

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SANDIK KESİTLİ BETONARME KÖPRÜLERİN TAŞIT YÜKÜ
ETKİSİNDEKİ YAPISAL DAVRANIŞI**

ENES MİRAC KARADAĞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADİYAMAN, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SANDIK KESİTLİ BETONARME KÖPRÜLERİN TAŞIT YÜKÜ ETKİSİNDEKİ YAPISAL DAVRANIŞI

Enes Miraç KARADAĞ

Adıyaman Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Murat PALA
Yıl : 2021, Sayfa sayısı: 66

Jüri : Prof. Dr. Murat PALA
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÜNSAL
Doç. Dr. Nihat ATMACA

Bu çalışmada SAP2000 programında sandık kesitli betonarme köprü, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek taşıt yükü etkisi altındaki yapısal davranışı incelenmiştir. Taşıt yükünün köprü yapısına olan etkisini görmek için iki farklı analiz yapılmıştır. Hareketli yük analizi yapılarak taşıt yükü etkisinde köprü yapısında meydana gelebilecek minimum ve maksimum etkiler görülmüştür. Köprü modeli dört açıklık ve üç ayaktan oluşmaktadır. Bu analiz türü için köprü tabliyesi üç gözlü sandık kesit ve tek gözlü sandık kesit olarak modellenmiştir. İki modele göre 16 farklı açıklık durumunda hareketli yük analizi yapılmıştır. Şartnamelerde belirtilen üç farklı kamyon türü için bu analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü yapısında meydana gelen deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında analiz yapılarak analiz süresi boyunca taşıt yükü etkisinde, köprü yapısında meydana gelebilecek etkiler görülmüştür. Köprü modeli üç gözlü, sandık kesitli ve üç açıklıklıdır. Şartnamelerde tanımlanan H30-S24 kamyonu köprü üzerinden beş farklı hızda, beş farklı sayıda ve 5 farklı takip mesafesinde geçirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü yapısında meydana gelen deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Köprü; Sandık Kesit; SAP2000; Taşıt Yüğü

ABSTRACT

MSc Thesis

STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES WITH BOX GIRDER UNDER THE INFLUENCE OF VEHICLE LOAD

Enes Miraç KARADAĞ

Adiyaman University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Murat PALA
Yıl : 2021 , Number of pages: 66

Jury : Assoc. Prof. Dr. Murat PALA
Asist Prof. Dr. İsmail ÜNSAL
Asist Prof. Dr. Nihat ATMACA

In this study, in SAP2000 program, reinforced concrete bridge with box girder was modeled by finite element method and its structural behavior under the influence of vehicle load was examined. Two different analyses were conducted to see the impact of vehicle load on the bridge structure. By analyzing the moving load, the minimum and maximum effects that can occur in the bridge structure were observed in the impact of vehicle load. The bridge model consists of four spans and three legs. For this type of analysis, the bridge table is modeled as three-eye box girder and one-eye box girder. Moving load analysis was performed in 16 different aperture cases according to the two models. These analyses were carried out for three different types of trucks specified in the specifications. As a result of the analysis, the deformation, shear force and bending moment values of the bridge structure were compared. During the analysis period, the effects of vehicle load and bridge structure were observed by analyzing in the time definition area. The bridge model has three eyes, box girder and three spans. The H30-S24 truck defined in the specifications was passed over the bridge at five different speeds, five different numbers and 5 different tracking distances. As a result of the analysis, the deformation, shear force and bending moment values of the bridge structure were compared.

Key Words: Bridge; Box Girder; SAP2000; Vehicle Load

BEYAN

“Sandık Kesitli Betonarme Köprülerin Taşıt Yüğü Etkisindeki Yapısal Davranışı” başlıklı tezimde çalışmaları tamamen akademik kurallara ve etik değere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Enes Miraç KARADAĞ

TEŞEKÜR

Çalışmalarım sırasında kıymetli bilgi ve birikimi ile bana yol gösteren ve tezimin her aşamasında bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Murat PALA'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana destek veren ailem ve değerli dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
BEYAN	III
TEŞEKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
RESİMLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. KÖPRÜ YAPISININ MODELLENMESİ	10
3.1. Köprü Modelinin Oluşturulması	10
3.1.1. Hareketli Yük Analizi İçin Tasarlanan Köprü Modeli	15
3.1.2. Zaman Tanım Alanında Analiz İçin Tasarlanan Köprü Modeli	17
3.2. Taşıt Yüklemesinin ve Yol Güzergahının Tanımlanması	19
3.2.1. Hareketli Yük Analizi İçin Yol Güzergahı ve Taşıt Yüklemesi	20
3.2.2. Zaman Tanım Alanında Analiz İçin Yol Güzergahı ve Taşıt Yüklemesi	21
3.3. Köprü Analizinin Yapılması	22
3.3.1. Hareketli Yük Analizi	22
3.3.2. Zaman Tanım Alanında Analiz	23
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	25
4.1. Hareketli Yük Analizi Bulguları	25
4.1.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma	26
4.1.1.1. Köprünün z Eksenindeki Yer Değiştirme Değerleri	26
4.1.1.2. Köprünün y Eksenindeki Dönme Değerleri	30
4.1.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma	33
4.1.2.1. Köprü Ayaklarındaki Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Değerleri	33
4.1.2.2. Köprü Açıklıklarındaki Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Değerleri	37
4.2. Zaman Tanım Alanında Analiz Bulguları	40
4.2.1. Taşıt Hızına Göre Yükleme Durumları	42
4.2.1.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma	42
4.2.1.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma	44
4.2.2. Taşıt Sayısına Göre Yükleme Durumları	47
4.2.2.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma	47
4.2.2.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma	50
4.2.3. Araç Takip Mesafesine Göre Yükleme Durumları	53
4.2.3.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma	53
4.2.3.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma	56
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	59

KAYNAKLAR.....	62
KİŞİSEL BİLGİLER	65



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Karayolları yük sınıfları [34]	19
Çizelge 4.1. Karşılaştırma yapılan açıklık durumları.....	26
Çizelge 4.2 Taşıt yükleme durumları	41



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Analitik sonlu eleman modeli [15]	13
Şekil 3.2. Betonarme ve ön gerilmeli köprü tabliyelerinin kesit tipleri [31]	14
Şekil 3.3 Köprü modelinin x-z ekseninde görüntüsü, mesnet türleri ve eleman uzunlukları.....	16
Şekil 3.4 Köprü tabliyesinin kesit özellikleri a) Tek Gözlü Sandık Kesit Özellikleri b) Üç gözlü sandık kesit özellikleri.....	16
Şekil 3.5 Hareketli yük analizi için modellenen köprü modelinin üç boyutlu görünümü	17
Şekil 3.6 Köprü modelinin x-z ekseninde görüntüsü, mesnet türleri ve eleman uzunlukları.....	17
Şekil 3.7 Köprü modelinin kesit özellikleri a) Tabliye kesit özellikleri b) Ayak kesit özellikleri.....	18
Şekil 3.8 Zaman tanım alanında analiz için modellenen köprü modelinin üç boyutlu görünümü	18
Şekil 3.9 Kamyon çeşitleri ve yükleme açısından özellikleri (Uluğ [33] değiştirilerek kullanılmıştır).....	19
Şekil 3.10 H30-S24 kamyonunun programa tanımlanması	20
Şekil 3.11 H30-S24 kamyonunun eşdeğer şerit yüklemesinin programa tanımlanması	21
Şekil 3.12 Yol güzergahı ve köprüye etki ettirilen taşıtların görünümü	22
Şekil 3.13 Hareketli yük analizinin tanımlanması	23
Şekil 3.14 Taşıt yükünün zaman tanım alanı [21]	24
Şekil 3.15 Zaman tanım alanında analizin tanımlanması.....	24
Şekil 4.1. Köprü açıklıklarının belirtilmesi ve karşılaştırma yapılan noktalar	25
Şekil 4.2. Köprü yapısındaki z eksenindeki yer değiştirmeler.....	26
Şekil 4.3 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler.....	27
Şekil 4.4 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler.....	28
Şekil 4.5 Tek gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler.....	29
Şekil 4.6 Üç gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler.....	29
Şekil 4.7 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme	30
Şekil 4.8 Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme	31
Şekil 4.9 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme	32
Şekil 4.10 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme	32
Şekil 4.11 a) Kesme kuvveti diyagramı b) Eğilme momenti diyagramı.....	33

Şekil 4.12. Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın tabliyeyle birleştiği noktadaki kesme kuvveti.....	34
Şekil 4.13 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın tabliyeyle birleştiği noktadaki kesme kuvveti.....	35
Şekil 4.14 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti.....	36
Şekil 4.15 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti.....	37
Şekil 4.16 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti	38
Şekil 4.17 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti	38
Şekil 4.18 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti	39
Şekil 4.19 Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti	40
Şekil 4.20 Köprü elemanları birleşim noktaları ve köprü elemanlarının numaralandırılması.....	41
Şekil 4.21 Köprü yapısında, tüm taşıt hızlarına göre yükleme durumlarında z ekseninde oluşan en büyük yer değiştirmeler	42
Şekil 4.22 Köprü'nün 2'nci ve 6'ncı noktalarında y eksenini yönündeki dönme	43
Şekil 4.23 Köprü'nün 5'inci noktasında y eksenini yönündeki dönme.....	44
Şekil 4.24 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti ...	45
Şekil 4.25 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti.....	45
Şekil 4.26 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti	46
Şekil 4.27 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti.....	46
Şekil 4.28 Köprü üzerinden 2 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	47
Şekil 4.29 Köprü üzerinden 4 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	48
Şekil 4.30 Köprü üzerinden 6 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	48
Şekil 4.31 Köprü üzerinden 8 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	48
Şekil 4.32 Köprü üzerinden 10 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	49
Şekil 4.33 Köprü'nün 2'nci ve 6'ncı noktalarında y eksenini yönündeki dönme	49
Şekil 4.34 Köprü'nün 5'inci noktasında y eksenini yönündeki dönme.....	50
Şekil 4.35 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti ...	51
Şekil 4.36 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti.....	51
Şekil 4.37 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti	52
Şekil 4.38 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti.....	52
Şekil 4.39 Araç takip mesafesi 10 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	53
Şekil 4.40 Araç takip mesafesi 20 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	54

Şekil 4.41 Araç takip mesafesi 30 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	54
Şekil 4.42 Araç takip mesafesi 40 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	54
Şekil 4.43 Araç takip mesafesi 50 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler.....	55
Şekil 4.44 Köprünün 2'nci ve 6'ncı noktalarında y eksen yönündeki dönme	55
Şekil 4.45 Köprünün 5'inci noktasında y eksen yönündeki dönme.....	56
Şekil 4.46 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti ...	56
Şekil 4.47 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti.....	57
Şekil 4.48 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti	57
Şekil 4.49 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti.....	58



RESİMLER DİZİNİ

Resim 1.1 Sclayn Köprüsü [6]	1
Resim 1.2 Rafsund Köprüsü [7].....	2
Resim 1.3 Stolma Köprüsü [8].....	2



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

<i>cm</i>	: Santimetre
<i>ft</i>	: Fit
<i>h</i>	: Saat
<i>km</i>	: Kilometre
<i>KN</i>	: Kilonewton
<i>KNm</i>	: Kilonewtonmetre
<i>m</i>	: Metre
<i>mm</i>	: Milimetre
<i>rad</i>	: Radyan

Kısaltmalar

<i>a</i>	: Orta Açıklık Uzunluğu
<i>AASHTO</i>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>ANSYS</i>	: Analysis System
<i>b</i>	: Yan Açıklık Uzunluğu
<i>BEF</i>	: Beam of Elastic Foundation
<i>FSM</i>	: Finite Strip Method
<i>C</i>	: Beton Sınıfı
<i>CSiBridge</i>	: Computers and Structures Incorporated
<i>H30-S24</i>	: Kamyon dan intikal eden ağırlık 30 ton-Yarım treyler yükü 24 ton
<i>LFRD</i>	: Load and Resistance Factor Design
<i>PTI</i>	: Post Tension Institute
<i>SAP2000 V20</i>	: Structural Analysis Program 2000 Version 20
<i>YSA</i>	: Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Ulaşım, insanların günlük yaşamında en çok etkili olan faaliyetlerden biridir. Genellikle mal, insan ve fikirlerin taşınması olarak tanımlanabilir [1]. İnsan ve mal ulaşımı; karayolu, denizyolu, demiryolu ve havayolu ile sağlanır. Köprüler insanlık tarihinin eski dönemlerine kadar uzanan çeşitli coğrafi engelleri aşmak için kullanılan yapılardır. Üzerinden demiryolu, karayolu, yaya yolu veya iletim hattı geçirilmesini sağlayan iki ucundan ayaklara oturan veya gerektiğinde farklı genişliklerde ve birden fazla açıklıklardan oluşan yapılardır [2,3]. Ahşap köprüler, demir köprüler, çelik köprüler, betonarme köprüler ve ön gerilmeli beton köprüler günümüzde var olan köprü çeşitleridir.

Sandık kesitin kullanılması birçok avantaj sağlar. En büyük avantajlarından biri kesitin minimum ağırlıkla yüksek rijitlik ve dayanım sağlamasıdır. Köprü üzerindeki sabit yükler arttıkça göreceli etkinlik de artmaktadır [4].

İlk kutu kesitli köprü olan Sclayn, 1948'de Belçika'da yapılmıştır. Maaş nehri üzerine yapılmıştır. 62.7 metre uzunluğuna sahip iki açıklıklı ve öngerilmeli betondan inşa edilmiş bir köprüdür [5]. Köprü, Resim 1.1'de görülmektedir.



Resim 1.1 Sclayn Köprüsü [6]

Dünyada farklı yerlerde, farklı özelliklerde kutu kesitli köprüler vardır. Raftsund Köprüsü Norveç'te bulunan 1998 yapımı bir köprüdür. Sudan yüksekliği 45 metredir ve 711 metre uzunluğa sahiptir. Resim 1.2'de Rafsund Köprüsü görülmektedir.



Resim 1.2 Rafsund Köprüsü [7]

Norveç'te 1998 yapımı bir diğer kutu kesitli köprü, Stolma Köprüsü'dür. 467 metre uzunluğunda, 9 metre genişlikte bir köprüdür. Stolma Köprüsü Resim 1.3'te görülmektedir.



Resim 1.3 Stolma Köprüsü [8]

Köprülerin tasarımında Karayolları Genel Müdürlüğü Yol ve Köprüler Teknik Şartnamesinden yararlanılmaktadır. Fakat bu şartname günümüz şartlarında yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden Karayolları Genel Müdürlüğü, AASHTO ve AASHTO LRFD yönetmeliklerini benimsemiştir. AASHTO LRFD, köprülerde kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan davranışını hesaba katar ve farklı köprü yapıları için kuvvet esaslı doğrusal yöntemleri benimseyerek köprülerin tasarlanması sağlar. AASHTO LRFD yönetmeliği, AASHTO yönetmeliğinden sonra yürürlüğe girmiştir. AASHTO yönetmeliğinde köprü tasarımı, yük faktörü yöntemi esas alınarak yapılır. AASHTO LRFD yönetmeliği yük ve dayanım faktörlerini tasarımda esas alır [9]. AASHTO LRFD yönetmeliği 3.2 ile 4 kat arasında değişen daha emniyetli bir tasarım anlayışını benimserken önceki yönetmelikte bu 1.5 ile 4.5 kat arasında değişen emniyetli tasarım yapabilmektedir [10]. Bu çalışmada köprü tasarımı bu yönetmeliklere göre yapılmıştır.

Köprü üzerinden geçen taşıtların köprü yapısına, statik etkisinin yanı sıra dinamik etkisi de vardır. Taşıt ve köprü tabliyesi arasında oluşan titreşim yükleri zamanla köprü yapısında hasarlar oluşturabilir. Bu durum, köprü bakım maliyetlerini artıracak ve güvenlik sorunu çıkaracaktır [11]. Bu çalışma, köprü yapısına taşıt yükünün etkisinin önemli olmasından dolayı yapılmıştır.

Bilgisayar programlarının gelişmesiyle yapı elemanları bilgisayar ortamında modellenebilmektedir. Bu sayede yapı davranışı, çeşitli yük durumları altında daha detaylı gözlemlenebilmektedir. Köprü elemanlarının bilgisayar ortamında modellenmesiyle sorun oluşturabilecek durumlar daha detaylı görülebilmektedir ve bu sorunları ortadan kaldırmak için istenilen değişiklikler yapılabilir. Modelleme çalışmalarıyla analitik çözüm sonuçlarına ve deneysel sonuçlara göre daha yaklaşık sonuçlar elde edilebilir. Modelleme çalışmaları diğer çalışmalara göre daha az zaman alan ve daha ekonomik çalışmalar olmuştur [12].

Bu çalışmada SAP2000 programında iki farklı analiz yapılarak sandık kesitli köprü incelenmiştir. Köprü, sonlu elemanlar metoduna göre üç boyutlu modellenmiştir. AASHTO yönetmeliklerine ve Karayolları Genel Müdürlüğü Yol ve Köprüler Teknik Şartnamesine uygun olarak modellenmiştir. Hareketli yük analizi yapılarak taşıt yükü etkisinde köprü yapısında meydana gelebilecek en elverişsiz

durumdaki etkiler görülmüştür. Bu analiz türü için köprü tabliyesi üç gözlü sandık kesit ve tek gözlü sandık kesit olarak modellenmiştir. İki modele göre 16 farklı açıklık durumunda hareketli yük analizi yapılmıştır. Şartnamelerde belirtilen üç farklı kamyon türü için bu analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü yapısında meydana gelen deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında analizler yapılarak farklı taşıt yüklemelerinde köprü yapısında meydana gelebilecek etkiler görülmüştür. Değişken kesit olmayan üç gözlü, sandık kesitli ve üç açıklıklı olan betonarme bir köprü modeli incelenmiştir. Taşıt yükleri köprü yapısına dinamik yük olarak etki ettirilmiştir. Köprü üzerinden geçirilen kamyonların hızları, sayısı ve takip mesafeleri değiştirilerek farklı yükleme durumları oluşturulmuştur. Köprü modeli her yükleme durumu için zaman tanım alanında doğrusal analiz yöntemiyle analiz edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zaman içerisinde gelişen teknoloji, hayatımızı çeşitli yönlerden kolaylaştırır. Teknolojinin gelişmesiyle bilinmezleri keşfetme merakı artmaktadır. İnsan nüfusunun artması ve hızlı yaşam tarzı çeşitli ihtiyaçlar doğurmuştur. Hızlı ve konforlu ulaşım da bu ihtiyaçlardan biridir. İnsan ve mal ulaşımı, günümüzde en çok karayolu ile sağlanmaktadır. Fakat çeşitli coğrafi engeller karayolu ulaşımını birçok açıdan olumsuz etkilemiştir. Bu engelleri aşmak için kullanılan en önemli yapılardan biri köprülerdir. Bu yüzden köprü yapısı hakkındaki araştırmalar önem kazanmıştır. Köprü yapısı hakkında geçmişte yapılan analitik çözümler uzun zaman almaktadır. Günümüzde bilgisayar programlarının gelişimiyle köprü yapısı, bilgisayar ortamında modellenebilmektedir. Bu sayede daha detaylı ve daha ekonomik çalışmalar olmuştur. Hareket eden araçların köprü üzerindeki dinamik etkisi, köprülerin tasarımı ve değerlendirilmesi büyük ilgi görmüştür. Bu konuda farklı geometrideki ve farklı malzemeden yapılmış köprüler araştırılmıştır. Bu çalışmada sandık kesitli köprülerin araç yükü etkisindeki davranışı ele alınmıştır. Yapılan çalışmanın öncesinde pek çok çalışma yapılmıştır.

Ekiz [2] yaptığı çalışmada sandık kesitli köprülerin hesap yöntemlerinden ve bilgisayar uygulamalarından bahsetmiştir. Kapalı kesitlerin burulması ve genel olarak eğilmeli burulmadan söz etmiştir. Sandık kesitli köprüler için 6 ayrı metod incelemiştir. Her yöntem için analitik çözümler sunmuştur. Bu yöntemlerin sandık kesitli köprülerde nasıl kullanılacağına dair önemli sonuçlar ortaya koymuştur.

Huang ve ark. [13] yaptıkları çalışmada ince cidarlı kutu kesitli köprülerin taşıt yükü etkisi altındaki titreşimlerini incelemişlerdir. Kamyon yükünden dolayı ince cidarlı köprünün dinamik davranışını görmek için bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde kutu kesitli köprü çok sayıda ince cidarlı kirişlere bölünmüştür. AASHTO yönetmeliğinde tanımlanan HS20-44 kamyonu 11 serbestlik derecesine sahip doğrusal olmayan bir araç modeli olarak düşünülmüştür. Analizlerde zayıf, orta, iyi ve çok iyi olmak üzere 4 farklı tabliye yüzeyi kullanılmıştır. Katlanmış plak teorisi ile uygulanan yöntemin sonuçları arasında kıyaslamalar yapmışlardır. Yapılan yöntemin iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda düşey dinamik

hareket sırasında eğilme momenti, birkaç titreşim modunda etkiliyken burulma ve çarpılma daha fazla modda etkili olmuştur.

Lei ve Noda [14] yaptıkları çalışmada köprülerin günümüz yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile köprüyü modellemişlerdir. Hareketli araç ve araç hatları için dinamik sayısal modeller oluşturmuşlardır. Güçlü köprü sistemleri için hem araç hem de tren yükü köprüye etki ettirmişlerdir. Zayıf sistemler için ise tren yükü etki ettirmişlerdir. Araç ve tren katarlarının analiz edildiği sistemde, araç tekeri ve raylar arasındaki kuvvet etkilerinin sabit ve hareketli olarak karşılaştırılmasını trigonometrik seriler kullanarak yapmışlardır. Çalışmada trafik koşullarını da göz önünde bulundurmak için farklı hızlarla ve farklı araçlarla analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda rastgele katar hareketlerinin önemini belirtmişlerdir ve yeni tasarımlar için önerilerde bulunmuşlardır.

Gülhan [15] yaptığı çalışmada tek açıklıklı, basit mesnetli sandık kesitli köprülerin SAP2000 yazılımı ile analizini yapmış ve iç kuvvetlerin hesabını Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulaması ile ele almıştır. Farklı geometriye sahip çeşitli açıklık ve genişlikteki köprü kesitleri, SAP2000 yazılımı ile modellemiştir. Yük sınıfı olarak TCK Köprüler Teknik Şartnamesinde tanımlı H20-S16 standart kamyonunu kullanmıştır. Mesnet kesitindeki kesme kuvveti ile açıklık ortasındaki eğilme momenti değerlerini bulmuştur. PTI yöntemi ile kesme kuvvetleri ve eğilme momentlerini de bularak karşılaştırmalar yapmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda ortalama hata değerlerini belirtmiştir.

Begum [16] yaptığı çalışmada çelik kutu kesitli köprü modelini ANSYS ve DESCUDII programlarını kullanarak analizler yapmıştır. Düz ve kavisli kutu kirişleri üç boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Düz ve kavisli kutu kirişler için her eleman için gerilme değerlerini karşılaştırmıştır.

