

PREKAST ÖNGERME KİRİŞLİ KÖPRÜNÜN YAPIM AŞAMALARI DİKKATE ALINARAK ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ YÖNTEMİYLE PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Özlem ÇAVDAR *^{ID}
Osman SARIGÜN **^{ID}

Alınma:05.01.2023; düzeltme:12.04.2023; kabul: 09.08.2023

Öz: Mühendislik yapılarının tasarımında gerekli olan yapısal çözümlerinin gerçekçi sonuçlar verebilmesi için tasarım aşamasında yapının inşaa aşaması, süresi ve yapıya esas beton, çelik gibi malzemelerin bu süre zarfında meydana gelecek değişimleri ile beraber dinamik etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir. Çalışma kapsamında karayolu köprüsünün uygulama modeli üzerinde gerçekleştirilecek sonlu eleman analizleriyle yapı tasarımlarının sadece servis durumu ve yapım aşamalarını dikkate alacak şekilde değil, zaman tanım alanında gerçek ivme kayıtlarının da kullanılarak dinamik çözümlenmesi gerekliliği amaçlanmıştır. Model olarak seçilen Çirmiş Köprüsü üç eşit açıklığa sahip olup toplam 96 metre uzunluğundadır. Köprü üst yapısı, tabliye ve öngerme kirişlerden oluşmaktadır. Bu tip köprülerin tasarım esaslarında kullanılan AASHTO, TS 3233 Yönetmelikleri ve TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi dikkate alınarak köprü üst yapısının model güvenilirliği sağlanıp çözümlenelere başlanılmıştır. Dinamik etkilerin tespiti amacıyla TBDY-2018 kapsamında belirtilen kurallar çerçevesinde gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz ile doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarının yapı elemanlarında daha yüksek kesit tesirleri ve yer değiştirme değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Ülkemizin aktif fay kuşağında yer almasından dolayı yapı tasarımlarının, zaman tanım alanında gerçek ivme kayıtlarının da kullanılarak dinamik çözümlenmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Karayolu Köprüsü, Öngerme Kiriş, TBDY-2018, Yapım Aşamalı Analiz, Zaman Tanım Alanı.

Determination of the Performance of a Precast Girder Bridge by Non-Linear Analysis Method in the Time Domain Considering the Construction Stages

Abstract: In order for the analyzes to be realistic in the design of buildings, the construction of the building, its duration and changes in materials such as concrete and steel should be taken into account along with its dynamic effects. In the study, it is aimed to dynamically analyze the designs of the highway bridge by using finite element analyzes to be carried out on the model, not only taking into account the service status and construction stages, but also using real acceleration records in the time history. The model, Çirmiş Bridge, has three spans and is 96 meters long. Bridge superstructure consists of deck and prestressed beams. Superstructure model reliability has been ensured with the AASHTO, TS 3233 and TRH Road Bridges Technical Specifications used in the design of these bridges. The results of non-linear construction phase analysis in the time history domain, carried out within the framework of the rules specified in TBEC-2018 for the determination of dynamic effects, gave higher cross-sectional effects and displacement values in the

* Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane.

** Karayolları 101. Şube Şefliği, 29100, Gümüşhane.

İletişim Yazarı: Özlem Çavdar (ozlemcavdar@gumushane.edu.tr)

building elements compared to the construction phase analysis results. Since our country is located in the fault zone, dynamic analysis should be done by using real acceleration records in the designs.

Keywords: Highway Bridge, Prestressed Beam, TBEC-2018, Construction Phase Analysis, Time History Domain.

1. GİRİŞ

Öngörme kirişli köprüler karayollarında sıklıkla inşa edilmektedir. Bu yapılar çok fazla sabit ve hareketli yüke maruz kaldığından dolayı bu yapılarda yüksek dayanıma sahip beton kullanılmaktadır. Çekme gerilmelerine karşı mukavemeti çok düşük olan betonda meydana gelebilecek gerilmeleri dengelemesi maksadıyla betona yapay ve sürekli olarak belirli bir zaman aralığında gerilme verilir. Öngörme işlemi uygulanan beton belirli dayanıma ulaşmaktadır. Bu yöntem veya başka yöntemlerle inşa edilen köprü vb. yapıların sonlu eleman analizlerinde yapının inşa aşamaları ve bu süreçte ve de sonrasında oluşan malzeme deformasyonları göz önünde bulundurulmadan sanki yapının anlık olarak bir anda inşa edilip tamamlandığı kabul edilir. Ancak böylesine teknik ve inşası uzun süren yapılara etkiyen yükler, hem yapım süresinde hem de sonrasında değişmektedir. Yapıya esas malzemeler olan beton ve çelikte ise zamana bağlı olarak deformeler ve geometrik değişimler meydana gelebilmektedir. Zamana bağlı malzeme özellikleri, beton için sünme, büzülme, yaşlanma ve basınç dayanımının azalması, çelik için gevşemesi olarak kabul edilir.

Ayrıca ülkemiz aktif bir deprem kuşağında bulunmaktadır. Yakın zamanda ve geçmişte ülkemizde yaşanan yıkıcı ve şiddetli depremler sonucunda çok fazla can ve mal kaybı meydana gelmiştir. Yaşanan bu depremler, ülkemizde deprem etkisinin ne kadar tehlikeli boyutlara ulaştığını ve tedbir alınmazsa daha da kötü sonuçlar çıkaracağını gözler önüne sermektedir. Depremler; köprü, tünel, bina ve diğer yapılarda göçmelere ve hasarlara yol açarak mal ve can kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Günümüzde halen gelişmeye devam eden inşaat teknolojisine rağmen yakın zamanda İzmir ve Elazığ'da yaşanan şiddetli depremler sonucu birçok bina ve yapı yıkılarak çok fazla can kaybı olayı yaşanmıştır. Depremlerin, yapılar üzerinde oluşturacağı olumsuz etkileri minimum düzeye indirmek için yapı tasarımlarının deprem faktörü dikkate alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Köprüler gibi teknik ve önemli mühendislik yapılarının yapısal davranışının daha güvenilir ve sağlıklı çözümlenebilmesi için zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisi ve yapım aşamaları ile birlikte dinamik etkileri de dikkate alınarak analiz edilmesi gerekmektedir. Gerçekçi yapı davranışının ele edilemediği bir analizden daha sağlıklı sonuçlara ulaşılması imkansız hale gelebilir. Geçmişten günümüze karayolu ve demiryolu köprülerinin yapısal davranışının belirlenmesinde dinamik etkilerinin ele alındığı pek çok çalışma yapılmıştır. Ahmed ve Anam (2003), çalışmalarında çeşitli tipteki betonarme kutu kesitli köprülerin rasyonel ve ayrıntılı bir şekilde dinamik analizini çözümlenmeyi amaçlamışlardır. Xia ve Zhang (2005), demiryolu köprülerinin tren yükleri altındaki dinamik tepkisinin, demiryolu köprüsü tasarımında çözülmesi gereken temel problemlerden birisi olduğunu söylemişlerdir. Aktaş (2010), yapmış olduğu çalışmada iki açıklıklı, öngerme kirişli, 65 m uzunluğunda, 22,5 m genişliği olan bir köprü tasarlayıp, köprü'nün doğrusal elastik olmayan artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile deprem performansını incelemiştir. Dolati ve diğ., (2012), ele aldıkları herhangi bir karayolu köprüsünü yakın ve uzak fay hareketleri altında nümerik bir şekilde incelemiştir. Çalışmaları sonucunda yakın fay yer hareketlerinin, uzak faylara kıyasla köprülerin her iki yönü üzerinde daha şiddetli etkilere sahip olduğunu göstermişlerdir. Filho ve diğ. (2017), demiryolu köprülerinin demiryolu köprülerinin deprem, rüzgâr, araç yükleri gibi çeşitli dinamik yüklere maruz kalmalarından bahsedip çalışmalarında her iki yapının da ayrı ayrı modellendiği ve kendilerine özgü dinamik özelliklere sahip olduğu, demiryolu aracı ve köprü arasındaki etkileşimi dikkate alan bir yöntem arayışını amaçlamışlardır. Karaca (2017), uzun açıklığa sahip eğik kablo askılı ve asma köprülerin yakın ve uzak fay depremsel hareketleri etkisindeki dinamik davranışını araştırmak amacıyla ele

