

## Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Mevcut bir Köprü'nün Yapısal Performans Davranışının Belirlenmesi

Özlem ÇAVDAR<sup>1\*</sup>, Osman SARIGÜN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, Gümüşhane

<sup>2</sup>Karayolları 101. Şube Şefliği, Gümüşhane

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5459-0769>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9470-8610>

\*Sorumlu yazar: ozlemcavdar@gumushane.edu.tr

### Araştırma Makalesi

### ÖZ

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 01.02.2024

Kabul tarihi: 21.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Malzeme deformasyonları

Öngerme kiriş

Sonlu eleman analizi

Üstyapı tasarım esasları

Yapım aşaması

Türkiye'de öngermeli kirişlerin hesap ve tasarım esaslarında; kabul gören uluslararası Köprü Tasarım Yönetmeliği (American Association of State Highway and Transportation Officials\_ AASHTO), Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi ve TS 3233 (1979) yönetmeliği kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında bu yönetmelikler çerçevesinde üstyapı tasarım esaslarıncı model güvenilirliği belirlenen Gümüşhane İli Şiran İlçesi'nde yer alan üç açıklıklı, öngerme kirişli, betonarme yapıya sahip Çirmiş Köprüsü model olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı; öngerme kiriş yöntemiyle inşa edilen karayolu köprüsünün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonları etkisini belirlemektir. Bu amaçla gerçekleştirilecek olan sonlu eleman analizleriyle yapı elemanlarında ortaya çıkacak olan kesit tesirleri karşılaştırılacaktır. Ayrıca, doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi ile tasarımı yapılan köprü'nün, deprem altındaki performansı incelenmiştir. Yapının performans analizi, Karayolları Genel Müdürlüğü Sanat Yapıları Daire Başkanlığı'nın Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri için Mayıs ayı Taslak raporundaki kriterlere göre belirlenmiştir. Statik ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analizler neticesinde köprü tabliye uzunluğu ve ayak yüksekliğince elde edilen normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri karşılaştırılarak zamana bağlı malzeme deformasyonlarının ve inşa süresinin önemi ele alınarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda öngerme kiriş yöntemiyle inşa edilen köprü tasarımlarının sadece servis durumunu dikkate alacak şekilde değil yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınarak çözümlenmesi gerektiği belirlenmiştir.

## Determination of Structural Performance Behavior of an Existing Bridge Considering Construction Stages

### Research Article

### ABSTRACT

#### Article History:

Received: 01.02.2024

Accepted: 21.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Material deformations

Prestressing beam

Finite element analysis

Superstructure design

The construction phase

In the calculation and design principles of prestressed beams in Turkey; The internationally accepted Bridge Design Regulation (American Association of State Highway and Transportation Officials\_ AASHTO), the Republic of Turkey Technical Specification for Highways and Road Bridges and the TS 3233 (1979) regulation are used. Within the scope of the study, the three-span, pre-stressed beam, reinforced concrete Çirmiş Bridge located in Gümüşhane Province Şiran District, whose model reliability is determined by the superstructure design principles within the framework of these regulations, was determined as the model. The purpose of this study; To determine the effect of construction stages and time-dependent material deformations on the structural behavior of the highway bridge built with the prestressing beam method. With the finite element analyzes to be carried out for this purpose, the cross-sectional effects that will

occur in the structural elements will be compared. Additionally, the performance of the bridge, which was designed using the non-linear static pushover analysis method, under earthquake was examined. The performance analysis of the structure was determined according to the criteria in the May Draft report for Highway and Railway Bridges and Viaducts of the General Directorate of Highways, Department of Artistic Structures. As a result of static and non-linear construction phase analyses, the normal force, shear force, bending moment and displacement values obtained by the bridge deck length and pier height were compared and the importance of time-dependent material deformations and construction period were examined. As a result of the study, it was determined that bridge designs constructed with the prestressing beam method should be analyzed not only by taking into account the service condition, but also by taking into account the construction stages and time-dependent material deformations.

**To Cite:** Çavdar Ö., Sarıgün O. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Mevcut bir Köprünün Yapısal Performans Davranışının Belirlenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 116-144.

## 1. Giriş

Yapısal çözümleme yöntemlerinin tasarım için gereklilik arz etmesi ve buna bağlı olarak teknolojinin ilerlemesiyle birlikte önemli gelişmeler elde edilmiştir. Geleneksel yapı çözümlerinde köprüler gibi teknik yapıların değişkenlik gösteren yükler altındaki davranışlarının saptanmasında sonlu eleman analizlerinden faydalanılmaktadır. Ancak sonlu elemanlar analizinde, yapının yapım aşamaları ve bu işlem sırasında ve sonrasında meydana gelen malzeme deformasyonları dikkate alınmadan, yapının anlık olarak inşa edildiği ve tamamlandığı kabul edilmektedir. Ancak, bu tür teknik yapıların inşası uzun zaman almaktadır. Ayrıca yapıya etkileyen yükler inşaat aşamasında ve sonrasında değişmektedir. Zamana bağlı olan malzeme özellikleri; beton için basınç dayanımı, yaşlanması, sünmesi ve büzülmesi, çelik için gevşemesidir. Örneğin beton döküldükten sonra zamanla mukavemet kazanacağı için 7 günlük, 14 günlük, 28 günlük veya daha fazla gün değişiminin dikkate alınması gerekmektedir. Betonun yaş halinden ekonomik ömrünü doldurmasına kadar yapısında meydana gelen değişimler göz önünde bulundurularak gelecekte oluşabilecek hatalar önlenmeye çalışılabilir.

İnşaat aşamalarının da dikkate alınması yapıyı meydana getiren elemanların iç kuvvetlerini ve yer değiştirmelerini önemli ölçüde etkiler. Bu etkinin meydana getirdiği farklılıklar; söz konusu elemanın türü ve konumu dışında, malzeme tipine, geometrisine, yüklerin uygulama sırası ve türüne ve de mevsimsel koşullara bağlıdır.

Literatürde geçmişten günümüze karayolu köprülerinin yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Cruz ve ark., (1998) çalışmalarında üç açıklıklı, öngermeli, betonarme, kutu kirişli köprü modeli tasarlayıp köprünün adım adım inşa aşamaları ile yapısal malzemenin zamansal etkilerini de ele alarak çözümlerini yapmışlardır. Wang ve ark., (2004) dengeli konsol tekniği ile inşa edilen kablolu köprülerin yapım aşamalarını göz önüne alarak yapısal davranışlarını belirlemişlerdir. Karakaplan ve ark., (2009) yapısal çözümlerinin daha hassas sonuçlar verebilmesi için yapı analizlerinde klasik yapı çözümleri ile inşa aşamaları sırasında meydana gelen geometri ve malzeme dayanım değişimlerinin göz önüne alınarak analiz edilen gelişmiş yapı çözümleri arasındaki farklılıkları belirtmişlerdir. Altunışık ve ark., (2010) dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen otoyol köprülerinin yapım aşaması analizi üzerine

çalışmışlardır. İnşa aşamaları olmadan yapılan analizlerin güvenilir çözümler sunmayacağını belirtmişlerdir. Çavdar ve ark., (2010) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kablolar ile yapılmış uzun açıklıklı köprülerin stokastik sismik analizi, pertürbasyon tabanlı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM) ve Monte Carlo simülasyonu (MCS) yönteminin avantajlarının birleştirilmesi yoluyla incelemişlerdir. Martins ve ark., (2015) yapısal analizin, yapım aşamasına bağlı yük geçmişini, geometri değişikliklerini ve betonun sünme, büzülme ile birlikte yaşlanmasına bağlı gerçekleşen zamansal etkiler içerdiğini söylemişlerdir. Bu amaçla modelledikleri 144 m uzunluğunda, 14 m genişliğinde, 16 adet kabloya sahip betonarme köprüye dair gerçekleştirilen analizler ile hem inşaat aşamalarını hem de zamana bağlı etkileri göz önünde bulundurmanın önemini ortaya koymuşlardır. Traykov ve Boiadjieva (2015) zamana bağlı malzeme özellikleri ve inşaat aşamalarının dikkate alınması gerekliliği üzerine 6 ve 7,20 m açıklıklarına sahip, 3 m kat yüksekliği olan bir yapı modellemişlerdir. Analizlerinin sonucunda sıradan bir düzlem çerçevesi ele alınarak modellenen bir yapıda dahi inşaat aşamaları sırasında yapı elemanlarında tasarlandığından daha yüksek olan büyüklükte yer değiştirme ve iç kuvvet değerleri verdiği için dolayı yapı tasarımlarında zamana bağlı malzeme özelliklerini de içeren yapım aşamalarının dikkate alınması gerektiğini ortaya çıkarmışlardır. Çavdar ve ark., (2015) Türkiye'nin doğusunda Elazığ-Malatya karayolunun 51. km'sinde bulunan Kömürhan Köprüsü sayısal örnek olarak seçmiş oldukları çalışmalarında, 1992 Erzincan depremi, köprü'nün yakınında meydana geldiğinden yer hareketi olarak kabul edilmiştir. Malzeme özellikleri rastgele değişkenler olarak kabul edilmiştir. Stokastik analiz sırasında, söz konusu köprü'nün yer değiştirmeleri ve iç kuvvetleri, pertürbasyon tabanlı stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılarak verilmiştir. Leite ve ark., (2016) öngerme kiriş yöntemi ile inşa edilen iki açıklıklı bir köprü tasarlayıp gerçekleştirdikleri analizler sonucu inşaat aşamaları göz önüne alındığında özellikle eğilme momentlerinin büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Hatta negatif eğilme momentlerinde %60'dan büyük farklılıklar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Wang ve ark. (2020) asma köprülerin yapım süreçleri boyunca sıcaklık, basınç, anlık deformasyon gibi doğrusal olmayan davranışların yapıya temas etmesinden dolayı sürekli yüklemelere maruz kaldığını söylemişlerdir. Belwal ve ark. (2023) denge konsol yöntemiyle inşa edilen kutu kirişli köprü'nün yapım aşamalarını, sıcaklık değişimini ve yapıya etkiyen ölü ve hareketli yükleme koşullarını dikkate alarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapım aşamalı analizin, inşaat süresinin uzun olması ve yük değerlerinin süre boyunca değişebilmesi nedeniyle geleneksel analitik yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Çavdar ve Şener (2022) çalışmalarında AASHTO'ya göre dengeli bir konsol köprü tasarlamışlardır. Tasarımını yaptıkları dengeli konsol köprü'nün malzeme deformasyonlarını dikkate alarak yapım aşamalı analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda yapım aşamalı analiz sonuçları statik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapım aşaması ele alınarak gerçekleştirilen çözüm metodunda meydana gelen sonuçlar %14 daha yüksek eğilme momenti ortaya çıkarmıştır. Orgnoni ve ark. (2022) Cenova'da bulunan, şehrin simgelerinden biri olan 51 yıllık Morandi Köprüsü'nün yıkılmasından sonra köprü'nün çökme anında

yapının ömrü boyunca maruz kaldığı gerilme ve yükleme durumunun anlaşılabilmesi için öncelikle hem yapım sırasının hem de yükleme yükünün yeniden oluşturulması gerektiğini söylemişlerdir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Uygulama Modeli (Karayolu Köprüsü)

Çalışmada Gümüşhane İli Şiran İlçesi ile Giresun İli Alucra İlçesi'ni Çirmiş suyu ile birleştiren karayolunun kesiştiği noktada geçişi sağlayan Çirmiş Köprüsü model olarak seçilmiştir. Köprü konumu Şekil 1'de görseli ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Köprü'nün malzeme ve geometrik özellik verileri Karayolları Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Köprü üstyapısı tabliyeler ve öngermeli kirişlerden oluşmaktadır. Açıklıkları 32 metre olan köprü'nün toplam uzunluğu 96 metredir. Köprü genişliği ise 18 metredir. Köprü 1x2 şeritli (çift yönlü yol) trafik akışını sağlamaktadır. Platform genişliği 12 metre olup her iki platform yanında 3 metre tretuvar vardır. Köprü kenar ayakları 5,72 m yüksekliğe sahip olup perde tipindedir. Kenar ayakları, kesit alanı  $25 \times 10 \text{ m}^2$  ve derinliği 1,5 m olan betonarme kütle betondur. Ayrıca köprü'nün 8 ayak ve 2 kenar ayağı olmak üzere 10 ayağı tabliyenin ana taşıyıcı sistemlerini oluşturmaktadır. P1 ekseninde yer alan 4 adet ayak 6,60 m yüksekliğinde, P2 ekseninde yer alan 4 adet ayak ise 5,60 m yüksekliğindedir. Ayaklar  $2,5 \times 1 \text{ m}^2$  kesit alanına sahip, temeller ise  $25 \times 8 \text{ m}^2$  kesit alanına ve 1,5 m derinliğe sahip kütle betondur. Ayaklar inşa edildikten sonra öngerilmeli betonarme kirişleri yerine koymak için inşa edilen başlık kirişleri, kesit alanı  $1,5 \times 1,10 \text{ m}^2$  ve uzunluğu 18 m olan kütle betondur (Şekil 3).

