7	3651.1	0.0											
9	66019.5	59413.3	52807.2	46201.0	38493.8	30786.5	23079.3	14271.1	5462.8	0.0										
10	73611.8	67298.9	60985.9	54673.0	47307.9	39942.8	32577.7	24160.5	15743.2	5221.7	0.0									
11	80590.2	74543.3	68496.5	62449.6	55394.9	48340.2	41285.5	33223.0	25160.5	15082.4	5004.3	0.0								
12	87134.3	81323.3	75512.3	69701.3	62921.8	56142.3	49362.8	41614.8	33866.8	24181.8	14496.8	4811.8	0.0							
13	93392.3	87787.2	82182.0	76576.9	70037.6	63498.3	56959.0	49485.5	42012.0	32670.1	23328.2	13986.4	4644.5	0.0						
14	99576.7	94144.0	88711.4	83278.8	76940.7	70602.7	64264.6	57021.1	49777.6	40723.2	31668.9	22614.5	13560.1	4505.7	0.0					
15	105856.6	100562.9	95269.2	89975.6	83799.6	77623.6	71447.6	64389.4	57331.1	48508.3	39685.5	30862.7	22039.9	13217.1	4394.3	0.0				
16	112376.6	107189.4	102002.2	96815.1	90763.3	84711.6	78659.9	71743.6	64827.4	56182.1	47536.8	38891.5	30246.1	21600.8	12955.5	4310.2	0.0			
17	119377.8	114261.3	109144.8	104028.3	98059.1	92089.8	86120.6	79298.6	72476.6	63949.1	55421.6	46894.1	38366.6	29839.1	21311.6	12784.1	4256.6	0.0		
18	127023.9	121942.8	116861.8	111780.7	105852.8	99924.9	93997.0	87222.3	80447.5	71979.1	63510.6	55042.2	46573.8	38105.3	29636.9	21168.4	12700.0	4231.6	0	
19	53081.7	51053.1	49024.5	46995.9	44629.2	42262.5	39895.8	37191.0	34486.2	31105.2	27724.2	24343.2	20962.2	17581.2	14200.2	10819.2	7438.2	4057.2	676.2	0



EK B: Her bir yapım aşaması için kalıp arabasının ağırlığından dolayı kesitlerde meydana gelen eğilme momenti değerleri

Kalıp arabasının ağırlığından dolayı kesitlerde meydana gelen momentler (kN.m). Yatayda kesit no, Düşeyde dilim yapım aşaması no.																					
NO	CE+IE (kN)	L (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	880	3	0.0																		
2	880	3	2640.0	0.0																	
3	880	3	5280.0	2640.0	0.0																
4	880	3	7920.0	5280.0	2640.0	0.0															
5	880	3.5	11000.0	8360.0	5720.0	3080.0	0.0														
6	880	3.5	14080.0	11440.0	8800.0	6160.0	3080.0	0.0													
7	880	3.5	17160.0	14520.0	11880.0	9240.0	6160.0	3080.0	0.0												
8	880	4	20680.0	18040.0	15400.0	12760.0	9680.0	6600.0	3520.0	0.0											
9	880	4	24200.0	21560.0	18920.0	16280.0	13200.0	10120.0	7040.0	3520.0	0.0										
10	880	5	28600.0	25960.0	23320.0	20680.0	17600.0	14520.0	11440.0	7920.0	4400.0	0.0									
11	880	5	33000.0	30360.0	27720.0	25080.0	22000.0	18920.0	15840.0	12320.0	8800.0	4400.0	0.0								
12	880	5	37400.0	34760.0	32120.0	29480.0	26400.0	23320.0	20240.0	16720.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0							
13	880	5	41800.0	39160.0	36520.0	33880.0	30800.0	27720.0	24640.0	21120.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0						
14	880	5	46200.0	43560.0	40920.0	38280.0	35200.0	32120.0	29040.0	25520.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0					
15	880	5	50600.0	47960.0	45320.0	42680.0	39600.0	36520.0	33440.0	29920.0	26400.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0				
16	880	5	55000.0	52360.0	49720.0	47080.0	44000.0	40920.0	37840.0	34320.0	30800.0	26400.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0			
17	880	5	59400.0	56760.0	54120.0	51480.0	48400.0	45320.0	42240.0	38720.0	35200.0	30800.0	26400.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0		
18	880	5	63800.0	61160.0	58520.0	55880.0	52800.0	49720.0	46640.0	43120.0	39600.0	35200.0	30800.0	26400.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0.0	
19	880	5	68200.0	65560.0	62920.0	60280.0	57200.0	54120.0	51040.0	47520.0	44000.0	39600.0	35200.0	30800.0	26400.0	22000.0	17600.0	13200.0	8800.0	4400.0	0