Cengiz ve ark. [17] yaptıkları çalışmada dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü olan Tatara Köprüsünün nümerik modelini SAP2000 programından modellemişlerdir. Üç farklı araç hızı için iki farklı trafik koşulu belirlemişlerdir. Köprü yapısına araç yükünün etkisini zaman tanım alanında direk integrasyon yöntemiyle dinamik analiz yapmışlardır. Köprü yapısındaki yer değiştirme, burulma

momenti ve eksenel kuvvetin zamana göre değişimini grafiklerle sunmuşlardır. Çalışma sonucunda modellenen büyük açıklıklı köprü için en büyük tepki kuvvetinin, düşük hızda araç geçişinin olduğu analiz koşullarında görmüşlerdir. Fakat araçlar köprü ortasını geçtikten sonra açıklık ortasındaki en büyük tepki kuvveti yüksek hızlar altında araç geçişinin olduğu analiz koşullarında görmüşlerdir.

Sezdirmez [18] yaptığı çalışmada Türkiye’de dengeli konsol yöntemi ile 2005-2009 yılları arasında inşa edilmiş köprülerden olan Gülburnu Köprüsü’nde zamanla meydana gelen yer değiştirmeleri incelemiştir. Gülburnu Köprüsü, öngerilmeli sandık kesitli bir köprüdür. ANSYS programında malzeme özellikleri, sınır koşullarındaki değişimleri dikkate alarak sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile düşey yükler altındaki yer değiştirmeler, sünme-büzülme yer değiştirmeleri ve ön germe kayıplarından dolayı oluşan yer değiştirmeleri hesaplamıştır. Bütün bu yer değiştirmeler dikkate alındığında Gülburnu Köprüsü’nde ölü yükler, yaya yükü ve trafik yükleri altında köprüde 1-2 cm değişiklikler oluşurken; köprüde sünme ve büzülme etkilerinden dolayı ortalama 27 sene sonrasında yaklaşık 0.111 metre yer değiştirme gerçekleşebileceği görülmüştür.

Gouda [19] yaptığı çalışmada açıklık uzunlukları aynı, tek gözlü, eğriligi değişken 5 farklı kutu kesitli köprü modeli üzerinde çalışmıştır. Çalışmayı SAP2000 programını kullanarak yapmıştır. Yatay yönde eğrilik yarıçapı değiştirilerek köprü üzerinden taşıtlar geçirilmiştir. Sonuç olarak yatay eğrilik arttıkça burulma momenti, eğilme momenti ve deformasyonların arttığı görülmüştür.

Yu ve ark. [20] yaptıkları çalışmada öngerilmeli beton, kutu kesitli köprü modeli üzerinden araç geçirmiştir. Araç-köprü etkileşim modeli oluşturmuşlardır. Yol yüzeyi pürüzsüzlüğü, araç hızı ve köprü açıklık uzunluğu ile dinamik büyütme çarpanı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sonuç olarak global ve yerel dinamik büyütme çarpanları arasında güçlü bir ilişki olmadığı görülmüştür. Yerel dinamik büyütme çarpanı ile yüzey pürüzsüzlüğü ve köprü uzunluğu arasında iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür.

Mubuli [21] yaptığı çalışmada Fatih Sultan Mehmet Köprüsü’nün kendi ağırlığı, deprem yükleri ve taşıt yükleri altında yapısal davranışını incelemiştir. Ana

kablonun, askı halatların ve kule elemanlarının ilk gerilme kuvvetlerini ayarlayarak SAP 2000 programı ile köprünün üç boyutlu modelini oluşturmuştur ve sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Deprem analizleri, birkaç farklı deprem kaydı için ve bu kayıtların ortalamasını dikkate alarak yapmıştır. Hareketli taşıt yükleri her şeritte farklı sayı ve hızda araçların geçirilmesiyle zamana bağlı dinamik analizler yapmıştır. Çalışmada hem depremin hem de taşıt yüklerinin etkisinde, köprünün temel elemanlarındaki kesit etkileri ve yer değiştirme değerlerini grafik ve tablolarla sunmuştur. Farklı deprem ivme kayıtlarının ve farklı taşıt hızlarının köprünün dinamik davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

An ve ark. [22] yaptıkları çalışmada dinamik araç yükünün, zaman alanında köprü yapısı üzerindeki titreşim etkisini incelemişlerdir. Bu bağlamda köprü üzerinden araç geçişi sırasında köprü ortasında meydana gelen yer değiştirme değerlerini göstermişlerdir. Çalışmada sandık kesitli, değişken kesitli ve üç açıklıklı bir köprü modelini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda farklı şerit sayısında köprü modeli üzerinden farklı araç yükleme durumları oluşturarak köprü titreşiminin önemini ortaya koymuşlardır.

Çift [23] yaptığı çalışmada öngerilme metoduyla inşa edilen mevcut Trabzon ilinde yapılmış dengeli konsol köprü modelini, CSiBridge programında modellemiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılmıştır. Köprüye etkileyen farklı yük çeşitleri için farklı yükleme durumları oluşturarak en kritik yükleme durumunu belirlemiştir. Maksimum kesit tesirlerini belirlemiştir. C40 ve C50 beton sınıflarından iki farklı model oluşturmuştur ve bu modeller için kesit boyları, kesit tesirleri, ağırlık ve maliyet karşılaştırması yapmıştır. Sismik analiz yapılarak yapıda oluşan etkiler karşılaştırılmıştır.

Bostan [24] yaptığı çalışmada öngerilme kutu kesitli, betonarme karayolu köprülerinin dinamik davranışı üzerinde en kesit şeklinin etkisini incelemiştir. Bu amaçla, farklı kesit özelliklerinde kirişlere sahip dört farklı kutu kesitli köprü modellemiştir. Modal ve dinamik analizler yapmıştır. Karayolu köprüsünü CSiBridge programında modellemiştir. Analizlerde hareketli yükleri iki şekilde göz önüne almıştır. Birinci yöntemde, katar yük analizi yöntemiyle tesir çizgileri ve en elverişsiz durumları göstermiştir. İkinci yöntemde, belirlenen bir kamyon

yüklemede 6 farklı taşıt yüklemesi senaryosunda analizler yapmıştır. Burulma rijitliği hakkındaki sonuçları irdemiştir.

Yukarıdaki verilen çalışmalara göre farklı özelliklere sahip kutu kesitli köprülerin araç yükü başta olmak üzere diğer yükler altındaki davranışları araştırılmıştır. Bunun yanında zaman tanım alanında analizlerle zaman içerisinde köprü yapısında oluşan etkiler farklı köprü çeşitleri için araştırılmıştır. Yapılan literatür incelemesinde betonarme sandık kesitli köprüler için taşıt yüklemesi altında deformasyon, eğilme momenti ve kesme kuvvetinin farklı açıklıklarda hareketli yük analizinin yapıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Fakat birden fazla açıklıklı ve birden fazla gözlü sandık kesitli köprülerin hareketli yük analizi ve farklı taşıt yüklerinin köprü yapısına etkisinin karşılaştırıldığı çalışmaya yazarın bilgisi dahilinde rastlanmamıştır. Ayrıca sandık kesitli betonarme köprüler için farklı araç hızları, farklı araç sayıları ve farklı takip mesafelerinde taşıt yükü altında köprü yapısındaki dinamik etkilerin zamana göre değişiminin araştırıldığı herhangi bir çalışmaya yazarın bilgisi dahilinde rastlanmamıştır.

3. KÖPRÜ YAPISININ MODELLENMESİ

3.1. Köprü Modelinin Oluşturulması

Sandık kesitli betonarme köprü modeli, SAP2000 V20 paket programında sonlu elemanlar yöntemiyle yönetmeliklere uygun şekilde oluşturulmuştur.

Sandık Kesitli Köprülerin başlıca analiz yöntemleri;

- Richmond Deplasman Yöntemi,
- Elastik Zemin Oturan Kirişler Yöntemi (BEF - Beam of Elastic Foundation Method),
- Knittel Yöntemi,
- Katlanmış Plak Yöntemi,
- Sonlu Bantlar Yöntemi (Finite Strip Method),
- Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Elements Method),

olarak sıralanmıştır [2,25-28].

Richmond Deplasman Yöntemi: Bu yöntemin ilk çalışanları Ebner ve Reisner'dir. Başlık(flaş), sandık kesit ve gövdeden meydana gelmektedir. Boyuna eğilmeler yalnızca flaşlar ve kayma etkileri yalnızca gövdeler tarafından karşılanır. Distorsiyonal yüklemeler, enlemeler(enine diyafram) aracılığıyla karşılanır. Aynı zamanda sandık kesitin çerçeve rijitliği dikkate alınmaz, ihmal edilir. Gözde bulunan iç kuvvetler ve gözün ucunda bulunan deplasman arasındaki bağıntılar kaldırılır. Diyaframlarda bulunan denge göz önünde bulundurularak diyaframın üstüne etkileyen iç kuvvetleri dıştaki yüklerle bağlantısını sağlayan ifadeler bulunur. Bu adımlar her gözde tekrar edilir ve deplasman çözümleri için birbirine benzer lineer denklemler oluşturulur. Birinci denklem bölümünde deplasmanlar yerine yerleştirilir. Ardından bunların iç kuvvetleri ve gerilmeleri hesaplanır. Bu yöntem sayesinde yükün bileşenleri olan torsiyonal ve distorsiyonal tesirleri bulunur. Yükler, diyaframların arasına etki ettiği anda torsiyonal ve distorsiyonal etkileri ankastre uç moment ile kuvvetleri halinde göz önünde bulundurulur [2,25-28].

Elastik Zemin Oturan Kiriş Yöntemi (BEF - Beam of Elastic Foundation): Vlaslov, elastik zeminlere oturan kirişler ve distorsiyonal yükler altında sandık

kirişler arasında analojiyi inceleyen ilk kişi olmuştur. Bu analojiyi daha sonradan Wright geliştirmiştir. Bu yöntemin aslı elastik zeminlere oturan kirişlerin diferansiyel denklemlerinin bulunmasına bağlıdır. Analog BEF'in (k) zemin modülü sandık kirişlerinin (Elb) eğilme rijitliği ve çarpılma rijitlikleri ile mesnet rijitlikleri (Q) ise sandık kesitlerindeki diyaframların (enleme) ya da çapraz bağlantıların rijitlikleri ile orantılı haldedir. BEF'in mesnetler arası mesafesi, sandık kirişlerinin açıklıkları ya da boyuna göz uzunlukları ile BEF'deki yükün uyguladığı şiddet ile boyuna doğru yayılımı ise bu sandık kirişlerinin bir gövdesi üzerine etkileyen yüklerin antimetrik bileşeni ile aynı durumdadır. BEF'deki sehimler, sandık kesitin distorsiyon olarak gerilmesi ile BEF'in momentleri de sandık kesitin çarpılma gerilmesiyle doğru orantılıdır [2,25-28].

Knittel Yöntemi: Bu yöntem, sistemin boyuna kenarları doğrultusunda rijit halde birleşen katlanmış plak serileri halinde düşünülmüştür. Yükleme ise gövdelerden biri üzerine yapılmaktadır. Gövdenin üzerine etkileyen kuvvet belirli oranda diğer gövdelere de aktarılır. Yük ise açıklık doğrultusunda lineer ve fazla da değişken değildir. Enine doğrultusunda eğilme tesirini göz önünde tutmak için sandık kiriş, boyuna doğrultularda birlikte çalışan ve birbirlerine etkileri olmayan fazlaca enine ve birbirine benzer çerçeveler halinde düşünülmektedir [2,25-28].

Katlanmış Plak Yöntemi: Bu metot, sistemlerin çözülmesinde tekil ve yayılı yükler için fourier den meydana gelmiş harmonik yöntem uygulandığında, iki uçları basit mesnetli sandık kirişe sahip köprüler için idealdir. Köprü boyunca gözler boyunca rijit bağımlı ve dikdörtgen halinde plak serileri olarak düşünülmektedir. Plaklar, ilk önce bağımsız bir şekilde plak düzlemine dik halinde yükler için elastik ince plastik teorisi ile ve plak düzleminde bulunan yükler için de levha teorisi ile çözülmesi yapılır. Bu halde bir plak için fourier serisi terimini içine alan rijitlik matrisi elde edilmiş olur. Her harmonik için plaklar her boyuna kenarlarda dört serbestlik derecesi halindedir. Rijit plaklar bulunduran her sistemin çözülmesinde rijitlik çözümü kullanılmaktadır. Bu yöntemin sayısal çözümleri için bilgisayar gerekir. Fourier serisi ile gösterilen fazlaca yükleme tipi hayal edilebilir. Çözümleri elastik teorisinin maddeleriyle tam anlamıyla uyuşur [2,25-28].

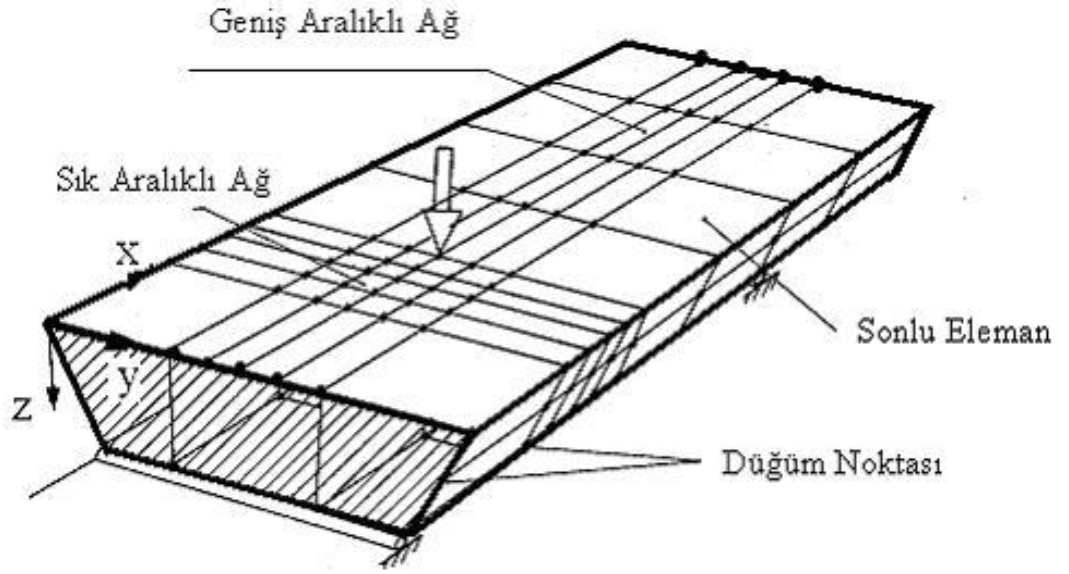
Sonlu Bantlar Yöntemi (FSM - Finite Strip Method): Bu metot, iki uç tarafında keyfi sınır koşulları bulunduran sistemlerde kullanılabilir. Asıl kullanılan sistem, boyuna doğrultuda elemanı plak elemanının sonlu sayıda bantlar halinde bölmesiyle oluşturulan bir sonlu banttır. Elde edilen sonlu bantlar, plağın boyuna haldeki ayrıtlarının aralarındaki enine aralıkları eşit bir genişlikte dirler. Enine bir bandın açıklık boyunca köprünün bir ucundan diğer bir ucuna kadar bağımlı düşünölen bir metot ile çözüm sağlanır. Ara mesnetlerde bulunan sınır koşulları ile köprüdeki iki uç nokta problemin çözölmesinde bilinmeyenleri bulmak için yeterli sayıda denklemleri verir [2,25-28].

Karışık mühendislik sorunlarının halledilmesinde kullanılan yöntemin ismi sonlu elemanlar metodudur. Bu yöntem 1956'da hava ile ilgili yapıların çözömlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu tarihten itibaren bu metodun farklı mühendislik sorunlarını da çözebildiği fark edildi. İlerleyen yıllarda çok gelişerek artık mühendislik problemlerinde kullanılan en iyi yöntemlerden biri olmuştur. Yöntemin en iyi avantajı bilgisayar programı halinde kullanılıp geliştirilmesi ve veriler değıştirilerek diğer sorunlara uyarlanabilmesidir [29]. Sonlu elemanlar yönteminde amaç, çözölmeleri zor olan problemleri basite indirgemektir. Esas olan problem değıştiği zaman sonuçta gerçek değıl ancak gerçeğe yakın bir sonuç olacaktır. Bilindiği üzere birçok problemin çözöümünde matematik gereçleri her zaman yeterli gelmeyebilir. Bu metotta bu gerçeğe yaklaşan çözöümler daha da geliştirilip tam sonuca daha da yaklaşılabılır. Bu yöntemde çözöüm alanının çok küçük, sonlu eleman diye isimlendirilen birbirine bağılı alt bölgelerden meydana geldiği kabul edilir. Bu yöntem ile karışık problemler modellenebilir. Günümüzde sonlu elemanlar metodu birçok mühendislik uygulamasında kullanılır. Bu yöntem mühendislere karışık ve büyük inşaların statik ve dinamik çözöümlerini yapmak için çok kolaylıklar sağlamaktadır [30].

Sonlu elemanlar yönteminde her plak düğüm noktalarında içten bağımlı (rijit) çok sayıda elemana ayrılır. Her düğüm noktasında üç eksen de dönme ve öteleme için serbestlik derecesi vardır. Bunların her biri için kuvvet veya deplasman vardır. Her düğüm noktası için kuvvet biliniyorsa ona karşılık gelen deplasman değıerleri araştırılabilir. Düğümlerde bilinmeyen deplasmanların ve kuvvetlerin hepsini bulmak

için direkt rijitlik yöntemi kullanılabilir. Buradan yola çıkarak iç kuvvetler ve gerilmeler de hesaplanabilmektedir. Buradaki en önemli adım, her sonlu eleman için eleman rijitlik matrislerinin geliştirilmesidir. Bu yöntem, değişik malzemelerden yapılmış veya değişik boyutlardaki sistemlerde kullanılabilir [2,25-28].

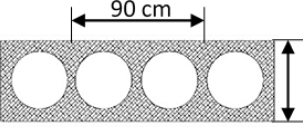
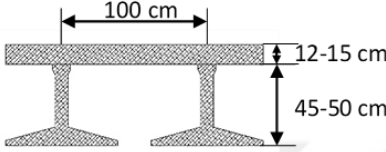
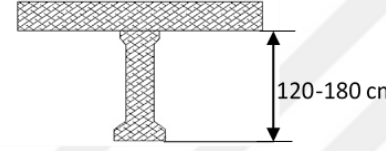
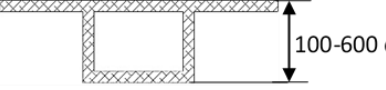
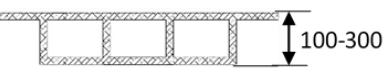
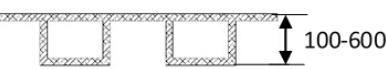
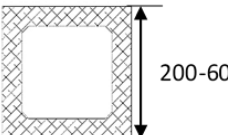
Sonlu eleman modeli, sistemdeki elemanların Şekil 3.1'deki gibi enine veya boyuna sonlu elemanlara bölünmesiyle oluşur [15].



Şekil 3.1 Analitik sonlu eleman modeli [15]

Kutu kesitin köprülerde kullanılmasının en büyük sebeplerinden biri kesitin minimum ağırlıkla yüksek rijitlik ve dayanım sağlamasıdır. Kutu kesit tipinin seçilmesi; kesit genişliğine, kesit yüksekliğine ve enine donatı tasarımına bağlıdır [4].

Dikdörtgen kutu kesitli tabliyeler genellikle raylı sistem köprüleri için uygun görülmüştür. Şekil 3.2'de görülen diğer kesit tiplerine sahip tabliyeler, karayolu köprüleri için uygundur. Çok gözlü kesitler daha ince döşeme kullanımını sağlar. Tek gözlü kutu kesitli tabliyeler daha uzun açıklıklar için kullanılabilir. Çünkü çok gözlü kutu kesit, tek gözlü kutu kesite göre toplam gövde kalınlığını yani kesit yüksekliğini artırır. Çok gözlü kutu kesitlerin imalatı daha zordur [4].

Tipi	Örnek	İnşaat Yöntemi	Açıklık Aralığı
Dolu kesitli döşeme		Yerinde döküm	5-15 m
Boşluklu döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	6-15 m
Ters T kirişli döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	12-24 m
I kirişli		Prekast ya da yerinde döküm	12-35 m
Çift T kirişli döşeme		Yerinde döküm	25-40 m
Tek omurgalı (tek gözlü) kutu kesitli döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	30-200 m
Çok gözlü kutu kesitli döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	30-100 m
İki omurgalı (iki kutu kesitli) döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	30-200 m
Dikdörtgen kutu kesitli döşeme		Prekast ya da yerinde döküm	30-150 m

Şekil 3.2. Betonarme ve ön gerilmeli köprü tabliyelerinin kesit tipleri [31]

Genellikle betonarme ve ön gerilmeli beton köprülerde köprü ayaklarının kesit tipi; dairesel, dikdörtgen, değişken kesitli veya boşluklu yapıda olabilir. Bu çalışmada dikdörtgen kesit tipi, köprü ayakları için kullanılmıştır.

Köprü tabliyesi ve köprü ayakları birleşim noktalarına plastik mafsalları tanımlanmıştır. Betonarme köprüler, üstyapının zarar görmesini önlemek amacıyla elastik olmayan deformasyonların kolonlarda oluşmasını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tasarım; bina türü yapılarda kullanılan, düşey yükü taşıyan sistemi korumak için elastik olmayan deformasyonların kirişlerde oluşmasını sağlayan tasarım yaklaşımından tamamen farklıdır. Bu yüzden betonarme köprülerde plastik mafsalları kullanılabilir [32].

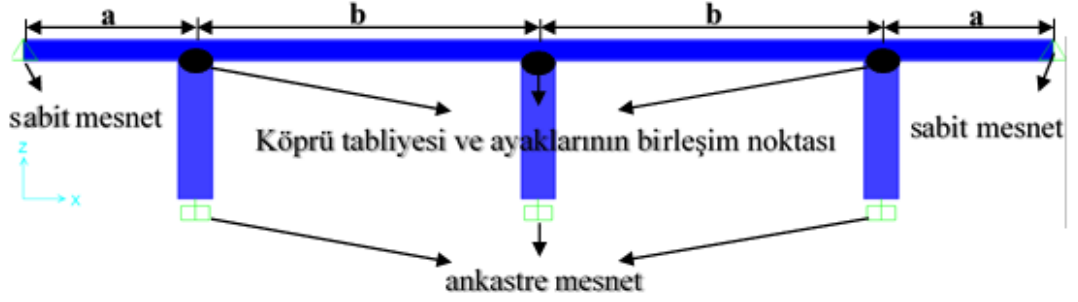
Çalışmada köprü genişliği 7 metre olarak belirlenmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü Yol ve Köprüler Teknik Şartnamesine göre bu genişlikteki köprülerde çift şeritli araç geçişine müsaade edilmektedir. Çift şeritli yollarda yük azaltma katsayısı 1'dir.

3.1.1. Hareketli Yük Analizi İçin Tasarlanan Köprü Modeli

Hareketli yük analizi için köprü modeli, iki farklı tabliye kesit tipinde ve 16 farklı açıklık durumunda modellenmiştir.