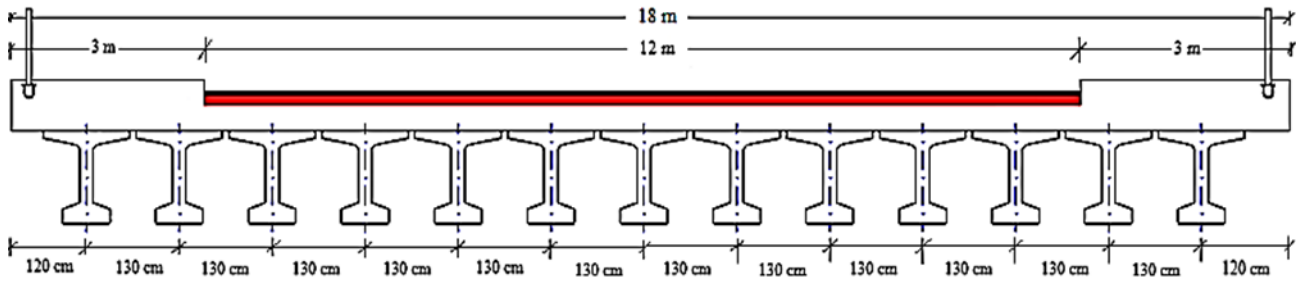
Köprü üstyapısındaki ön üretimli köprü kirişleri I-profillerden oluşmaktadır. Köprü kirişleri, köprü'nün bir ucundan diğer ucuna uzunlamasına bir yönde sürekli olarak uzanır. Profilin üst başlığının kalınlığı 10 cm, alt başlığın kalınlığı 20 cm'dir. Profil yüksekliği 130 cm, üst başlığın genişliği 127,5 cm ve alt başlığın genişliği 70 cm'dir. Her platformda 13 kiriş bulunmaktadır. İlgili ayrıntılar Şekil 4'te gösterilmektedir. Tabliye için 25 cm kalınlığında döşeme betonu tamamlanarak 6 cm asfalt kaplama yapılacaktır. Ayrıca Şekil 5'te görüldüğü gibi başlık kirişi ile öngerilmeli kirişlerin bağlantısı elastomer mesnetler ile sağlanmaktadır.



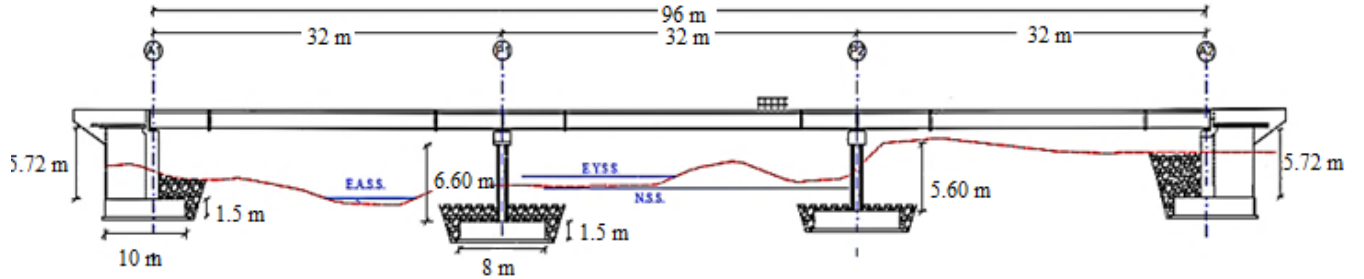
Şekil 1. Köprü Konumu



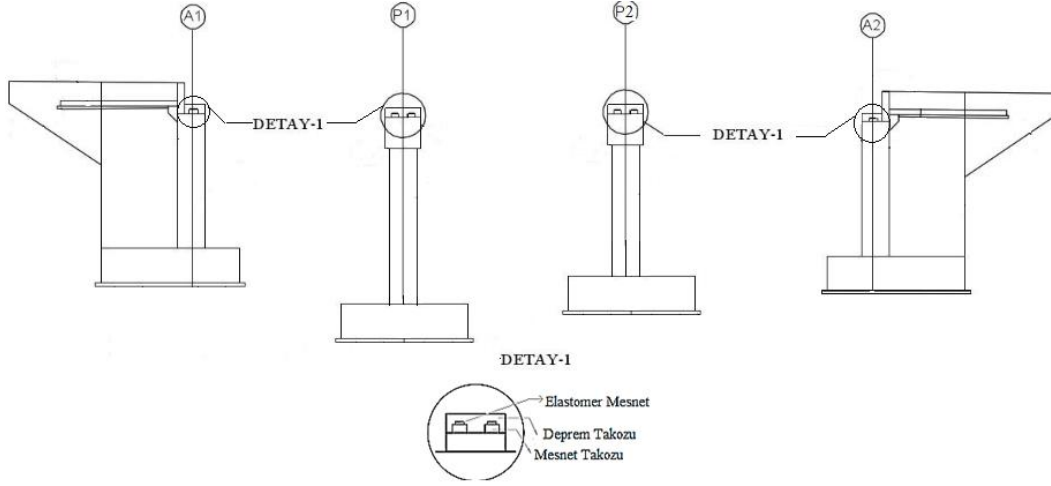
Şekil 2. Çirmiş Köprüsü



Şekil 3. Köprü Enkesiti



Şekil 4. Köprü Boykesiti



Şekil 5. Elastomer Mesnet Yerleşimi

## 2.2. Üstyapı Tasarım Esasları

Ülkemizde hâlihazırda köprü tasarımına dair geniş kapsamlı bir yönetmelik bulunmadığından dolayı karayolu köprülerinin tasarımında, “American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)” tarafından yayınlanmış, “Standard Specifications for Highway Bridges” adlı yönetmelik kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Kiriş geometrik özellikleri

Öngermeli kirişlerin boyutlandırılıp köprü üstyapı hesaplarının yapılabilmesi için öncelikli olarak projelendirilecek kirişin enkesit alanı, ağırlık merkezi, atalet ve mukavemet momentleri gibi bazı kesit

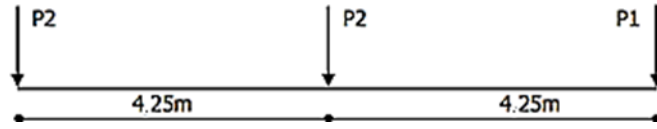
özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Köprü üstyapısını meydana getiren öngermeli kirişler ve köprü tabliyesi köprüye etkileyen yükleri yükleme aşamalarına göre öngermeli kirişler tek başına veya köprü tabliyesi ile birlikte taşımaktadır. Bu durumda öngermeli kirişin yalnızca çalıştığı kesite ön üretimli kesit, tabliye ile çalıştığı kesite ise kompozit kesit adı verilmektedir. Tablo 1 'de ön üretimli kiriş ve kompozit kirişe ait geometrik özellikler verilmiştir.

**Tablo 1.** Ön Üretimli Kiriş ve Kompozit Kiriş Geometrik Özellikleri

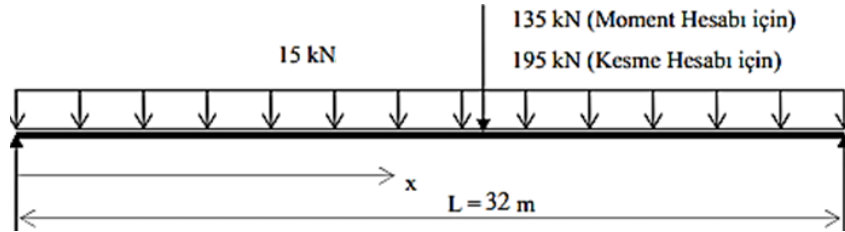
| Kiriş Tipi  | Enkesit Alanı      | Ağırlık Merkezi  |                  | Atalet Momenti     |                 | Mukavemet Momenti  |                |
|-------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
|             | (cm <sup>2</sup> ) | (cm)             |                  | (cm <sup>4</sup> ) |                 | (cm <sup>3</sup> ) |                |
|             | A                  | y <sub>alt</sub> | y <sub>üst</sub> | I <sub>xb</sub>    | I <sub>yb</sub> | W <sub>b</sub>     | W <sub>t</sub> |
| Ön Üretimli | 0,5538             | 0,7048           | 0,5952           | 0,12470            | 0,03018         | 0,17692            | 0,20951        |
| Kompozit    | 0,8190             | 0,9380           | 0,6120           | 0,21909            | 0,05505         | 0,23356            | 0,60527        |

### 2.2.2. Kirişte oluşan kesit tesirleri

Öngermeli kirişlerin, tasarım hesaplarında basit bir mesnet olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Bu durumda köprü üstyapısına etkileyen kiriş zati ağırlığı, tabliye ağırlığı ve de kaplama, korkuluk gibi ek ağırlıklar düzgün yayılı yük olarak etkilmiştir. Hareketli yükler ise Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterildiği gibi tesir ettirilerek kesit tesirleri hesaplanmalıdır. Şekil 4'te standart kamyon yük sınıfı olarak H30-S24 kamyon yükü alınmıştır. P1 ön teker yükü 56,22 kN, P2 arka teker yükü ise 224,90 kN olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 6.** Standart Kamyon Yükü Uygulanması (AASHTO, 2015).



**Şekil 7.** Eşdeğer Şerit Yükü Uygulanması (AASHTO, 2015).

### 2.2.3. Öngerme Kablo Sayısı

Kirişe yerleştirilecek öngerme kablo miktarının tespiti servis yüklemesi altında kiriş açıklık ortasında ve kiriş alt kenarındaki gerilmeler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Servis yüklemesi ise kirişe uygulanan bütün yüklerin mevcut olduğu durumu ifade etmektedir. AASHTO 9.15.2.2'ye göre açıklık ortasında izin verilen çekme gerilmesi Denklem 1'de verilen bağıntıyla +3,354 MPa ile sınırlanmıştır.

Kiriş açıklık ortası alt kenarında kayıplardan sonra öngerme kablolarınca alınacak kuvvet Denklem 2’de gösterilirken, öngerme kablo sayısının formülasyonu Denklem 3’te verilmiştir.

$$\frac{M1(\text{zati}) + M2(\text{tabliye})}{W_b} + \frac{M3(\text{ilave}) + M4(\text{max,hareketli})}{W_{cb}} + \sigma_b \leq + 3,354\text{Mpa} \quad (1)$$

Bu denklemde, M1 kiriş zati ağırlığından meydana gelen moment tesirlerini, M2 tabliye ağırlığından meydana gelen moment tesirlerini, M3 ilave yüklerden (kaplama, bordür, korkuluk ve yaya yükleri) meydana gelen moment tesirlerini, M4 maksimum hesaplarda kullanılacak hareketli yüklerden meydana gelen moment tesirlerini,  $W_b$  kiriş alt noktasına göre mukavemet momentini,  $W_{cb}$  kompozit kiriş alt noktasına göre mukavemet momentini ifade etmektedir.

$$\sigma_b = - \frac{P_s}{A} - \frac{P_s \times e}{W_b} \quad (2)$$

Bu denklemde,  $\sigma_b$  tüm kayıplardan sonra kiriş alt lifinde gerekli öngerme gerilmesini,  $P_s$  kiriş açıklık ortası alt kenarında kayıplardan sonra öngerme kablolarınca alınacak kuvveti,  $e$  kablo eksantrisitesini,  $A$  kesit alanı ifade etmektedir.

$$N = \frac{P_s}{P1 \times (1-\text{Kayıp Oranı})} \quad (3)$$

Bu denklemde  $N$  kablo sayısını,  $P1$  müsaade edilen ilk öngerme kuvvetini ifade etmektedir.

