



## ARDGERMELİ BETONARME KÖPRÜ TABLİYESİNDE HALAT YERLEŞİMİNİN İRDELEMESİ VE EKONOMİK DEĞERLENDİRMELER

Mustafa TURAN\*

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe/Ankara, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Köprü,  
Betonarme,  
Ardgerme,  
Sonlu Elemanlar Yöntemi,  
Halat Seçimleri

### Öz

Ardgemeli beton teknolojisi, günümüz şartlarında, endüstriyel alanda sıkça kullanılan bir sistem haline gelmiştir. Özellikle, köprü üstyapı sistemlerinde, betonun sahip olduğu yüksek basınç mukavemetinden faydalanarak, çelik donatı ve halatlar yardımıyla betonun çekme gerilmeleri zaafını kapatmayı amaçlar. Bu çalışmada, köprü üstyapısı, sonlu elemanlar yöntemi metodu kullanan bilgisayar yazılımı ile modellenmiştir. Üstyapı tasarımlarına; daimi yükler, geçici yükler ve zamana bağlı yükler uygulanmıştır. Kesit gerilmelerini dengelemek amacıyla, öngerme halatları analiz modellerine yerleştirilmiştir. Seçilen halat düzeninin tasarıma etkileri kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, "en uygun" tasarıma ulaşmak adına halat kullanımı konusu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, neden-sonuç ilişkisi kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuçların yönlendirmiş olduğu iki ana bulgu; ardgemeli köprü tabliyelerinde kullanılan öngerme kablolarının kesit gerilmelerini takip eden parabolik bir yörünge izlemesinin ve mümkün olduğunca daha büyük çaplı tüplerin içerisinden geçirilerek, kesit yüzeylerine yakınlaştırılmasının tesirleri karşılamak adına gereken toplam çelik halat metrajını düşüreceği saptanmıştır.

## TENDON LAYOUT RESEARCH ON POST-TENSIONED CONCRETE BRIDGE DECK AND ECONOMIC EVALUATIONS

### Keywords

Bridge,  
Concrete,  
Post-Tensioned,  
Finite Element Analysis,  
Tendon Usage.

### Abstract

In recent years, post-tensioned concrete technology has become widely used one in bridge engineering. Post tensioning system aims to use the high compressive strength of concrete and helps to resist on tension stresses with tendons and reinforcements. The aim of this paper is to study on finite element analysis of two-span post-tensioned concrete bridge decks and tendon usage. Bridge is 2-span and superstructure type is voided slab. Permanent, transient and time-dependent loading types were considered. To balance the deck section stresses, prestressing tendons were used. By iterations, post-tensioned tendons layout and types were studied. Two main results have been found that a parabolic trajectory tracing following sectional stresses of prestressing cables used in post-tensioned bridge decks and passing them through tubes of larger diameter as possible will decrease the required amount of tendon usage.

### Alıntı / Cite

Turan, M., (2020). Ardgemeli Betonarme Köprü Tabliyesinde Halat Yerleşiminin İrdelemesi ve Ekonomik Değerlendirmeler, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1126-1137.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Turan, 0000-0002-4601-8041

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.04.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.12.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.09.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.12.2020

### 1. Giriş (Introduction)

Beton ve çelik malzemelerinin uyum içerisinde kullanımları, yapı mühendisliğinde en sık kullanılan sistemdir. Bu sistemi bir adım daha öteye götürmek adına birçok teknolojik yöntem geliştirilmiştir. Ön germe teknolojisi de

\* İlgili yazar / Corresponding author: mustafa.turan.ce@gmail.com, +90-531-960-74-96

sistemi bir adım öteye götürmek adına geliştirilen öncü teknolojilerdendir. Ön germe sayesinde, betonun sahip olduğu yüksek basınç mukavemeti ön plana çıkartılır. Sistemi basınç altında tutarak, betonun çekme kapasite zaafı gizlenmiş olur.

Çalışma kapsamında, ardgermeli beton tabliye içerisinde konumlandırılması planlanan ön germe kabloları irdelenmiştir çünkü sistemi doğrudan etkileyen en etkin parametre halat seçimleridir. Kesit boyutlandırması, donatı seçimi, sehim oranları, tabliye kesit gerilmeleri gibi bir çok önemli konu, halat seçimlerinin devamında geliştirilir. Köprü üstyapı sistemi sonlu elemanlar yazılımı ile hazırlanmıştır. Üstyapı ağırlığının azaltılması amacıyla, açıklık bölgelerinde boşluklu kesitler tercih edilmiştir. Mesnet bölgelerinde ise kesme gerilmelerini karşılamak amacıyla daha büyük beton kesit alanlarına ihtiyaç duyulmuştur ve dolu kesitler tercih edilmiştir. Analiz geometrisi çubuk elemanlar yardımıyla hazırlanmıştır ve mesnet koşulları, bağlantı elemanları yardımıyla, gerçek mekanik özellikleri ile ifade edilmiştir. Kalıcı, geçici ve zamana bağlı yüklemeler hazırlanmıştır. Halat yerleşimleri, kesitlerde oluşan gerilmeleri karşılayacak formatta; açıklıklarda alt liflere, mesnet bölgelerinde ise üst liflere yakın bölgelerden yürütülmüştür. Yapılan çok sayıda analizler neticesinde; farklı sayıda halat kullanımının, kesit gerilmelerine olan etkileri incelenmiştir. Halatların içerisinde bulunan çelik demetler ve halatların içerisinde geçeceği tüp seçiminin farklı alternatifleri kıyaslanmıştır. Analizler neticesinde, tasarımcıyı en iyi ürüne götürmeyi amaçlayan değerlendirmeler sunulmuştur.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması (Scientific Literature Review)

Freyssinet, (1928), ardgermeli beton fikrini ilk olarak geliştirmiş ve bir yıl sonrasında bir uygulamasını hayata geçirmiştir. Fikrin gelişimi ve araştırmalar günümüzde de halen devam etmektedir.

Williams ve Waldron (1989), ardgermeli beton elemanların davranışı konusunda deneysel çalışmalar sunmuştur. Kim ve Lee (2012), nümerik ve teorik modeller geliştirerek, enjeksiyonlu veya enjeksiyonsuz ardgermeli beton konusunu araştırmışlardır. İki durum arasındaki kullanım farklılıklarını ortaya çıkarmışlardır. Lineer olmayan analizler yardımıyla, moment dağılımları incelenmiştir.

Fanning (2001), sıkça kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS ile, ardgermeli giriş tasarımı konusunda çalışmalar ortaya koymuştur.