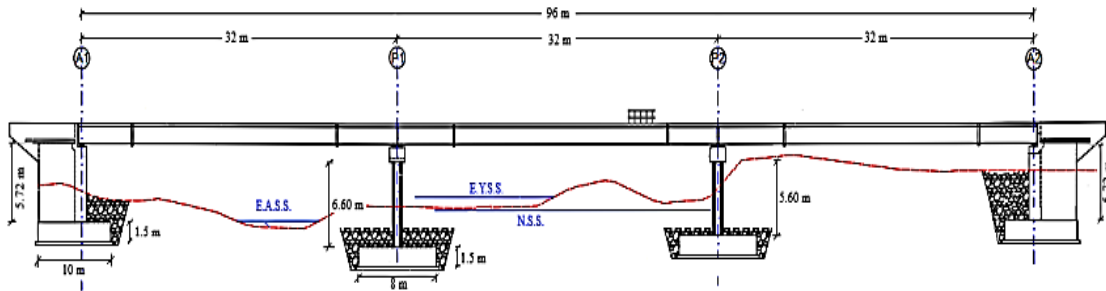
aldığı iki köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelinde 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Düzce ve 1999 Kocaeli depremlerine ait kayıtları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen köprü tepkilerini karşılaştırıp özellikle yakın fay yer hareketinin bu tip köprülerde dinamik hareketleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu vurgulamıştır. Özmen ve Sayın (2020), eski dönemlerdeki yapım yöntemleri ve yapı malzemeleri ile inşa edilen tarihi yığma kemerli köprülerin deprem altındaki performanslarını incelemek için lineer dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir.

2. VERİ VE YÖNTEM

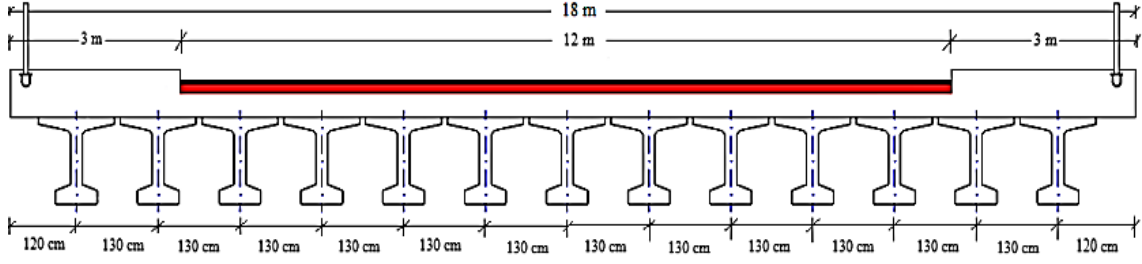
2.1. İncelenen Köprünün Tasarımı

Çalışma kapsamında model olarak belirlenen Çirmiş Köprüsü, Gümüşhane İli Şiran İlçesi ile Giresun İli Alucra İlçesini birbirine bağlayan karayolunun Çirmiş suyu ile kesiştiği noktada geçişi sağlayan köprüdür. Köprüye ait malzeme verileri ve geometrik özellik bilgilerine Karayolları Genel Müdürlüğü'nden erişilmiştir. Köprü üst yapısı, tabliye ve öngörme kirişlerden meydana gelmektedir. Her bir açıklığı 32 metre olan köprünün toplam uzunluğu 96 metre, genişliği ise 18 metredir. Platform genişliği 12 m olup her iki platform kenarında 3'er metre kaldırım bulunmaktadır. Köprü kenar ayakları 5,72 m yüksekliğine sahip olup perde tipindedir. Kenar ayak temelleri $25 \times 10 \text{ m}^2$ kesit alanına ve 1,5 m derinliğe sahip donatılı kütle betonudur. Ayrıca köprünün 8 orta ve 2 kenar ayak olmak üzere 10 ayağı tabliyenin ana taşıyıcı sistemlerini oluşturmaktadır. P1 aksındaki 4 orta ayağı 6,60 m ve P2 aksındaki 4 orta ayağı ise 5,60 m yüksekliğindedir. Orta ayaklar $2,5 \times 1 \text{ m}^2$ kesit alanına, temelleri ise $25 \times 8 \text{ m}^2$ kesit alanına ve 1,5 m derinliğe sahip demirli kütle betondur. Orta ayaklar inşa edildikten sonra prefabrik öngermeli betonarme kirişleri yerlerine oturtmak için inşa edilen başlık kirişleri $1,5 \times 1,10 \text{ m}^2$ kesit alanına ve 18 m uzunluğa sahip demirli kütle betondur (Şekil 1).

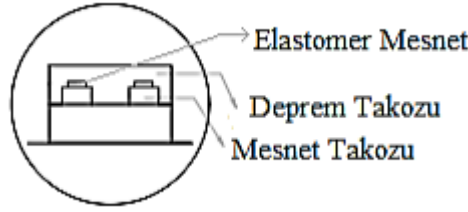
Köprü üst yapısını oluşturan prekast köprü kirişleri, I profillere sahiptirler. Köprü kirişleri, köprünün bir ucundan diğer ucuna kadar sürekli bir şekilde boyuna doğrultuda uzanmaktadır. Profilin üst başlığının et kalınlığı 10 cm, alt başlığın et kalınlığı ise 20 cm'dir. Profil yüksekliği 130 cm olup üst başlık genişliği 127,5 cm alt başlığı ise 70 cm genişliğindedir. Her platformda 13 adet kiriş bulunmaktadır. İlgili detaylar Şekil 2'de gösterilmiştir. Tabliye için 25 cm kalınlıkta demirli döşeme betonu imalatı tamamlanıp 6 cm asfalt kaplama yapılacaktır. Ayrıca Şekil 3'te görüldüğü gibi başlık kirişi ile öngermeli kirişlerin bağlantısı ise elastomer mesnetler aracılığıyla sağlanmıştır.



Şekil 1:
Köprü boykesiti



Şekil 2:
Köprü enkesiti



Şekil 3:
Elastomer mesnet yerleşimi

2.2. Sonlu Eleman Modeli

Çirmiş Köprüsü'nün yapısal davranışını saptamak amacıyla köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında tasarlanmıştır. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulurken aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınmıştır.

Köprü üst yapısı, bitişik nizamda, prekast, I kirişlere sahip olacak şekilde modellenmiştir.