Bu denklemler kullanılarak gerekli öngerme kablosu sayısı ( $N$ ), 32 adet olarak belirlenmiştir.

#### 2.2.4. Öngerme Kayıpları

Öngermeli ön üretilmiş kirişlerde meydana gelen öngerme kayıplarının hesapları AASHTO 9.16.2'ye göre yapılacaktır. Toplam kayıp ( $f_s$ ) Denklem 4’te verilmiştir.

$$f_s = SH + ES + CR_c + CR_s \quad (4)$$

Burada,  $f_s$  Toplam öngerme kaybını,  $CR_c$  betonun sünmesinden meydana gelen öngerme kayıplarını,  $CR_s$  öngerme çeliğinin gevşemesinden meydana gelen öngerme kayıplarını,  $ES$  betonun elastik kısılmasından meydana gelen öngerme kayıplarını,  $SH$  betonun rötresinden meydana gelen öngerme kayıplarını gösterir.

Yukarıda verilen bütün kayıplar meydana geldiğinde toplam kayıp ( $f_s$ ), % 22,84 olarak bulunmuştur.

#### 2.2.5. Gerilme kontrolleri ve öngerme kablolarının kılıflanması

Öngermeli kirişlerde betona öngerme kuvveti aktarıldıktan sonra başlangıç öngerme kuvveti ve kayıplardan sonra gerçekleşecek efektif öngerme kuvvetleri bulunduğundan sonra mesnet eksenine ve açıklık ortasındaki gerilmeler hesap edilip öngerme kablolarının kılıflanmasına karar verilecektir. Başlangıç



öngerme kuvveti Denklem 5'te, kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvveti Denklem 6'da gösterilmiştir.

$$P_i = \text{Toplam Kablo Sayısı} \times P_1 \times (1 - \text{Elastik Kısılma Kaybı}) \quad (5)$$

$$P_e = \text{Toplam Kablo Sayısı} \times P_1 \times (1 - \text{Toplam Kayıp}) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde,  $P_i$  başlangıç öngerme kuvvetini,  $P_e$  kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvvetini göstermektedir.  $P_i$  başlangıç öngerme kuvveti 5767,64 kN,  $P_e$  kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvveti 4827,38 kN olarak hesaplanmıştır.

### 2.2.6. Kesit gerilmelerinin kontrolü

Kesit gerilmeleri kirişin yükleme aşamalarına göre dört aşamada tahkik edilecektir.

1. Yükleme durumu, öngerme kuvvetinin uygulandığı aşamadır. Sadece kiriş zati ağırlığı mevcuttur. Kayıplar minimum düzeydedir ve kayıplardan sonra kesitlerde meydana gelen gerilmeler, Denklem 7'de alt lifteki ve Denklem 8'de üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1}{W_b} < 20250 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1}{W_t} > -3602 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

2. Yükleme durumu, 1. aşamaya ilaveten döşeme betonu ağırlığı da ön üretimli kiriş tarafından taşınmaktadır. Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 9'da alt lifteki ve Denklem 10'da üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1 + M_2}{W_b} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1 + M_2}{W_t} > -\frac{3354,1 \text{ kN}}{\text{m}^2} \quad (10)$$

3. Yükleme durumunda hareketli yükler dışındaki tüm yükler var olup kiriş ve tabliye ağırlıklarının ön üretimli kesit, ilave zati yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilmiştir. Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 11'de alt lifteki ve Denklem 12'de üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1 + M_2}{W_b} - \frac{M_3}{W_{cb}} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1 + M_2}{W_t} + \frac{M_3}{W_{cb}} > -3354,1 \text{ kN/m}^2 \quad (12)$$

4. Yükleme durumu en son aşamadır. Hareketli yük dahil tüm yükler mevcuttur. Kiriş ve döşeme ağırlıklarının ön üretimli kesit, ilave zati yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilmiştir.

Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 13'te alt lifteki ve Denklem 14'te üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{alt} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M1+M2}{W_b} - \frac{M3+M4}{W_{cb}} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (13)$$

$$\sigma_{üst} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M1+M2}{W_t} + \frac{M3+M4}{W_{cb}} > -3354,1 \text{ kN/m}^2 \quad (14)$$

Öngermeli kirişin 4 yükleme durumuna göre kılıflama yapıldıktan sonra ön üretimli kesitte meydana gelen gerilme tahkikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Öngermeli kirişte kılıflamadan sonra oluşan kesit gerilmeleri

| <b>Öngermeli kirişte kılıflamadan sonra oluşan kesit gerilmeleri</b> |          |          |          |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| x (metre) =  | 0L       | H/2      | 0,1L     | 0,2L     | 0,3L     | 0,4L     | 0,5L     |
|  | 0,00     | 0,65     | 3,20     | 6,40     | 9,60     | 12,80    | 16,00    |
| Yük Değerleri  |          |          |          |          |          |          |          |
| M1 (kNm)   | 0        | 140,68   | 637,93   | 1134,10  | 1488,51  | 1701,15  | 1772,03  |
| M2 (kNm)   | 0        | 87,95    | 398,78   | 708,94   | 930,48   | 1063,40  | 1107,71  |
| M3 (kNm)   | 0        | 58,64    | 265,88   | 472,68   | 620,39   | 709,02   | 738,56   |
| M4 (kNm)   | 0        | 134,93   | 631,58   | 115,97   | 1453,16  | 1643,46  | 1791,16  |
| <b>Yükleme Durumu - 1</b>  |          |          |          |          |          |          |          |
| Alt Lifte < 20250 kN/m <sup>2</sup>                                  |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_i / A_p$  | 5858,94  | 6509,15  | 6509,15  | 7810,98  | 9112,82  | 10414,66 | 10414,66 |
| $P_i \times e_p / W_b$   | 10362,00 | 11674,96 | 11674,96 | 14303,34 | 16687,25 | 18810,36 | 18810,36 |
| $M1 / W_b$   | 0,00     | 795,16   | 3605,75  | 6410,24  | 8413,46  | 9615,36  | 10016,00 |
| $\Sigma\sigma$   | 16220,93 | 17388,95 | 14578,36 | 15704,07 | 17386,60 | 19609,66 | 19209,02 |
| <b>Yükleme Durumu - 1</b>  |          |          |          |          |          |          |          |
| Üst Lifte > -3602 kN/m <sup>2</sup>                                  |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_i \times e_p / W_t$   | 8750,15  | 9858,88  | 9858,88  | 12078,40 | 14091,49 | 15884,34 | 15884,34 |
| $M1 / W_t$   | 0,00     | 671,47   | 3044,87  | 5413,11  | 7104,72  | 8119,66  | 8457,97  |
| $\Sigma\sigma$   | -2891,21 | -2678,25 | -304,85  | 1145,68  | 2126,05  | 2649,98  | 2988,29  |
| <b>Yükleme Durumu - 2</b>  |          |          |          |          |          |          |          |
| Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>                                  |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_i \times e_p / W_b$   | 10362,00 | 11674,96 | 11674,96 | 14303,34 | 16687,25 | 18810,36 | 18810,36 |
| $M1 + M2 / W_b$  | 0,00     | 1292,28  | 5859,77  | 10417,36 | 13672,79 | 15625,99 | 16277,07 |
| $\Sigma\sigma$   | 16220,93 | 16891,83 | 12324,34 | 11696,95 | 12127,28 | 13599,03 | 12947,94 |
| Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup>                                |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_i \times e_p / W_t$   | 8750,15  | 9858,88  | 9858,88  | 12078,40 | 14091,49 | 15884,34 | 15884,34 |
| $M1 + M2 / W_t$  | 0,00     | 1091,26  | 4948,26  | 8796,91  | 11545,94 | 13195,31 | 13745,12 |
| $\Sigma\sigma$   | -2891,21 | -2258,46 | 1598,54  | 4529,48  | 6567,27  | 7725,63  | 8275,44  |
| <b>Yükleme Durumu - 3</b>  |          |          |          |          |          |          |          |

| Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>   |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $P_i \times e_p / W_b$                | 10362,00 | 11674,96 | 11674,96 | 14303,34 | 16687,25 | 18810,36 | 18810,36 |
| $M1 + M2 / W_b$                       | 0,00     | 1292,28  | 5859,77  | 10417,36 | 13672,79 | 15625,99 | 16277,07 |
| $M3 / W_{cb}$                         | 0,00     | 251,07   | 1138,38  | 2023,81  | 2656,23  | 3035,71  | 3162,19  |
| $\Sigma\sigma$                        | 16220,93 | 16640,76 | 11185,96 | 9673,15  | 9471,04  | 10563,32 | 9785,76  |
| Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup> |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_i \times e_p / W_t$                | 8750,15  | 9858,88  | 9858,88  | 12078,40 | 14091,49 | 15884,34 | 15884,34 |
| $M1 + M2 / W_t$                       | 0,00     | 1091,26  | 4948,26  | 8796,91  | 11545,94 | 13195,31 | 13745,12 |
| $M3 / W_{ct}$                         | 0,00     | 96,88    | 439,28   | 780,94   | 1024,98  | 1171,41  | 1220,22  |
| $\Sigma\sigma$                        | -2891,21 | -2161,58 | 2037,81  | 5310,42  | 7592,25  | 8897,05  | 9495,66  |
| Yükleme Durumu - 4                    |          |          |          |          |          |          |          |
| Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>   |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_e / A_p$                           | 4905,76  | 5448,01  | 5448,01  | 6537,62  | 7627,22  | 8716,82  | 8716,82  |
| $P_e \times e_p / W_b$                | 8676,22  | 9771,67  | 9771,67  | 11971,58 | 13966,84 | 15743,82 | 15743,82 |
| $M1 + M2 / W_b$                       | 0,00     | 1292,28  | 5859,77  | 10417,36 | 13672,79 | 15625,99 | 16277,07 |
| $M3 + M4 / W_{cb}$                    | 0,00     | 828,78   | 3842,52  | 2520,34  | 8878,02  | 10072,27 | 10831,14 |
| $\Sigma\sigma$                        | 13581,98 | 13098,63 | 5517,39  | 5571,49  | -956,75  | -1237,62 | -2647,57 |
| Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup> |          |          |          |          |          |          |          |
| $P_e \times e_p / W_t$                | 7326,61  | 8251,65  | 8251,65  | 10109,36 | 11794,25 | 13294,81 | 13294,81 |
| $M1 + M2 / W_t$                       | 0,00     | 1091,26  | 4948,26  | 8796,91  | 11545,94 | 13195,31 | 13745,12 |
| $M3 + M4 / W_{ct}$                    | 0,00     | 319,81   | 1482,74  | 972,54   | 3425,83  | 3886,66  | 4179,49  |
| $\Sigma\sigma$                        | -2420,85 | -1392,57 | 3627,36  | 6197,71  | 10804,74 | 12503,98 | 13346,62 |

Yükleme durumlarında verilen denklemler ile yapılan kontroller sonucunda, kılıflamadan sonra ön üretimli kirişte tüm yükleme durumlarında beton basınç gerilmeleri mesnet ekseninden kiriş orta noktasına kadar yer alan tüm bölgelerde emniyet gerilmelerinden daha küçük çıkmaktadır. Kiriş son durumdaki gerilmeler bakımından emniyetlidir.