Optimizasyon konusunda da bir çok akademik araştırma yapılmıştır. Tasarımın en önemli kısmı olarak optimum şartlara ulaşım amaçlanmıştır. En iyi çözümü yakalamak, tasarımcıyı kaynakları en efektif şekilde kullanmaya yönlendirecektir. Her tasarımcının kendine göre izlediği bir rota vardır ancak tümünü tek seferde değerlendirip, en iyi tasarımı yakalamak en önemlisidir. Bu bağlamda, en yüksek tasarım performansına ulaşım konularında; en makul kesitlerin seçimi, uygun malzemelerin tercihi ve uygun fiyatlandırma politikası önem arz etmektedir. Bahsi geçen konulara sıkça vurgu yapılmıştır ve yönlendirici sonuçlar sunulmuştur. (Amir, 2013; Kumar, 2014, Atabay & Gulay, 2009)

Halat seçimi konusunda en iyiye yönlendirme konusunda çeşitli araştırmalar hazırlanmıştır. (Ranzi & Ostinelli, 2017; Hussien, 2012; Utrilla & Samartin, 1997; Ghallab, 2013; Marks & Trochymiak, 1991)

Köprülerde kullanılan ardgerme teknolojisi hali hazırda gelişmekte olan bir sistemdir. Yapılan çeşitli araştırmaların ışığında, yapılması gerekli olan, tasarımcıyı daha iyiye yönlendirebilecek çok fazla parametre vardır. Bu çalışma kapsamında da halat ve tüp seçimlerinin önemine dikkat çekilmek istenmiştir. Sonuçlarda görüleceği üzere, tasarımın sebep olacağı ekonomik yük, tasarımcı seçimlerine göre, önemli derecede farklılıklar gösterecektir.

## 3. Öngerme Tekniği (Prestressing Method)

Öngerme fikrinin M.Ö. 2700 yıllarında ortaya koyulduğu çeşitli kaynaklara göre varsayılmaktadır. İlk olarak ahşap, taş gibi bazı basit malzemelerin basınç altında tutularak kullanılması, fikrin taslağını oluşturmaktadır. Beton içerisinde kullanılma düşüncesi ise ilk olarak 19. yy. sonlarında Amerikalı bir mühendis tarafından geliştirilmiş ve patent almıştır.

Öngerme fikri yapım metodu olarak; ön çekim ve ard çekim olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Ön germe, ön çekim tekniğinde, kablo yerleşimi ve gerilme kuvvetler beton dökümünden önce yapılır. Ard çekim tekniğinde ise beton belirli bir mukaveme ulaştıktan sonra kablolar gerilir ve sisteme ters sehim uygulanır. Bu çalışma kapsamında, ön germeli, ard-çekim sistemine ait köprü tabliyesi irdelenecektir.

Ardgermeli beton kullanımı ile daha uzun açıklıktaki köprüleri, daha makul kesit boyutlandırmaları ile tasarlanabilir. Kesit ölçülerinin narinleştirilmesi köprüye hem ekonomi hem de görünüş konusunda estetik getirmektedir. Ayrıca, boyutlandırmada yapılacak kazanım, ekonomik olarak da olumlu geri dönüş sağlayacaktır. Bilinen konvansiyonel yapıların aksine ardgermeli beton sisteminde tasarımı etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Tasarımcı için en uygun tasarıma ulaşmak, daha önceki basit tasarımlara kıyasla çok daha zordur. Sonuç olarak, en iyi tasarıma ulaşmak için çok sayıda hesap adımları değerlendirilmelidir.

#### 4. Köprü Model Analizi (Bridge Mathematical Analysis)

##### 4.1. Tasarım Tarifi (Design Description)

Çalışma kapsamında, hesap açıklığı 2 x 32,00 m. olan köprü sisteminin üstyapı analizi hazırlanmıştır. Köprü üstyapı sistemi; yerinde dökme ard-germe boşluklu betonarme tabliyedir. Tabliye genişliği 10,00 m, derinliği ise 1,20 m'dir. Üstyapı sisteminin hafifletilmesi amacıyla açıklık ortalarında boşluklu kesit tercih edilmiştir. Boşluklu kesit; 6 adet 0,70 cm çapında borular yardımıyla hazırlanmıştır. Tabliye alt ve üst kesit kalınlığı 25 cm ve orta duvar kalınlığı 30 cm olarak tasarlanmıştır. Kenar ayak ve orta ayak mesnet bölgelerinde ise dolu kesitli tabliye tercih edilmiştir.

Tabliye kenarlarda; 2 x 1,50 m yaya yolu, ortada ise 2 şerit kapasitesine sahip 7,00 m yol genişliği mevcuttur. Yol üst yapısı kalınlığı 6,00 cm olarak belirlenmiştir. Oto korkluk ve yaya korkuluk yerleşimleri ile yaya ve sürücü açısından gerekli güvenlik önlemleri alınmıştır.

##### 4.2. Tasarım Kriterleri (Design Criteria)

Yapı tasarımları "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007 SI" ye uygun olarak yapılmıştır.

##### 4.3. Mühendislik Yazılımı (Engineering Software)

Sonlu elemanlar yöntemi yazılımı için Midas Civil, 2019 (v2.1) programı kullanılmıştır. Program, inşaat mühendiliği alanında hazırlanacak olan tüm yapı sistemlerinin tasarımında ve analizinde kullanılmaktadır. Özellikle köprü mühendisliği alanında, uluslararası platformda kabul görmüş bir yapı analizi programıdır. İki boyutlu ve üç boyutlu, kompleks yapıların geometrik modellemesi, yüklemesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin tamamlanması mümkündür. Ayrıca, farklı şartnamelerin gereksinimlerine göre hareketli yük modelleri sunuyor oluşu, köprü sisteminin dünyanın çeşitli ülkelerindeki karayolu / demiryolu yük sınıflarına göre değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

##### 4.4. Malzeme Bilgisi (Materials)

Analizlerde kullanılacak olan malzeme sınıfları aşağıdaki tablolarda sunulmaktadır;