Köprü kirişleri ve ayakları (kenar ayak ve orta ayak), çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Ayrıca köprü orta ve kenar ayakları köprü temelleri tarafından taşınacak şekilde tasarlanmıştır. Köprü temelleri alan elemanlarla tanımlanmıştır.

Köprü orta açıklık ve kenar ayak mesnetleri, yüksek rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır.

Kenar ayaklar ve orta ayaklar köprü kirişlerinin elastomer mesnetler üzerine yerleştirileceği düzende yani kenar ayaklar ve orta ayaklar köprü kirişlerini alttan destekleyecek şekilde tasarlanmıştır.

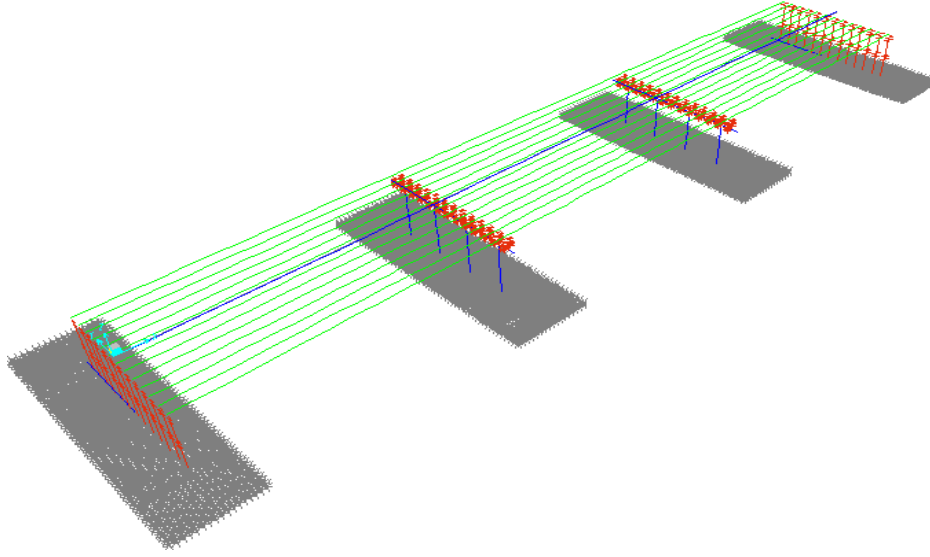
Prekast köprü kirişlerini yerlerine oturtmak için elastomer mesnetler üzerine yerleştirileceği şekilde tasarım yapılmıştır.

Elastomer mesnetler, başlık kirişleri üzerine planda verilen düzende ve de elastomer mesnetlerin orta ve kenar ayaklarda yerleşim derinliği uygun koordinatlara yapılmıştır.

Elastomer mesnet rijitlik hesapları sonucunda çıkan değerler programa aktarılmıştır.

Öngerme çelikleri birer yapı elemanı sayılmıştır. Tendonlar kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca, üstyapı segment uçlarına proje verilerinde belirtilen başlangıç ve bitiş lokasyonlarında bağlanmıştır.

Modellenen köprüye ait sonlu elemanlar modeli Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4:
Köprünün sonlu elemanlar modeli

2.3. Doğrusal Olmayan Yapım Aşamalı Analiz

2.3.1. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması

Karayolu köprüsünün yapısal davranışına, zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla köprü modelinde beton malzemesi için basınç dayanımı, yaşı, sünme ve büzülme etkileri, çelik malzemesi için ise çeliğin gevşemesi ele alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi strüktürel malzemelerin bu özellikleri, iklim koşullarına bağlı bir şekilde sürekli değişkenlik gösterebilmektedir. SAP2000’de betonun zamana bağlı özellikleri CEB-FIP 90 formülasyonuna göre tanımlanmaktadır. Tablo 1’de malzeme deformasyonlarının ele alınması için seçilmesi gereken CEB-FIP 90 tasarım kodunun analiz parametreleri verilmiştir. Tablo 2’de ise köprünün analizlerinde sonlu eleman modelinde dikkate alınması gereken malzeme parametreleri verilmektedir.

Tablo 1. CEB-FIP 90 tasarım kodunun analiz parametreleri (CEB-FIP, 1990)

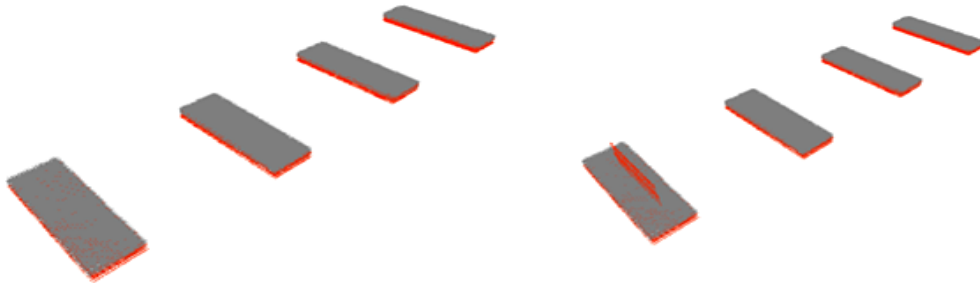
SAP2000’de CEB-FIP Parametreleri		
Çimento Tipi Katsayısı	0,2	Hızlı Sertleşen Yüksek Mukavemetli Çimento
	0,25	Normal ve Hızlı Sertleşen Çimento
	0,38	Yavaş Sertleşen Çimento
Bağıl Nem (%), BN	CEB-FIP 90’daki denklemler $40 \leq BN < 99$ için geçerlidir.	
Büzülme Katsayısı, B_{sc}	8	Hızlı Sertleşen Yüksek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

Tablo 2. Köprü analizlerinde dikkate alınması gereken malzeme parametreleri

PARAMETRELER	TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI			
		Tabliye	Ayaklar	Öngerme Çeliği
Malzeme Özelliği		Beton	Beton	Tendon
Zamana Bağlı Özellikler	Elastisite Modülü	+	+	-
	Sünme	+	+	-
	Büzülme	+	+	-
	Sünme Etkileri	Tam	Tam	-
	Çimento Tipi Katsayısı	0,25	0,25	-
	Bağlı Nem (%), BN	60	60	-
	Kavramsal Boyut (m)	0,1	0,1	-
	Büzülme Katsayısı, Bsc	5	5	-
	Büzülme Başlangıç Zamanı	0	0	-
	Çeliğin Gevşemesi	-	-	+
	Gevşeme Analiz Tipi	-	-	Tam
	Parametre Sınıfı	-	-	1