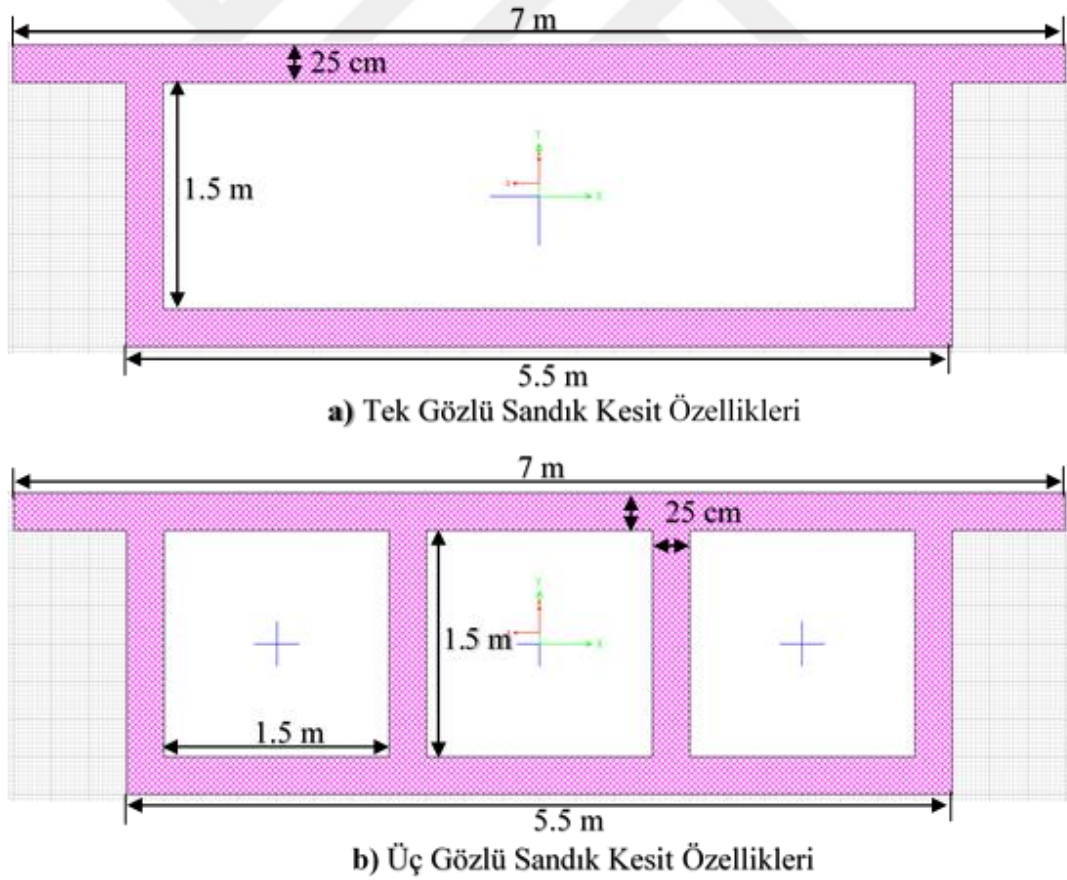
Tasarlanan köprü modeli dört açıklıktan oluşmaktadır. Açıklıklardan çalışmada yan açıklıklar ve orta açıklıklar olarak bahsedilmiştir. Orta açıklık eşit ve yan açıklıkların iki katı uzunluğunda modellenmiştir. İlk açıklık durumu için yan açıklıklar 15 metre, orta açıklıklar 30 metredir. Yan açıklıklar birer metre, orta açıklıklar ikişer metre artırılarak 16 farklı durum için analiz yapılmıştır. Son açıklık durumu için yan açıklıklar 30 metre, orta açıklıklar 60 metredir. Köprü'nün yerden yüksekliği 12 metredir. Köprü ayakları dikdörtgen kesit olarak tanımlanmıştır. Orta açıklık, yan açıklıklardan daha uzun tasarlanmıştır. Köprü yapısına ait mesnet özellikleri ve köprü elemanlarının uzunlukları Şekil 3.3'te verilmiştir. Açıklıklarda a ve b ile belirtilen açıklık değerleri çalışmada daha detaylı belirtilmiştir.

Köprü'nün her iki ucunun karayolu ile birleşen noktaları öteleme hareketine karşı olan sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprü ayaklarının zeminle birleştiği noktalar ise öteleme ve dönmeye karşı olan ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprü ayaklarının tabliyeyle birleştiği noktalara plastik mafsalları tanımlanmıştır.



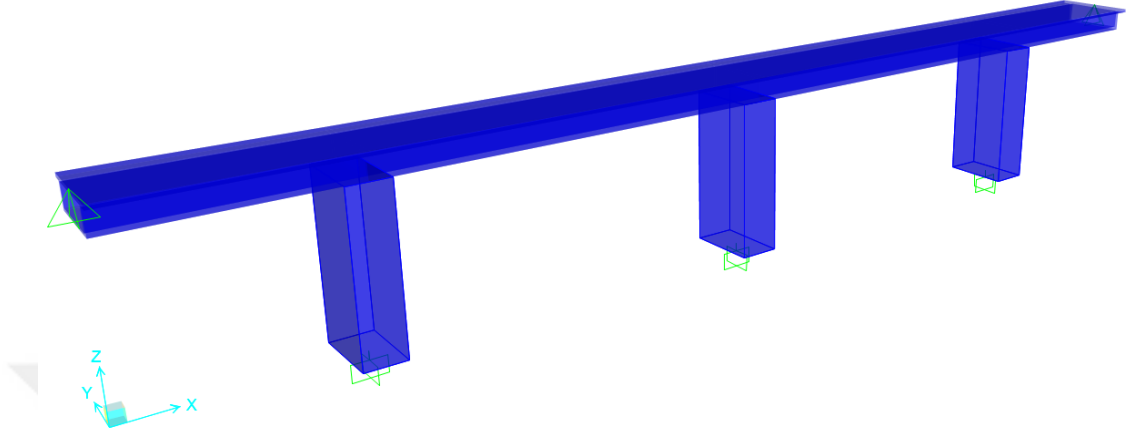
Şekil 3.3 Köprü modelinin x-z ekseninde görüntüsü, mesnet türleri ve eleman uzunlukları

Şekil 3.4'te verilen iki farklı kesit tipinde analizler yapılmıştır. Köprü ayakları dikdörtgen kesit tipindedir. Ayak genişliği 3 metre, derinliği ise 5.5 metredir.



Şekil 3.4 Köprü tabliyesinin kesit özellikleri a) Tek Gözlü Sandık Kesit Özellikleri b) Üç gözlü sandık kesit özellikleri

Modellenen köprünün SAP2000 programında üç boyutlu görüntüsü Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Hareketli yük analizi için modellenen köprü modelinin üç boyutlu görünümü

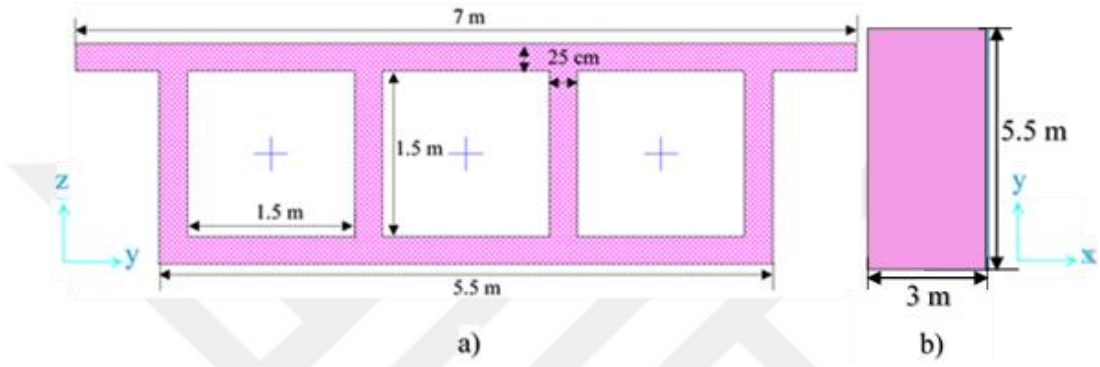
3.1.2. Zaman Tanım Alanında Analiz İçin Tasarlanan Köprü Modeli

Tasarlanan köprü modeli üç açıklıktan oluşmaktadır. Orta açıklık, yan açıklıklardan daha uzun tasarlanmıştır. Köprü yapısına ait mesnet özellikleri ve köprü elemanlarının uzunlukları Şekil 3.6'da verilmiştir. Köprünün her iki ucunun karayolu ile birleşen noktaları sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprü ayaklarının zeminle birleştiği noktalar ise ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprü ayaklarının tabliye ile birleştiği noktaya plastik mafsal tanımlanmıştır. Farklı taşıt yükleri için yapılan analizler, aynı köprü modeli üzerinde yapılmıştır.



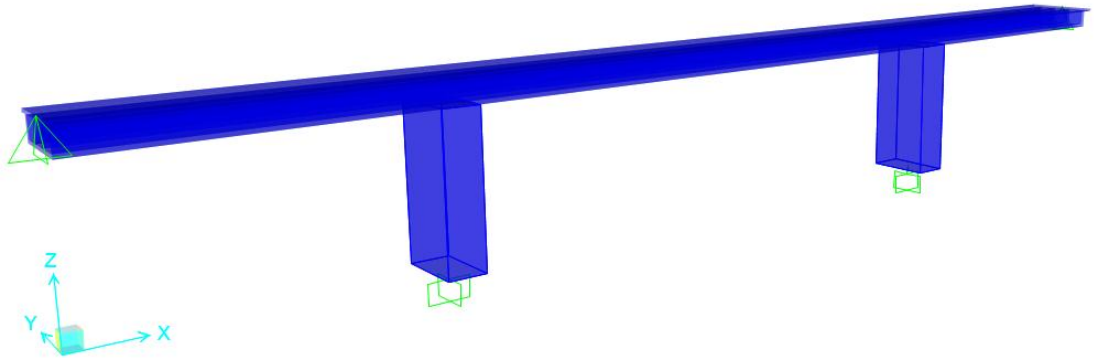
Şekil 3.6 Köprü modelinin x-z ekseninde görüntüsü, mesnet türleri ve eleman uzunlukları

Köprü tabliyesi tipi, çok gözlü kutu kesitli tabliye seçilmiştir. Bu tabliye tipi 30-100 metre aralığındaki açıklıklara sahip betonarme köprülerde kullanılmaktadır. Köprü modelinin orta açıklığı 50 m olduğu için bu kesit türü tercih edilmiştir. Bu kesit türünün imalatı prekast ya da yerinde döküm şeklinde yapılmaktadır. Kesit kalınlığı bu kesit tipinde 1-3 metre aralığında değişmektedir. Köprü tabliyesinin ve ayaklarının kesit özellikleri Şekil 3.7 'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Köprü modelinin kesit özellikleri a) Tabliye kesit özellikleri b) Ayak kesit özellikleri

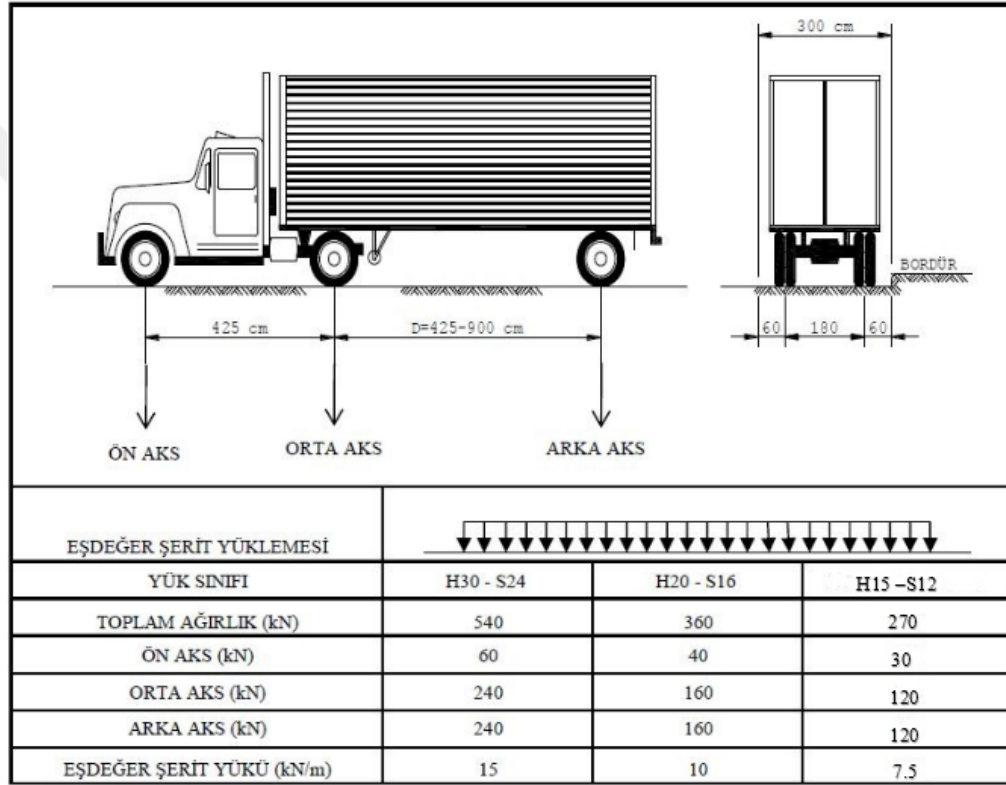
Modellenen köprünün SAP2000 programında üç boyutlu görüntüsü Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Zaman tanım alanında analiz için modellenen köprü modelinin üç boyutlu görünümü

3.2. Taşıt Yüklemesinin ve Yol Güzergahının Tanımlanması

SAP2000 programında köprü üzerindeki yol güzergahı, sadece çubuk elemanlar için tanımlanabilir. Çalışmada üç farklı kamyon yükü kullanılmıştır. Bu kamyon türlerine ait dingil yükleri, eşdeğer şerit yükleri ve diğer özellikler Şekil 3.9'da verilmiştir. Karayollarında farklı trafik cinslerine göre yük sınıfı tanımlanmaktadır (Çizelge 3.1).



Şekil 3.9 Kamyon çeşitleri ve yükleme açısından özellikleri (Uluğ [33] değiştirilerek kullanılmıştır)

Çizelge 3.1 Karayolları yük sınıfları [34]

Yük Sınıfı	Trafik Cinsi
H30-S24	Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığı'nca gerekli görüldüğü hallerde
H20-S16	Proje saatlik trafiği 100-400 taşıt ise veya ağır sanayi merkezlerine giden yollarda
H15-S12	Proje saatlik trafiği 100 taşıttan az ise
H10	Köy yollarında

3.2.1. Hareketli Yük Analizi İçin Yol Güzergahı ve Taşıt Yükleme

Hareketli yük analizinde köprü üzerindeki taşıtlar en elverişsiz koşula göre yüklenmektedir. Yol güzergahı iki farklı kesit tipi için 16 açıklık durumunda da köprü tabliyesinin tamamı için tanımlanmıştır.

Bu analiz türünde H30-S24, H20-S16 ve H15-S12 kamyonları kullanılmıştır. Kamyonların dingillerindeki tekil yükler ve dingiller arası mesafeler tanımlanmıştır. Şekil 3.10'da H30-S24 kamyonunun programa tanımlanması görülmektedir. Her kamyon türü için eşdeğer şerit yüklemeleri programa tanımlanmıştır. Şekil 3.11'de H30-S24 kamyonunun eşdeğer şerit yüklemesinin tanımlanması görülmektedir. Kamyon tekil yükleri ve eşdeğer şerit yüklemesiyle taşıt sınıfları oluşturularak köprüye etki ettirilmiştir. Program en elverişsiz durum için hesaplarda tekil yüklerin tanımlandığı taşıt yüklemesini veya eşdeğer şerit yüklemesini seçerek analiz yapar.

Vehicle Data

Vehicle name: H30-S24

Units: KN, m, C

Load Elevation:

Loads:

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	Infinite		0,	60,
Fixed Length	4,25	9,	0,	240,
Variable Length	4,25		0,	240,

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete

☒ Vehicle Remains Fully In Path

Buttons: OK, Cancel

Şekil 3.10 H30-S24 kamyonunun programa tanımlanması

Vehicle Data

Vehicle name: ŞERİT YÜKLEMESİ

Units: KN, m, C

Load Elevation: [Red Area]

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Trailing Load	Infinite		15,	
Trailing Load	Infinite		15,	

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete

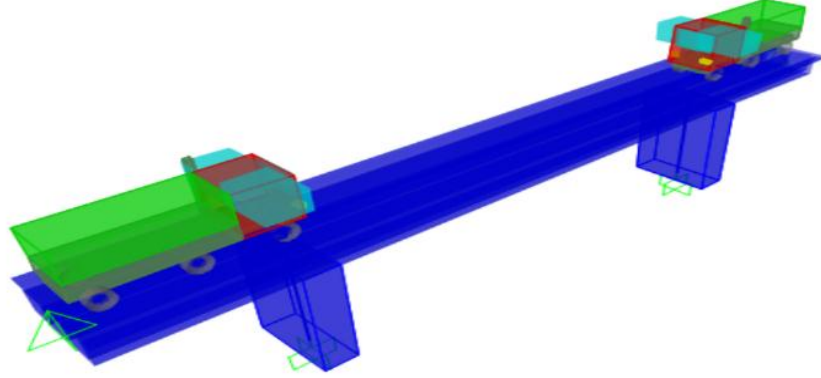
☒ Vehicle Remains Fully In Path

OK, Cancel

Şekil 3.11 H30-S24 kamyonunun eşdeğer şerit yüklemesinin programa tanımlanması

3.2.2. Zaman Tanım Alanında Analiz İçin Yol Güzergahı ve Taşıt Yükleme

Yol güzergahı köprü tabliyesinin tamamı için tanımlanmıştır. Köprü üzerinde tanımlanan yol güzergahının birden fazla şerit olması durumunda, köprü tabliyesi üzerindeki yolların eksantrisitesinin hesaba katılması daha gerçekçi ve avantajlıdır. Çünkü köprü tabliyesindeki eksenel burulma ve alt yapı elemanlarındaki enine eğilmenin belirlenmesinde rol oynar. Fakat analiz süresinden, hafıza gerekliliklerinden ve disk kapasitesinden kazanç sağlanabilmesi açısından şeritlerin eksantrisitesi sıfır kabul edilebilir [15]. Yapılan çalışmada tanımlanan yol eksantrisiteyi sıfır kabul edilmiştir. Köprü üzerinde farklı yönlerde iki şerit tanımlanmıştır. SAP2000 programında yapılan köprü modelindeki yol güzergahları ve taşıt modellemesi Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.12 Yol güzergahı ve köprüye etki ettirilen taşıtların görünümü

Köprü yapısına, H30-S24 kamyonu etki ettirilerek analiz yapılmıştır. Bu kamyon türü karayollarında öngörülen en ağır taşıt modelidir. Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığınca gerekli görülen durumlarda görülmektedir. Bu çalışmada taşıt yükleri, zaman tanım alanında dinamik yük olarak etki ettirileceği için sadece kamyonun dingillerinden gelen tekil yüklerin tanımlanmasıyla analiz yapılmıştır.

Karşılaştırmalar için kamyonların hızları, adedi ve aralarındaki takip mesafeleri değiştirilerek analizler yapılmıştır.

3.3. Köprü Analizinin Yapılması

3.3.1. Hareketli Yük Analizi

Taşıt yüklerinin olduğu köprülerin analizinde üç tür analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar hareketli katar yük analizi, çok adımlı statik ve çok adımlı dinamik(doğrudan integrasyon zaman alanı) analiz yöntemleridir [24]. SAP2000 programı vasıtasıyla hareketli katar yük analizi yapılarak taşıt yükünün köprü yapısında oluşturacağı minimum ve maksimum etkileri en elverişsiz yükleme durumunda belirlenerek hesaplanmıştır.

SAP2000 programının hareketli yük analizine entegre edilmesi Şekil 3.13'te görülmektedir.

Load Case Data - Moving Load

Load Case Name: H15-S12 **Set Def Name** **Modify/Show...**

Stiffness to Use: ☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State ☐ Stiffness at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Load Case Type: Moving Load **Design...**

Directional Factors: 1, ,

MultiPath Scale Factors:

Number of Paths Loaded	Reduction Scale Factor
1	1,

Mass Source: MSSSRC1

Loads Applied:

Assign Number	Vehicle Class	Scale Factor	Min Loaded Paths	Max Loaded Paths	Paths Loaded
1	H15S12	1,	0	0	All

Paths Loaded for Assignment 1:

List of Path Definitions:

Selected Path Definitions: YOL

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Şekil 3.13 Hareketli yük analizinin tanımlanması

3.3.2. Zaman Tanım Alanında Analiz

Bu analiz yöntemi, zaman tanım alanında, lineer ve doğrudan entegrasyon yöntemi ile yapılmıştır. Taşıt yükleri zaman tanım alanında analizde köprü tabliyesindeki herhangi bir noktaya aniden etkiyip kaybolan darbe yükü gibidir. Bu yüzden programa zaman tanım alanı 3 zamanlı yani 0, t1, t2 zaman alanında, 1 kN değerinde üçgen yük etkisi tanımlanmıştır. Sıfır zamanında 0 KN değeri varken t1 anında 1 kN ve t2’de tekrar 0 kN tanımlanmıştır. Buradaki t1 ve t2 zamanları taşıt hızına göre hesaplanır [21]. Şekil 3.14’te programa tanımlanan zaman tanım alanı görülmektedir.

Yükleme süresi içerisinde köprü yapısındaki değişimleri analiz etme sıklığı önemlidir. Analiz etme sıklığı artırıldığında alınan sonuçlar çok daha gerçekçi olmakta ancak analiz süresi de uzamaktadır.



Şekil 3.14 Taşıt yükünün zaman tanım alanı [21]

Köprü üzerinden geçirilen taşıtların köprü üzerinde kalma süreleri toplam analiz süresidir. Bu süre taşıt sayısı, hızı ve takip mesafesine göre yapılan karşılaştırmalarda değişmektedir. Şekil 3.15' te SAP2000 programının zaman tanım alanında, lineer, direk integrasyon yöntemine entegre edilmesi görülmektedir.

Load Case Data - Linear Direct Integration History

Load Case Name: H30S2410KM Set Def Name Modify/Show...

Stiffness to Use: ☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State ☐ Stiffness at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	H30S2410KI	RAMP	1,
Load Pattern	H30S2410KM	RAMP	1,

☐ Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 500

Output Time Step Size: 0,1

Other Parameters

Damping: None Modify/Show...

Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...

Load Case Type: Time History Design...

Analysis Type: ☒ Linear ☐ Nonlinear

Solution Type: ☐ Modal ☒ Direct Integration ☐ Frequency Domain

History Type: ☒ Transient ☐ Periodic

Mass Source: MSSSRC1

OK Cancel

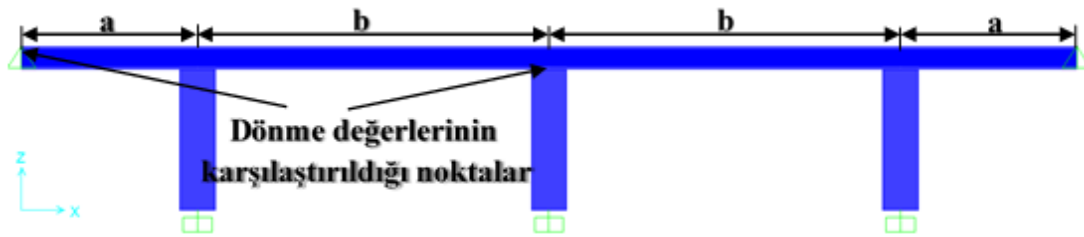
Şekil 3.15 Zaman tanım alanında analizin tanımlanması

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Hareketli Yük Analizi Bulguları

Köprü modeli her açıklık durumu için z eksenine göre simetriktr. Köprünün yan açıklıklarındaki mutlak eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri eşittir. Bu durum orta açıklıklarda ve yan ayaklar için de geçerlidir. Köprünün birleşim noktalarında ve açıklıklarındaki mutlak deformasyon değerleri de köprü yapısının simetrik olmasından dolayı bazı noktalarda eşittir.