**Tablo 1.** Beton Özellikleri (Concrete Properties)

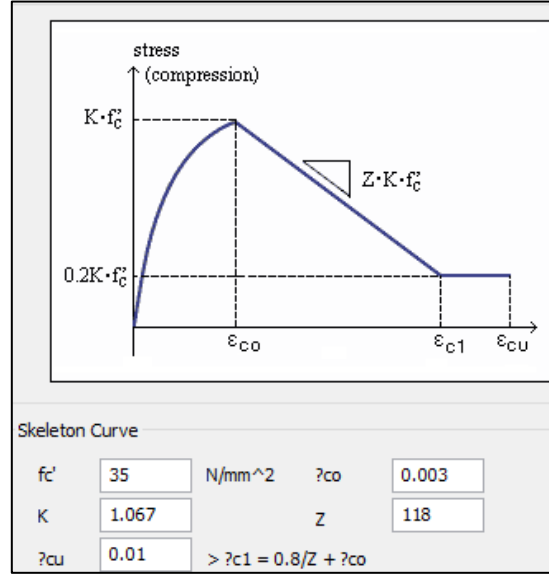
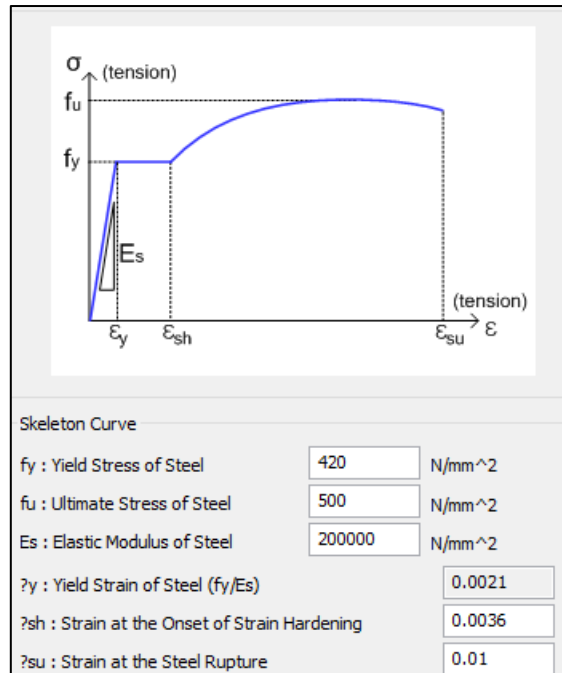
Tabliye Beton Sınıfı	C35/45
28 Günlük Silindirik Basınç Dayanımı	35 MPa
Elastik Modül, $E_c$	34000 MPa
Birim Ağırlık	25 kN/m <sup>3</sup>
Poisson Oranı	0,20
Isıl Genleşme Katsayısı	1,00 E-5 /°C

**Tablo 2.** Donatı Çeliği Özellikleri (Steel Properties)

Akma Dayanımı	420 MPa
Elastik Modül, $E_s$	200000 MPa

**Tablo 3.** Ön Germe Çeliği Özellikleri (Prestressing Steel Properties)

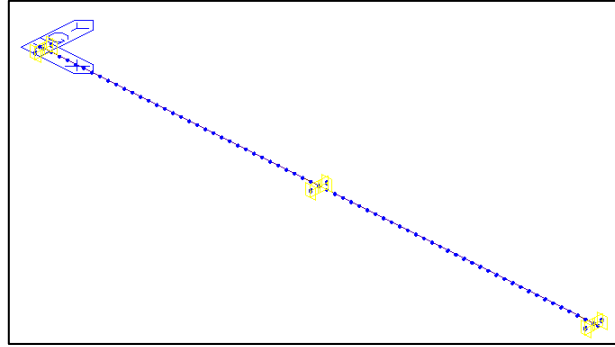
Halat Çekme Dayanımı, $f_{pu}$	1860 MPa
Elastik Modül, $E_s$	200000 MPa
Akma Dayanımı, $f_{py}$	1674 MPa
Öngerme Kuvveti ( $0.75 \times f_{pu}$ )	1395 MPa
Sürtünme Katsayısı	0.18
Titreşim Katsayısı (Wobble)	$0.002 \text{ m}^{-1}$
Halat Alanı	$150 \text{ mm}^2$
Ankraj Oturması	0.006 m
Birim Ağırlık	1,18 kg/m

**Şekil 1.** Beton Gerilme-Deformasyon Grafiği (Concrete Stress-Strain Graph)**Şekil 2.** Çelik Gerilme-Deformasyon Grafiği (Concrete Stress-Strain Graph)

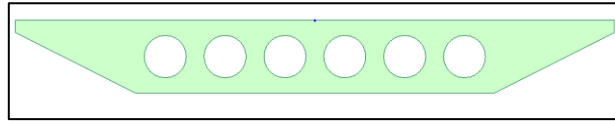
#### 4.5. Modelleme Metodolojisi (Methodology)

- Üstyapı model metodu çubuk elemanlar tanımlamasıyla hazırlanmıştır.
- Üstyapı tanımlamasında; dolu kesit ve boşluklu kesit olmak üzere iki farklı kesit tanımlaması hazırlanmıştır.

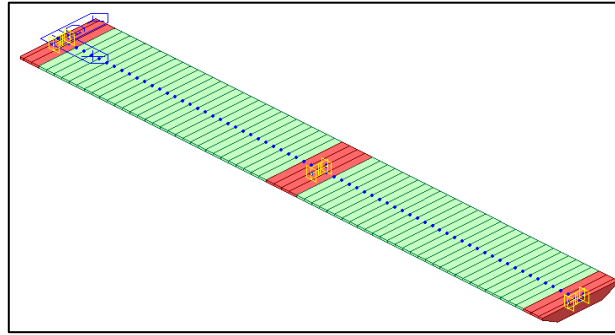
- Köprü üst yapısı basit elastomer mesnetler ile alt yapı üzerine konumlandırılacak şekilde düzenlenmiştir. Her aksta 2 adet mesnet kullanılmıştır. Mesnetler; yatay ve düşeyde gerçek etki noktasına göre hesap modelinde tanımlanmıştır ve geometrik özelliklerine mekanik özellikleri hesaplanarak, programda tanımlanmıştır. Mesnet ile tabliye arasındaki geçişler, rijit bağlantı elemanları ile tanımlanmıştır.
- Düğüm noktaları lokal eksenleri ile global eksenler aynı doğrultularda olacak şekilde ayarlanmıştır.
- X yönü köprü boyuna yön, Y yönü köprü enine yön ve Z yönü düşey yönü ifade etmektedir.
- Bütün elemanlar, merkez-üst noktalarından tanımlanmıştır.



Şekil 3. Çubuk Analiz Görüntüsü (Frame Analysis View)



Şekil 4. Boşluklu Tabliye Kesiti (Voided Slab Section)



Şekil 5. Donatılmış Analiz Görüntüsü (Filled Analysis View)

#### 4.6. Yapıya Etkiyen Yükler (Loads on Structure)

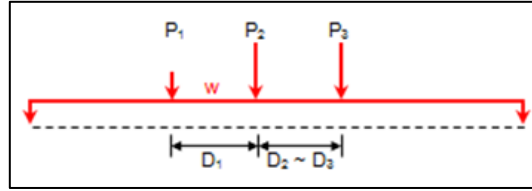
##### 4.6.1. Daimi Yükler (Dead Loads)

Zati Yükler (DC), Tabliye kesitleri için hesaplanacak olan zati yükler, analiz programı içerisinde tanımlanmıştır. İlave Zati Yükler (DW), Kesit öz ağırlıkları haricinde uygulanması planlanan ilave zati yükler (asfalt, kaldırım ve korkuluklar) harici yük tanımı ile kesitlere uygulanmıştır. Ön Germe Kuvvetleri (PS), Ön germe halatları 1395 MPa kuvvetle, halatın her iki ucundan eş zamanlı gerdirilecek şekilde tasarlanmıştır.