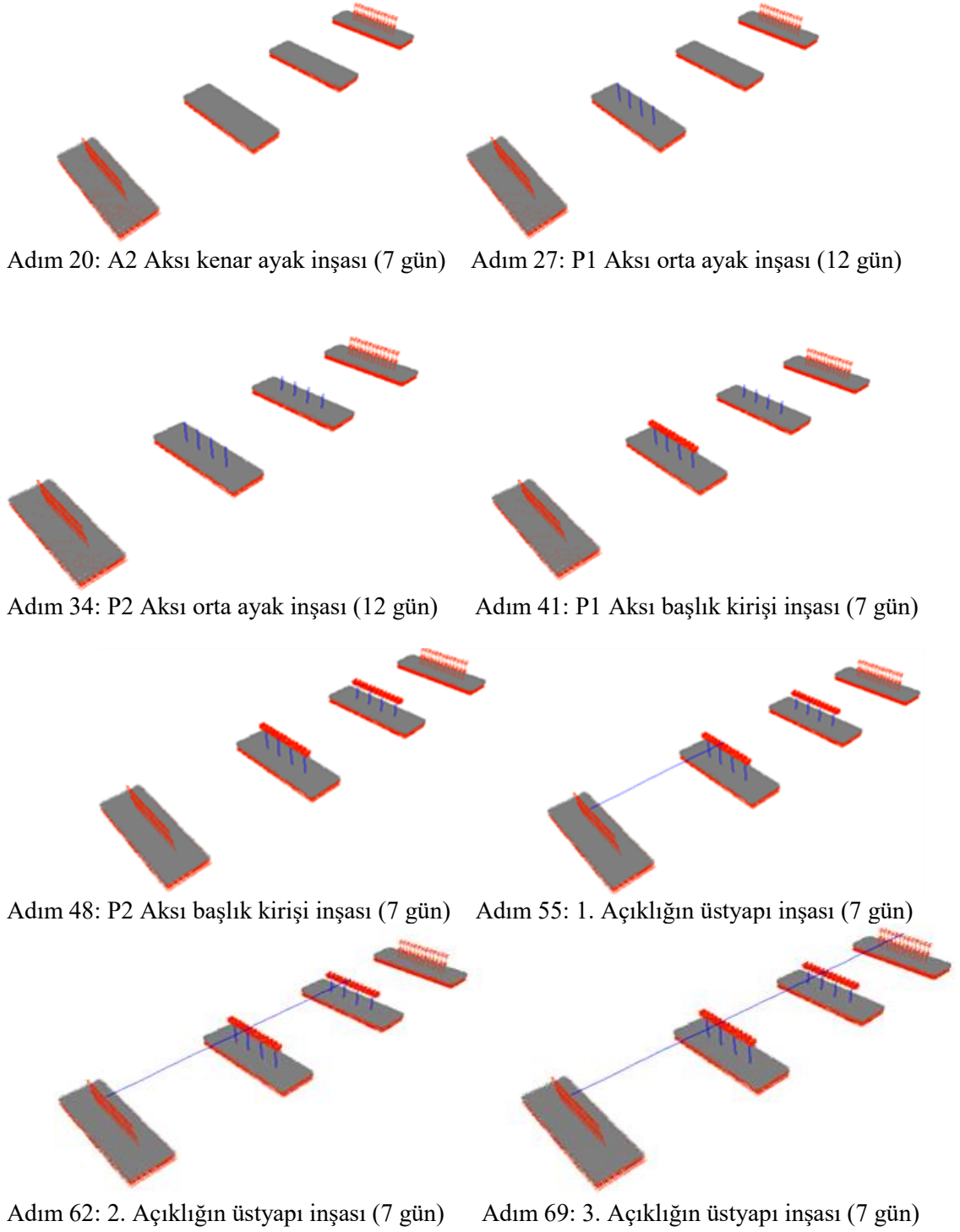
2.3.2. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması

Çirmiş Köprüsü'nün yapısal davranışına, yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla toplam inşa süresi 101 gün olarak dikkate alınmıştır. Köprü'nün sonlu eleman modeli 69 adımda oluşturulmuştur. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Karayolu köprüsünün inşasına dair sonlu eleman modeli Şekil 5'te verilmiştir.



Adım 1: Temellerin inşası (28 gün)

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



Şekil 5:
Köprü'nün inşasına dair sonlu eleman modeli

2.3.3. Yapım Aşamalı Analizlerde Dikkate Alınan Yük Durumları

SAP2000 sonlu eleman programında gerçekleştirilen analizlerde analiz tipi olarak “Nonlinear Staged Construction (Doğrusal Olmayan Aşamalı İnşaat)” ve geometrik doğrusal olmayan

parametreler için “P-Delta Etkisi” dikkate alınmıştır. P- Delta etkisi doğrusal olmayan geometrik etki olarak isimlendirilen ikincil bir etkidir. Yapılar büyük depremlere maruz kaldığında büyük yer değiştirmelerin ve şekil değiştirmelerin 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 etkiyen yükler sabit yükler ve hareketli yükler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Üst yapı tasarım analizlerinde yapı sistemini meydana getiren elemanların öz ağırlıkları sabit yükler sınıfında, yapının üzerinden geçtiği kabul edilen taşıt yükleri ve yaya yükleri hareketli yükler sınıfında değerlendirilmiştir. Çirilmiş Köprüsü’nün yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır.

- **Sabit Yük**

Yapı sistemini meydana getiren elemanların öz ağırlıklarıdır. Betonun birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 olarak dikkate alınmıştır. Kiriş ve tabliye zati ağırlıkları sırasıyla $13,844 \text{ kN/m}$ ve $8,654 \text{ kN/m}$ olarak hesaplanmıştır.

- **İlave Sabit Yük**

Asfalt, bordür ve yaya korkuluğu gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. Bu ağırlıklardan sırasıyla $1,274 \text{ kN/m}$, $2,885 \text{ kN/m}$ ve $0,231 \text{ kN/m}$ yük meydana gelmiştir.

- **Hareketli Yük**

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

H30-S24 yüklemesi, köprü üzerinden geçen standart kamyonlardan ya da standart kamyon katarına eşdeğer şerit yüklerinden meydana gelmektedir. H30-S24 yük sınıfını gösteren sembollerden H iki dingilli bir kamyonu, S ise ona bağlı bir yarım treyleri ifade etmektedir. H harfinden sonra gelen 30 rakamı kamyonun iki dingilinden aktarılan $W = 300 \text{ kN}$ ağırlığını, S harfinden sonra gelen 24 rakamı ise yarım treylerin tek dingilinden intikal eden ağırlığı yani 240 kN ’ u göstermektedir. Bu yük hesaplanırken AASHTO 3.12’ye göre hareketli yüklerin azaltılması, AASHTO 3.23.4.3’e göre her bir boyuna kirişe etkiyen hareketli yük miktarı ve AASHTO 3.8.2.1’e göre titreşim faktörü dikkate alınmıştır. AASHTO yönetmeliğine uygun olarak en kritik durum hesaplarda dikkate alındığında ön teker yükü $56,22 \text{ kN}$, arka teker yükü, $224,90 \text{ kN}$ olarak hesaplanmıştır.

Yaya yükü, AASHTO 3.14.1.1’e göre yaya hareketinin olabileceği alanlara 3 kN/m^2 lik düzgün yayılı bir şekilde hareketli yüklerle birlikte etkitilmelidir. Yaya yükü kompozite kesite etkidiği için tüm kirişlerce eşit oranda taşınacağı kabul edilmiştir. Bu durumda 1 kompozit kirişe etkiyen yaya yükü $1,385 \text{ kN/m}$ ’dir.

Fren yükü, dinamik etki katsayısı olmaksızın, şerit yüklerinin yüklenmesiyle elde edilen hareketli yükün %5’i yatay olarak köprüye 1.80 m (6 feet) yükseklikten uygulanması AASHTO 3.9’da belirtilmiştir. Bu yük $4,59 \text{ kN/m}$ olarak hesaplanmıştır.