### 2.2.7. Eğilme taşıma gücü kontrolü

Eğilme mukavemeti kontrolleri AASHTO 9.17'ye göre yapılacaktır. Ön üretimli ve kompozit kiriş için taşıma gücü açıklık ortası için hesaplanmıştır. Taşıma kapasitesi hesaplarında kesit içindeki betonarme donatılarının katkısı ihmal edilmiştir. Öngermeli kirişlere sahip köprülerde eğilme taşıma gücü, ön üretimli kesit ve kompozit kesit için ayrı ayrı olmak üzere her iki durum içinde hesaplanmalıdır. Ayrıca bir kesit için hesabı yapılan moment, normal kuvvet ve kesme kuvvetine dair taşıma gücü aşağıda belirtilen azaltma katsayıları ile çarpılarak boyutlandırmaya tabi taşıma gücü elde edilir. Eğilme taşıma gücü kontrolleri sonucunda eşdeğer basınç bloğu yüksekliğinin, tabla içinde kalıp kalmamasına göre kiriş kesiti, dikdörtgen ya da tablalı kesit olarak dikkate alınacaktır.

Boyutlandırmaya esas taşıma gücü, bir kesit için hesabı yapılan moment, normal kuvvet ve kesme kuvvetine dair taşıma gücünün aşağıda verilen azaltma katsayıları ile çarpılmasıyla ifade edilir. Taşıma

gücü azaltma katsayısı ( $\Phi$ ), öngermeli elemanların kesme taşıma gücü hesabında  $\Phi = 0,90$ , öngermeli elemanların eğilme taşıma gücü hesabında  $\Phi = 1,00$  olarak alınabilir (Aktaş, 2010).

AASHTO 9.17.4.1'e göre sınır yük durumunda öngörme kablosundaki ortalama gerilme,  $f_{su}^*$  Denklem 15'te hesaplanır. Ayrıca öngörme çeliği alanının beton alanına oranı Denklem 16'da verilmiştir.

$$f_{su}^* = f_s' \times [1 - (g^* / \beta_1) \times (p^* \times f_s' / f_c')] \quad (15)$$

$$p^* = A_s^* / (b \times d) \quad (16)$$

Bu denklemlerde,  $A_s^*$  öngörme donatıları toplam alanını,  $\beta_1$  beton mukavemet faktörünü,  $b$  etkili tabla genişliğini,  $b'$  ön üretimli kiriş gövde kalınlığını,  $d$  faydalı yüksekliği,  $f_s'$  öngörme çeliği kopma dayanımını,  $g^*$  öngörme çeliği tip faktörünü,  $f_c'$  28 günlük beton basınç dayanımını,  $p^*$  öngörme çeliği alanının beton alanına oranını,  $x$  öngörme kabloları merkezinin kiriş alt kenarına mesafesini ifade etmektedir. Dikdörtgen kesit hesabı için sağlanması gereken şart Denklem 17'de verilmiştir.

$$(A_s^* \times f_{su}^*) / (0.85 \times f_c' \times b) < t \quad (17)$$

Bu eşitlikte,  $t$  tabla yüksekliğini ifade etmektedir. Dikdörtgen kesit için moment taşıma kapasitesi Denklem 18'de belirtilmiştir.

$$\Phi M_n = [A_s^* \times f_{su}^* \times d \times (1 - 0.60 \times (p^* \times f_{su}^*) / f_c')] \times \Phi \quad (18)$$

Bu eşitlikte  $\Phi$ , taşıma kapasitesi azaltma katsayısı AASHTO 9.14'e göre öngermeli kirişler için 1,00'dır. Zati yükler ve hareketli yük birleşimlerinden oluşan faktörlü moment Denklem 19 ile ifade edilir.

$$M_u = 1.3 \times (M_{DL} + 1.67M_{LL}) \quad (19)$$

Bu eşitlikte,  $M_{DL}$  kiriş zati ağırlığı, tabliye, enleme kirişi yüklerinden dolayı oluşan momentlerin toplamını,  $M_{LL}$  araç yükünden dolayı açıklık ortasında oluşan momenti belirtmektedir.

Kompozit ve ön üretimli kiriş kesitleri için eğilme taşıma gücü kontrolleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Moment taşıma kapasitesi, zati ve hareketli yüklerin birleşiminden oluşan faktörlü momentten büyük olmasından dolayı kesit yeterlidir.

### 2.2.8. Sehîm hesapları

Sehîm tahkikleri maksimum sehîmin meydana geleceği açıklık ortası için yapılacaktır. Zamana bağımlı tahkik edilen sehîm hesapları PCI yayınlarında ifade edilen katsayı metoduna uygun vaziyette yapılacaktır. Zamana bağımlı davranışın neticesi olarak meydana gelecek sehîmlerin hesaplanması için hesabı gerçekleştirilen elastik sehîmler Tablo 3'te seçilen uygun katsayılarla çarpılacaktır. AASHTO 9.11.3.1'e göre, üstyapıya etkileyen hareketli yükler ve bu yüklerden kaynaklanan dinamik etki altında, köprü üstyapısında meydana gelen maksimum sehîm, açıklığın 1/800'den küçük olmalıdır.

**Tablo 3.** Tipik Elemanlarda Uzun Zamanda Oluşacak Sehim ve Ters Sehimlerin Hesabında Kullanılacak Katsayılar (PCI, 1985).

|          | Sehim  | Kompozit Başlıksız Kesit | Kompozit Başlıklı Kesit |
|----------|--|--------------------------|-------------------------|
| Montajda | (Montaj) 1-Sehim (↓) Çarpanı: Öngerme anında kiriş zati ağırlığından dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.  | 1,85                     | 1,85                    |
|          | (Montaj) 2-Ters Sehim (↑) Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır. | 1,80                     | 1,80                    |
| Serviste | (Servis) 3-Sehim (↓) Çarpanı: Öngerme anında kiriş zati ağırlığından dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.  | 2,70                     | 2,40                    |
|          | (Servis) 4-Ters Sehim (↑) Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır. | 2,45                     | 2,20                    |
|          | (Servis) 5-Sehim (↓) Çarpanı: Kirişe gelen ilave yüklerden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.            | 3,00                     | 3,00                    |
|          | (Servis) 6-Sehim (↓) Çarpanı: Kompozit başlıktan dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.                      | -                        | 2,30                    |

Tablo 3'te verilen katsayılar yardımıyla hesaplanan ilk öngerme kuvvetinden meydana gelen sehim (Başlangıç Dönemi), efektif öngerme kuvvetinin oluşturduğu sehim (İnşaat Dönemi) ve ek yüklerin oluşturduğu sehime (İşletme Dönemi) dair tek tek koşullar sağlanmıştır. Ayrıca toplam yüklerden dolayı oluşan sehim:

$$\Delta_{\text{sonuç}} = \Sigma \Delta + \Delta l = 0,764 < 4,00 \text{cm} (L / 800), \text{koşul sağlanmıştır.}$$

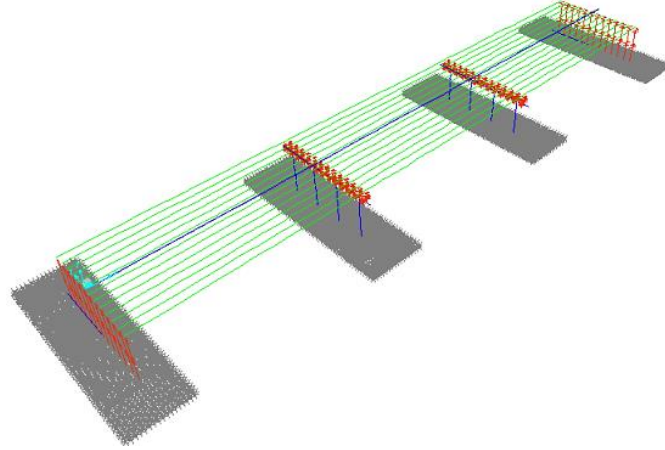
### 2.3. Sonlu Eleman Modeli

Çirilmiş Köprüsü'nün statik davranışını belirlemek amacıyla SAP2000 sonlu elemanlar programında köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Köprü sonlu elemanlar modeli oluşturulurken aşağıdaki modelleme ölçütleri göz önünde bulundurulmuştur.

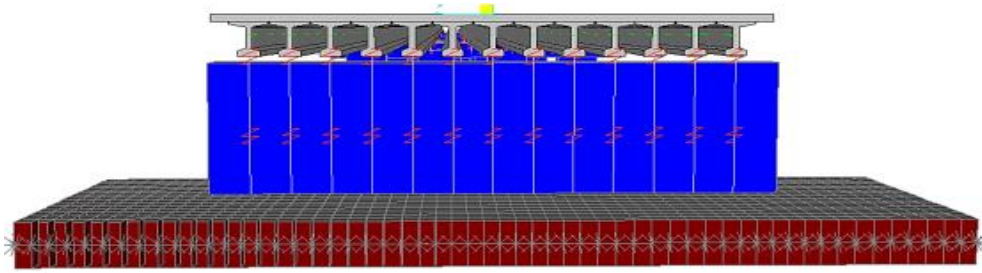
Köprü üstyapısı, bitişik bir düzende ön üretimli I kirişlere sahip olacak şekilde modellenmiştir. Köprü kirişleri ve ayakları çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca köprünün ayakları köprü temelleri tarafından taşınabilecek şekilde tasarlanmıştır. Köprü temelleri alan elemanlarla tanımlanır. Köprünün orta açıklığı ve kenar ayak destekleri, yüksek rijitliğe sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenar ve diğer ayaklar, köprü kirişleri elastomer mesnetler üzerine yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.

Ön üretimli köprü kirişlerini yerine oturtmak için elastomer mesnetlere yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Elastomer mesnetler planda verilen düzende başlık kirişleri üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca elastomer mesnetlerin ayaklardaki yerleşim derinliği uygun koordinatlarda yapılmıştır. Elastomer yatak rijitliği hesaplamaları sonucunda elde edilen değerler programa aktarılmıştır. Öngerme kabloları, yapısal bir eleman olan tendonlar kullanılarak simüle edildi ve proje verilerinde belirtilen başlangıç ve bitiş konumlarında üstyapı segment uçlarına bağlandı. Modellenen köprünün sonlu

elemanlar modeli Şekil 8’de, köprünün üç boyutlu tabliye kesiti ve ön üretimli kirişlerin görünümü Şekil 9’da verilmiştir.



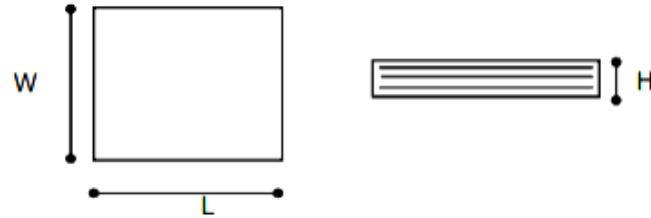
Şekil 8. Köprünün Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 9. Tabliye Kesiti ve Ön Üretimli Kirişler

### 2.3.1. Elastomer Mesnet Rijitlik Hesapları

AASHTO LRFD 2017 Bölüm 14.7.5’e göre rijitlik hesapları gerçekleştirilmiştir. Mesnet rijitliklerin hesabı için 7 katmanlı ve boyutları Şekil 10’da, malzeme özellikleri Tablo 4’te ifade edilen elastomer mesnet kullanılmıştır. Elastomer mesnetin efektif kayma modülü ( $G_{eff}$ ) AASHTO LRFD 2017 şartnamesinde tanımlandığı gibi  $1000 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmıştır.