Köprü tabliyesinin iki farklı kesiti için de orta ve yan açıklıkların ortasında z eksenindeki yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Köprü ayaklarının tabliyeyle birleştiği noktalarda z eksenindeki yer değiştirme değerleri çok küçüktür. Köprü tabliyesinin karayolu ile birleştiği noktalarda ve köprü ayaklarının zeminle birleştiği noktalardaki mesnetler, köprü yapısının x eksen yönünde yer değiştirme yapmasını kısıtlamıştır. Köprü tabliyesinin karayolu ile birleştiği noktalarda y eksen yönündeki dönme kısıtlanmamıştır. Köprü yapısındaki en büyük dönme değerleri bu noktalarda görülmüştür. Köprü ayaklarının zeminle birleştiği noktalar dönmeye kısıtlanmıştır. Köprü ayaklarındaki en büyük dönme değeri, orta ayağın tabliyeyle birleştiği noktada görülmüştür. Dönme değerlerinin karşılaştırıldığı noktalar Şekil 4.1’de görülmektedir.

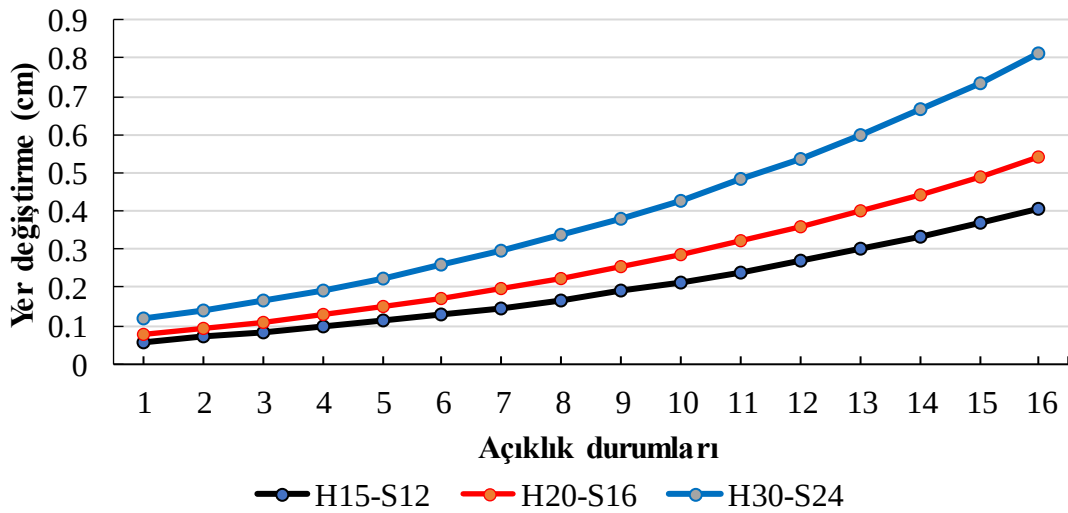


Şekil 4.1. Köprü açıklıklarının belirtilmesi ve karşılaştırma yapılan noktalar

Karşılaştırmalar 16 farklı açıklık durumu ve 2 farklı tabliye kesit tipine göre yapılmıştır. Şekil 4.1’de açıklıklar harfler ile gösterilmiştir. Bu harflerle gösterilen açıklıkların uzunluğuna göre oluşturulmuş 16 farklı açıklık durumu Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Diğer açıklık durumları için köprü yapısında z eksenindeki yer değiştirmelerin değerleri farklı ama değerlerin yapı elemanlarındaki değişimi benzer olmuştur.

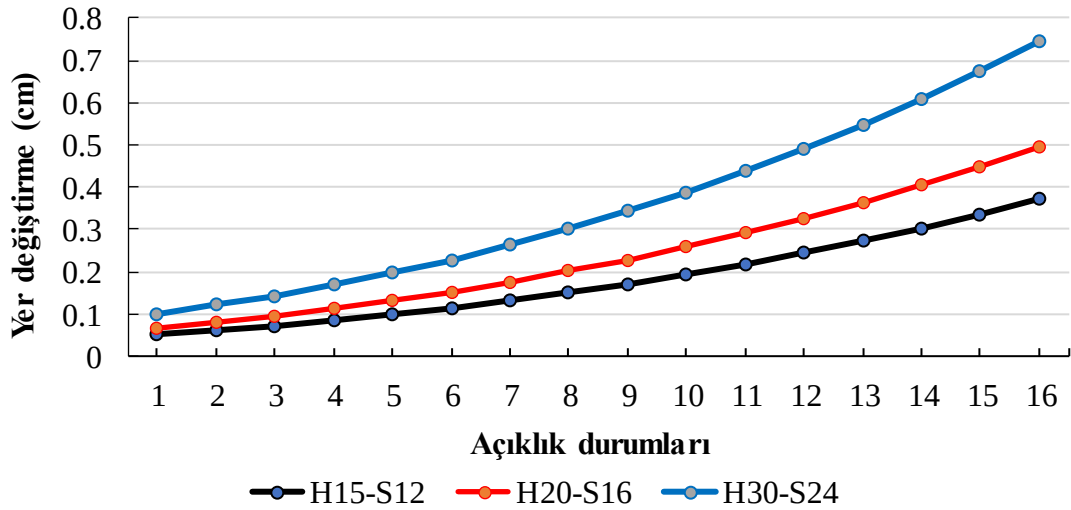
Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirme değeri, orta açıklıkların orta noktasında görülmüştür. Şekil 4.3'te tek gözlü sandık kesitli köprü için yapılan karşılaştırma sunulmuştur. Farklı açıklıktaki tek gözlü sandık kesitli köprü analizlerinde, açıklık uzunluğuna arttıkça z eksenindeki yer değiştirme değerleri de artmıştır. H15-S12 kamyonu ve H20-S16 kamyonları için yapılan analizler sonucunda; z eksenindeki yer değiştirmelerin açıklığa göre artışı birbirine yakın olmuştur. Fakat H30-S24 kamyonu için yapılan analizler sonucunda z eksenindeki yer değiştirmelerin açıklığın artışına göre artışı daha fazla olmuştur. H15-S12 kamyonu için değerler 0.058 cm ile 0.405 cm arasında değişmiştir. H20-S16 kamyonu için değerler 0.078 cm ile 0.540 cm arasında değişmiştir. H30-S24 kamyonu için değerler 0.117 cm ile 0.81 cm arasında değişmiştir.



Şekil 4.3 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler

Şekil 4.4'te üç gözlü sandık kesitli köprü için yapılan karşılaştırma sunulmuştur. Üç gözlü sandık kesitli köprü için yapılan analizler sonucunda z eksenindeki yer değiştirmelerin artışı, tek gözlü sandık kesitli köprü için yapılan analizler sonucunda z eksenindeki yer değiştirmelerin artışı gibi olmuştur. Fakat

görülen en büyük değerler değişiklik göstermiştir. Üç gözlü sandık kesitli köprü için yapılan analizlerde z eksenindeki yer değiştirmeler; H15-S12 için 0.050 cm ile 0.372 cm arasında, H20-S16 kanyonu için 0.067 cm ile 0.496 cm arasında, H30-S24 kanyonu için 0.1 cm ile 0.744 cm arasında değişmiştir.

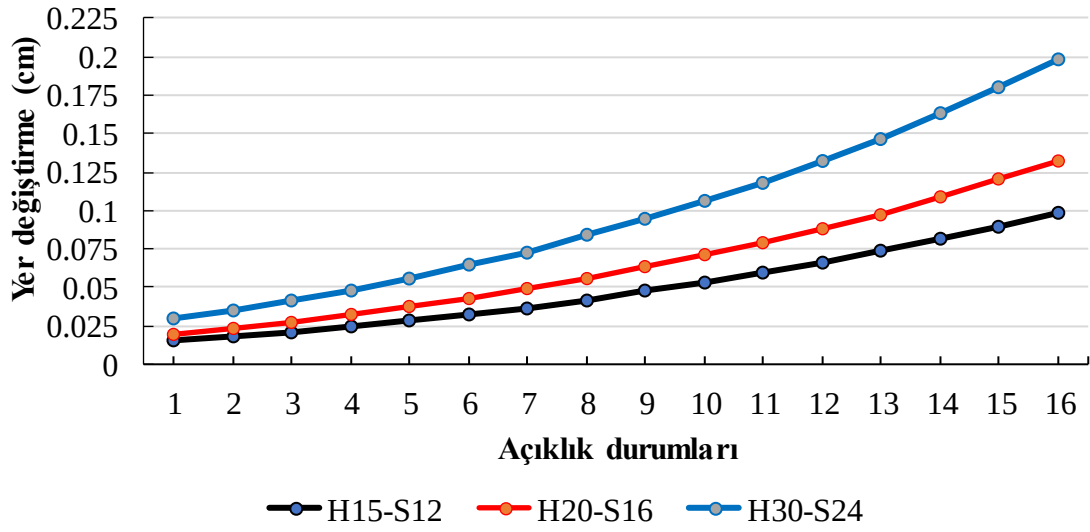


Şekil 4.4 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler

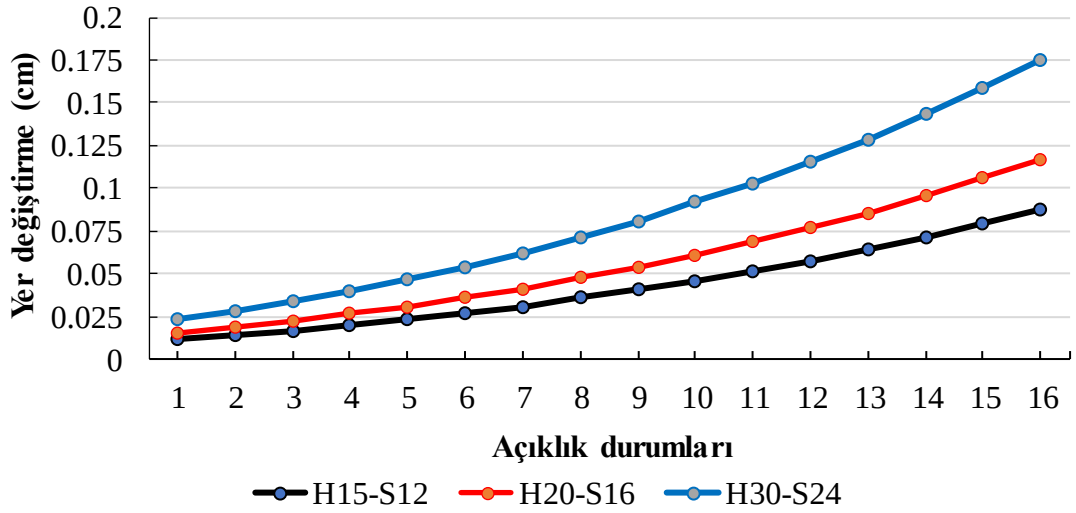
Yan açıklıklardaki değerlerin artışı orta açıklıklardaki gibi olmuştur. İki kesit durumu için de karşılaştırmalar Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Tek gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirme değerleri Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır. Buna göre yer değiştirme değerleri, H15-S12 için 0.015 cm ile 0.099 cm arasında, H20-S16 kanyonu için 0.02 cm ile 0.132 cm arasında, H30-S24 kanyonu için 0.03 cm ile 0.198 cm arasında değişmiştir.

Üç gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirme değerleri Şekil 4.6'da karşılaştırılmıştır. Buna göre yer değiştirme değerleri, H15-S12 için 0.012 cm ile 0.088 cm arasında, H20-S16 kanyonu için 0.016 cm ile 0.117 cm arasında, H30-S24 kanyonu için 0.024 cm ile 0.175 cm arasında değişmiştir.



Şekil 4.5 Tek gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler



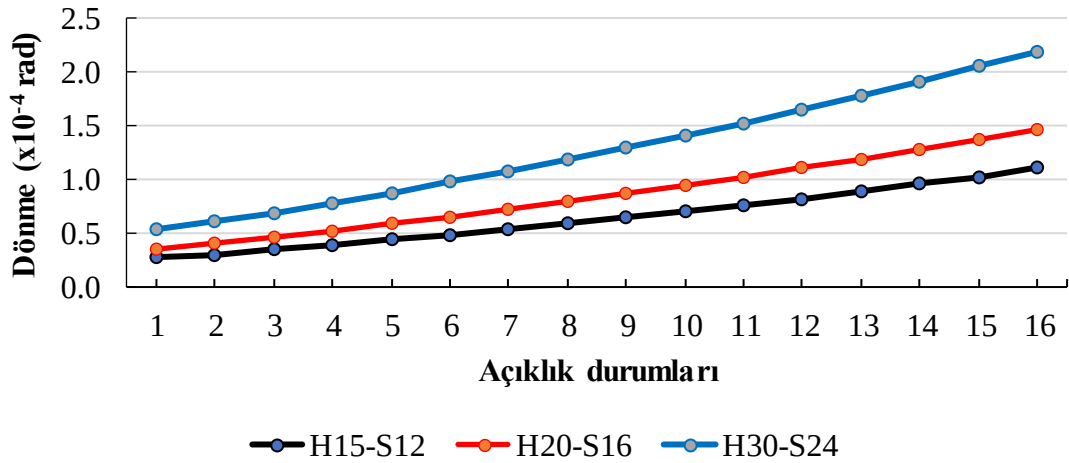
Şekil 4.6 Üç gözlü sandık kesitli köprü için yan açıklıklarda z eksenindeki yer değiştirmeler

4.1.1.2. Köprünün y Eksenindeki Dönme Değerleri

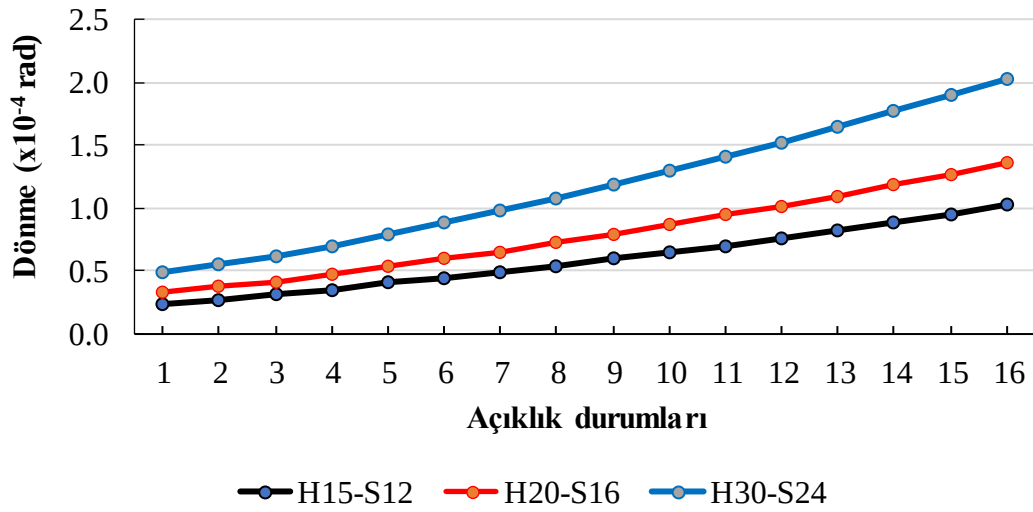
Dönme açısından karşılaştırma yapılan noktalardaki dönme değerlerinin açıklığa göre artışı; iki tür kesit için de açıklıklardaki, y eksenindeki dönme değerlerinin artışı gibi olmuştur.

Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme değerleri Şekil 4.7’de karşılaştırılmıştır. Buna göre H15-S12 kamyonu için dönme değerleri 0.27×10^{-4} rad ile 1.1×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H20-S16 kamyonu için dönme değerleri 0.35×10^{-4} rad ile 1.46×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H30-S24 kamyonu için değerleri 0.53×10^{-4} rad ile 2.19×10^{-4} rad arasında değişmiştir.

Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme değerleri Şekil 4.8’de karşılaştırılmıştır. Buna göre H15-S12 kamyonu için dönme değerleri 0.24×10^{-4} rad ile 1.02×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H20-S16 kamyonu için dönme değerleri 0.32×10^{-4} rad ile 1.36×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H30-S24 kamyonu için değerleri 0.48×10^{-4} rad ile 2.03×10^{-4} rad arasında değişmiştir.



Şekil 4.7 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme

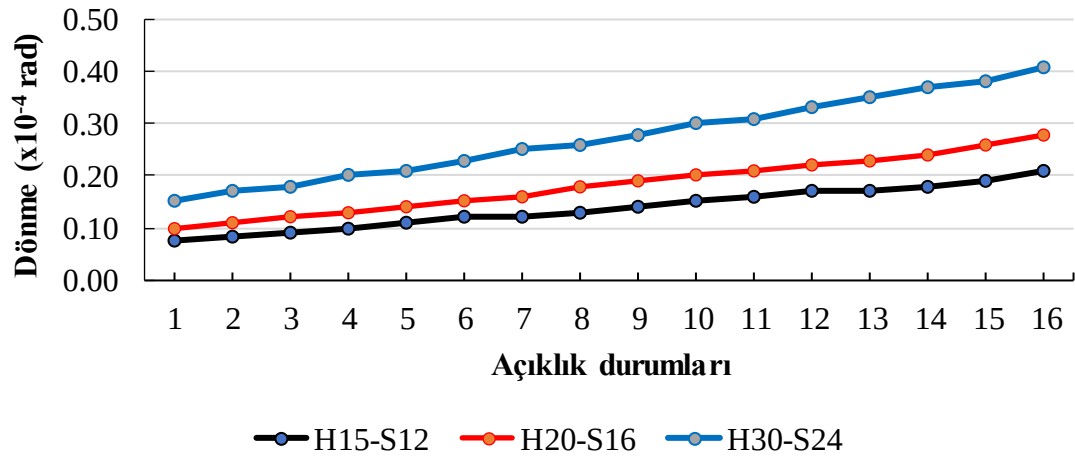


Şekil 4.8 Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliye ve karayolunun birleşim noktasında, y eksenindeki dönme

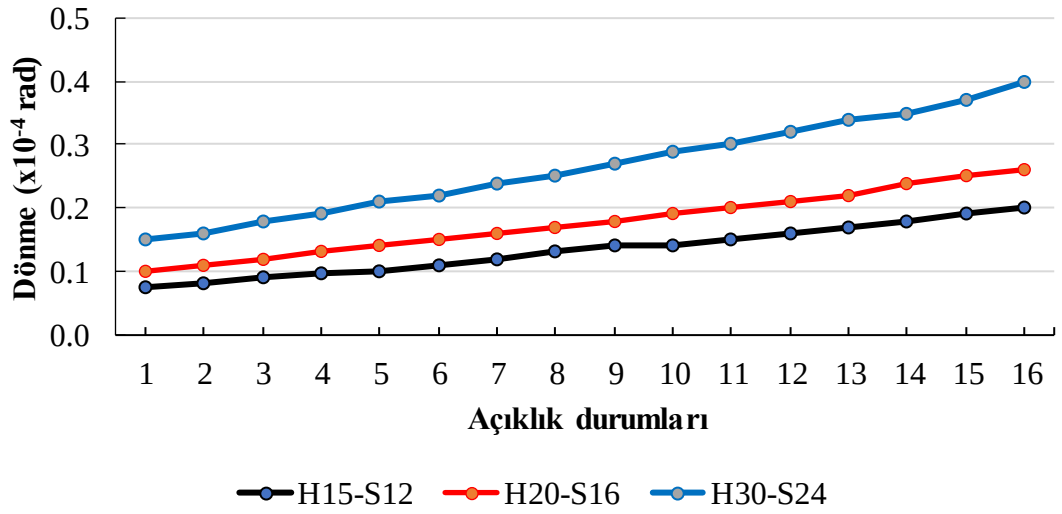
Orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme değerlerinin artışı tabliye ve karayolunun birleşim noktalarındaki gibi olmuştur.

Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme değerleri Şekil 4.9’da karşılaştırılmıştır. H15-S12 kamyonu için dönme değerleri 0.077×10^{-4} rad ile 0.21×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H20-S16 kamyonu için dönme değerleri 0.1×10^{-4} rad ile 0.28×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H30-S24 kamyonu için değerleri 0.15×10^{-4} rad ile 0.41×10^{-4} rad arasında değişmiştir.

Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme değerleri Şekil 4.10’da karşılaştırılmıştır. H15-S12 kamyonu için dönme değerleri 0.075×10^{-4} rad ile 0.2×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H20-S16 kamyonu için dönme değerleri 0.1×10^{-4} rad ile 0.26×10^{-4} rad arasında değişmiştir. H30-S24 kamyonu için değerleri 0.15×10^{-4} rad ile 0.4×10^{-4} rad arasında değişmiştir.



Şekil 4.9 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme

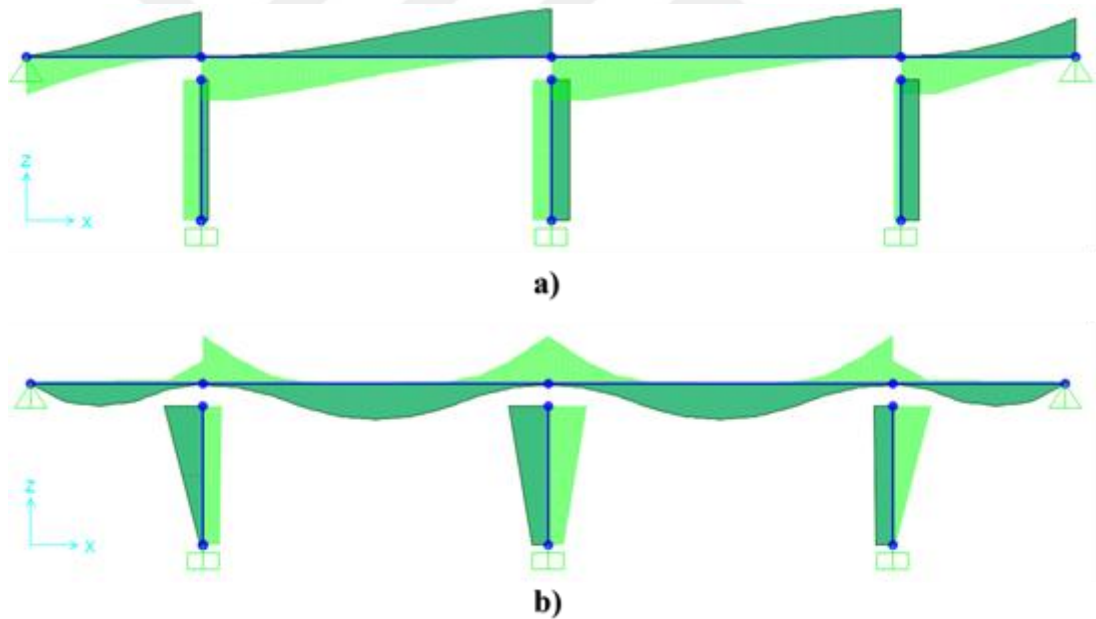


Şekil 4.10 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayak ve köprü tabliyesinin birleşim noktasında, y eksenindeki dönme

4.1.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma

4.1.2.1. Köprü Ayaklarındaki Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Değerleri

Köprü ayakları için en büyük kesme kuvveti değeri orta ayakta görülmüştür. Bu yüzden orta ayaktaki kesme kuvveti değeri karşılaştırılmıştır. Orta ayağın her noktasında kesme kuvveti değerleri aynıdır. Yan ayaklarda da ayakların her noktasındaki kesme kuvveti değerleri aynıdır. Köprü ayaklarında negatif ve pozitif yönde kesme kuvveti görülmüştür. Orta ayakta negatif ve pozitif yönde görülen kesme kuvveti değerlerinin mutlak değeri eşitken yan ayaklarda farklı görülmüştür. Köprünün kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları Şekil 4.11’de görülmektedir.