- **Sıcaklık Etkisi**

Sıcaklık etkileri neticesinde meydana gelen gerilme ve deformasyonlar analizlerde dikkate alınmalıdır. Isı değişiminden dolayı oluşan etkilerin hesaplanmasında TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesine göre sıcaklık değişimi $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $20 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında alınmıştır. Isı genleşme katsayısı, AASHTO 8.5.3’te $0.0000108/^\circ\text{C}$ olarak belirtilmiştir. Sıcaklık etkisinden meydana gelen yük, ısı genleşme katsayısı dikkate alınarak $38,83 \text{ kN/mesnet}$ olarak hesaplanmıştır.

• Öngerme Çeliği Kuvvetleri

Öngerme çeliğinin meydana getirdiği yüküdür. Yüksek dayanıma sahip çeliğin belirli bir kuvvetle çekilip kilitlenmesi ve bu kuvvetin betona aktarılması ile öngerme işlemi elde edilmektedir. Beton dökülmeden önce çeliğin gerilme işlemi yapılıyorsa ön çekme (öngerme), beton dökülüp dayanım kazandıktan sonra yapılıyorsa ard çekme (ardgerme) adını almaktadır. AASHTO LFRD'ye göre öngerme kuvvetinin en büyük değeri, nihai dayanımının %75'i olarak dikkate alınmaktadır. Bu kuvvet, öngerme uygulama oranı, karakteristik çelik kopma dayanımı ve kablo kesit alanının çarpılmasıyla 195,51 kN olarak elde edilmiştir. Her açıklık için ayrı ayrı oluşturulan öngerme çeliği kuvvetleri, her kirişte bulunan 32 adet halata uygulanmıştır.

2.4. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Yapım Aşamalı Analiz

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, viyadük veya köprünün deprem yer hareketi etkisindeki hareket denkleminin, nonlineer iç kuvvet-şekil değiştirme bağlantıları kullanılarak zaman tanım alanında doğrudan entegrasyonudur. Bu durumda zaman tanım alanındaki analiz türü için yukarıda tanımlanan yapılar doğrusal olmayan davranış modelleri aynen geçerlidir. Ayrıca her bir kesit için histerezis ilişkilerinin de tanımlanması gereklidir (Aydınoğlu, 2005).

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapılar aşamalı analizde ise ilk olarak doğrusal olmayan yapılar aşamalı analiz hesabı yapılacaktır. Hesap sonucunda elde edilen doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri ve iç kuvvetler, deprem hesabının başlangıcında hesaba eklenir. Doğrusal davranış gösterdiği kabul edilir elemanlarda oluşan dinamik enerji kaybını, temsili hareket denklemlerinde viskoz sönüm matrisi kullanılır. Doğrusal olmayan yapı analizini gerçekleştirmek için plastik mafsallı davranış uygulama modelinde tanımlanmalıdır.

2.4.1. Plastik Mafsallı Davranış

Köprü ve viyadüklerin nonlineer davranışlarının modellenmesinde, geleneksel plastik mafsallı 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 mafsallı olarak adlandırılan noktasal eleman ise bu bölgenin tam ortasına yerleştirilir. Plastik mafsallı 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).

Orta ayak modelinde, ayaklar 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 orta ayaklarda P-M2-M3 plastik mafsallı tipi, kenar ayaklarda ise elevasyon duvarı kesitlerinin çok uzun olması sebebiyle bu kesitlere fiber P-M2-M3 mafsallı tipi atanmıştır.

Köprü ve viyadük ayakları için yaygın olarak kullanılan ve köprü deprem yönetmeliklerinde yer alan bağıntı Denklem 1'de verilmiştir.

$$L_p = 0,08L + 0,022f_{ye} \times d_{bl} \geq 0,044f_{ye} \times d_{bl} \quad (1)$$

Burada plastik mafsallı boyu (mm) L_p , ayak tabanı ile moment sıfır noktası arasındaki uzunluk (mm) L , ayak kesitindeki tipik donatının karakteristik akma dayanımı (MPa) f_{ye} , ayak kesitindeki tipik donatının çapı (mm) d_{bl} ile ifade edilmiştir.

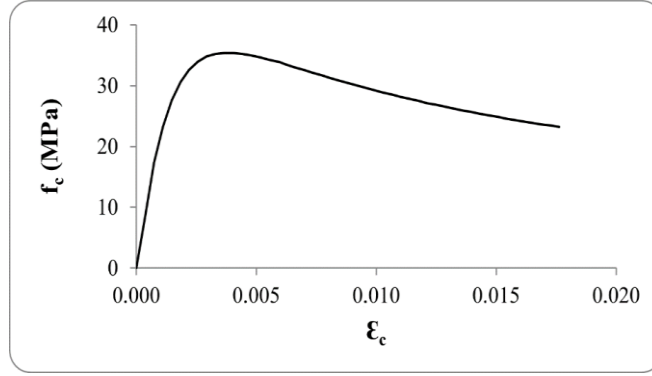
Denklem 1 yardımıyla yapılan hesaplar sonucunda, P1 aksında yer alan 6,60 m yüksekliğindeki orta ayaklar için L_p değeri: 0,676, P2 aksında yer alan 5,60 m yüksekliğindeki orta ayaklar için L_p değeri: 0,596 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler yapının doğrusal

olmayan analizi için ayakların alt ve üst uç kesitlerine atanan plastik mafsal verilerinde kullanılmıştır.

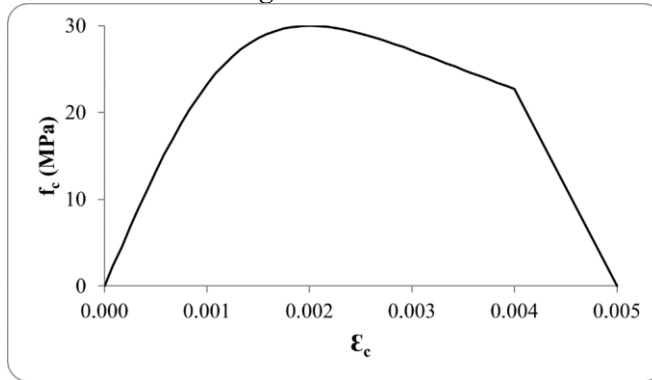
2.4.2. Malzeme Modelleri

Mevcut yapıda orta ve kenar ayaklarda beton sınıfı C30, donatı sınıfı ise S420 olarak kullanılmıştır. TBDY 2018 Ek 5A’da belirtilen bağıntılar dikkate alınarak sargılı ve sargısız beton modelleri ile donatı çeliğinin modeli oluşturulmuştur. Beton modeli olarak “Mander” beton modeline göre nonlineer malzeme tanımlaması yapılmıştır. Ayakların betonarme yapı olmasından dolayı histerezis eğrilerindeki enerji kaybının dikkate alınması için “Takeda” modeli kullanılmıştır. Donatı çeliği olarak doğrusal olmayan malzeme tanımlarında histerezis tipi “Kinematik” olarak belirlenmiştir. Ayak başlık bölgelerinde çekirdek olarak tanımlanan ve fret veya etriye ile sınırlanan beton kütlesi için sargılı beton modeli, çekirdek dışında kalan kabuk betonu için sargısız beton modeli oluşturulmuştur.