##### 4.6.2. Geçici Yükler (Transient Loads)

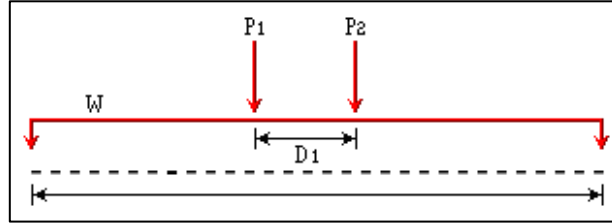
Köprü hareketli yük analizlerinde kullanılacak olan tasarım aracı "HL-93" yük modelidir. HL-93 yük modeli iki farklı yükleme modeli içermektedir. Birinci yükleme modeli, taşıta ait dingil yüklerinin kullanıldığı "tasarım kamyonu" yüklemesidir. İkinci yükleme modeli ise dingil yüklerinin eşdeğer bir şerit yüklemesine dönüştürüldüğü "tasarım dingil yükü" uygulamasıdır. İki bağımsız yükleme şekli yapıya ayrı ayrı uygulanarak, en kritik kesit tesirlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tasarım kamyonu; ön dingil yükü 35 kN, arka iki dingil yükü ise 145 kN'dur. Ön dingiller arası mesafe 4300 mm iken arka dingiller arası mesafe, en kritik durumu oluşturacak şekilde 4300 mm ~ 9000 mm mesafeleri arası değişmektedir.



Şekil 6. Tasarım Kamyonu Yük Modeli (Design Truck Load Model)

Tasarım dingil yükü; 110 kN büyüklüğünde 2 adet noktasal yükün 1200 mm aralıklarla yerleştirildiği bir yükleme şemasıdır. İlave olarak, aşağıdaki şemada "W" olarak ifade edilen 9,34 N/mm büyüklüğünde yayılı yük sisteme dahil edilir.



Şekil 7. Tasarım Dingili Yük Modeli (Design Lane Load Model)

Yapı üzerindeki toplam şerit sayısı 2'dir. Şartname uyarınca 2 şeritli sistemler için yük azaltma katsayısı "1" olarak uygulanacaktır. Ayrıca, dinamik yük artırma faktörü "1,33" olarak şartname gereğince kullanılmıştır.

#### Yaya Yükü (PL)

Köprü üzerinde 2 adet 1,50 m genişliğinde yaya kaldırımı bulunmaktadır. Analiz modelinde kaldırım sınırları belirlenerek, şartname uyarınca ilgili yük kombinasyonu ile 3,6 kN/m<sup>2</sup> köprü boyunca yayılı yük olarak uygulanmıştır.

#### Merkezkaç Yükü (CE)

Merkezkaç kuvveti, kurbta olan köprü yerleşimlerinde, eksen yarı çapına ve araç hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Analizi gerçekleştirilen yapı sisteminde ise köprü eksenini kurbta olmadığı için merkezkaç kuvveti meydana gelmeyeceği tespit edilmiş olup ilave yük durumu uygulanmamıştır.

#### Fren Yükü (BR)

Aşağıda tanımlanan iki kombinasyondan büyük olanı fren yükü olarak kullanılmıştır;

- Tasarım kamyonu veya tasarım dingil yükü diziliminin yüzde 25'i,
- Tasarım kamyonu veya tasarım dingil yükü diziliminin toplamının yüzde 5'i.

#### Rüzgar Yükü (WS, WL)

Rüzgar yükü etki alanı; yapının kendisine ve hareketli yüke olmak üzere 2 başlıkta irdelenecektir.

#### 4.6.3. Zamana Bağlı Yükler (Time Dependent Loads)

##### Sistemin Sıcaklık Değişimi (TU)

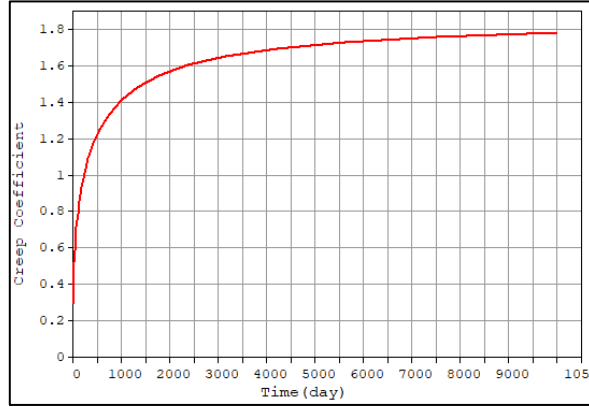
Yukarıdaki tanımlanan hesap modeli için +30°C ve -15°C derece sıcaklık değişimleri tanımlanmıştır. Ayrıca tabliye betonunun +10°C sıcaklıkta döküleceği düşünülerek analiz modeli başlangıç sıcaklığı belirlenmiştir.

##### Isıl Gradyan (TG)

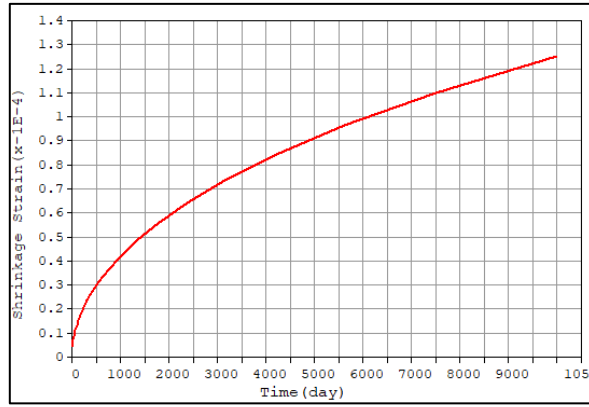
Sistem sıcaklığının değiştirilmesi dışında kesit yüksekliği boyunca değişken sıcaklıklar tanımlanmıştır. Kesit alt yüzeyi ve üst yüzeyi, kesit gövdesinden farklı olarak artı ve eksi 10 °C farklarla kontrol edilmiştir.