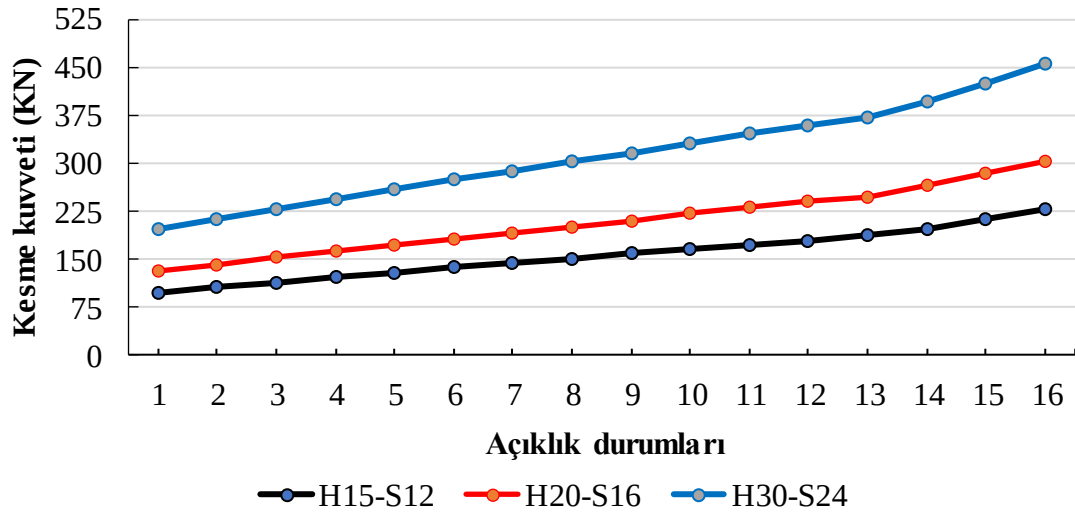


Şekil 4.11 a) Kesme kuvveti diyagramı b) Eğilme momenti diyagramı

Köprü ayakları için kesme kuvveti değeri, köprü açıklıklarının uzunluklarının artmasıyla artmıştır. Bu artış şekli tek gözlü sandık kesit durumu ve üç gözlü sandık kesit durumu için aynı şekilde seyretmiştir. Fakat üç gözlü sandık kesit durumu için kesme kuvveti değerleri daha büyüktür. Köprü ayaklarındaki kesme kuvveti değerleri

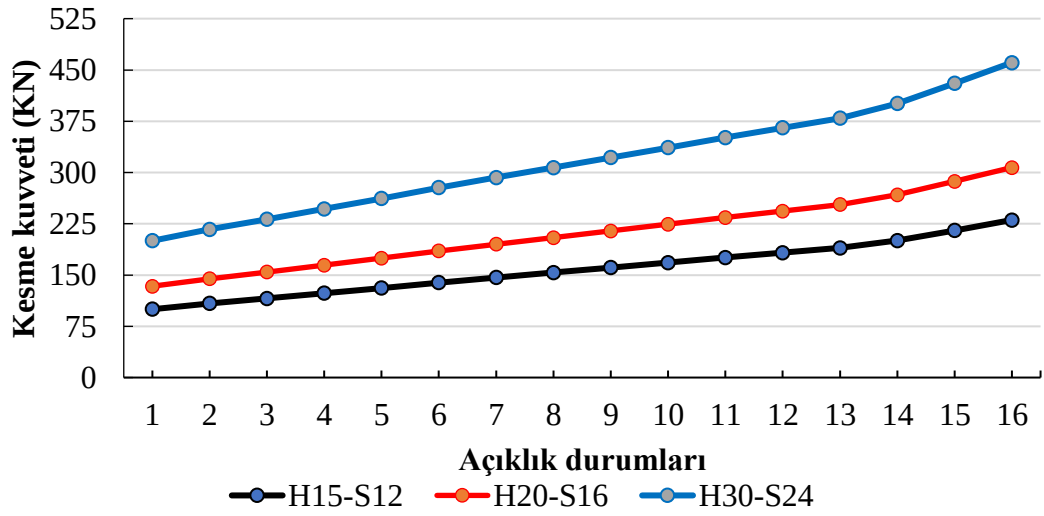
köprü açıklıklarının artışıyla giderek daha fazla arttığı görülmüştür. Özellikle 13. durumdan sonra görülmüştür. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te bu artış görülmektedir.

Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayaktaki kesme kuvveti değerleri; H15-S12 kamyonu için 99.06 KN ile 227.24 KN arasında, H20-S16 kamyonu için 132.08 KN ile 302.99 KN arasında, H30-S24 kamyonu için 198.12 KN ile 454.48 KN arasında değişmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın tabliyeyle birleştiği noktadaki kesme kuvveti

Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayaktaki kesme kuvveti değerleri; H15-S12 kamyonu için 100.13 KN ile 230.34 KN arasında, H20-S16 kamyonu için 133.51 KN ile 307.12 KN arasında, H30-S24 kamyonu için 200.26 KN ile 460.68 KN arasında değişmiştir (Şekil 4.13).

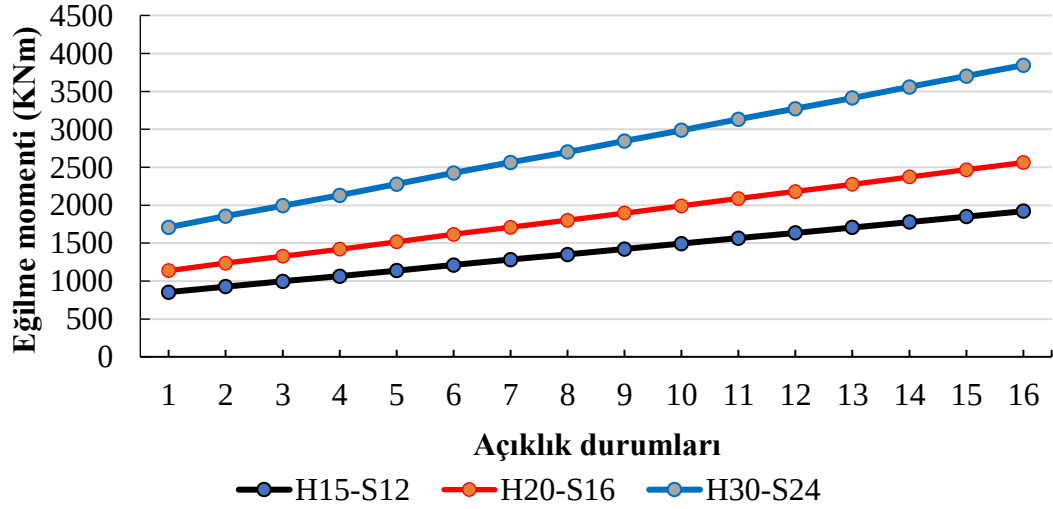


Şekil 4.13 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın tabliyesiyle birleştiği noktadaki kesme kuvveti

Köprü ayaklarında ilk 8 durum için en büyük eğilme momenti değeri, köprü orta ayağının köprü tabliyesiyle birleştiği noktada görülmüştür. Sonraki 8 durum için yan ayakların köprü tabliyesiyle birleştiği noktada görülmüştür. Değerler birbirine çok yakındır. Orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Köprü ayaklarında eğilme momentinin en büyük olduğu nokta, tabliyeyle bağlandığı noktadır. En küçük olduğu nokta ise köprü ayaklarının orta noktasıdır. Köprü ayaklarında negatif ve pozitif yönde eğilme momenti görülmüştür. Orta ayakta negatif ve pozitif yönde görülen eğilme momenti değerlerinin mutlak değeri eşitken yan ayaklarda farklı görülmüştür. Köprü ayakları için eğilme momenti değeri, köprü açıklıklarının uzunluklarının artmasıyla artmıştır. Bu artış şekli tek gözlü sandık kesit durumu ve üç gözlü sandık kesit durumu için aynı şekilde seyretmiştir. Fakat üç gözlü sandık kesit durumu için eğilme momenti değerleri küçük açıklık durumlarında daha büyük görülmüşken büyük açıklık durumlarında daha küçük görülmüştür. Karşılaştırmalar Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görülmektedir.

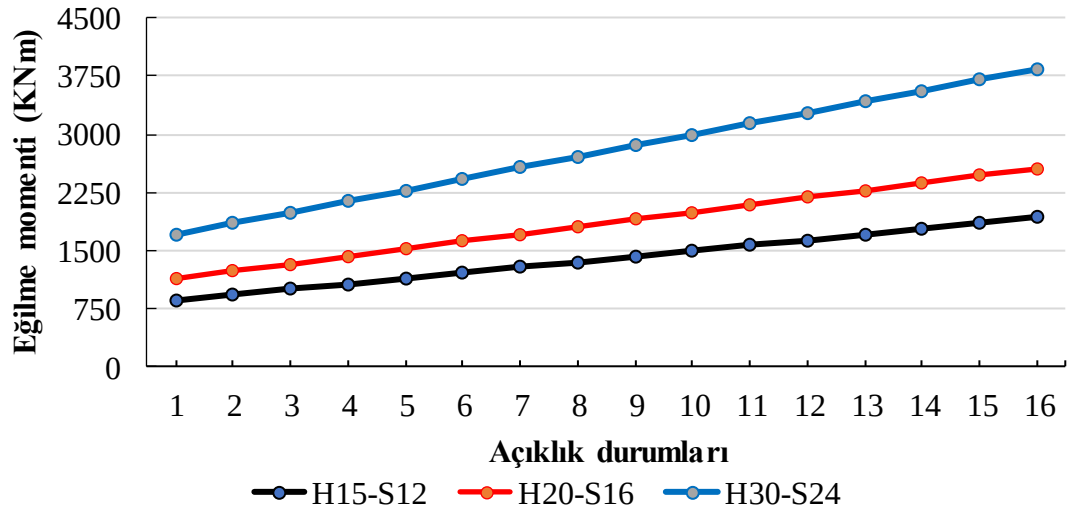
Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti değerleri; H15-S12 kamyonu için 854.45 KNm ile 1922.62 KNm arasında, H20-S16 kamyonu için 1139.26 KNm ile 2563.49 KNm

arasında, H30-S24 kamyonu için 1708.9 KNm ile 3845.25 KNm arasında değişmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Tek gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti

Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti değerleri; H15-S12 kamyonu için 855.13 KNm ile 1921.93 KNm arasında, H20-S16 kamyonu için 1140.18 KNm ile 2562.58 KNm arasında, H30-S24 kamyonu için 1710,26 KNm ile 3843.87 KNm arasında değişmiştir (Şekil 4.15).

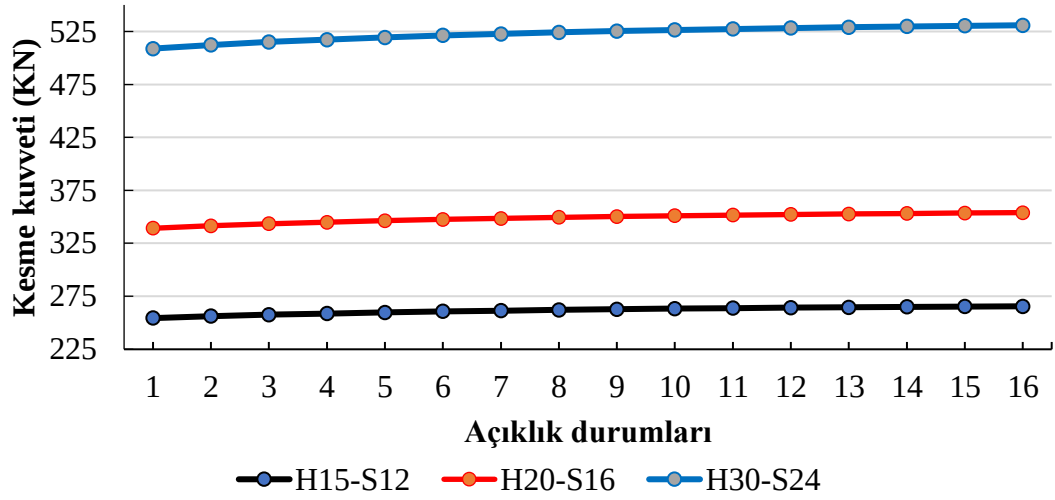


Şekil 4.15 Üç gözlü sandık kesitli köprü için orta ayağın köprü tabliyesiyle birleştiği noktadaki eğilme momenti

4.1.2.2. Köprü Açıklıklarındaki Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti Değerleri

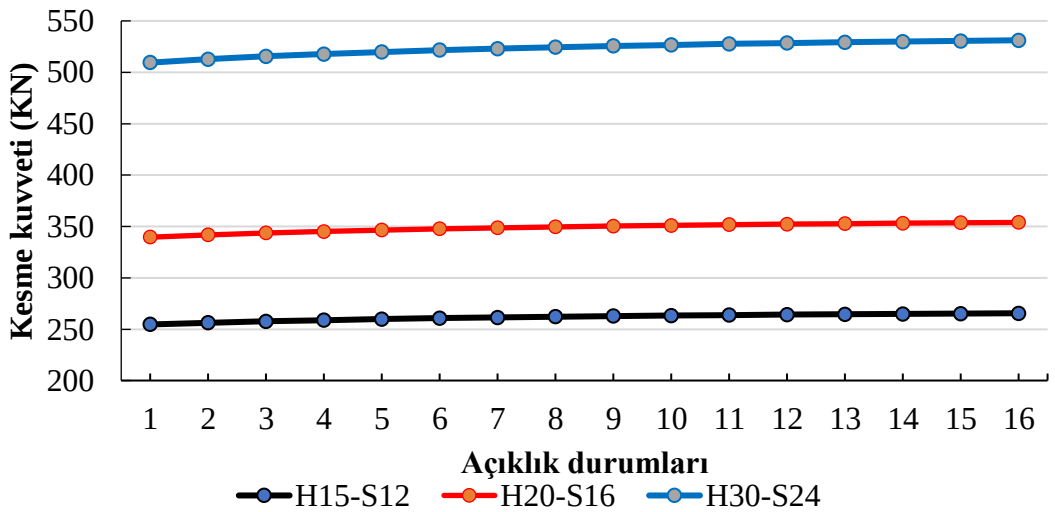
Köprü açıklıklarının orta noktasına doğru kesme kuvveti değerleri azalmaktadır. En büyük kesme kuvveti değerleri düğüm noktalarında görülmüştür. Yan açıklıkların orta açıklıklarla birleştiği noktalardaki kesme kuvveti değeri, orta açıklıkların birleştiği noktadaki kesme kuvveti değerine çok yakındır. Fakat köprü tabliyesi için en büyük kesme kuvveti değeri orta açıklıkların birleşim noktasında görülmüştür. Bu noktadaki kesme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Köprü açıklıklarında negatif ve pozitif yönde kesme kuvveti görülmüştür. Köprü tabliyesi için kesme kuvveti değeri, köprü açıklıklarının uzunluklarının artmasıyla çok az artmıştır. Bu artış şekli tek gözlü sandık kesit durumu ve üç gözlü sandık kesit durumu için aynı şekilde seyretmiştir. Fakat üç gözlü sandık kesit durumu için kesme kuvveti değerleri daha büyüktür. Karşılaştırmalar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de görülmektedir.

Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti değerleri; H15-S12 kamyonu için 254.44 KN ile 265.48 KN arasında, H20-S16 kamyonu için 339.26 KN ile 353.97 KN arasında, H30-S24 kamyonu için 508.89 KN ile 530.95 KN arasında değişmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti

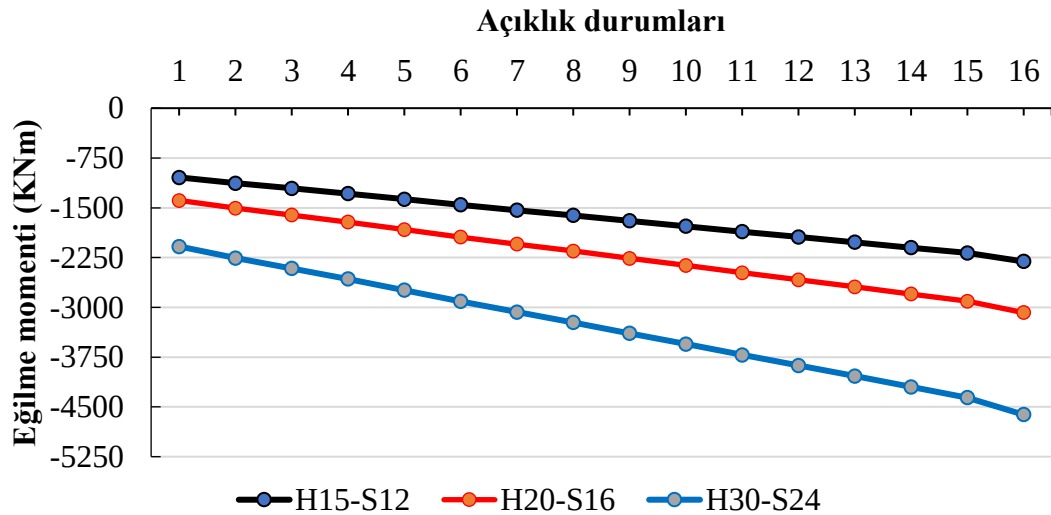
Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti değerleri; H15-S12 kamyonu için 254.73 KN ile 265.54 KN arasında, H20-S16 kamyonu için 339.63 KN ile 354.05 KN arasında, H30-S24 kamyonu için 509.45 KN ile 531.08 KN arasında değişmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki kesme kuvveti

Köprü tabliyesinde eğilme momentinin mutlak en büyük olduğu nokta orta açıklıkların birleştiği noktadır. Bu noktadaki eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Köprü tabliyesinde mutlak eğilme momenti değerinin en küçük olduğu noktalar açıklıkların düğüm noktasına yakın noktalarıdır. Köprü açıklıklarının orta noktasına doğru mutlak eğilme momenti değerleri artmaktadır. Köprü açıklıklarında negatif ve pozitif yönde eğilme momenti görülmüştür. Köprü tabliyesi için eğilme momenti değeri, köprü açıklıklarının uzunluklarının artmasıyla artmıştır. Bu artış şekli tek gözlü sandık kesit durumu ve üç gözlü sandık kesit durumu için aynı şekilde seyretmiştir. Fakat üç gözlü sandık kesit durumu için mutlak eğilme momenti değerleri daha büyüktür. Karşılaştırmalar Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da görülmektedir.

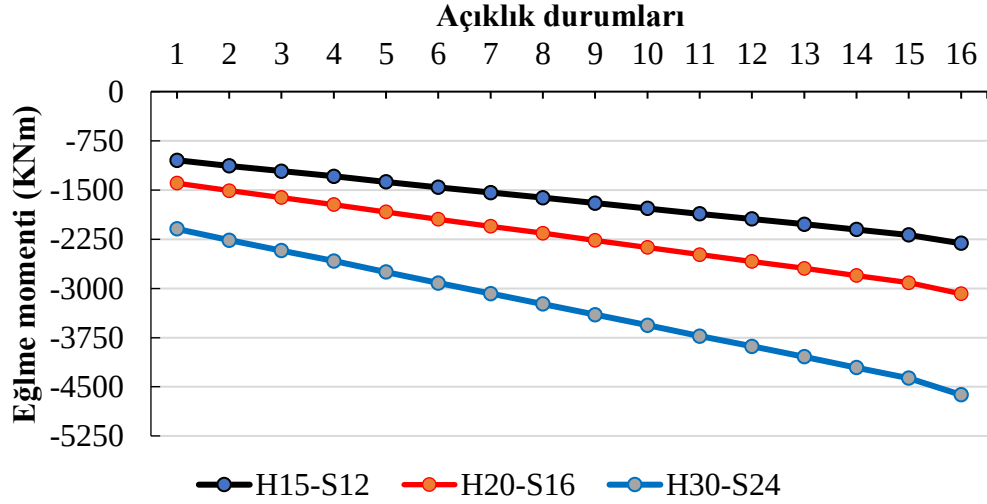
Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede, orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti değerleri; H15-S12 kamyonu için -1041.51 KNm ile -2308.3 KNm arasında, H20-S16 kamyonu için -1388.68 KNm ile -3077.77 KNm arasında, H30-S24 kamyonu için -2083.01 KNm ile -4616.6 KNm arasında değişmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Tek gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti

Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede, orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti değerleri; H15-S12 kamyonu için -1046.3 KNm ile -

2310.56 KNm arasında, H20-S16 kamyonu için -1395.07 KNm ile -3080.75 KNm arasında, H30-S24 kamyonu için -2092.61 KNm ile -4621.12 KNm arasında değişmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Üç gözlü sandık kesitli köprü için tabliyede orta açıklıkların birleşim noktasındaki eğilme momenti

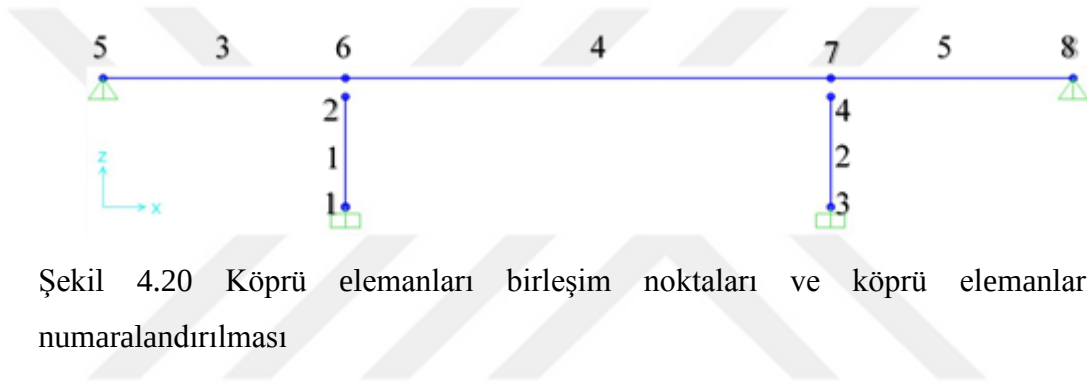
4.2. Zaman Tanım Alanında Analiz Bulguları

Taşıt hızının değişimine göre yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde, birer adet H30-S24 kamyonu, 5 farklı hız değerinde geçirilmiştir. Taşıt sayısına göre yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde, H30-S24 kamyonu, eşit sayılarda ve 10 metre takip mesafesi olacak şekilde geçirilmiştir. Taşıtlar arası takip mesafesine göre yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde ikişer adet, H30-S24 kamyonu, 10 km/h hız değerinde, 5 farklı takip mesafesinde geçirilmiştir. Taşıt yükleme durumlarında belirlenen hız değerleri, taşıt sayıları ve takip mesafesi değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Analizler sonucu köprü yapısında oluşan deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır.

Analizler sonucu köprü yapısında meydana gelen değişimlerin karşılaştırılabilmesi için köprü modelindeki birleşim noktaları ve elemanları numaralandırılmış (Şekil 4.20).