Şekil 10. Elastomer Mesnet Boyutları

**Tablo 4.** Elastomer Mesnet Özellikleri

| Özellik                                 | Ölçü   | Birim           |
|---|--------|-----------------|
| Elastomer mesnet sayısı ( $n_{bp}$ )    | 13     | adet            |
| Kayma modülü ( $G_{eff}$ )              | 1      | MPa             |
| Mesnet uzunluğu (L)                     | 300    | mm              |
| Mesnet genişliği (W)                    | 400    | mm              |
| Mesnet alanı (A)                        | 120000 | mm <sup>2</sup> |
| Elastomer tabaka kalınlığı ( $h_{ri}$ ) | 8      | mm              |
| Tabaka sayısı ( $n_{tabaka}$ )          | 7      | adet            |
| Toplam elastomer kalınlığı ( $h_{bp}$ ) | 72     | mm              |
| Çelik levha kalınlığı ( $h_s$ )         | 2      | mm              |
| Çelik levha sayısı                      | 8      | adet            |
| Dış elastomer kalınlığı ( $h_{os}$ )    | 5      | mm              |
| Toplam elastomer yüksekliği (H)         | 82     | mm              |
| Atalet momenti (I)                      | 124699 | cm <sup>4</sup> |
| Elastisite modülü ( $E_c$ )             | 688,22 | MPa             |
| Şekil katsayısı (S)                     | 10,71  |                 |

Elastomer mesnet rijitlik hesaplarında kullanılacak eşitlikler Denklem 20-24'te verilmiştir.

$$K_h = \frac{G_{eff} \times A}{h_{bp}} \quad (20)$$

$$K_v = \frac{E_c \times A}{h} \quad (21)$$

$$K_{\Theta} = 0,8 \times \frac{E_c \times I}{h_{bp}} \quad (22)$$

$$E_c = 6 \times G \times S^2 \quad (23)$$

$$S = \frac{L \times W}{2 \times h_{ri} \times (L+W)} \quad (24)$$

Bu denklemlerde ifade edilen semboller Tablo 4'te açıklanmıştır. Elastomer mesnetlerin köprü eksenindeki ve köprü eksenine dik rijitlikleri bu formüller yardımı ile hesaplanıp aşağıda verilmiştir.

X yönündeki yatay rijitliği ( $K_h$ ): 1666,67

Y yönündeki enine rijitliği ( $K_y$ ): 1666,67

Z yönündeki düşey rijitliği ( $K_v$ ): 1007151,22

Dönme rijitliği ( $K_{\Theta}$ ): 9535,66

### 2.3.2. Köprü Performans Hedefi ve Yapı Elemanlarında Hasar Sınırlarının Belirlenmesi

Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarım Esasları Bölüm 3.2.1’de standart karayolu köprüleri deprem anında ve deprem sonrasında kendilerinden beklenen performans ve önem düzeyi açısından üç ana sınıfa ayrılmıştır. Çalışmaya konu olan Çirimiş Köprüsü’nün kurpta yer almaması, en fazla üç açıklıklı olması, toplam açıklığı 100 m’den ve ayak yüksekliği ise 10 m’den azdır. Bu sebeplerden dolayı köprü önem düzeyi 3. sınıftır.

Köprü yapısal performans düzeyleri ilgili rapordaki Bölüm 3.6’ya göre, özel ve standart köprüler için geçerli olmak üzere dört adet olarak tanımlanmıştır.

a) Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi: Köprü ana taşıyıcı sistemini oluşturan yapı elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı duruma karşı gelmektedir.

b) Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi: Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı ve kolayca onarılabilecek hasar düzeyine karşı gelmektedir.

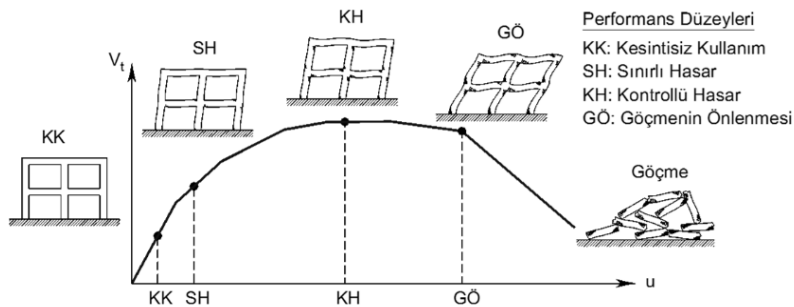
c) Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi: Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan kontrollü hasar düzeyine karşı gelmektedir.

d) Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi: Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma karşı gelmektedir.

Köprü önem sınıfına göre ve deprem davranış kategorisine göre performans hedefi, ilgili rapordaki Bölüm 3.6’ya göre Tablo 5’te verilmiştir. Şekil 11’de yapı için performans düzeyleri görülmektedir. Tablo 5’e göre, SAP 2000 programında modellenen köprünün 3. önem sınıfına sahip olmasından dolayı kesintisiz kullanım (KK) performans seviyesinde kalınması hedeflenmektedir.

**Tablo 5.** Köprü Performans Hedefi

| Köprü Performans Hedefi    |                   |         |         |
|----------------------------|-------------------|---------|---------|
| Deprem Yer Hareketi Düzeyi | Köprü Önem Sınıfı |         |         |
|                            | KÖS = 1           | KÖS = 2 | KÖS = 3 |
| DD – 3                     | —                 | KK      | KK      |
| DD – 2a                    | KK                | —       | —       |
| DD – 1                     | KH                | GÖ      | —       |



**Şekil 11.** Yapı performans düzeyleri



Köprü ve viyadüklerin nonlineer davranışlarının modellenmesinde, geleneksel plastik mafsallık hipotezinden yararlanılması öngörülmektedir. Bu hipotez plastik şekil değiştirmelerin yapı elemanlarının belirli bölgelerinde “yığılı (konsantre)” biçimde oluşacağı ve bu bölge boyunca sabit olarak alınabileceği varsayımına dayanır. Plastik mafsallık olarak adlandırılan noktasal eleman ise bu bölgenin tam ortasına yerleştirilir. Plastik mafsallık hipotezi, gerek binalarda, gerekse köprü ve viyadüklerde deprem etkisi altında yapılan nonlineer analiz ile şekil değiştirmeye göre performans değerlendirmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydınoğlu 2005).

Köprü kolonlarına plastik mafsallık atanması için ayaklara etkiyen eksenel kuvvet değerleri göz önünde bulundurularak moment-eğrilik bağıntılarını elde etmek için SAP 2000 programında “Section Designer” arayüzü kullanılmıştır. Ayağın çekirdek bölgesinde sargılı beton kullanılırken çekirdek dışında kalan bölgede ise sargısız beton modeli kullanılmıştır. Ayaklarda eksenel kuvvet değerleri dikkate alınarak kesitlerin moment-eğrilik bağıntıları saptanmış olup akma yüzeyleri ise 0° ve 90° açı değerleri için elde edilmiştir. Ayaklarda akma yüzeyinin belirlenmesi için eksenel kuvvet değerine göre değişen moment değerlerini gösteren P-M2-M3 (Normal kuvvet-enine moment-boyuna moment) diyagramı düzenlenmiştir. Belirli açılar için düzenlenen P-M2-M3 etkileşim diyagramı SAP 2000 programına plastik mafsallık atanmasını gerçekleştirmek için tanımlanmıştır P-M2-M3 diyagramı orta ayak kesitleri için 0° ve 90° açı için oluşturulmuştur. M2 ve M3 moment değerleri ilk ve son noktalarda sıfır olacak şekilde düzenlenmiştir. Belirtilen etkileşim diyagramının tüm M2 moment değerleri sıfırdan büyük ve tüm M3 moment değerleri sıfır olmalıdır. Tüm bu şartları 90° altında düzenlenen P-M2-M3 diyagramının sağlanması sebebiyle bu değerler SAP2000 programına aktarılmıştır (Çavdar,2016).

Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Raporu Bölüm 5.6’ya göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyine göre ve yığılı plastik davranış modeline göre yapılan değerlendirmede performans hedeflerine göre izin verilen dönme sınırları Denklem 25 ve Denklem 26’da tanımlanmıştır.

$$\theta_p^{GÖ} = (0,67 \times \Phi_u - \Phi_y) \times L_p \quad (25)$$

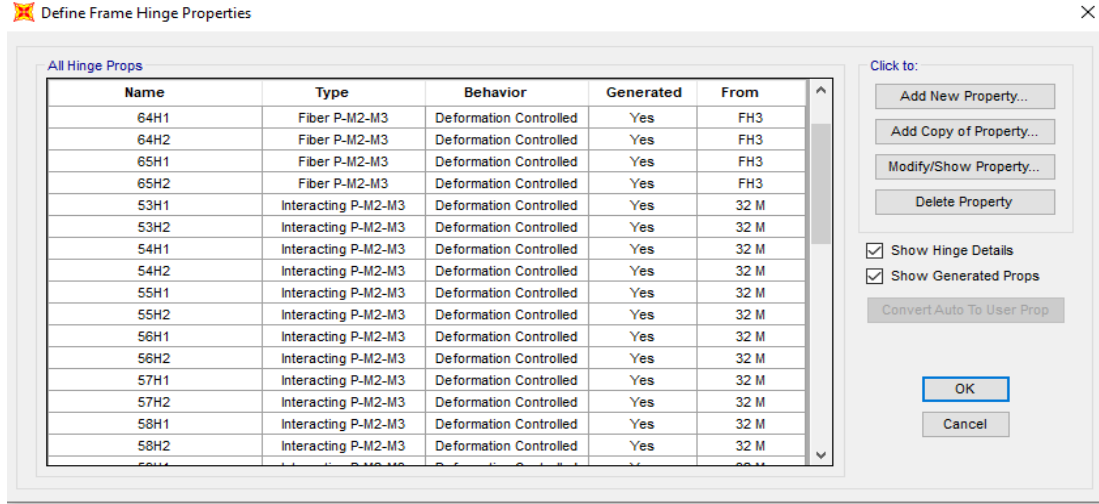
Kontrollü hasar (KH) performans düzeyine göre yapılan değerlendirmede, toplam dönme sınırı Denklem 26’da tanımlanmıştır.

$$\theta_p^{KH} = (0,50 \times \Phi_u - \Phi_y) \times L_p \quad (26)$$

Burada,  $\theta_p^{GÖ}$  göçmenin önlenmesi performans seviyesi için verilen plastik dönme sınırını,  $\theta_p^{KH}$  kontrollü hasar performans seviyesi için verilen plastik dönme sınırını,  $\Phi_u$  kesitin göçme öncesi toplam eğriliğini,  $\Phi_y$  kesitin akma eğriliğini,  $L_p$  plastik mafsallık boyunu göstermektedir.

Denklem 20 ve 21 kullanılarak köprü ayakları için plastik dönme sınırları belirlenmiş olup doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarından elde edilen ayaklara atanan plastik mafsallık sonuçları ile değerlendirilmiştir. Ayak modeli tasarımında kolonlar eğik veya birleşik eğilme etkisi altında çalışan betonarme çubuk yapı elemanları ile simüle edilmiştir. Bu nedenle eğilme momenti ve normal kuvvet

arasındaki etkileşimin yapılabilmesi için ayak kolonlarında P-M2-M3 plastik mafsal tipi, kenar ayak perdelerinde ise elevasyon duvarı kesitlerinin çok uzun olması sebebiyle bu kesitlere fiber P-M2-M3 mafsal tipi atanmıştır (Şekil 12). Buna göre köprü ayaklarında oluşan plastik dönme ile maksimum plastik dönmenin karşılaştırılmasına göre belirlenen performans düzeyi Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 12. Plastik mafsal tanımlaması

Tablo 6. Plastik Dönme Limitleri ve Performans Seviyesi

| Ayak No | Ayak Yüksekliği (m) | Plastik Dönme $\theta_p$ | $\Phi_u$ (1/m) | $\Phi_y$ (1/m) | $L_p$ (m) | $\theta_p^{KH}$ (radyan) | $\theta_p^{GÖ}$ (radyan) | Performans Seviyesi |
|---------|---------------------|--------------------------|----------------|----------------|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| P1      | 6,6                 | 0,00                     | 0,00765        | 0,0009         | 0,676     | 0,0020                   | 0,0028                   | KK                  |
| P2      | 5,6                 | 0,00                     | 0,00765        | 0,0009         | 0,596     | 0,0017                   | 0,0025                   | KK                  |

Tablo 6’da görüldüğü üzere yapı kesintisiz kullanım (KK) performansını sergilemektedir.