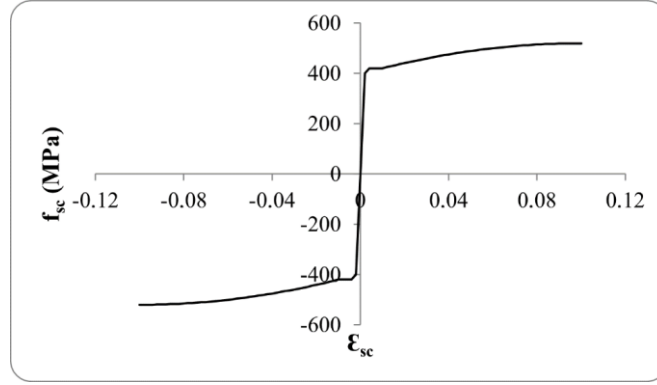
C30 karakteristik beton basınç dayanımına sahip olan orta ayağın programa aktarılan sargılı ve sargısız beton modelleri Şekil 6 ve Şekil 7, S420 sınıfı donatı çeliğinin modeli ise Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 6:
Sargılı beton modeli



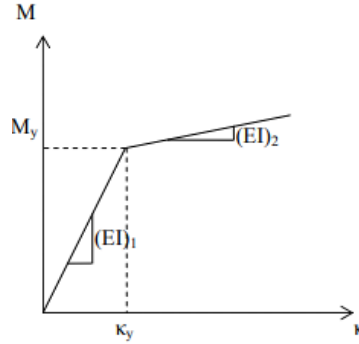
Şekil 7:
Sargısız beton modeli



Şekil 8:
Donatı modeli

2.4.3. Plastik Mafsal Kesitinde Moment-Eğrilik Bağıntısı

Her bir plastik mafsal kesitinde, “Mander sargılı / sargısız beton modeli” ve pekleşmeyi de içeren donatı çeliği gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak aksel kuvvete bağlı moment-eğrilik diyagramları çizilecek ve bu diyagramlar uygun biçimde “iki doğrusal (bilineer)” moment-eğrilik diyagramlarına Şekil 9’da gösterildiği gibi dönüştürülecektir.



Şekil 9:
İki doğrusal moment-eğrilik diyagramı (Aktaş, 2010).

Köprü ayaklarına plastik mafsal atanması için orta ayaklara etkiyen aksel kuvvet değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Moment-eğrilik bağıntılarını elde etmek için SAP2000 programında “Section Designer (Kesit Tasarımı)” arayüzü kullanılmıştır. Moment-eğrilik bağıntıları ve akma yüzeyleri elde edilen 250/100 cm boyutlarına sahip orta ayak kesitinin çekirdek bölgesinde sargılı beton kullanılırken çekirdek dışında kalan bölgede ise sargısız beton modeli kullanılmıştır.

2.4.4. Akma Yüzeyleri

Köprü orta ayakların enine doğrultuda çerçeve davranışı sergilemesinden dolayı aksel kuvvet değerleri sürekli akma momentini etkileyebilmektedir. Bundan dolayı doğrusal olmayan yapı analizinde daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar alabilmek için aksel kuvvet ve moment bağıntısını temsil eden akma yüzeylerinin saptanması gerekmektedir. Bu yüzeyler, bünye

bağıntılarının belirlediği eğri gruplarından oluşan, akma (kırılma) koşullarını ifade eden denklemlerin belirlediği kapalı eğriler grubu, akma (kırılma) yüzeyleri olarak tanımlanmaktadır (Agus, 2010; Çavdar, 2022).

“Section Designer (Kesit Tasarımı)” arayüzü kullanılarak orta ayakların akma yüzeyinin belirlenmesi için eksenel kuvvet değerine göre değişen moment değerlerini gösteren P-M2-M3 (Normal kuvvet-enine moment-boyuna moment) diyagramı düzenlenmiştir. P-M2-M3 etkileşim diyagramı SAP2000 programına plastik mafsalları atamasını 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 ve Çelik, 2022).

2.4.5. Kesitlere Plastik Mafsalların Tayini

Köprü orta ayaklarına plastik mafsalları atamasında, eksenel kuvvet ve bileşik eğilme etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Bu çubuk elemanlara P-M2-M3 plastik mafsalları atanmıştır. Kenar ayaklara ise perde duvar kesitlerinin çok uzun olması nedeniyle fiber P-M2-M3 plastik mafsalları program tarafından otomatik olarak atanmıştır. Plastik mafsalları elemanların i ve j uçları olarak adlandırılan (0,05 ve 0,95) noktalarından gerçekleştirilmiştir.

2.4.6. Etkin Kesit Rijitlikleri

Yığılı plastik davranış modeli dikkate alınarak modellenen yapı sistemini meydana getiren elemanların etkin kesit rijitlikleri $(EI)_e$, TBDY 2018’de belirtilen Denklem 2’de gösterildiği gibi belirlenir.

$$(EI)_e = \frac{M_y \times L_s}{\Theta_y \times 3} \quad (2)$$

Burada çubuk elemanda oluşan plastik mafsallara ait etkin akma momentlerinin ortalamaları M_y , çubuk elemanda oluşan plastik mafsalların etkin akma dönmelerinin ortalamaları Θ_y , kesme açıklığı L_s ile ifade edilmiştir. Rijitlik azaltma katsayısı ise Denklem 3’te verilmiştir.

$$\text{Rijitlik azaltma katsayısı} = \frac{(EI)_e}{(EI)_0} \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3’te verilen bağıntılar yardımıyla rijitlik azaltma katsayısı, 0,35 olarak belirlenmiştir.

2.5. Deprem Kaydının Seçimi

Zaman tanım alanında gerçekleştirilecek doğrusal olmayan yapı analizinde kullanılmak üzere 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Düzce İstasyonu DZC180 yatay ivme bileşeni dikkate alınmıştır. Yer hareketlerine ait ivme-zaman grafiği, 0,005 sn. adımlarla kaydedilmiş toplam 5437 adet veriden oluşmaktadır. İvme kaydı verileri yer çekimi ivmesi (g) biriminde olup, maksimum yer ivmesinin değeri 0,312 g’dir (Altunışık ve diğ., 2019).

2.6. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Yapım Aşamalı Analizin Hesap Yöntemi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz hesabının başlangıç adımında, karayolu köprüsünün doğrusal olmayan yapım aşamalı analizi kullanılmıştır. Deprem ivme kaydı programa aktarıldıktan sonra zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapı yüklemesinin SAP2000 programında tanımlanması gerekir. Bu yüklemeye tanımlanırken yüklemenin başlangıç koşulu, tipi, deprem ivme kaydı, AASHTO ve TBDY 2018 yönetmeliği dikkate alınarak sismik tasarım bilgileri ile hesaplanan ölçekleme katsayısı programa işlenir. P-Delta seçeneği ikinci mertebe etkilerini dikkate almak için aktif edilir. Deprem ivme kaydı için toplam adım sayısı, adım aralıkları ile beraber programa tanımlanır. Sayısal integrasyon yöntemi ve yapısal sönüm oranı programa girilerek yüklemeye işlemi tamamlanmış olur.