Çizelge 4.2 Taşıt yükleme durumları

Taşıt hızına göre	Taşıt sayısına göre	Takip Mesafesine Göre
km/h	adet	metre
20	2	10
25	4	20
30	6	30
35	8	40
40	10	50



Şekil 4.20 Köprü elemanları birleşim noktaları ve köprü elemanlarının numaralandırılması

Köprü modeli z eksenine göre simetriktir. Karşılaştırma yapılan yükleme durumlarında; köprü üzerinden iki yönden, eşit sayıda ve eşit hızlarda kamyonlar geçirilmiştir. Bu yüzden analiz sonucu, köprü modelindeki bazı noktalarda ve elemanlardaki değerler benzerlik göstermiştir. 1'inci ve 3'üncü noktalarda bütün öteleme ve dönmelere karşı kısıtlı olduğu için bu noktalarda deformasyon değerleri karşılaştırılmamıştır. Köprüdeki bütün noktalarda ve elemanların herhangi bir konumunda, z eksen yönünde oluşan deformasyonlar negatif yöndedir. 2'nci, 4'üncü, 6'ncı ve 7'nci noktalarda z eksen yönünde oluşan yer değiştirmeler eşittir. Bu noktalarda oluşan x eksen yönündeki yer değiştirmelerin mutlak değerleri de eşittir ve analiz süresi içerisinde iki yönde de yer değiştirmeler görülmüştür. Fakat köprü ayakları ve köprü tabliyesi, x eksenine göre öteleme yapamayacağı için yer değiştirme değerleri çok küçüktür. 5'inci ve 8'inci noktalar dönmeye serbest bırakıldığı için bu noktalarda dönme değerleri karşılaştırılmıştır. 5'inci ve 8'inci noktalardaki dönme değerleri mutlak olarak eşit ama farklı yöndedir.

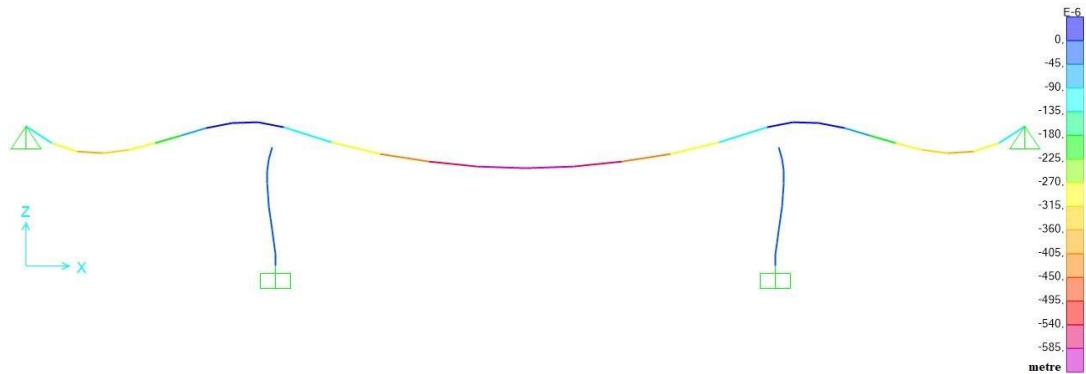
Köprü ayaklarında ve köprü elemanlarının birleşim noktalarında z eksenindeki yer değiştirme değerleri çok küçüktür. Fakat köprü açıklıklarında en büyük değerler görülmüştür. Bu yüzden köprü açıklıklarında, z eksenindeki yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır.

Köprü yapısında oluşan en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri köprü elemanlarının birleşim noktalarında görülmüştür. Köprü tabliyesinde en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 3 numaralı elemanın 0 metre konumunda görülmüştür. Köprü ayaklarında en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 1 ve 2 numaralı elemanların 12 metre konumlarında görülmüştür. Karşılaştırmalar bu noktalara göre yapılmıştır.

4.2.1. Taşıt Hızına Göre Yükleme Durumları

4.2.1.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma

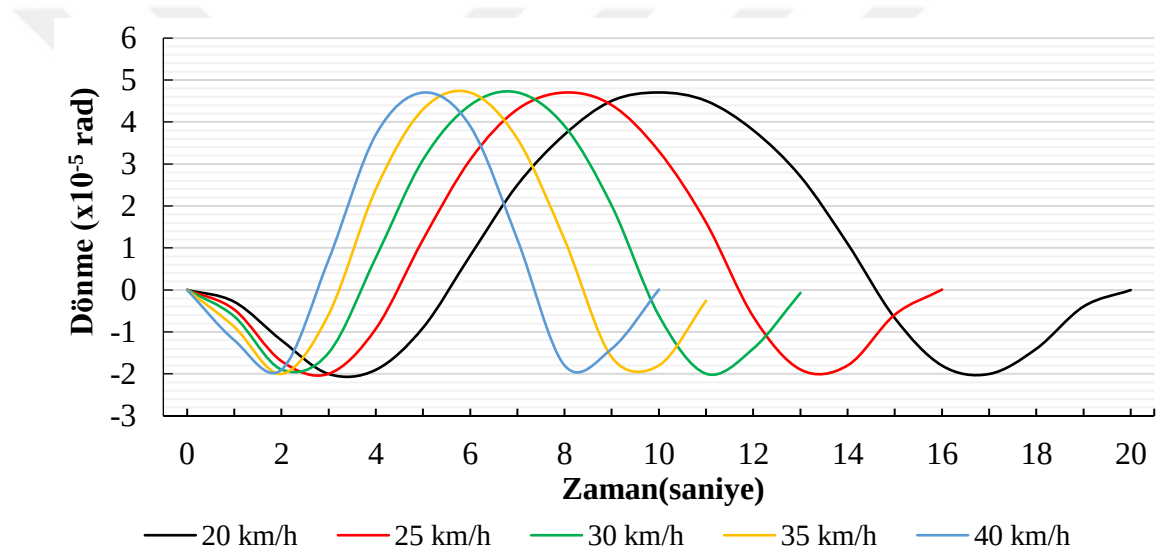
Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerleri kamyonların hızlarına göre değişmemiştir. Fakat köprü tabliyesinde herhangi bir noktada z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerlerinin görülme süresi, kamyonların hızları arttıkça azalmaktadır. En büyük yer değiştirme orta açıklığın ortasında görülmüştür. Bu değer 0.0591 cm'dir. En büyük yer değiştirme değerleri açıklık ortasına doğru artmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 Köprü yapısında, tüm taşıt hızlarına göre yükleme durumlarında z ekseninde oluşan en büyük yer değiştirmeler

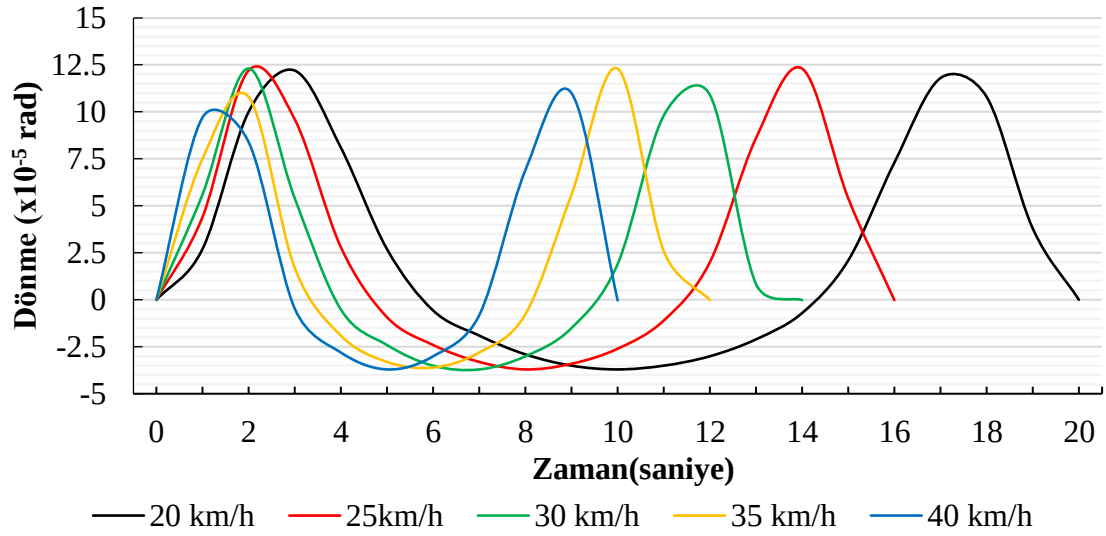
Araç hızlarına göre yükleme durumlarında araç yükleme süreleri sırasıyla yaklaşık 20, 17, 15, 13 ve 10 saniyedir. Orta açıklıkta z eksenindeki en büyük yer değiştirme değeri kamyonların orta açıklığın ortasında konumlandığı zamanda görülmüştür. Kamyonlar orta açıklığın ortasına, yükleme süresinin yarısında ulaşmaktadır.

Köprü ayaklarında ve tabliyesinde y ekseninde mutlak en büyük dönme değeri 4.7×10^{-5} radyan olarak köprünün 2'nci, 4'üncü, 6'ncı ve 7'nci noktalarında gerçekleşmiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 4.22). Kamyonlar orta açıklığın ortasında olduğu anlarda bu değer görülmüştür.



Şekil 4.22 Köprünün 2'nci ve 6'nci noktalarında y eksenindeki dönme

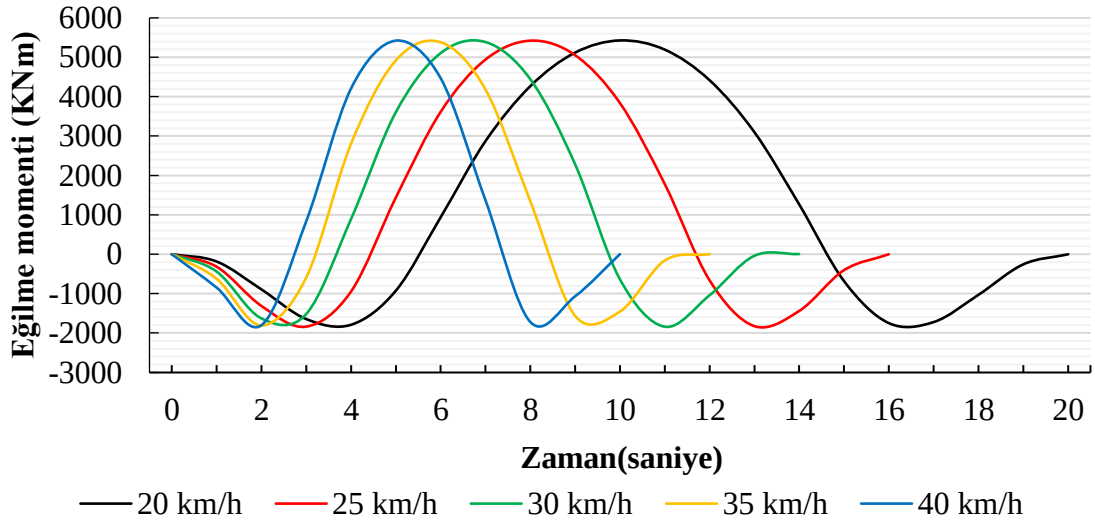
Köprünün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri beş yükleme durumu için de farklılık göstermiştir. Kamyonlar köprü tabliyesine temas ettiğinde köprünün 5'inci ve 8'inci noktalarındaki en büyük dönme değerleri, daha hızlı kamyon yüklemelerinde azalmıştır. Fakat değerler birbirine çok yakındır. En büyük değer 12.3×10^{-5} radyandır. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 4.23). En büyük değerler kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında görülmüştür.



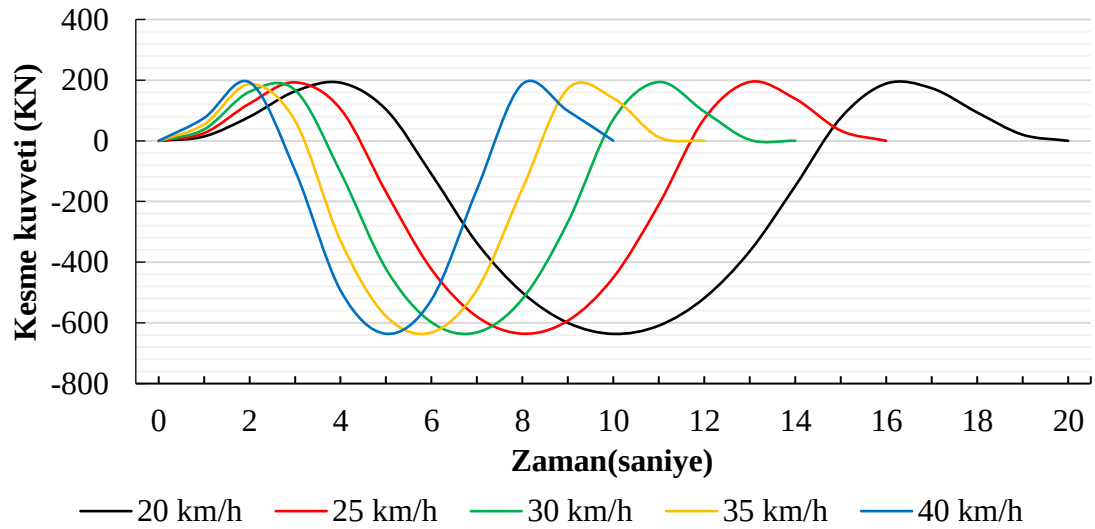
Şekil 4.23 Köprünün 5'inci noktasında y eksenı yönündeki dönme

4.2.1.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma

Köprü ayaklarında eğilme momenti ve kesme kuvvetinin maksimum olduğu noktalar, ayakların tabliyeyle birleştiği noktalardır. Kamyon hızları arttıkça mutlak en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri neredeyse değişmemiştir. Mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 20 km/h hızdaki kamyonların tanımlandığı yükleme durumunda görülmüştür ve eğilme momenti değeri 5424.18 KNm olarak, kesme kuvveti değeri ise 636.08 KN olarak görülmüştür (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Her iki kamyon, köprünün orta açıklığının ortasında olduğunda mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri görülmüştür. Köprü ayaklarındaki mutlak en büyük eğilme momenti değeri; ayakların orta noktasında, uç noktalarına göre daha küçüktür. Köprü ayaklarındaki mutlak en büyük kesme kuvveti değeri, ayakların her noktasında aynıdır. Köprü ayaklarında karşılaştırma yapılan noktalarda her iki yönde kesme kuvveti ve eğilme momenti görülmüştür.



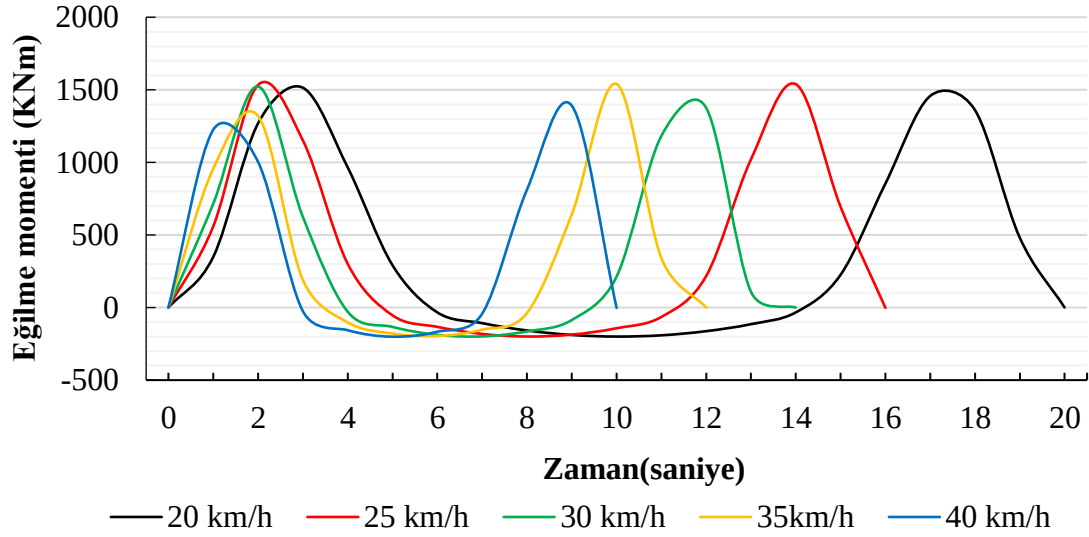
Şekil 4.24 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti



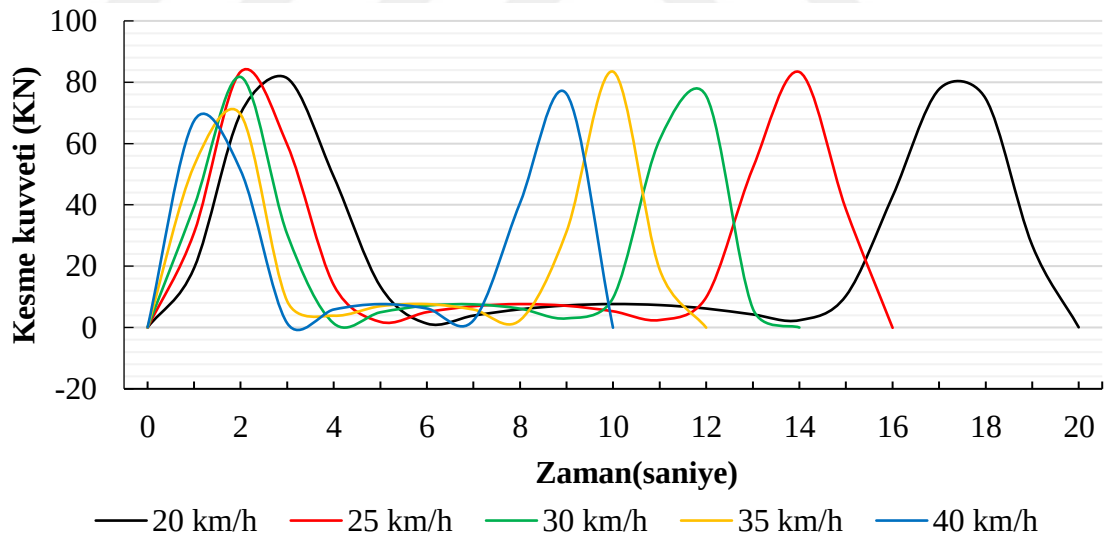
Şekil 4.25 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti

Kamyon hızları arttıkça açıklıklarda, mutlak en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri neredeyse değişmemiştir. Mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 25 km/h hızdaki kamyonların tanımlandığı yükleme durumunda görülmüştür ve eğilme momenti değeri 1538.32 KNm olarak, kesme kuvveti değeri ise 83.38 KN olarak görülmüştür (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27).

Kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri görülmüştür.



Şekil 4.26 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti

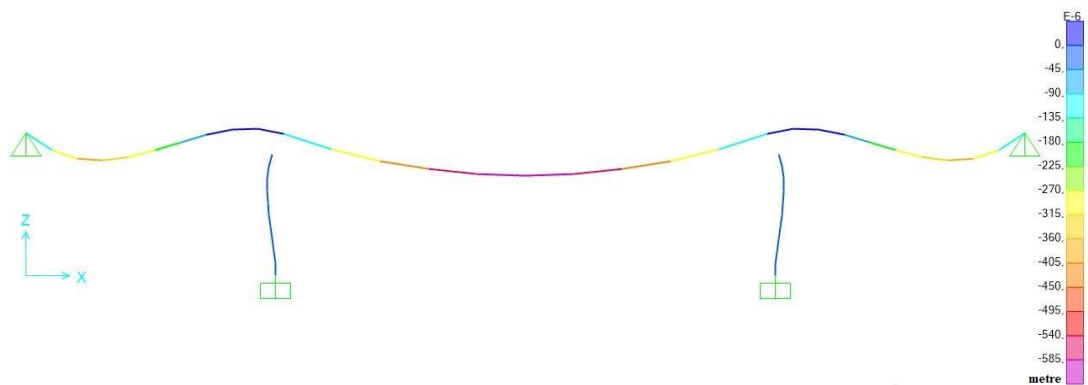


Şekil 4.27 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti

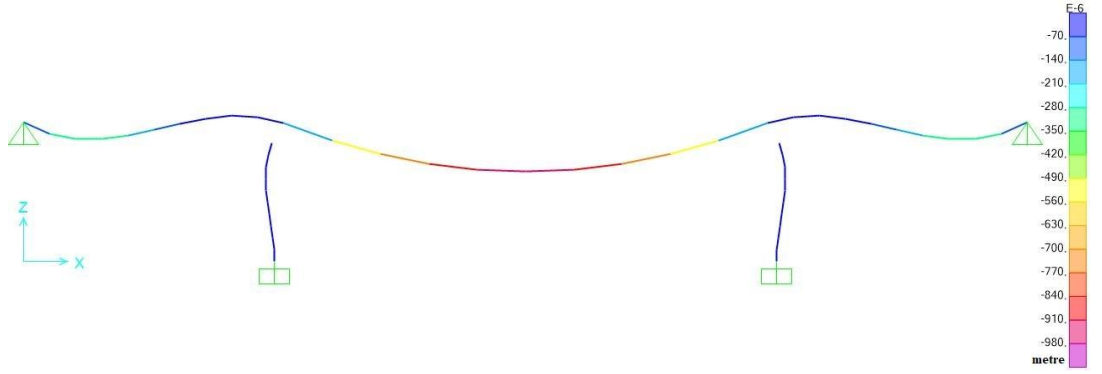
4.2.2. Taşıt Sayısına Göre Yükleme Durumları

4.2.2.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma

Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirmeler, kamyon sayılarına göre değişmiştir. En büyük yer değiştirme değerleri, orta açıklığın ortasında görülmüştür. Bu değerler araç sayısına göre yükleme durumlarında; 2 araç için 0.0591 cm, 4 araç için 0.0972 cm, 6 araç için 0.0936 cm, 8 araç için 0.0808 cm ve 10 araç için 0.0811 cm olarak görülmüştür. Kamyonlar orta açıklığın ortasında konumlandığında bu değerler görülmüştür. Fakat araç sayısı arttıkça yükleme süresinin yarısında, araçlar orta açıklığın başlangıç ve bitiş noktalarına daha yakın konumlanmıştır. Bu durumda deformasyon değerleri azalmıştır. Eğer orta açıklık daha uzun olsaydı araç sayısının artışıyla açıklık ortasındaki, z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerlerinin büyüyeceği de ön görülmüştür. Yan açıklıkların ortasında iki şeritte yan yana araçların konumlandığı tek durum 10 araç geçirilmesi durumudur. Bu yüzden yan açıklıklarda, z ekseninde en büyük yer değiştirme değeri diğer durumlarda birbirine yakın görülmüştür. Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de farklı sayıda araç yüklemesi durumları için köprü yapısında oluşan z eksenindeki deformasyon değerleri renk konturuyla verilmiştir. Araç sayısına göre yükleme durumlarında yükleme süreleri sırasıyla 37, 45, 53, 61 ve 69 saniye sürmüştür.