### Sünme & Büzülme (CR, SH)

Birim deformasyonlar "CEB-FIP Model Code 1990" a uygun olarak hesaplanacaktır. Etkilerin 10 gün – 10000 gün arası gelişmesi beklenerek, 24 zaman adımında, zamana bağlı sünme ve büzülme katsayıları grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 8. Sünme Katsayısı Grafiği (Creep Coefficient Graph)



Şekil 9. Büzülme Katsayısı Grafiği (Shrinkage Coefficient Graph)

### 4.7. Yük Kombinasyonları (Load Combinations)

AASHTO LRFD (2007) şartnamesi uyarınca oluşturulan yük birleşimleri aşağıda özetlenmiştir;

#### Servis Durumu Yük Kombinasyonları

- Servis 1: 1.0DC + 1.0DW + 1.0LL + 1.0BR + 1.0PL + 0.3WS + 1.0WL + 1.0 TU + 0.5TG
- Servis 2: 1.0DC + 1.0DW + 1.3LL + 1.3BR + 1.3PL + 1.0 TU
- Servis 3: 1.0DC + 1.0DW + 0.8LL + 0.8BR + 0.8PL + 1.0 TU + 0.5TG
- Servis 4: 1.0DC + 1.0DW + 0.7WS + 1.0 TU + 1.0TU

#### Dayanım Durumu Yük Kombinasyonları

- Dayanım 1: 1.25DC + 1.5DW + 1.75LL + 1.75BR + 1.75PL + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 2: 1.25DC + 1.5DW + 1.35LL + 1.35BR + 1.35PL + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 3: 1.25DC + 1.5DW + 1.40WS + 0.5 TU + 0.5TG
- Dayanım 4: 1.50DC + 1.50DW + 0.5 TU
- Dayanım 5: 1.25DC + 1.5DW + 1.35LL + 1.35BR + 1.35PL + 0.4WS + 1WL + 0.5 TU + 0.5TG

#### Kısaltmalar

- DC = Zati ve ilave kalıcı yükler
- DW= Asfalt yükü
- LL = Hareketli yükler
- PL = Yaya yükler
- BR= Fren yükü
- WS = Tabliye üzerindeki rüzgâr yükü

- WL = Hareketli yük üzerinde etkiyen rüzgâr yükü
- TU = Sistem sıcaklık değişimi
- TG = Isıl gradyan

#### 4.8. İzin Verilen Kesit Gerilmeleri (Allowable Section Stresses)

##### Basınç Gerilmeleri

İnşaat Aşaması :  $0.45f_c' = 15.75 \text{ MPa}$

Servis Aşaması :  $0.60f_c' = 21.00 \text{ MPa}$

##### Çekme Gerilmeleri

İnşaat aşaması :  $0.50\sqrt{f_c'} = 2.95 \text{ MPa}$

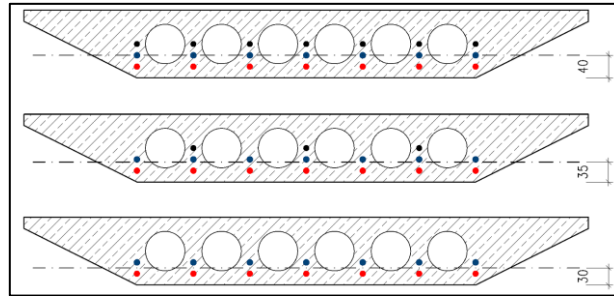
Servis aşaması :  $0.50\sqrt{f_c'} = 2.95 \text{ MPa}$

#### 4.9. Halatların Modellenmesi (Modelling Strands)

Köprü tabliyesinde meydana gelecek olan gerilmeleri dengelemek ve düzenlemek amacıyla kesite ard-germe halatları yerleştirilmiştir. Kullanılan halatların, tabliye boyunca oluşması muhtemel gerilme dağılımını en uygun şekilde dengelemesi amaçlanmıştır. Bu hususta, halat yerleşimi yatayda ve düşeyde optimize edilerek, en etkili olduğu konumlarda kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında, aşağıda detayları sunulan 3 farklı halat yerleşimi hazırlanmıştır;

- Analiz 1: Yatayda, düşeyde 7 x 3 adet, toplam 21 adet halat kullanılmıştır.
- Analiz 2: Yatayda 7, düşeyde ise sırasıyla 2 ve 3 adet olmak üzere toplam 17 adet halat kullanılmıştır.
- Analiz 3: Yatayda, düşeyde 7 x 2 adet, toplam 14 adet halat kullanılmıştır.



Şekil 10. Köprü Halat Yerleşimleri (Bridge Strand Layout)

Analiz kapsamında seçilen halat sayılarını ve karelajını çeşitlendirmek mümkündür. Ancak, statik analizler ile kesit gerilmeleri, deplasman limitleri vb. şartları yerine getirmek tek başına yeterli olmayacaktır. Şartname tarafından sunulan geometrik kısıtlamaların da yerine getirilmiş olması gerekmektedir. Halatların içerisinde yürütüleceği tüpün çapı, tüp alanının çelik halat kesit alanına oranı gibi birkaç kontrolün de yapılması gerekmektedir. Yukarıda izah edilen teknik konuların yanında ise yapının imalatının yapılacağı bölge ve ilgili bölgeden ürün temin edilebilecek üretici firmaların katalog bilgileri de halat seçimleri için büyük önem arz etmektedir.

Özetle, seçilen halat sayısı teknik ve teknik olmayan birçok parametreye bağlıdır. Çalışma kapsamında hazırlanan 3 farklı analiz tipi ise kesit gerilmelerinin kontrol edildiği iterasyonlar neticesinde seçilmiştir. Ayrıca, şartname tarafından sunulan geometrik kısıtların yerine getirilmiş oluşu da Bölüm 4.13'te kontrol edilmiştir.

#### 4.10. Analiz Çıktıları (Analysis Output)

Yapılan 3 farklı tip halat yerleşimlerine göre, 1 halatta bulunması gerekli çelik demet sayısı konusu irdelenmiştir. Beklendiği üzere, halat sayısı azaldıkça, 1 adet halatın içeriğini oluşturan çelik demet kesit alanı artmıştır. Tabliye kesitlerinde oluşan basınç ve çekme gerilme değerleri, izin verilen kapasite limitleri ile değerlendirilerek, her analiz tipi için gerekli olan halat metrajları hazırlanmıştır.

Aşağıdaki tabloda 3 farklı analize ait halat kullanım karelajı ve karelaja ait toplam çelik halat metraj bilgileri hazırlanmıştır. Kesit gerilmelerini dengeleyebilecek halat miktarı aşağıdaki tablodan da izleneceği üzere Analiz 1'de en yüksek, Analiz 3'te ise en düşük mertebelerde hesaplanmıştır.



**Tablo 4.** Çelik Halat Metrajı (Steel Strand Quantity)

	Halat	Adet	Alan	Birim Ağırlık	Toplam
			(mm <sup>2</sup> )	(kg/m)	(kg)
1	21x21	441	66150	1,18	35906,22
2	17x25	425	63750	1,18	34603,50
3	14x27	378	56700	1,18	30776,76

Yapılan analizlerin esas amacı çelik halat kullanımını irdelemek olduğu için tüm analizlerde aynı beton kesit kullanılmıştır. Açıklık ve mesnet bölgelerine ait boş ve dolu kesitler değerlendirilerek Tablo 5 elde edilmiştir.