EK C: Her bir yapım aşaması için yapım hareketli yüklerinden dolayı kesitlerde meydana gelen eğilme momenti değerleri

Yapım hareketli yüklerinden dolayı kesitlerde meydana gelen momentler (kN.m). Yatayda kesit no, Düşeyde dilim yapım aşaması no.																					
NO	CLL (kN/ m)	L (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	8.25	3	0.0																		
2	8.25	3	37.1	0.0																	
3	8.25	3	148.5	37.1	0.0																
4	8.25	3	334.1	148.5	37.1	0.0															
5	8.25	3.5	644.5	372.3	174.3	50.5	0.0														
6	8.25	3.5	1056.0	697.1	412.5	202.1	50.5	0.0													
7	8.25	3.5	1568.5	1123.0	751.8	454.8	202.1	50.5	0.0												
8	8.25	4	2278.0	1733.5	1263.3	867.3	499.1	232.0	66.0	0.0											
9	8.25	4	3119.5	2476.0	1906.8	1411.8	928.1	545.5	264.0	66.0	0.0										
10	8.25	5	4357.0	3589.8	2896.8	2278.0	1650.0	1123.0	697.1	334.1	103.1	0.0									
11	8.25	5	5800.8	4909.8	4093.0	3350.5	2578.1	1906.8	1336.5	808.5	412.5	103.1	0.0								
12	8.25	5	7450.8	6436.0	5495.5	4629.3	3712.5	2896.8	2182.1	1489.1	928.1	412.5	103.1	0.0							
13	8.25	5	9307.0	8168.5	7104.3	6114.3	5053.1	4093.0	3234.0	2376.0	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0						
14	8.25	5	11369.5	10107.3	8919.3	7805.5	6600.0	5495.5	4492.1	3469.1	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0					
15	8.25	5	13638.3	12252.3	10940.5	9703.0	8353.1	7104.3	5956.5	4768.5	3712.5	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0				
16	8.25	5	16113.3	14603.5	13168.0	11806.8	10312.5	8919.3	7627.1	6274.1	5053.1	3712.5	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0			
17	8.25	5	18794.5	17161.0	15601.8	14116.8	12478.1	10940.5	9504.0	7986.0	6600.0	5053.1	3712.5	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0		
18	8.25	5	21682.0	19924.8	18241.8	16633.0	14850.0	13168.0	11587.1	9904.1	8353.1	6600.0	5053.1	3712.5	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0.0	
19	8.25	5	24775.8	22894.8	21088.0	19355.5	17428.1	15601.8	13876.5	12028.5	10312.5	8353.1	6600.0	5053.1	3712.5	2578.1	1650.0	928.1	412.5	103.1	0



EK D: Her bir yapım aşaması sonunda uygulanacak ardgerme kuvvetlerinin kesitlerdeki bileşenleri ve uygulama esnasında ilgili kesitin gün cinsinden beton yaşı