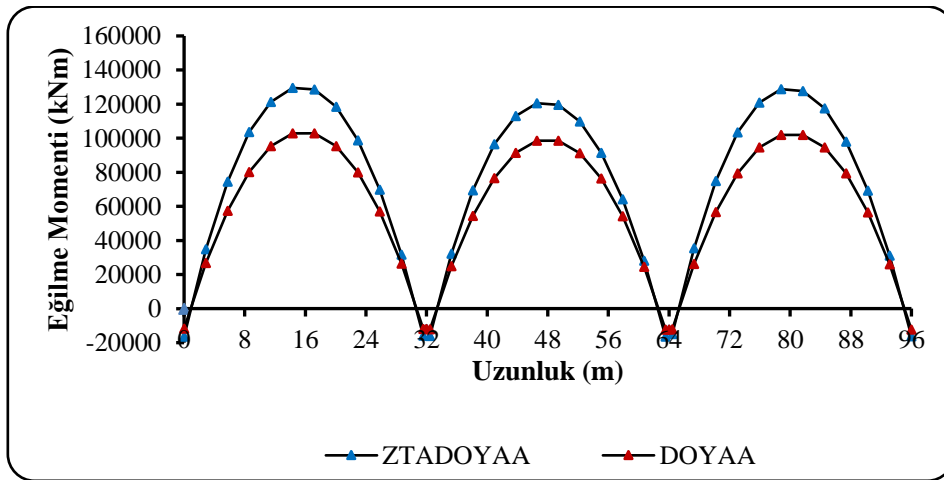
Ayrıca yapısal sönüm için, Hiber-Hughes-Taylor orantılı sönüm matrisi dikkate alınmıştır. Bu sönüm matrisinin tanımlanması için yapının ilk iki periyotları ve sönüm oranının programa işlenmesi gerekmektedir. Yapının birinci ve ikinci periyodu sırayla 1,001 sn ve 0,973 sn bulunarak bu değerler programa aktarılmıştır. Köprü modeli için sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmıştır.

3. BULGULAR

Bu bölümde SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilen “doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz (DOYAA)” ve “zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz (ZTADOYAA)” sonucunda köprü tabliye uzunluğu ve köprü ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri belirlenip mukayese edilmiştir.

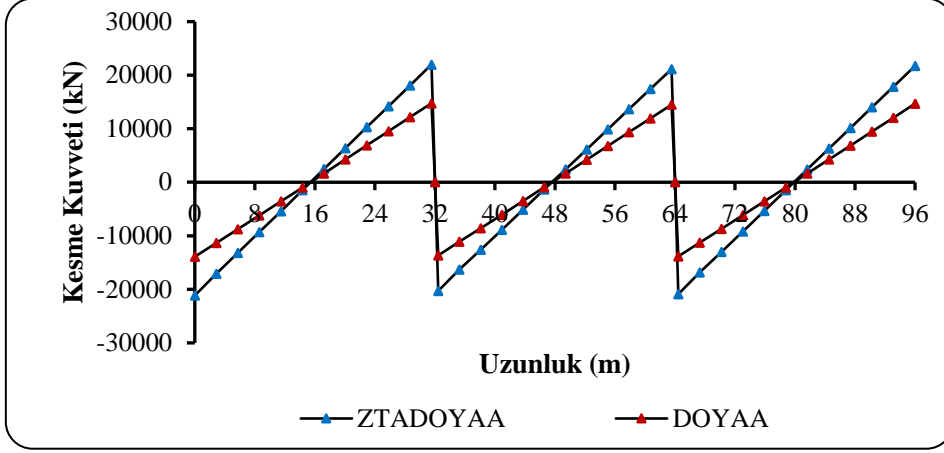
3. 1. Tabliye Davranışı

Doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz (DOYAA) ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz (ZTADOYAA) sonuçları tabliye uzunluğuna meydana gelen değişimlerinin karşılaştırılması Şekil 10-12’de gösterilmiştir. Tabliye uzunluğu boyunca düşey yer değiştirme değerleri ve eğilme momenti değerleri her bir açıklık ortasında artıp köprü ayakları üzerinde bu değerler azalmaktadır. Kesme kuvveti değerleri ise her bir açıklık ortasında minimize olup köprü ayakları üzerinde ise en yüksek değerlere ulaşmaktadır.

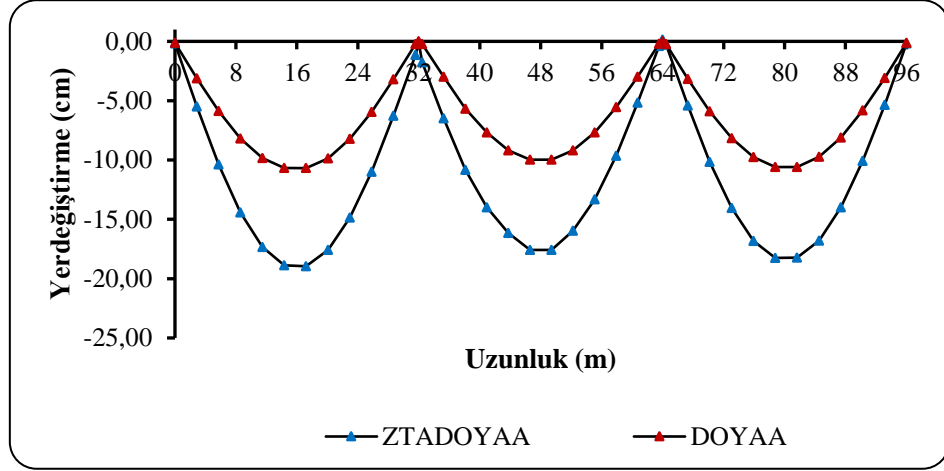


Şekil 10:

Tabliye uzunluğuna göre eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması



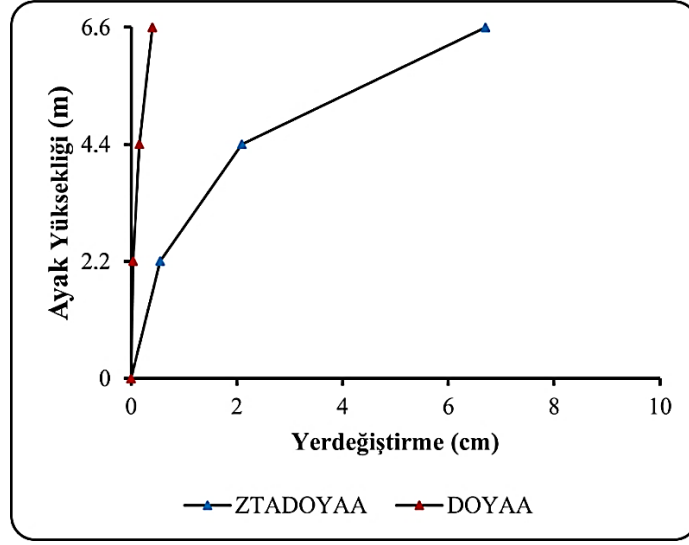
Şekil 11:
Tabliye uzunluğunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması



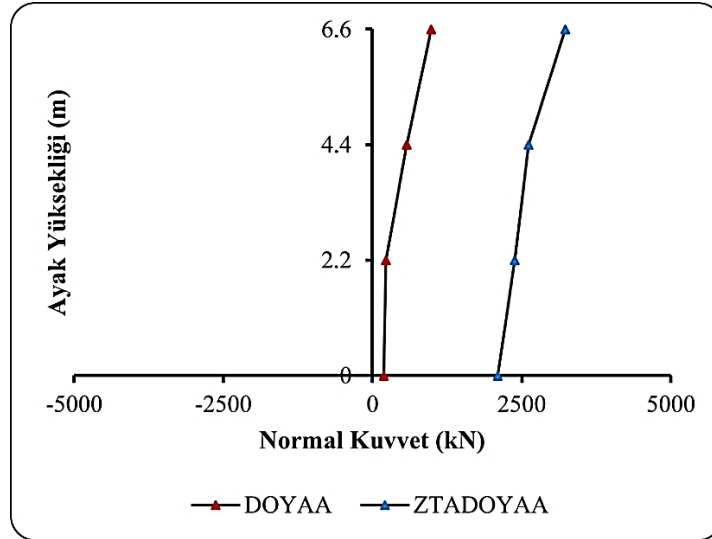
Şekil 12:
Tabliye uzunluğunca düşey yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

3. 2. Orta Ayak Davranışı

Doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz (DOYAA) ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşım analiz (ZTADOYAA) sonucunda orta ayak yüksekliği boyunca meydana gelen değişimlerinin karşılaştırılması Şekil 13 ve 14'te gösterilmiştir. Köprü orta ayak yüksekliği arttıkça yatay yer değiştirme ve normal kuvvet değerleri atmaktadır.