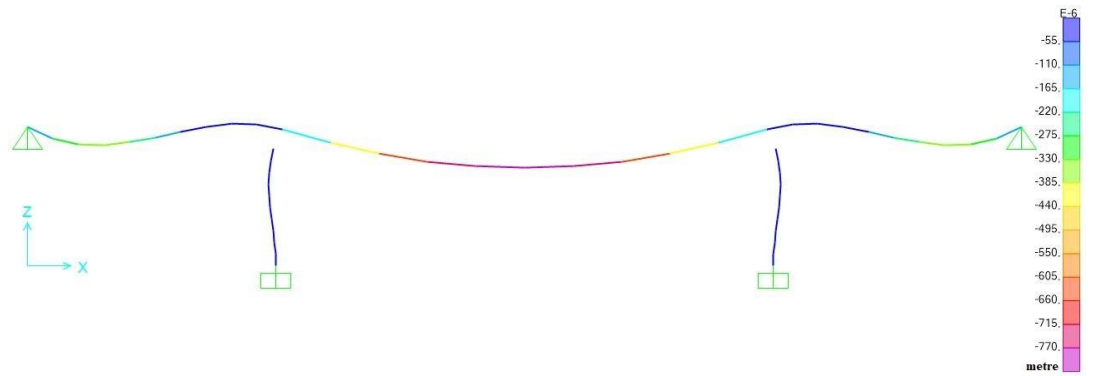
Şekil 4.28 Köprü üzerinden 2 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



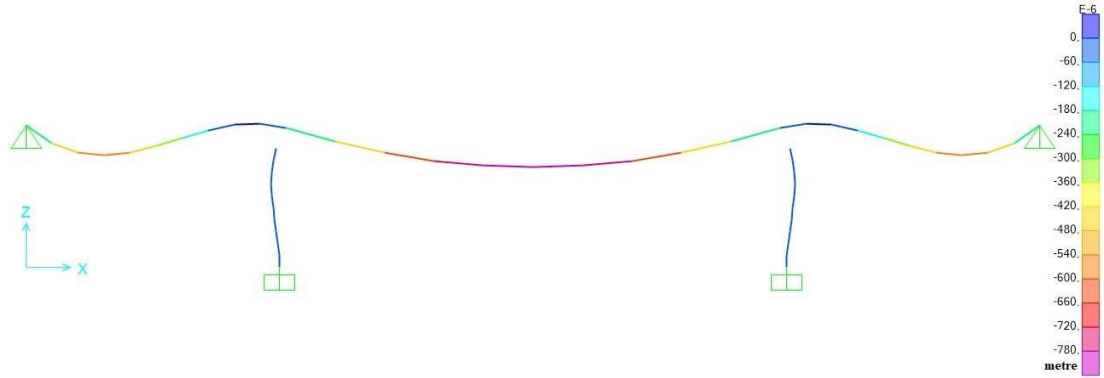
Şekil 4.29 Köprü üzerinden 4 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 4.30 Köprü üzerinden 6 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

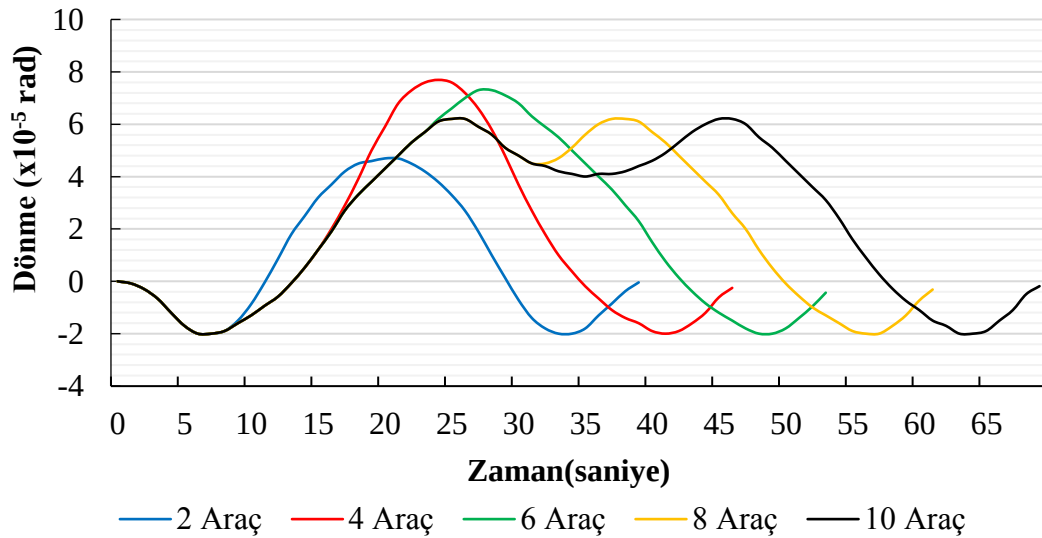


Şekil 4.31 Köprü üzerinden 8 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 4.32 Köprü üzerinden 10 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

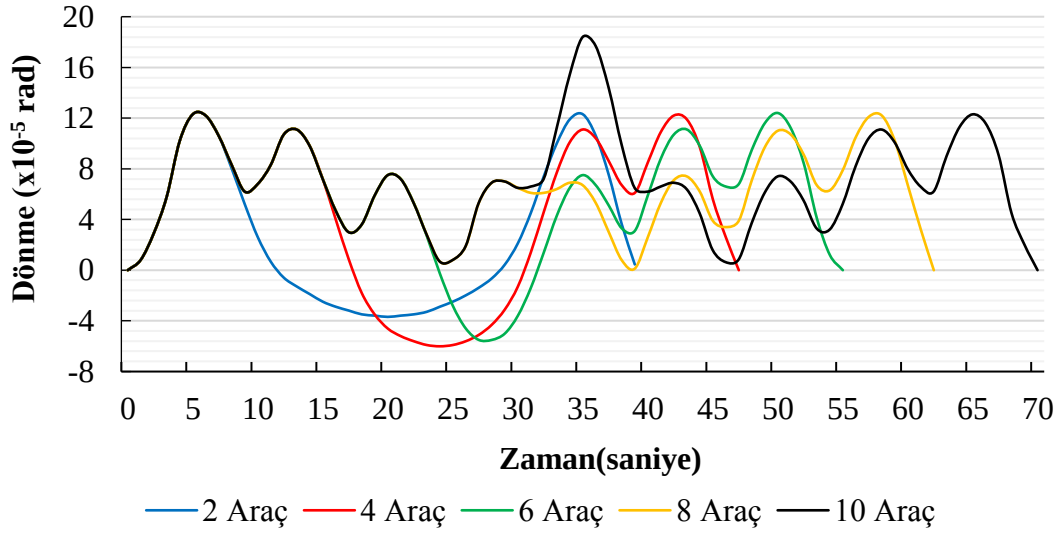
Köprü ayaklarında ve tabliyesinde y ekseninde mutlak en büyük dönme 7.7×10^{-5} radyan olarak köprünün 2'nci, 4'üncü, 6'ncı ve 7'nci noktalarında görülmüştür. Bu değer köprü üzerinden 4 araç geçirilmesi durumunda görülmüştür. Köprü ayakları ve tabliyesinde y eksen yönündeki mutlak maksimum dönme değeri, kamyon sayısı artışına bağlı düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 4.33).



Şekil 4.33 Köprünün 2'nci ve 6'nci noktalarında y eksen yönündeki dönme

Köprünün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri, 2 araç, 4 araç, 6 araç ve 8 araç geçirildiği yükleme durumları için aynıdır. Fakat 10

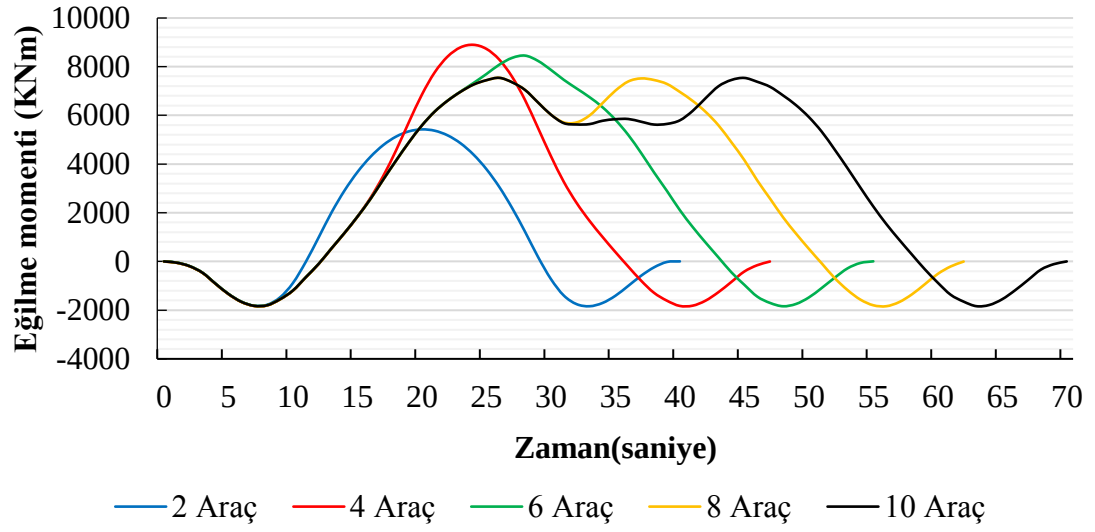
araç geçirildiğinde bu değer artmıştır. En büyük değer 18.4×10^{-5} radyandır. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 4.34). Bu değerler kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında görülmüştür. Kamyonların, yan açıklık üzerinde köprünün karayolu ile birleşen noktasına yakın olduğu anlarda mutlak maksimum dönme değerleri görülmüştür.



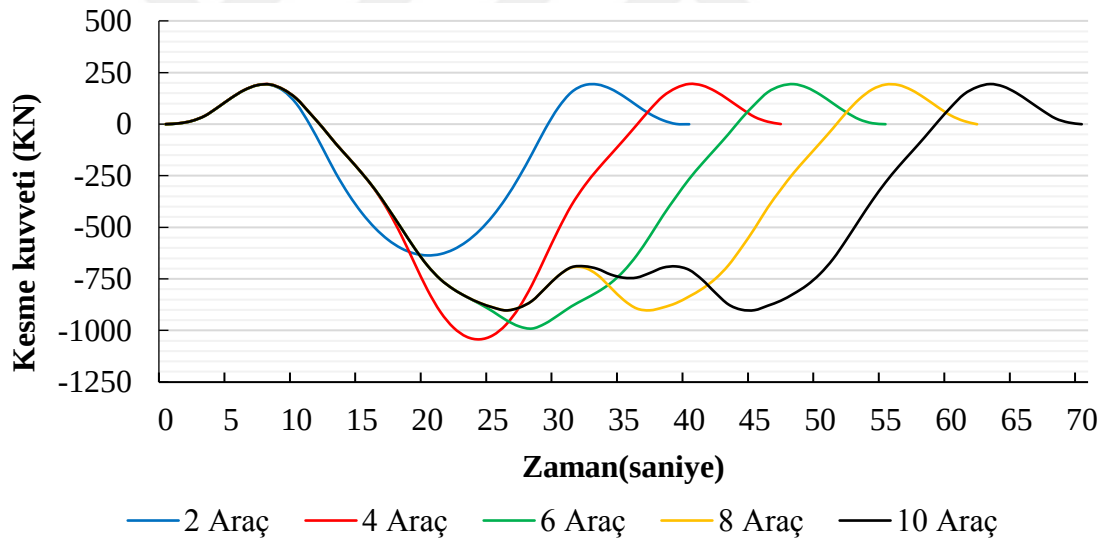
Şekil 4.34 Köprünün 5'inci noktasında y eksenindeki dönme

4.2.2.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma

Kamyon sayısına bağlı olarak köprü ayaklarında mutlak maksimum eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Orta açıklık üzerindeki kamyon sayısı maksimum miktarda olduktan sonra mutlak maksimum kesme kuvveti ve moment değerleri değişmemiştir. Bu durum köprü üzerinde 8 araç ve 10 araç geçirilmesi durumunda görülmüştür. Fakat araç sayısı arttıkça maksimum değerlerin görülme süresi artmıştır. En büyük mutlak maksimum eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri köprü üzerinden 4 araç geçirilmesi durumunda görülmüştür. Bu koşuldaki maksimum mutlak eğilme momenti değeri 8782.56 KNm ve mutlak maksimum kesme kuvveti değeri ise 1030.26 KN'dur (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36).



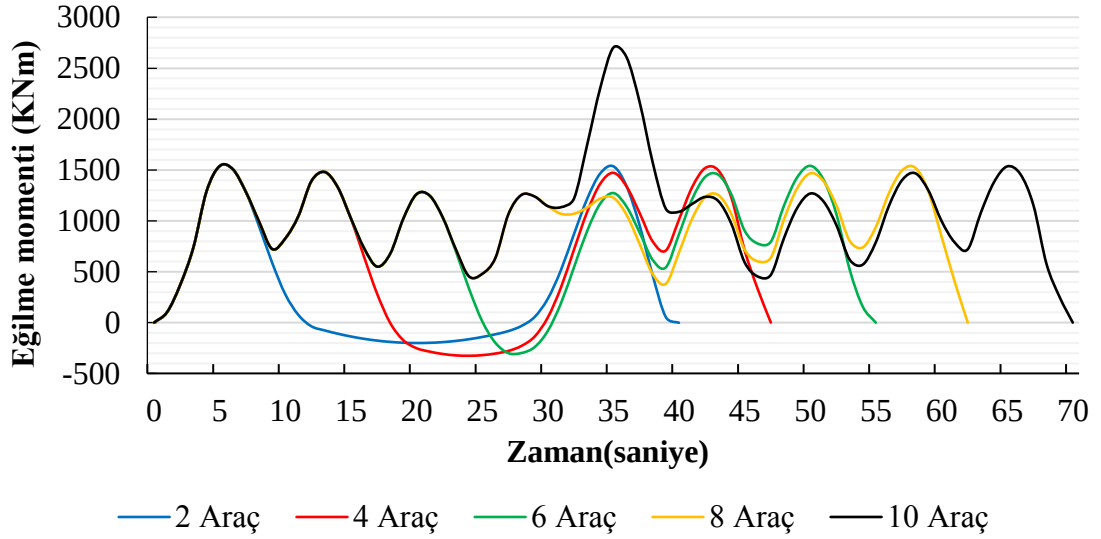
Şekil 4.35 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti



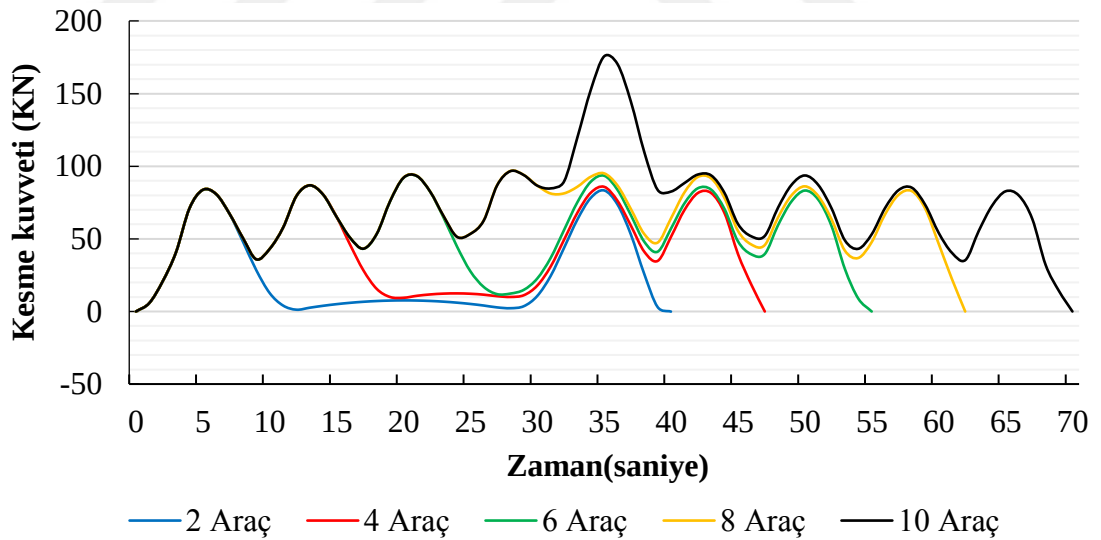
Şekil 4.36 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti

Köprü tabliyesindeki eğilme momenti ve kesme kuvvetinin maksimum olduğu noktalar, köprü tabliyesinin karayolu ile bağlandığı noktalardır. Köprü üzerinden 10 araç geçirilmesi durumu haricinde diğer durumlarda, köprü tabliyesinde mutlak maksimum eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri birbirine çok yakındır. 10 araç geçirilmesi durumunda, köprü tabliyesindeki mutlak maksimum

eğilme momenti değeri 2704.06 KNm ve kesme kuvveti değeri 175.77 KN'dur. Bu değerler yükleme süresinin yarısında görülmüştür (Şekil 4.37 ve Şekil 4.38).



Şekil 4.37 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti

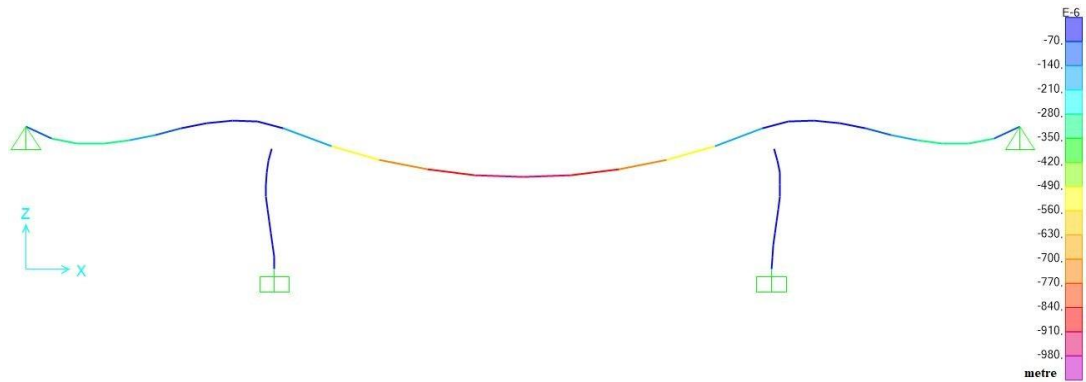


Şekil 4.38 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti

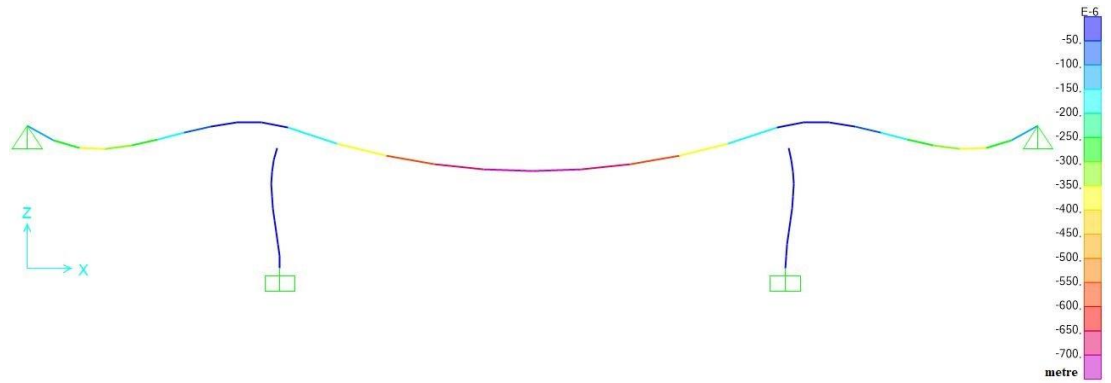
4.2.3. Araç Takip Mesafesine Göre Yükleme Durumları

4.2.3.1. Deformasyon Açısından Karşılaştırma

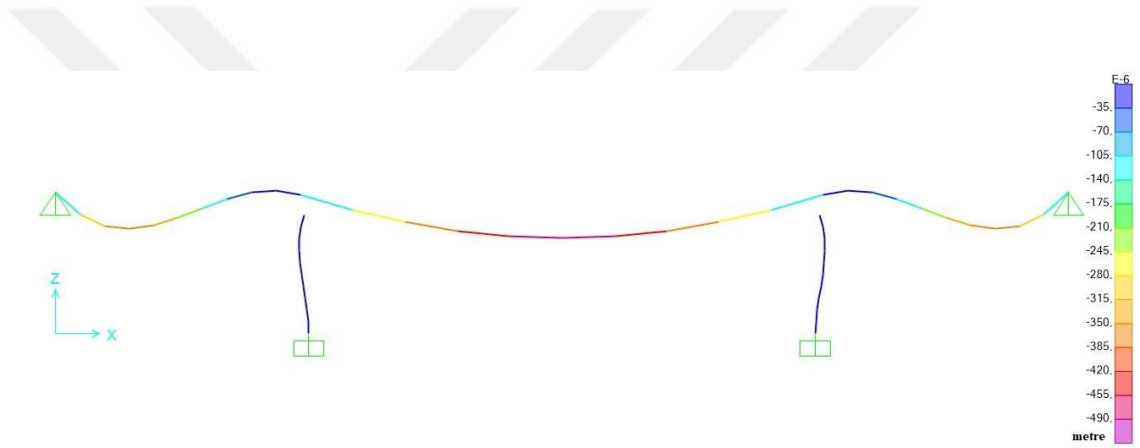
Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirmeler araç takip mesafelerine göre değişmiştir. En büyük yer değiştirme değerleri orta açıklığın ortasında görülmüştür. Bu değerler araç takip mesafesine göre yükleme durumlarında 10 metre takip mesafesi için 0.0972 cm, 20 metre takip mesafesi için 0.0725 cm, 30 metre takip mesafesi için 0.0487 cm, 40 metre takip mesafesi için 0.0597 cm ve 50 metre takip mesafesi için 0.06 cm olarak görülmüştür. Kamyonlar orta açıklığın ortasında konumlandığında bu değerler görülmüştür. Eğer orta açıklık daha uzun olsaydı takip mesafesinin artışıyla açıklık ortasındaki, z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerlerinin düzenli olarak küçüleceği ön görülmüştür. Yan açıklıkların ortasında; z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerleri tüm durumlar için birbirine yakındır. Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te farklı takip mesafelerinde araç yüklemesi durumları için köprü yapısında oluşan z eksenindeki deformasyon değerleri renk konturuyula verilmiştir. Araç takip mesafesine göre yükleme durumlarında yükleme süreleri sırasıyla 47, 51, 54, 58 ve 62 saniye sürmüştür.