Ardgerme kuvveti bileşenleri ve beton yaşı. Yatayda kesit no, Düşeyde dilim yapım aşaması no.																																							
	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i	Kuvvet	t _i			
	0		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		
0	P _{0_0}	3																																					
1	P _{0_1}	10	P _{1_1}	3																																			
2	P _{0_2}	17	P _{1_2}	10	P _{2_2}	3																																	
3	P _{0_3}	24	P _{1_3}	17	P _{2_3}	10	P _{3_3}	3																															
4	P _{0_4}	31	P _{1_4}	24	P _{2_4}	17	P _{3_4}	10	P _{4_4}	3																													
5	P _{0_5}	38	P _{1_5}	31	P _{2_5}	24	P _{3_5}	17	P _{4_5}	10	P _{5_5}	3																											
6	P _{0_6}	45	P _{1_6}	38	P _{2_6}	31	P _{3_6}	24	P _{4_6}	17	P _{5_6}	10	P _{6_6}	3																									
7	P _{0_7}	52	P _{1_7}	45	P _{2_7}	38	P _{3_7}	31	P _{4_7}	24	P _{5_7}	17	P _{6_7}	10	P _{7_7}	3																							
8	P _{0_8}	59	P _{1_8}	52	P _{2_8}	45	P _{3_8}	38	P _{4_8}	31	P _{5_8}	24	P _{6_8}	17	P _{7_8}	10	P _{8_8}	3																					
9	P _{0_9}	66	P _{1_9}	59	P _{2_9}	52	P _{3_9}	45	P _{4_9}	38	P _{5_9}	31	P _{6_9}	24	P _{7_9}	17	P _{8_9}	10	P _{9_9}	3																			
10	P _{0_10}	73	P _{1_10}	66	P _{2_10}	59	P _{3_10}	52	P _{4_10}	45	P _{5_10}	38	P _{6_10}	31	P _{7_10}	24	P _{8_10}	17	P _{9_10}	10	P _{10_10}	3																	
11	P _{0_11}	80	P _{1_11}	73	P _{2_11}	66	P _{3_11}	59	P _{4_11}	52	P _{5_11}	45	P _{6_11}	38	P _{7_11}	31	P _{8_11}	24	P _{9_11}	17	P _{10_11}	10	P _{11_11}	3															
12	P _{0_12}	87	P _{1_12}	80	P _{2_12}	73	P _{3_12}	66	P _{4_12}	59	P _{5_12}	52	P _{6_12}	45	P _{7_12}	38	P _{8_12}	31	P _{9_12}	24	P _{10_12}	17	P _{11_12}	10	P _{12_12}	3													
13	P _{0_13}	94	P _{1_13}	87	P _{2_13}	80	P _{3_13}	73	P _{4_13}	66	P _{5_13}	59	P _{6_13}	52	P _{7_13}	45	P _{8_13}	38	P _{9_13}	31	P _{10_13}	24	P _{11_13}	17	P _{12_13}	10	P _{13_13}	3											
14	P _{0_14}	101	P _{1_14}	94	P _{2_14}	87	P _{3_14}	80	P _{4_14}	73	P _{5_14}	66	P _{6_14}	59	P _{7_14}	52	P _{8_14}	45	P _{9_14}	38	P _{10_14}	31	P _{11_14}	24	P _{12_14}	17	P _{13_14}	10	P _{14_14}	3									
15	P _{0_15}	108	P _{1_15}	101	P _{2_15}	94	P _{3_15}	87	P _{4_15}	80	P _{5_15}	73	P _{6_15}	66	P _{7_15}	59	P _{8_15}	52	P _{9_15}	45	P _{10_15}	38	P _{11_15}	31	P _{12_15}	24	P _{13_15}	17	P _{14_15}	10	P _{15_15}	3							
16	P _{0_16}	115	P _{1_16}	108	P _{2_16}	101	P _{3_16}	94	P _{4_16}	87	P _{5_16}	80	P _{6_16}	73	P _{7_16}	66	P _{8_16}	59	P _{9_16}	52	P _{10_16}	45	P _{11_16}	38	P _{12_16}	31	P _{13_16}	24	P _{14_16}	17	P _{15_16}	10	P _{16_16}	3					
17	P _{0_17}	122	P _{1_17}	115	P _{2_17}	108	P _{3_17}	101	P _{4_17}	94	P _{5_17}	87	P _{6_17}	80	P _{7_17}	73	P _{8_17}	66	P _{9_17}	59	P _{10_17}	52	P _{11_17}	45	P _{12_17}	38	P _{13_17}	31	P _{14_17}	24	P _{15_17}	17	P _{16_17}	10	P _{17_17}	3			
18	P _{0_18}	129	P _{1_18}	122	P _{2_18}	115	P _{3_18}	108	P _{4_18}	101	P _{5_18}	94	P _{6_18}	87	P _{7_18}	80	P _{8_18}	73	P _{9_18}	66	P _{10_18}	59	P _{11_18}	52	P _{12_18}	45	P _{13_18}	38	P _{14_18}	31	P _{15_18}	24	P _{16_18}	17	P _{17_18}	10	P _{18_18}	3	



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Shamil Nuri
Doğum Tarihi ve Yeri : 10.04.1993 - Sumgayıt/Azerbaycan
E-posta : nurishamil93@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Eylül 2015'ten beri BOTEK Boğaziçi Teknik Müşavirlik A.Ş.'de Sanat Yapıları Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.