Şekil 13:
Orta ayak yüksekliğince yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 14:
Orta ayak yüksekliğince normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

Her iki analiz sonucunda elde edilen en yüksek değerlerin karşılaştırması Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. DOYAA ve ZTADOYAA sonucu maksimum değerlerin karşılaştırılması

	Maksimum Değer	
	DOYAA	ZTADOYAA
Tabliye Davranışı:		
Eğilme Momenti	102.830,03 kN	129.520,18 kN
Kesme Kuvveti	14.753,73 kN	21.993,58 kN
Düşey Yerdeğiştirme	10,69 cm	18,96 cm
Orta Ayak Davranışı:		
Yatay Yerdeğiştirme	0,40 cm	6,70 cm
Normal Kuvvet	980,09 kN	3.228,41 kN

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında ele alınan karayolu köprüsünün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonları etkisinin, doğrusal olmayan deprem analizi yöntemi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sonlu eleman paket programında tasarımı yapılan köprü modelinde “doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz” ve “zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz” olmak üzere iki tipte analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışmaya konu olan karayolu köprüsünün üst yapısı, öngörme kirişler ve tabliyeden meydana gelmektedir. Ülkemizde öngermeli kirişlerin hesap ve tasarım esaslarında uluslararası kabul gören AASHTO Köprü Tasarım Yönetmeliği, TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi ve TS 3233 (1979) Yönetmeliği kullanılmaktadır. Bu yönetmelikler çerçevesinde köprü üst yapısının tasarım esasları belirlenmiştir. Ayrıca köprüye etkiyen yükler bu yönetmeliklere uygun olarak hesaplanmıştır. Öncelikli olarak köprünün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme deformasyonlarının ve yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla “doğrusal olmayan yapım aşamalı analizi” gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan yapım aşamalı analizde beton malzemesi için basınç dayanımı, yaşı, sünme ve büzülme etkileri, çelik malzemesi için ise çeliğin gevşemesi ve P-Delta etkisi dikkate alınmıştır. Daha sonra doğrusal olmayan yapım aşamalı analizin, zaman tanım alanında gerçek deprem ivme kaydı ile çözümlemesinin sağlandığı “zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analizi” gerçekleştirilmiştir.

“Doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz” sonuçları ve “zaman tanım alanında doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz” sonuçlarından elde edilen maksimum değerler, karşılaştırmalı olarak incelendiğinde tabliye uzunluğunca eğilme momenti değeri 26.690,15 kN, kesme kuvveti değeri 7.239,85 kN, düşey yerdeğiştirme değeri ise 8,27 cm artmıştır. Ayak yüksekliğince ise yatay yerdeğiştirme değeri 6,30 cm, normal kuvvet değeri ise 2.248,32 kN artış sergilemiştir. Böylece doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarına göre yapı elemanlarında daha yüksek kesit tesirleri ve yer değiştirme değerleri vermektedir. Bu suretle ülkemizin aktif fay kuşağında yer almasından dolayı köprüler gibi teknik ve önemli mühendislik yapılarının yapısal davranışının daha güvenilir ve sağlıklı tasarlanması için sadece servis durumu ve yapım aşamalarını dikkate alacak şekilde değil zaman tanım alanında gerçek ivme kayıtlarının da kullanılarak dinamik çözümlenmesi gerekir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

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.

KAYNAKLAR

1. AASHTO (2002) Standard specifications for highway bridges, Washington.
2. AASHTO LRFD. (2017) Bridge design specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
3. Agus, A. (2010) Mevcut bir karayolu köprüsünün deprem performansının doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler ile belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Ahmed, A.T.M.R. ve Anam, I. (2003) Dynamic analysis of RC bridges, *2nd International Conference on Structural Engineering*, Cape Town, South Africa.
5. Aktaş, E. (2010) Öngerilme kirişli bir köprü tasarımı ve performansının değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
6. Altunışık, A. C., Ateş, Ş. ve Adanur, S. (2019) İnşaat Mühendisliğinde SAP2000 Uygulamaları, Dynamic Academy, Trabzon.
7. Aydınoglu, M. N. (2005) Mevcut veya güçlendirilen köprü ve viyadüklerinin deprem performanslarının nonlinear analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi, TC Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Raporu, İstanbul.
8. CEB-FIP Model Code 1990. (1993) CEB-FIP model code, London. doi.org/10.1680/ceb-fipmc1990.35430.
9. Çavdar, Ö. ve Şener, M.A. (2022) Dilimsel Dengeli Konsol Yöntemi ile Tasarlanan Bir Köprü'nün Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Yapısal Davranış ve Maliyet Açısından İncelenmesi, *El-Cezeri: Journal of Science and Engineering*, 9-2. 469- 491. doi.org/10.31202/ecjse.962089.
10. Çavdar, Ö. ve Çelik, H.İ. (2022) Yüksek Bir Binanın Deprem Performansına Dış Destek Kirişlerin Etkisinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerle İncelenmesi, *Uludag University Journal of the Faculty of Engineering*, 27-1. 271-290. doi.org/10.17482/uumfd.901862
11. Dolati, A., Taghikhany, T. ve Rahai, A. (2012) Seismic demands of the case study highway bridge under near fault pulse-like ground motion. *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
12. Filho, J., Beghetto, F. ve Remor, J. (2017) A methodology for the dynamic analysis of railway bridges subjected to vehicular loads, *Structures Congress*, 04-08. Brazil. doi: 10.1061/9780784480403.019
13. Karaca, H. (2017) Yakın fay etkisindeki uzun açıklıklı köprü sistemlerin dinamik analizi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
14. KGM (1973) Yol köprüleri için teknik şartname, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

15. Özmen, A. ve Sayın, E. (2020) Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 956-965. doi:10.28948/ngumuh.715121
16. PCI (1985) PCI design handbook–precast and prestressed concrete, Chicago.
17. SAP2000 (2015) Integrated finite element analysis and design of structures, computers and structures inc, California.
18. Şancı, E. (2021) Yüksek yapı sistemlerinin performanslarında P-Delta etkisinin değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
19. TBDY (2018) Türkiye bina deprem yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
20. TS 3233 (1979) Öngerilmeli beton yapıların hesap ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. Xia, H. ve Zhang, N. (2005) Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains, *Computers and Structures*, 1891-1901. China. doi:10.1016/j.compstruc.2005.02.014