## 2.4. Doğrusal Olmayan Yapım Aşamalı Analiz

### 2.4.1. Zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması

Zamana bağlı malzeme deformasyonlarının karayolu köprüsünün yapısal davranışına etkisini belirlemek için beton malzeme için basınç dayanımı, yaş, sünme ve büzülme etkileri ve çelik malzeme için çeliğin gevşemesi yapım aşamaları ile sonlu elemanlar modelinde ele alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin bu özellikleri iklim koşullarına bağlı olarak sürekli değişebilmektedir. SAP2000 olarak, betonun zamana bağlı özellikleri CEB-FIP 90 formülasyonuna göre tanımlanır. Tablo 7, malzeme deformasyonlarını ele almak için seçilmesi gereken CEB-FIP 90 tasarım kodunun analiz parametrelerini vermektedir. Tablo 8, köprünün analizinde sonlu elemanlar modelinde dikkate alınması gereken malzeme parametrelerini vermektedir.

**Tablo 7.** CEB-FIP 90 Tasarım Kodunun Analiz Parametreleri (CEB-FIP, 1990).

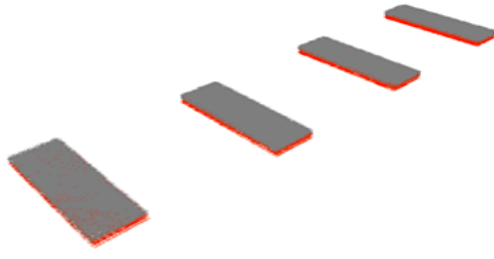
| SAP2000'de CEB-FIP Parametreleri |   |   |
|----------------------------------|---|---|
| Çimento Tipi Katsayısı           | 0,2   | Hızlı Sertleşen Yüksek Mukavemetli Çimento      |
|                                  | 0,25  | Normal ve Hızlı Sertleşen Çimento               |
|                                  | 0,38  | Yavaş Sertleşen Çimento                         |
| Bağıl Nem (%)                    | CEB-FIP 90'daki denklemler $40 \leq BN < 99$ için geçerlidir. |   |
| Büzülme Katsayısı, $B_{sc}$      | 8   | Hızlı Sertleşen Yüksek Mukavemetli Çimento      |
|                                  | 5   | Normal ve Hızlı Sertleşen Çimento               |
|                                  | 4   | Yavaş Sertleşen Çimento                         |
| Büzülme Başlangıç Zamanı (gün)   | $t_s$   | Çimento tipi nedeniyle ayar gerektirmemektedir. |

**Tablo 8.** Köprü Analizlerinde Dikkate Alınması Gereken Malzeme Parametreleri (CEB-FIP, 1990).

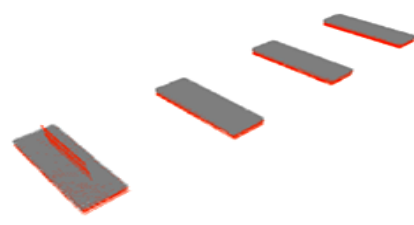
| PARAMETRELER            |                             | TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI |         |                 |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------|-----------------|
|                         |                             | Tabliye                    | Ayaklar | Öngermeli Çelik |
| Malzeme Özelliği        |                             | Beton                      | Beton   | Tendon          |
| Zamana Bağlı Özellikler | Elastisite Modülü           | +                          | +       | -               |
|                         | Sünme                       | +                          | +       | -               |
|                         | Büzülme                     | +                          | +       | -               |
|                         | Sünme Etkileri              | Tam                        | Tam     | -               |
|                         | Çimento Tipi Katsayısı      | 0,25                       | 0,25    | -               |
|                         | Bağıl Nem (%)               | 60                         | 60      | -               |
|                         | Kavramsal Boyut (m)         | 0,1                        | 0,1     | -               |
|                         | Büzülme Katsayısı, $B_{sc}$ | 5                          | 5       | -               |
|                         | Büzülme Başlangıç Zamanı    | 0                          | 0       | -               |
|                         | Çeliğin Gevşemesi           | -                          | -       | +               |
|                         | Gevşeme Analiz Tipi         | -                          | -       | Tam             |
|                         | Parametre Sınıfı            | -                          | -       | 1               |

#### 2.4.2. Yapım aşamalarının dikkate alınması

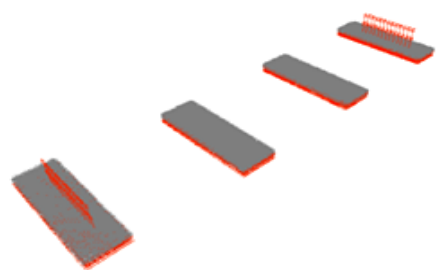
İnşaat aşamalarının Çirimiş Köprüsü'nün yapısal davranışına etkisini belirlemek için toplam inşaat süresi 101 gün olarak dikkate alınmıştır. Köprünün sonlu elemanlar modeli 69 adımda oluşturulmuştur. Modelleme sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Karayolu köprüsünün yapım aşamalarının adım adım sonlu eleman modelleri Şekil 13'te verilmiştir.



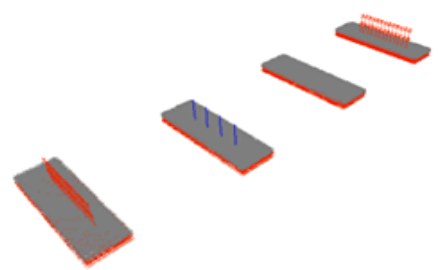
Adım 1: Temellerin inşası (28 gün)



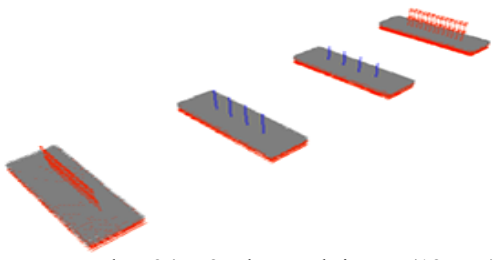
Adım 13: A1 Aksı kenar ayak inşası (7 gün)



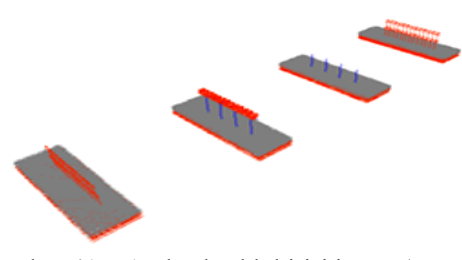
Adım 20: A2 Aksı kenar ayak inşası (7 gün)



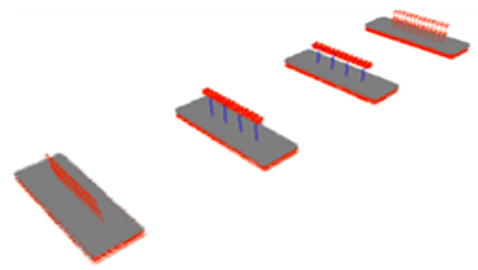
Adım 27: P1 Aksı ayak inşası (12 gün)



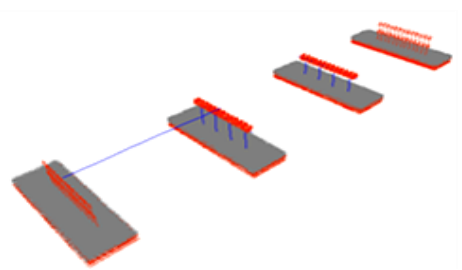
Adım 34: P2 Aksı ayak inşası (12 gün)



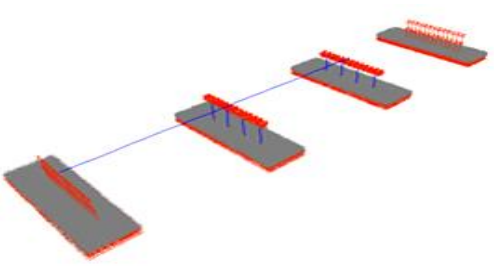
Adım 41: P1 Aksı başlık kirişi inşası (7 gün)



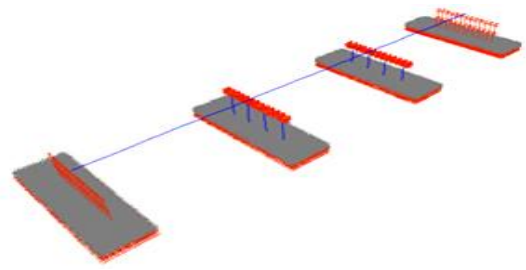
Adım 48: P2 Aksı başlık kirişi inşası (7 gün)



Adım 55: 1. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)



Adım 62: 2. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)



Adım 69: 3. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)

Şekil 13. Yapım Aşamalarına Dair Adım Adım Sonlu Eleman Modeli

### 2.4.3. Yapım aşamalı analizlerde dikkate alınan yük durumları

SAP2000 sonlu eleman programında gerçekleştirilen analizlerde analiz tipi olarak "Doğrusal Olmayan Kademeli Yapı", geometrik doğrusal olmayan parametreler için ise "P-Delta Etkisi" dikkate alınmıştır. P- Delta etkisi, doğrusal olmayan geometrik etki adı verilen ikincil bir etkidir. Yapılar büyük depremlere maruz kaldığında büyük yer değiştirmelerin ve deformasyonların meydana geleceği kabul edilmektedir. Bu durum, yanal olarak yer değiştirmiş bir yapıya etki eden düşey yüklerin ikinci dereceden etkisini, yani P-Delta etkisini çoğu durumda baskın hale getirmektedir (Şancı, 2021).

Köprü üst yapısına etki eden yükler sabit yükler ve hareketli yükler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Üst yapı tasarım analizinde, yapı sistemini oluşturan elemanların kendi ağırlıkları sabit yükler sınıfında, bina üzerinden geçmesi kabul edilen araç yükleri ve yaya yükleri ise hareketli yükler sınıfında değerlendirilmiştir. Çirmiş Köprüsü'nün yapım aşamaları dikkate alınarak yapılan analizlerde aşağıdaki yükleme durumları dikkate alınmıştır.

#### Sabit Yük:

Yapı sistemini oluşturan elemanların kendi ağırlıklarıdır. Betonun birim hacim ağırlığı  $25 \text{ kN/m}^3$  olarak kabul edilir. Kiriş ve tabliyelerin gerçek ağırlıkları sırasıyla  $13,844 \text{ kN/m}$  ve  $8,654 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Ek Sabit Yük:

Asfalt, bordürler ve yaya korkulukları gibi ek bir ağırlıktır. Bu ağırlıklardan sırasıyla  $1,274 \text{ kN/m}$ ,  $2,885 \text{ kN/m}$  ve  $0,231 \text{ kN/m}$  yük meydana geldi.

#### Hareketli Yük:

Bu yükler H30-S24 standart kamyon yükü, yaya yükü ve frenleme kuvvetidir.

H30-S24 yüklemesi, köprüden geçen standart kamyonlardan veya standart bir kamyon trenine eşdeğer şerit yüklerinden oluşur. H30-S24 yük sınıfı sembollerinden H, iki dingilli bir kamyonu ve S, ona bağlı bir yarı römorku ifade eder. H harfinden sonra gelen 30 rakamı, kamyonun iki dingilinden aktarılan  $W = 300 \text{ kN}$  ağırlığını, S harfinden sonra gelen 24 rakamı ise yarı römorkun tek dingilinden aktarılan ağırlığı yani  $240 \text{ kN}$  ağırlığını gösterir. Bu yük hesaplanırken, AASHTO 3.12'ye göre hareketli yüklerin azaltılması, AASHTO 3.23.4.3'e göre her bir uzunlamasına kirişe etki eden hareketli yük miktarı ve AASHTO 3.8.2.1'e göre titreşim faktörü dikkate alınmıştır. AASHTO yönetmeliğine göre ön tekerlek yükü  $56,22 \text{ kN}$ , arka tekerlek yükü ise  $224,90 \text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır.

AASHTO 3.14.1.1'e göre yaya yükü, yaya hareketinin meydana gelebileceği alanlara  $3 \text{ kN/m}^2$  homojen dağılımlı bir şekilde hareketli yüklerle birlikte etkilenmelidir. Yaya yükü kompozit bölümü etkilediği için tüm kirişler tarafından eşit olarak taşınacağı kabul edilir. Bu durumda 1 kompozit kirişe etki eden yaya yükü  $1,385 \text{ kN/m}$ 'dir.