**Tablo 5.** Beton Metrajı (Concrete Quantity)

Boşluklu Kesit		Dolu Kesit		Toplam
Uzunluk	Alan	Uzunluk	Alan	Beton Hacmi
(m)	(mm <sup>2</sup> )	(m)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>3</sup> )
7,76	60	10,00	9	555,60

#### 4.11. Özet Bilgiler (Summary Information)

Yapılan 3 tip analiz neticesinde gerekli olan halat sayıları ve 1 adet halatta bulunması gerekli olan çelik demet sayıları hesaplanmıştır. Ön germe çeliği metrajı ve beton metrajının birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilen özet tablo aşağıda sunulmaktadır;

**Tablo 6.** Gerekli Halat Sayıları ve Metrajları (Required Strand and Quantity)

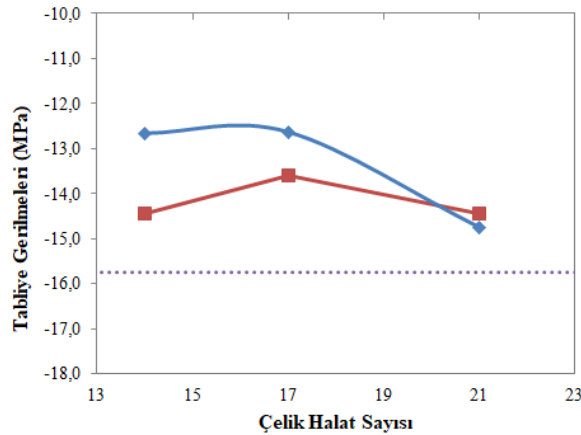
Analiz Adımı	Halat Sayısı	Çelik Demet Sayısı	Halat Metrajı (kg/m <sup>3</sup> )
Adım 1	21	21	64,63
Adım 2	17	25	62,28
Adım 3	14	27	55,39

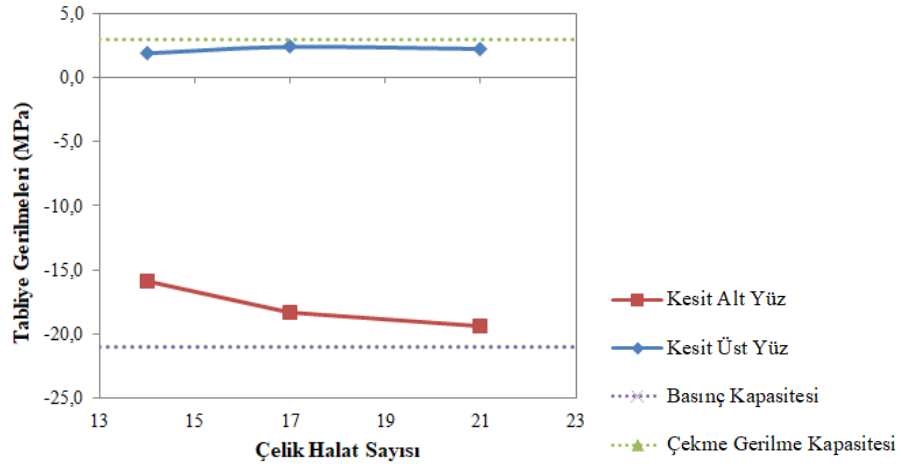
Tabliye kesitlerinde meydana gelen gerilmeler ise izin verilen kapasite limitleri ile kıyaslanarak, kesit gerilmeleri açısından problem oluşmadığı teyit edilmiştir. Bölüm 4.12’de sunulacak olan analiz sonuç görüntülerinde inşaat aşaması ve servis aşamasında elde edilen tabliye alt yüz & üst yüz kesit gerilmeleri gösterilmiştir.

#### 4.12. Değerlendirmeler (Evaluations)

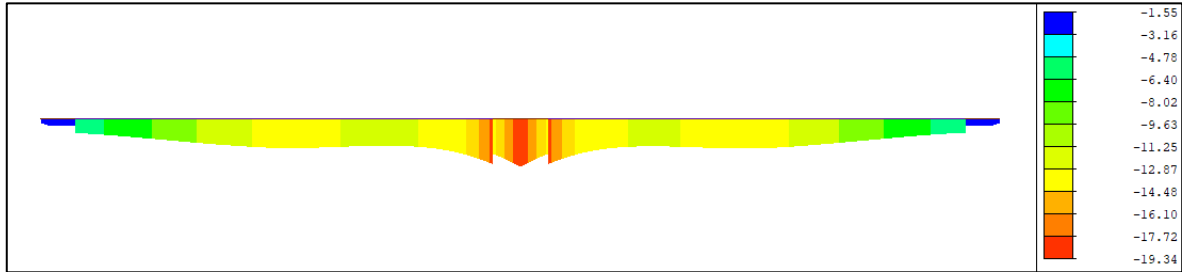
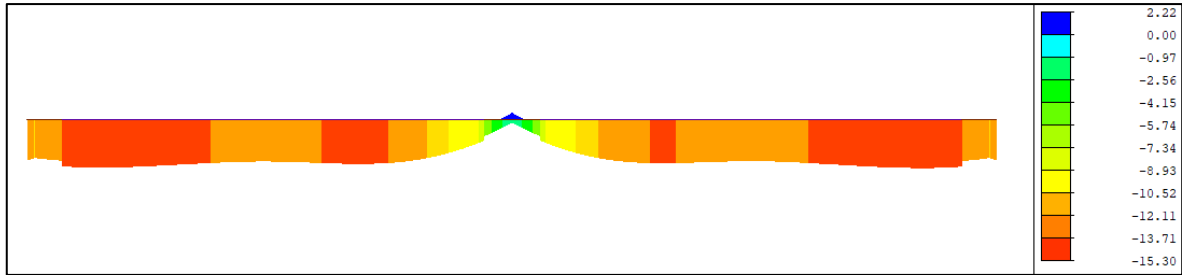
Adım 3 analizinde, aynı tabliye kesitinin gerilme güvenliği, daha az halat metrajı ile sağlanmıştır. Daha az sayıda halat kullanılarak daha efektif bir çözüm elde edilmiş olmasının sebepleri irdelendiğinde 2 önemli husus tespit edilmiştir; halat merkezlerinin tarafsızlık eksenine olan mesafesi ve zamana bağlı kayıplar.

Aşağıda sunulan grafiklerde tüm adımlarda elde edilen kesit gerilmeleri ve kapasite çizgileri gösterilmiştir. Sonuç olarak, tüm adımlarda seçilen halatların, izin verilen limitleri aşmadığı gösterilmiştir.