Fren yükü, AASHTO 3.9'da, şerit yüklerin  $1,80 \text{ m}$  ( $6 \text{ fit}$ ) yükseklikten köprüye yatay olarak yüklenmesiyle elde edilen hareketli yükün %5'inin, dinamik etki katsayısı olmaksızın uygulanması olarak belirtilmiştir. Bu yük  $4,59 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Sıcaklık Etkisi:

Analizlerde sıcaklık etkileri sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve deformasyonlar dikkate alınmalıdır. Isı değişiminden kaynaklanan etkilerin hesaplanmasında TCK Karayolu Köprüleri Teknik Şartnamesine göre  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklık değişimi alınmıştır. Isı genleşme katsayısı AASHTO 8.5.3'te  $0,000108/^{\circ}\text{C}$  olarak belirtilmiştir. Sıcaklık etkisinden kaynaklanan yük, ısı genleşme katsayısı dikkate alınarak  $38,83\text{ kN/mesnet}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Öngerme Çelik Kuvvetleri:

Öngerme çeliğinin oluşturduğu yüküdür. Öngerme işlemi, yüksek mukavemetli çeliğin belirli bir kuvvetle çekilip kilitlenmesi ve bu kuvvetin betona aktarılması ile elde edilir. Beton dökülmeden önce çelik gerilirse buna ön çekme (ön gerilme), beton dökülüp mukavemet kazandıktan sonra yapılırsa çekme sonrası denir. AASHTO LFRD'ye göre, öngerme kuvvetinin en büyük değeri, nihai mukavemetinin %75'i olarak kabul edilir. Bu kuvvet, kestirimci uygulama hızı, karakteristik çelik kopma mukavemeti ve kablo kesit alanının çarpılmasıyla  $195,51\text{ kN}$  olarak elde edilmiştir. Her bir açıklık için ayrı ayrı oluşturulan öngerme çelik kuvvetleri, her bir kirişte 32 halata uygulanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

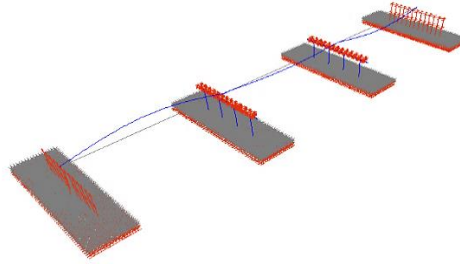
Çırmış köprüsündeki kesit özellikleri göz önünde bulundurularak kirişin destek ekseninden açıklığın ortasına kadar olan mesafede kesit etkileri elde edilerek öngerme kablolarının sayısı belirlenmiştir (TS3233, 1979; AASHTO, 2015). Kiriş yükleme aşamaları için kesitlerde oluşan gerilmelerin tahkiki yapılmıştır. Daha sonra hem ön üretimli kiriş için hem de kompozit kiriş için eğilme taşıma kapasitesi, öngerme donatısı oranı, kesme ve sehim kontrolleri yapılarak köprü üstyapısının güvenilirliği tespit edilmiştir.

#### 3.1. Sonlu Eleman Modal Analizi

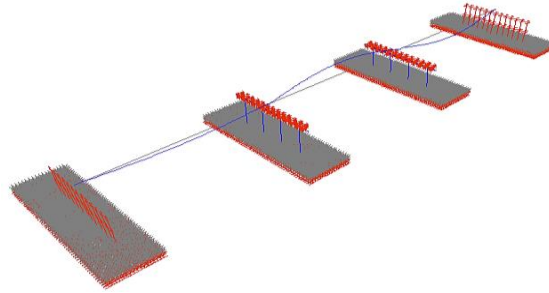
Tasarım yapılırken 100 mod dikkate alınmıştır. Burada sadece ilk üç mod şekli verilmiştir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk 12 modun frekans ve periyot değerleri Tablo 9'da, ilk 3 mod Şekil 14-16'da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Sonlu Eleman Modal Analizi

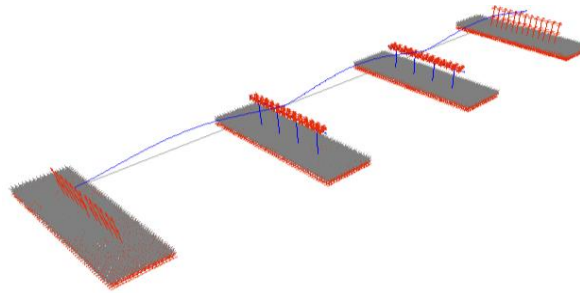
| Mod Sırası | Periyot (s) | Frekans (Hz) | Modal Kütle Katılım Oranı |
|------------|-------------|--------------|---------------------------|
| Mod 1      | 1,001       | 0,992        | 0,75125                   |
| Mod 2      | 0,973       | 1,028        | 0,05756                   |
| Mod 3      | 0,945       | 1,058        | 0,01742                   |
| Mod 4      | 0,345       | 2,894        | 0,00283                   |
| Mod 5      | 0,344       | 2,905        | 0,00211                   |
| Mod 6      | 0,335       | 2,983        | 0,00119                   |
| Mod 7      | 0,128       | 7,83         | 0,03333                   |
| Mod 8      | 0,105       | 9,522        | 0,02713                   |
| Mod 9      | 0,09        | 11,089       | 0,00037                   |
| Mod 10     | 0,089       | 11,178       | 0,00036                   |
| Mod 11     | 0,086       | 11,508       | 0,00585                   |
| Mod 12     | 0,043       | 23,191       | 0,00013                   |



**Şekil 14.** 1. Mod Şekli



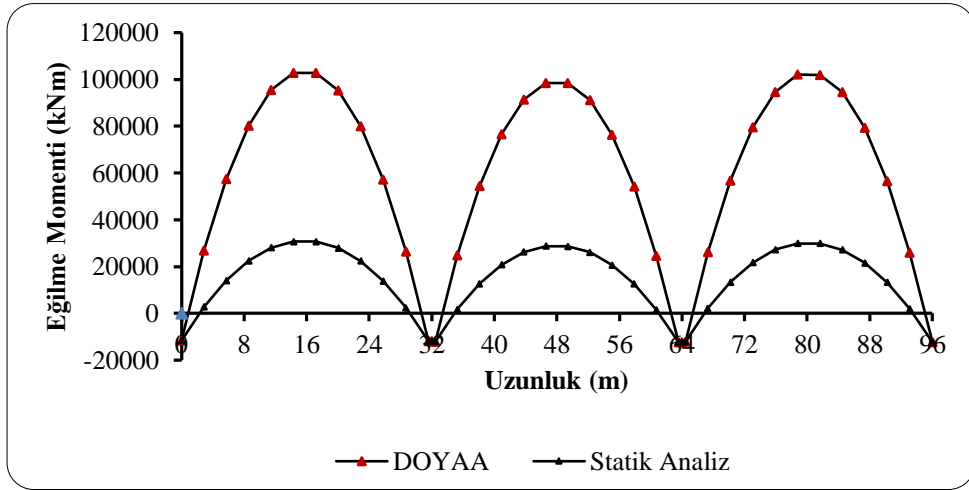
**Şekil 15.** 2. Mod Şekli



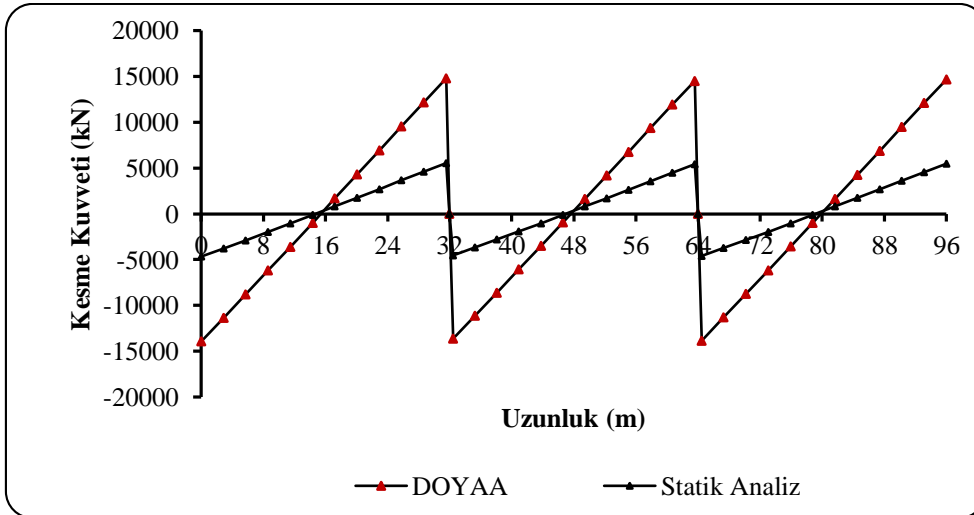
**Şekil 16.** 3. Mod Şekli

### 3.2. Tabliye Davranışı

Köprü modelinin “doğrusal statik” ve “doğrusal olmayan yapım aşamalı analizleri (DOYAA)” neticesinde elde edilen eğilme momenti, kesme kuvveti ve düşey yer değiştirme değerlerinin tabliye uzunluğu boyunca karşılaştırmalı değişimi sırasıyla Şekil 17 – 19’da gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere düşey yer değiştirmeler her bir açıklık ortasında artmaktadır. Eğilme momenti değerleri her açıklık ortasında maksimum değerlere çıkıp köprü ayakları üzerinde minimum değerlere inmektedir (Adanur ve ark. 2012). Kesme kuvveti değerleri ise ayaklar üzerinde maksimum değere ulaşip köprü açıklık ortasında minimum değere düşmektedir.

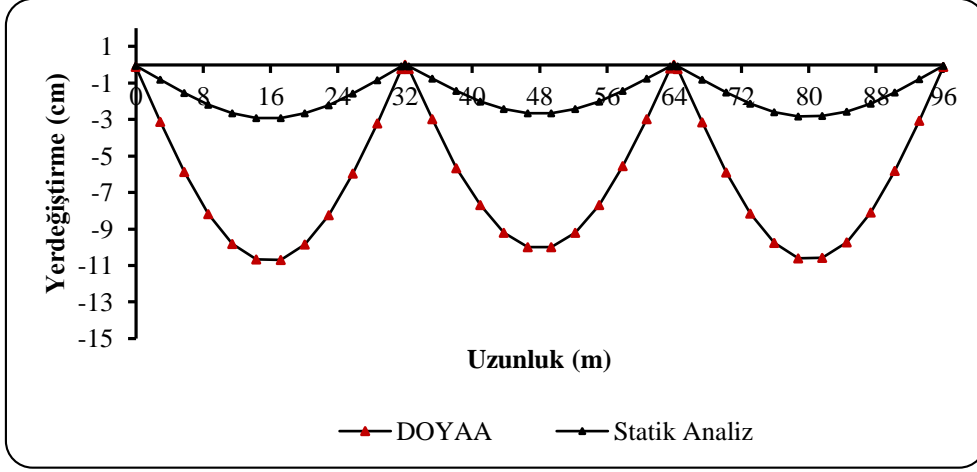


Şekil 17. Statik ve DOYAA Sonucunda Eğilme Momentinin Karşılaştırması



Şekil 18. Statik ve DOYAA Sonucunda Kesme Kuvvetinin Karşılaştırılması

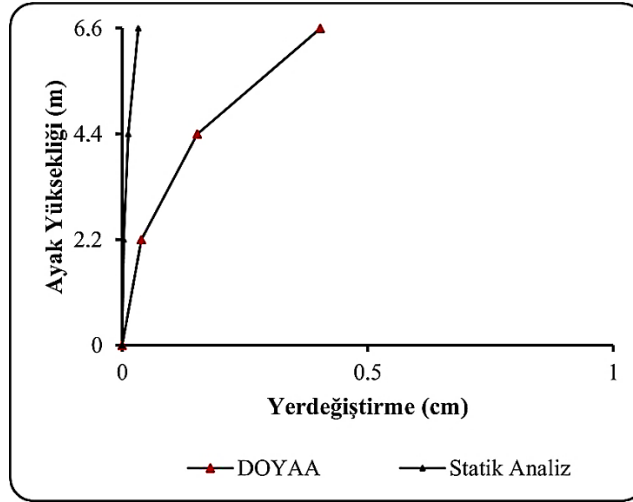




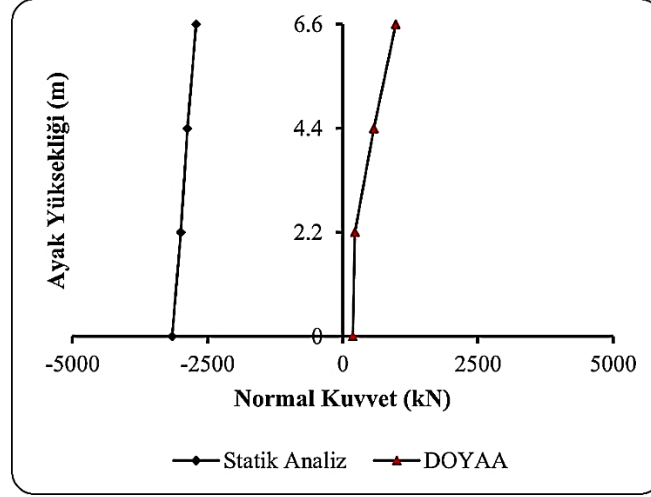
Şekil 19. Statik ve DOYAA Sonucunda Düşey YerDeğiştirmenin Karşılaştırılması