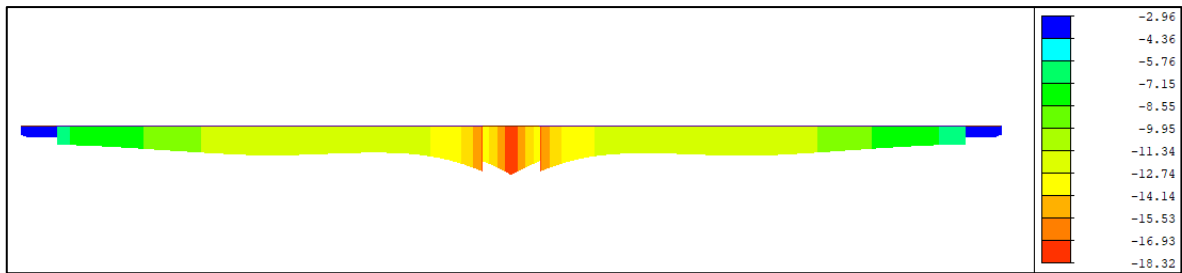
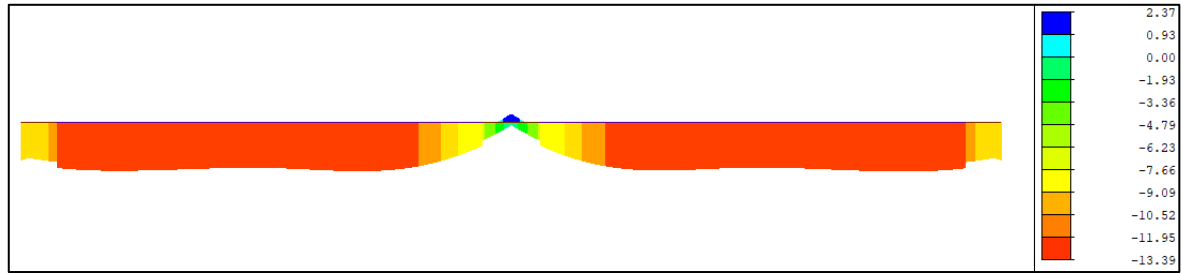
**Şekil 11.** İnşaat Aşaması Kesit Gerilmeleri (Construction Stage Stresses)



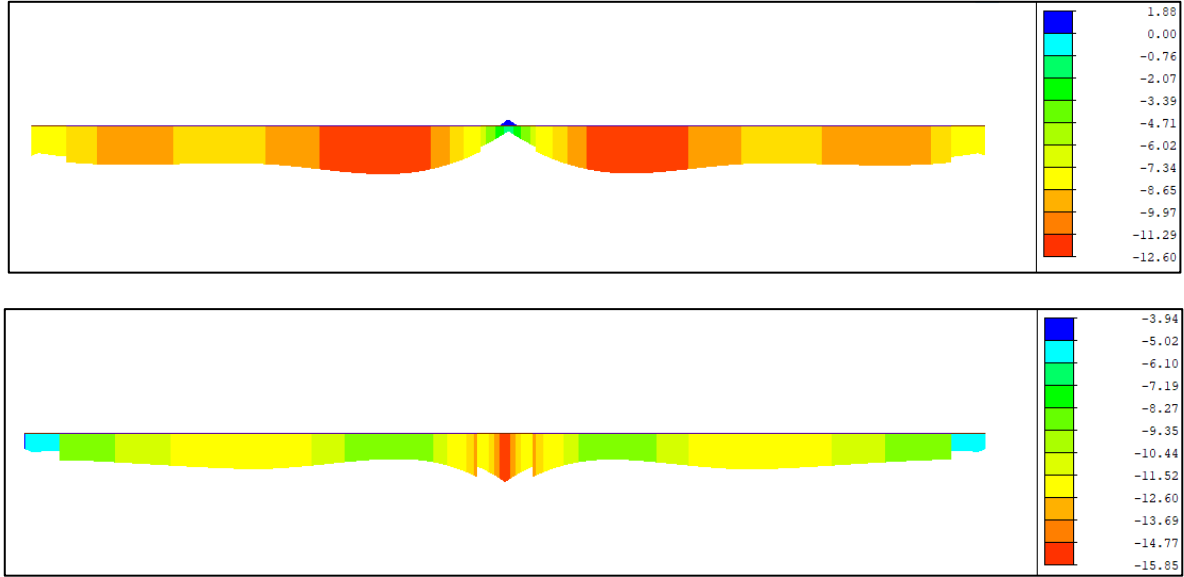
Şekil 12. Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (Service Stage Stresses)



Şekil 13. Analiz 1, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 1, Service Stage Stresses)



Şekil 14. Analiz 2, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 2, Service Stage Stresses)



Şekil 15. Analiz 3, Servis Aşaması Kesit Gerilmeleri (MPa) (Analysis 3, Service Stage Stresses)

#### 4.12.1. Halat Merkezlerinin Tarafsızlık Eksenine Olan Uzaklığı (Distance between strand centroid and section neutral axis)

Ön germe halatlarının ağırlık merkezlerinin, kesit yüzeylerine olan mesafeleri, gerilme karşılama kapasitelerini ciddi oranda değiştirmektedir. Tabliye boyut kesiti boyunca belirlenen halat yörüngesi, elde edilen kesit gerilmelerini takip etmektedir. Açıklık ortalarında, mümkün olduğunca alt yüzeye yakın, orta ayak aks bölgesinde ise mümkün olduğunca üst yüzeye yakın geçmektedir. Adım 1’de hazırlanan şemaya göre 3 sıra halatın merkezinin yüzeye mesafesi 40 cm, Adım 2’de 35 cm ve Adım 3’te ise 30 cm olarak belirlenmiştir. Bu durumda, en etkili halat yerleşim düzeni Adım 3’e aittir. Tüm adımlara ait şematik gösterim aşağıdaki grafikte sunulmaktadır;

Halatları birbirlerine daha fazla yaklaştırmak ve hatta birbirlerine bağlamak da ayrıca mümkün. “Bundled” adı verilen işlemlerde halatlar birbirlerine her 900 mm adımlarda ankre edilebilir. En fazla 3’er li gruplar halinde hazırlanabilir. İki farklı grup arası mesafe yatayda 100 mm ve düşeyde 38 mm yakınlıkta olabilir.

#### 4.12.2. Zaman Bağlı Kayıplar (Time Dependent Losses)

Zamana bağlı kayıplar; elastik deformasyon, sünme/büzülme ve gevşeme kaybı noktalarında incelenmiştir. Adım 1’den Adım 3’e doğru gidildiğinde halatlarda, meydana gelen kayıplar ciddi oranlarda azalmaktadır. Elastik deformasyon kayıpları incelendiğinde, kayıplarda meydana gelen azalmalar sırasıyla; % 30,44 ve % 31,63 mertebelerindedir. Sünme/büzülme ve gevşeme kayıpları tasarımı etkileyecek derecede farklılık göstermemektedir. Sonuç olarak, tüm kayıplardan sonra oluşan gerilmelerin ilk kayıplardan sonra oluşan gerilmelere oranı 3 adım için farklılık göstermektedir. Büyük oranda elastik deformasyonun sebep olduğu farklılık neticesinde Adım 3 analizinde meydana gelen kayıplar daha azdır. Bu durumun sonucu olarak, Adım 3 analizi daha efektif çalışmaktadır.

#### 4.13. Halat Yerleşimi ile İlgili Kısıtlamalar (Strand Layout Rules)

Bir önceki bölümde keşfedildiği üzere, halat sayısının azaltılması ve buna karşın 1 adet halatın içerisindeki çelik demetinin adetinin artırılması, tasarımı daha ekonomik hale getirmektedir. Ancak, hangi aşamaya kadar bu çözümün yapılması ayrıca araştırılmıştır. Bir başka deyişle, kesitteki halat sayısı ne kadar azaltılabilir veya 1 adet halat en fazla kaç demetten oluşturulabilir sorularına ait kısıtlamalar, şartnamenin ilgili bölümlerinde araştırılmıştır.

Şartname tarafından sunulan bilgiler ışığında, çoklu halat sistemlerinde, halat tüpüne ait kesit alanı, tüpün içerisinden geçirilecek çelik demetlerin toplam alanının en az 2 katı kadar olmalıdır. En fazla demet alanı kullanılan Adım 3’e ait kontrol aşağıda sunulmaktadır;

Halat Tüpü Çapı: 120 mm  
 Halat Tüpü Alanı: 11309 mm<sup>2</sup>  
 27 Demet Çelik Halat Alanı: 4050 mm<sup>2</sup>

$$11309 \text{ mm}^2 > 2 \times 4050 = 8100 \text{ mm}^2$$

Sonuç, seçilen halat tüpü çapı yeterlidir.

## 5. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Çalışma kapsamında, seçilen halat karelağının önemi, etkileri ve getirdiği ekonomik sonuçlar araştırılmıştır. Yapılan iterasyonlar neticesinde 3 farklı adette ve karelağda çelik halat kullanımının ve seçilen halat sayısına uygun adette kullanılan çelik demetlerin kesit güvenliğini sağlanması amaçlanmıştır. Yapılan analizler neticesinde, kesit güvenliği sağlanırken azaltılan halat sayısının ve buna karşın gereken daha fazla sayıda çelik demet kullanımının etkili olduğu durum tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında, tüm analizlerde şartnamenin sunmuş olduğu geçici durum ve servis durumu kesit gerilme limitlerine uyulmuştur. Kesit güvenliği açısından tüm iterasyonlar uygundur ancak Analiz 3’de kullanılan çelik halat metrajı ( $55,39 \text{ kg/m}^3$ ) diğer analizlere kıyasla daha makul ve daha efektif olarak hesaplanmıştır.

Analizi 3’ün daha efektif olmasının 2 ana sebebi tespit edilmiştir. Birincisi, halat yörüngesinin köprü boy kesiti boyunca daha etkin bir yörünge çizmesidir. Halatların ağırlık merkezleri, çekme tesirlerinin oluşacağı kesit yüzeylerine yakınlaştırıldıkça, elde edilen ön germe kuvveti daha efektif olacaktır ve kesiti daha etkin bir ön basınca yönlendirecektir. Raporun önceki bölümlerinde sunulan Şekil 8’de de görüleceği gibi Analiz 1’de açıklık ortasından alınan halat kesitinde, halat ağırlık merkezlerinin kesit alt yüzüne olan mesafesi 40 cm iken, Analiz 3’te halat merkezleri kesit yüzeyine 30 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Analiz 3’ü daha makul bir çözüm olarak gösteren ikinci ana sebep ise ön germe kayıplarının daha makul seviyelerde oluşudur. Kullanılan halat sayısı arttıkça, elde edilen ön germe kayıp miktarı artmaktadır ve ön germe etkisi de aynı oranda azalmaktadır. Analiz 3’te kullanılan ön germe halatlarının daha az sayıda oluşu, ön germe kalitesini artırmaktadır.

Bu çalışma, betonarme ard-germeli köprü teknolojisinin, köprü üstyapılarında uygulandığını kısaca özetlemiştir. Sonlu elemanlar yazılımları ile hazırlanmış olan analiz modelleri ile tasarımı etkileyen en ciddi konulardan biri olan çelik halat seçimleri konusu irdelenmiştir. Tasarımcı için farklı oranlardaki çelik halat kullanım kombinasyonları ile güvenli tasarım sunmak mümkündür ancak “en iyi” tasarıma ulaşmak ciddi bir optimizasyon ve yeterli sayıda iterasyon çalışması gereklidir. Çalışmanın ana teması özetleyen “en iyi” ürün arayışı, tasarımcıyı en güvenli ürüne en ekonomik seçimlerle ulaştırmaya yöneliktir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

## Kaynaklar (References)

- A. Ghallab, 2013, “Calculating ultimate tendon stress in externally prestressed continuous concrete beams using simplified formulas” *Engineering Structures*, 46, 417-430.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design. Washington, DC.
- G. Ranzi and A. Ostinelli, 2017, “Ultimate behaviour and design of post-tensioned composite slabs” *Engineering Structures*, 150, 711-718.
- J. D. Chaitanya Kumar and L. Venkat, 2013, “Genetic algorithm based optimum design of prestressed concrete beam” *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3, 644-654.
- M. A. Pisani, 2018, “Behaviour under long-term loading of externally prestressed concrete beams” *Engineering Structures*, 160, 24-33.
- M. A. Utrilla and A. Samartin, 1991, “Optimized design of the prestress in continuous bridge decks” *Computers and Structures*, 1, 719-728.
- M. S. Kim, and Y. H. Lee, 2016, “Flexural behavior of posttensioned flat plates depending on tendon layout” *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 11.
- O. F. Hussien, T. H. K. Elafandy, A. A. Abdelrahman, S. A. Abdel Baky, and E. A. Nasr, 2012, “Behavior of bonded and unbonded prestressed normal and high strength concrete beams” *HBRC Journal*, vol. 8, 239-251.
- P. Fanning, 2001, “Nonlinear models of reinforced and posttensioned concrete beams” *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2, 111-119.
- W. Marks, W. Trochymiak 1991, “The selection of a system of prestressing tendons in hyperstatic beams as a problem of linear integer programming” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 3, 59-67.