### 3.3. Ayak Davranışı

Köprü modelinin statik analiz ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analizleri (DOYAA) neticesinde elde edilen yatay yer değiştirme ve normal kuvvet değerlerinin ayak yüksekliğince karşılaştırmalı değişimi sırasıyla Şekil 20 ve 21'de gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere ayak yüksekliği boyunca yatay yer değiştirme değerleri artmakta olup maksimum yer değiştirme ayak uç noktasında elde edilmiştir. Statik analizde normal kuvvet değerleri grafiğin solunda negatif değerlerde kalırken doğrusal olmayan yapım aşamalı analizde grafiğin sağında pozitif değerler almaktadır.



Şekil 20. Statik ve DOYAA Sonucunda Yatay YerDeğiştirmenin Karşılaştırılması



Şekil 21. Statik ve DOYAA Sonucunda Normal Kuvvetin Karşılaştırılması

Statik analiz ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarından elde edilen maksimum değerlerin karşılaştırması Tablo 10'da verilmiştir. Literatüre benzer şekilde doğrusal olmayan yapım aşamalı analizde daha yüksek değerler elde edilmiştir (Altunışık ve ark.,2010; Günaydın ve ark. 2014)

Tablo 10. Statik Analiz ve DOYAA Sonucu Maksimum Değerlerin Karşılaştırılması

|                           | Statik Analiz | DOYAA        |
|---------------------------|---------------|--------------|
| Maksimum Değer            |               |              |
| Tabliye Uzunluğu Boyunca: |               |              |
| Eğilme Momenti            | 30677,42 kN   | 102830,03 kN |
| Kesme Kuvveti             | 5524,47 kN    | 14753,73 kN  |
| Düşey Yer Değiştirme      | 2,91 cm       | 10,69 cm     |
| Ayak Yüksekliği Boyunca:  |               |              |
| Yatay Yer Değiştirme      | 0,03 cm       | 0,40 cm      |
| Normal Kuvvet             | -2713,66 kN   | 980,09 kN    |

#### 4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında; yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının Çirilmiş Köprüsü'nün yapısal davranışına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla SAP2000 sonlu elemanlar paket programında tasarlanan köprü modelinde "doğrusal statik" ve "doğrusal olmayan yapım aşaması analizi" olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışmaya konu olan karayolu köprüsünün üstyapısı öngermeli kirişler ve tabliyeden oluşmaktadır. Ülkemizde öngermeli kirişlerin hesaplanmasında ve tasarım esaslarında uluslararası kabul görmüş AASHTO köprü tasarım yönetmeliği, TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi ve TS 3233 (1979) yönetmeliği kullanılmaktadır. SAP2000'de basit kiriş tasarımı üzerinde gerçekleştirilen yük analizleri sonucunda, ön üretimli ve kompozit kirişlerin kesit özellikleri göz önünde bulundurularak, kirişin destek ekseninden açıklığın ortasına kadar olan mesafede her bölge için moment etkileri ve kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak öngörme kablolarının sayısı belirlenerek öngörme kayıpları hesaplanmış, öngörme donatısının mantolaması üzerinde analizler yapılmıştır. Daha sonra kiriş yükleme

aşamalarına göre kesit gerilmelerinin tahkiki sağlanıp aynı zamanda hem ön üretimli hem de kompozit kiriş için eğilme taşıma kapasitesi kontrolü, öngerme donatısı oranı kontrolü, kesme hesapları kontrolü ve sehim kontrolleri gerçekleştirilerek modellenen köprü üstyapısının güvenilirliği belirlenmiştir.

AASHTO ve diğer yönetmelikler çerçevesinde üstyapı tasarım ilkeleri dikkate alınarak tasarlanan karayolu köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde, öncelikle bu yönetmeliklerin belirttiği yükleme koşulları ile doğrusal statik analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, zamana bağlı malzeme deformasyonlarının köprünün yapısal davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için doğrusal olmayan inşaat aşaması analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan yapım aşaması analizinde, beton malzeme için basınç dayanımı, yaş, sünme ve büzülme etkileri, çelik malzeme için ise çelik gevşeme ve P-Delta etkisi dikkate alınmıştır. Köprünün her iki analiz koşulu için elde edilen kesit etkileri ve yer değiştirme değerleri birbirleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tabliye uzunluğu ile köprü modelinde gerçekleştirilen iki analiz için elde edilen düşey yer değiştirmeler, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi incelendiğinde, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri köprü açıklığının ortasında artmış, ayaklarda ise minimum değerlere inmiştir. Kesme kuvveti değerleri ayaklarda maksimum değere yükselmiş ve köprü açıklığının ortasına doğru minimum değere düşmüştür. Ayak yüksekliğindeki yatay yer değiştirme ve normal kuvvet değerleri göz önüne alındığında, ayak yüksekliği arttıkça yer değiştirme miktarı ve normal kuvvet değerleri artar.

"Doğrusal statik analiz" ve "doğrusal olmayan yapım aşaması analizi" sonuçlarından elde edilen maksimum değerler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, güverte uzunluğu boyunca eğilme momenti değeri 72152,61 kN (% 235,20), kesme kuvveti değeri 9229,26 kN (% 167,06) ve düşey yer değiştirme değeri 7,78 cm (% 267,35) artmıştır. Ayak yüksekliği açısından yatay yer değiştirme değeri 0,37 cm (% 1233,33) ve normal kuvvet değeri 3693,75 kN (% 136,12) artmıştır. Bu nedenle köprünün tasarımında köprünün yapısal davranışının belirlenmesinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Yapılan performans analizi sonucunda Çirilmiş köprüsünün performans düzeyinin Kesintisiz Kullanım (KK) olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tür büyük açıklıklı köprüler uzun süren inşaat aşamaları sonucunda yapıldığından inşaat başlangıç aşamasında yapım aşamalarının hesaplarda dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Elde edilen sayısal ve şekil sonuçları incelendiğinde hiç ara verilmeden inşaat yapım aşaması dikkate alınmayan analizler sonucunda (doğrusal statik analiz) çok daha küçük kesit etkileri ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Bu çalışmada Özlem ÇAVDAR çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, bu süreçlerin yönetilmesi ve makalenin gelişmesinde fikri katkının sağlanması, Osman SARIGÜN makale

taslağının oluşturulması, modelleme, veri toplama, veri analizi ve yorumlama yönünden katkı sağlamıştır.

### **Kaynakça**

- AASHTO. Standard specifications for highway bridges. Washington: 2015.
- AASHTO LRFD Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington: 2017.
- Adanur S., Günaydin M., Altunışık AC., Sevim B. Construction stage analysis of Humber Suspension Bridge. *Applied Mathematical Modelling* 2012; 36(11): 5492-550.
- Aktaş E. Öngerilme kirişli bir köprü tasarımı ve performansının değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- Altunışık AC., Bayraktar A., Sevim B., Adanur S., Domaniç A. Construction stage analysis of Kömürhan Highway Bridge using time dependent material properties. *Structural Engineering and Mechanics* 2010; 36(2): 207-223.
- Aydınoğlu MN. Mevcut veya güçlendirilen köprü ve viyadüklerinin deprem performanslarının nonlinear analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi raporu. İstanbul: TC Bayındırlık ve İşkan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü; 2005.
- Belwal A., Thapliyal S., Jhinkwan VS. Construction stage analysis of continuous box girder bridge constructed via full staging and balance cantilever method. *Recent Advances in Structural Engineering and Construction Management* 2023; 12: 89-99.
- Comite Euro-International Du Beton. CEB-FIP, Model Code, London, 1990.
- Cruz P., Mari A., Roca P. Nonlinear time dependent analysis of segmentally constructed structures. *Journal of Structural Engineering* 1998; 124(7): 278–287.
- Çavdar Ö., Şener MA. Dilimsel dengeli konsol yöntemi ile tasarlanan bir köprünün yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranışının incelenmesi. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* 2022; 9(2): 469-491.
- Çavdar Ö., Bayraktar A. Nonlinear earthquake performance evaluation of a structure collapsed during the Van, Turkey, earthquake on October 23, 2011. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2016; 30 (4): 04015092.
- Çavdar Ö., Bayraktar A., Altunışık AC. Stochastic seismic analysis of Kömürhan highway bridge with varying material properties. *Civil Engineering and Environmental Systems* 2015; 32 (3): 193-205.
- Çavdar Ö., Bayraktar A., Adanur S., Başađa HB. Stochastic finite element analysis of long-span bridges with CFRP cables under earthquake ground motion. *Sadhana* 2010; 35, 341-354.
- Günaydin M., Adanur S., Altunışık AC., Sevim B., Türker E. Determination of structural behavior of Bosphorus suspension bridge considering construction stages and different soil conditions. *Steel and Composite Structures* 2014; 17(4): 405-429.

- Karakaplan A., Caner, A., Kuç Ö., Domaniç A., Lüleç A. Yapı çözümlemesinde yeni bir devir: Yapım aşaması. İMO Teknik Dergi 2009; 20(99): 4905-4917.
- KGM Yol köprüleri için teknik şartname. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü 1973.
- Leite ACF., Silva FAN., Berenguer RA., de Oliveira RA. Numerical staged construction analysis of precast concrete bridge. Journal of Civil Engineering and Architecture 2016; 10: 447-451.
- Martins AMB., Simões LMC., Negrão JHJO. Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects. Structural and Multidisciplinary Optimization 2015; 51: 757-772.
- Orgnoni A., Pinho R., Moratti M., Scattarreggia N., Calvi GM. Critical review and modelling of the construction sequence and loading history of the collapsed Morandi bridge. International Journal of Bridge Engineering (IJBE) 2022; 10(3): 37-62.
- PCI design handbook—precast and prestressed concrete. Chicago: 1985.
- SAP2000 Integrated finite element analysis and design of structures. California: Computers and structures inc; 2015.
- Şancı E. Yüksek yapı sistemlerinin performanslarında P-Delta etkisinin değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye, 2021.
- TS 3233 Öngerilmeli beton yapıların hesap ve yapım kuralları. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü; 1979.
- Traykov A., Boiadjeva R. Computer modelling of structures with account of the construction stages and the time dependent material properties. Gradjevinski Materijali i Konstrukcija 2015; 58(3): 29-35.
- Wang PH., Tang TY., Zheng HN. Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. Computers & Structures 2004; 82(4-5): 329-346.
- Wang X., Wang H., Sun Y., Mao X., Tang S. Process-independent construction stage analysis of self-anchored suspension bridges. Automation in Construction 2020; 117: 103227.