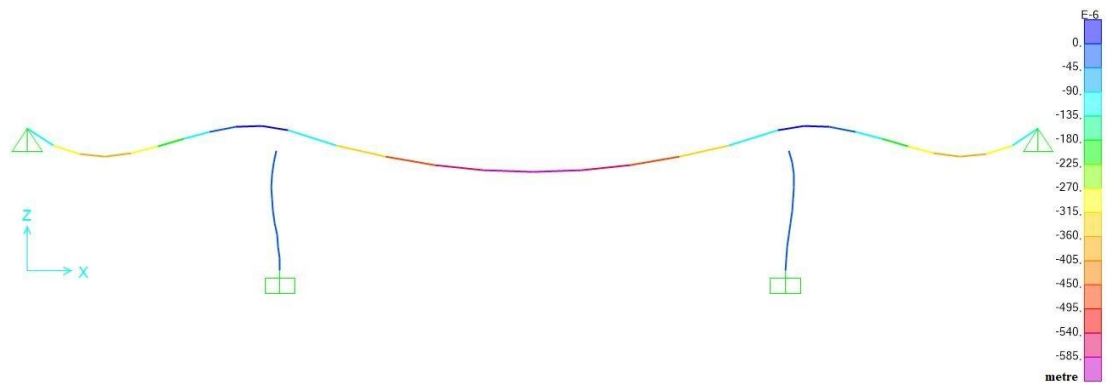
Şekil 4.39 Araç takip mesafesi 10 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



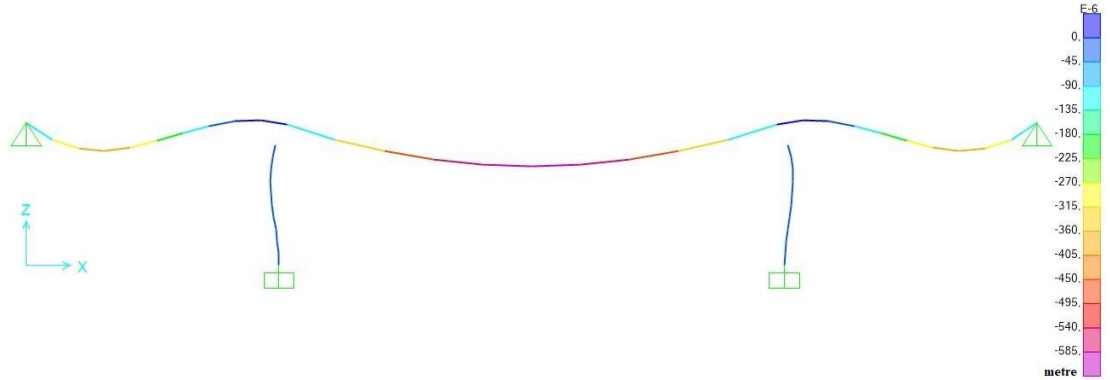
Şekil 4.40 Araç takip mesafesi 20 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 4.41 Araç takip mesafesi 30 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



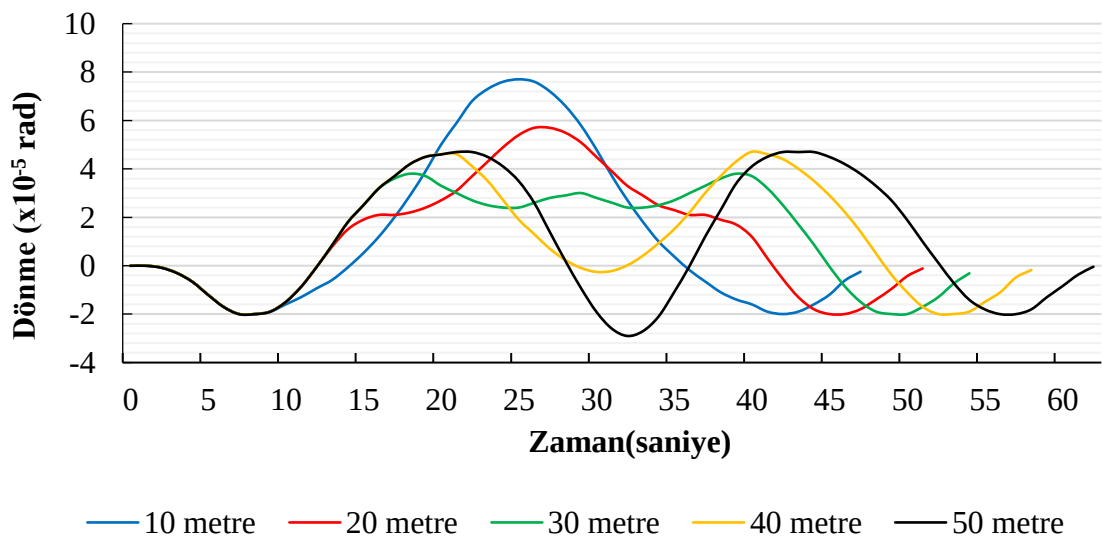
Şekil 4.42 Araç takip mesafesi 40 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



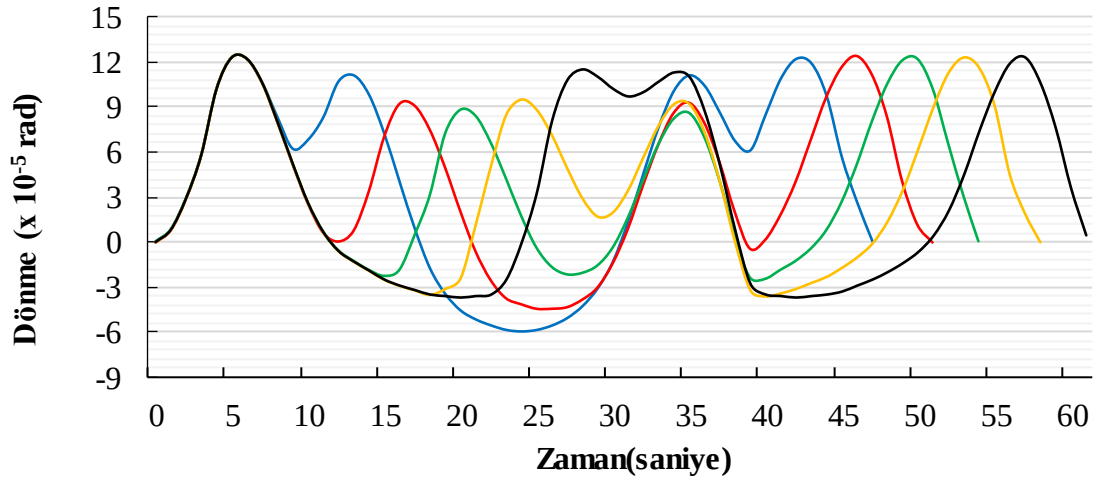
Şekil 4.43 Araç takip mesafesi 50 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

Köprü ayaklarında ve tabliyesinde y ekseninde mutlak en büyük dönme 7.7×10^{-5} radyan olarak 2'nci, 4'üncü, 6'ncı ve 7'nci noktalarda görülmüştür. Bu değer köprü üzerinden 10 metre takip mesafesinde kamyonlar geçirildiği durumda görülmüştür. Köprü ayakları ve tabliyesinde y eksen yönündeki mutlak maksimum dönme değeri, araç takip mesafesinin artmasına bağlı olarak düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 4.44).

Köprü'nün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri, araç takip mesafesine göre yükleme durumları için aynıdır. En büyük mutlak maksimum dönme değeri 12.3×10^{-5} radyandır (Şekil 4.45).



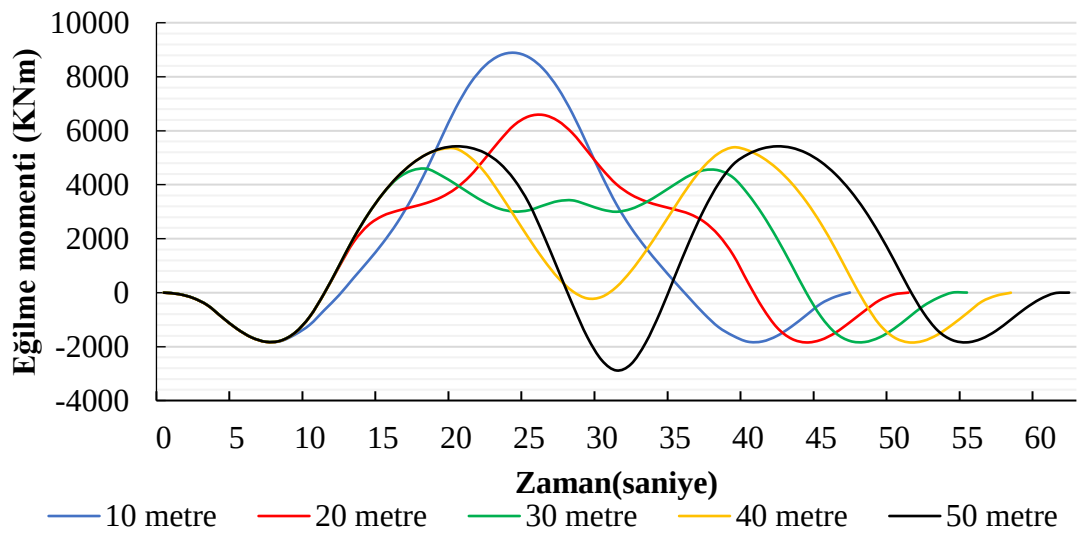
Şekil 4.44 Köprü'nün 2'nci ve 6'nci noktalarında y eksen yönündeki dönme



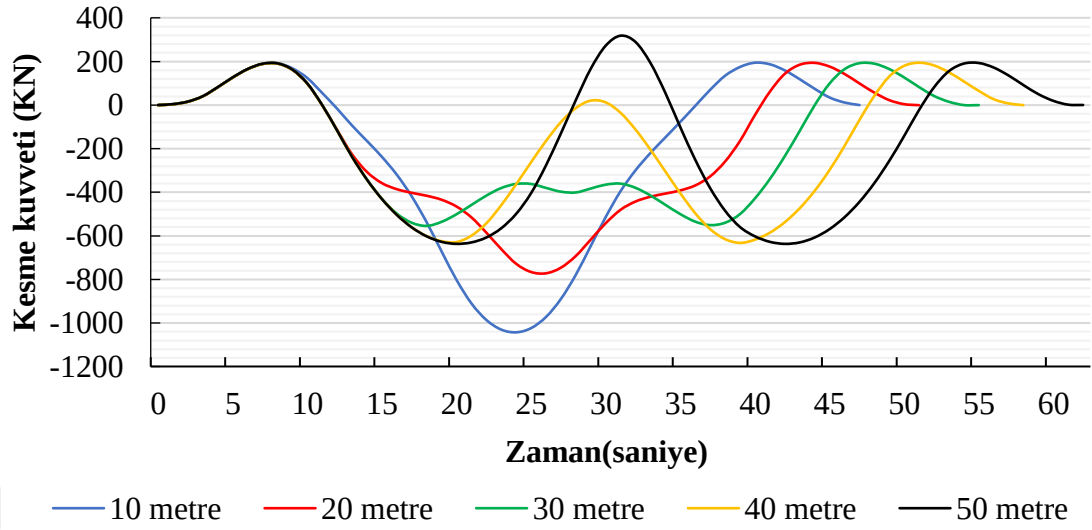
Şekil 4.45 Köprünün 5'inci noktasında y eksenindeki dönme

4.2.3.2. Moment ve Kesme Kuvveti Açısından Karşılaştırma

Araç takip mesafesinin artışına bağlı olarak köprü ayaklarında, mutlak maksimum eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. En büyük mutlak maksimum eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 10 metre takip mesafesinde olup eğilme momenti değeri 8887.93 KNm ve kesme kuvveti değeri ise 1042.61 KN'dur (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).



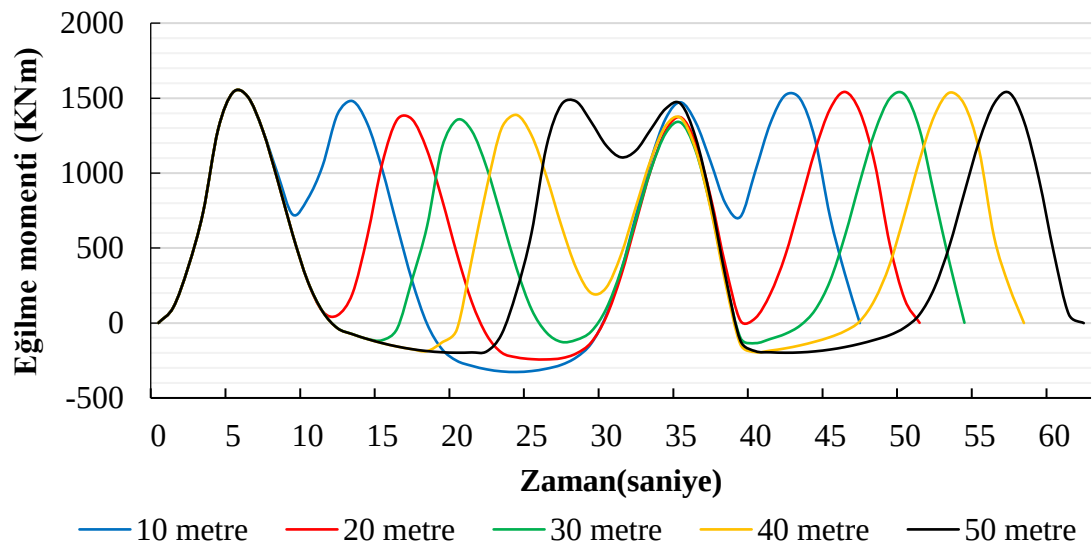
Şekil 4.46 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki eğilme momenti



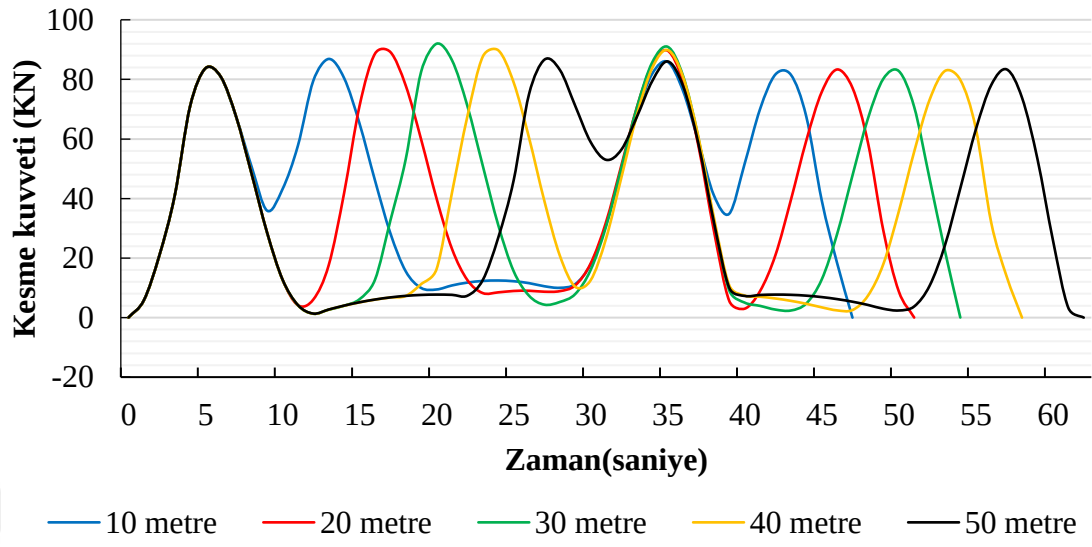
Şekil 4.47 1 numaralı köprü elemanının 12 metre konumundaki kesme kuvveti

Köprü tabliyesinde araç takip mesafesinin artışına bağlı olarak eğilme momentinin mutlak maksimum değeri değişmemiştir ve bu değer 6'ncı saniye içerisinde 1538.86 KNm olarak görülmüştür (Şekil 4.48).

Köprü tabliyesinde mutlak maksimum kesme kuvveti değeri takip mesafesinin artışına bağlı olarak düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. En büyük mutlak maksimum kesme kuvveti değeri 30 metre takip mesafesinde görülmüş olup bu değer 92.03 KN'dur (Şekil 4.49).



Şekil 4.48 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki eğilme momenti



Şekil 4.49 3 numaralı köprü elemanının 0 metre konumundaki kesme kuvveti

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada sandık kesitli betonarme bir köprünün; taşıt yükü etkisinde köprü yapısında meydana gelen deformasyonlar, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri incelenmiştir. SAP2000 programında iki farklı analiz türü ile farklı yüklemeler ve modellemeler yapılarak köprü yapısındaki etkiler görülmüştür.

Hareketli yük analizi için 16 farklı açıklık durumunda, tek gözlü ve üç gözlü sandık kesitli köprü modelinin deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalardan çıkarılan sonuçlar bu bölümde verilmektedir.

- Köprü yapısında z eksenindeki yer değiştirmeler açıklık ortasına doğru artmaktadır. H30-S24 kamyonu için bu artış diğer iki kamyon yüklemelerinden daha fazla olmuştur. Değerlerin artışı her iki kesit için de benzer seyretmiştir. Fakat tek gözlü sandık kesitli köprü için değerler daha büyüktür.
- Orta açıklıklarda z eksenindeki en büyük yer değiştirme değeri 0.81 cm olarak tek gözlü sandık kesitli köprüde görülmüştür. Bu değer en büyük açıklık durumunda ve en ağır kamyon yüklemesinde görülmüştür.
- Tabliyenin karayolu ve ayaklarla birleştiği noktalarda y eksenindeki dönme değerlerine bakıldığında değerlerin artışı her iki kesit için de benzer seyretmiştir. Fakat tek gözlü sandık kesitli köprü için değerler daha büyüktür.
- En büyük dönme değerleri tabliyenin karayolu ile birleştiği noktalarda görülmüştür. En büyük dönme değeri, en büyük açıklıklarda ve en ağır kamyon yüklemesinde görülmüştür. Bu değer 2.19×10^{-4} radyandır. Bu değer en büyük açıklık durumunda, tek gözlü sandık kesitte ve en ağır kamyon yüklemesinde görülmüştür.
- Kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri kesit türüne göre farklı olmuştur. Orta ayağın tabliyeyle birleştiği noktadaki kesme kuvveti değerleri, üç gözlü sandık kesitli köprüye göre tek gözlü sandık kesitli köprü için daha küçük olmuştur. Kısa açıklıklarda eğilme momenti değerleri üç gözlü sandık kesitli köprü için daha büyük değerler görülürken uzun açıklıklarda tek gözlü sandık

kesitli köprü için daha büyük değerler görülmüştür.

- Köprü tabliyesi için kesme kuvveti değeri, üç gözlü sandık kesit tanımlanan durumlarda tek gözlü sandık kesit tanımlanan durumlara göre daha büyük görülmüştür. Köprü tabliyesinde eğilme momentinin mutlak en büyük olduğu nokta, orta açıklıkların birleştiği noktadır. Üç gözlü sandık kesit durumları için mutlak eğilme momenti değerleri tek gözlü sandık kesit durumlarına göre daha büyüktür.

Zaman tanım alanında analiz için köprü üzerinden geçirilen taşıtların hızları, adetleri ve taşıtlar arasındaki araç takip mesafelerine göre yükleme durumları oluşturulmuştur. Analizler sonucunda zaman içerisinde köprü yapısındaki deformasyonların, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin değişimi görülmüştür ve yükleme durumları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmaların sonuçları bu bölümde verilmektedir.

- Taşıt hızı arttıkça z ekseninde, orta açıklığın ortasındaki en büyük yer değiştirme değerleri değişmemiştir. Fakat bu değerlerin görüldüğü zaman aralıkları değişmiştir.
- Taşıt hızı arttıkça z ekseninde orta açıklığın ortasındaki en büyük yer değiştirme değerlerinin ilk görülme anı giderek daha erken olmuştur. Bu yüzden köprü yapısının, taşıt hızı arttıkça daha fazla yorulacağı öngörülmüştür.
- Taşıt hızı arttıkça köprü ayaklarının tabliye ile birleştiği noktalardaki en büyük dönme değerleri değişmemiştir. Fakat bu değerlerin görüldüğü zaman aralıkları değişmiştir.
- Taşıt hızı arttıkça köprü tabliyesinin karayolu ile birleştiği noktalardaki en büyük dönme değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Her durum için birbirine yakın fakat farklı sonuçlar elde edilmiştir.
- Köprü ayaklarında en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri taşıt hızının artmasıyla düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Fakat bu değerlerin görüldüğü zamanlar değişmektedir.
- Taşıt sayısı arttıkça z ekseninde, orta açıklığın ortasındaki en büyük yer değiştirme değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Eğer orta

açıklık daha uzun olsaydı araç sayısının artışıyla açıklık ortasındaki, z eksenindeki mutlak en büyük yer değiştirme değerlerinin büyüyeceği ön görülmüştür.

- Taşıt sayısı arttıkça köprü ayaklarının tabliye ile birleştiği noktalardaki en büyük dönme değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. 2 araç geçirilmesi durumunda en büyük dönme değerleri diğer koşullara göre çok daha düşüktür.
- Taşıt sayısı arttıkça köprü tabliyesinin karayolu ile birleştiği noktalardaki en büyük dönme değerleri düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. 10 araç geçirilmesi durumunda en büyük dönme değerleri diğer koşullara göre çok daha büyüktür. Yan açıklıklardan analiz süresi içerisinde ne kadar çok kamyon aynı anda geçerse bu değerlerin artacağı ön görülmüştür.
- Taşıt sayısına göre yükleme durumlarında köprü ayaklarında, köprü üzerinden 2 araç geçirilmesi durumunda en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri karşılaştırma yapılan diğer araç sayısı durumlarına göre çok daha düşüktür. Köprü üzerinden 4 araç geçirilmesi durumunda ise diğer durumlardan çok daha fazla değerler görülmüştür.
- Araç takip mesafesinin değişimiyle oluşturulan durumlarda; köprü yapısında görülen en büyük deformasyon, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri karşılaştırıldığında takip mesafesinin artmasıyla bu değerler düzenli artış veya azalış göstermemiştir. Takip mesafesi ne kadar az olursa köprü yapısında oluşturduğu etkilerin kısa zamanda daha büyük olacağı ön görülmüştür.

Yapılan çalışmanın daha sonra yapılacak köprü hakkındaki araştırmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Değişken kesitli, simetrik yapıda olmayan farklı geometriye sahip köprü yapılarının zaman tanım alanında dinamik analizleri ve katar yük analizleri yapılarak deformasyon, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerleri farklı taşıt yükleme durumları oluşturularak karşılaştırılabilir. Tarihi taş köprülerin, günümüzde var olan asma köprülerin ve çelik köprülerin taşıt yükü etkisindeki yapısal davranışları çalışmada ele alınan iki analiz yöntemiyle farklı analiz programlarıyla çözümlemeler yapılarak çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] E. Tümertekin, *Ulaşım coğrafyası*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları, 1987.
- [2] İ. Ekiz, “Sandık kesitli köprülerin hesap metotları ve bilgisayar uygulaması”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 1976.
- [3] H. Celasun, “Sandık kesitli kirişlerin hesabı-BEF analojisi”, *İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Dergisi*, vol. 4, 1978.
- [4] Z. Polat, “Depreme Dayanıklı Köprü Mühendisliğinde Kavramsal Tasarım”, Köprü Sempozyumu, İstanbul, 2018.
- [5] J. Schlaich ve H. Scheef, *Concrete box-girder bridges*. Zurich: IABSE, 1982.
- [6] “Sclayn Bridge”, structurae.net, <https://structurae.net/en/structures/sclayn-bridge>. [Erişim tarihi: 28- Ocak- 2021].
- [7] “Raftsund Bridge”, wikipedia.org, https://en.wikipedia.org/wiki/Raftsund_Bridge. [Erişim tarihi: 23- Ocak- 2021].
- [8] “Stolma Bridge”, wikipedia.org, https://en.wikipedia.org/wiki/Stolma_Bridge. [Erişim tarihi: 26- Ocak- 2021].
- [9] AASHTO LRFD, Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1998.
- [10] FHWA, Federal Highway Administration, Introduction to LRFD-Load and Load Distribution, Chicago.
- [11] R. Karoumi, J. Wibreg ve A. Liljencraniz, “Monitoring traffic load and dynamic effects using an instrumented railway bridge”, *Engineering Structures*, vol. 27, no. 12, pp. 1813-1819, 2005.
- [12] M.K. Ali, “Öngermeli betonarme köprü kirişi modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.
- [13] D. Huang, T.L. Wang ve M.Shahawy, “Vibration of thin-walled box-girder bridges excited by vehicles”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, no. 9, pp. 1330-1337, 1995.
- [14] X. Lei, N.A. Noda, “Analyses of dynamic response of vehicles and track coupling system with random irregularity of track vertical profile”, *Journal of*

- Sound and Vibration*, vol. 258, no. 1, pp. 147-165, 2002.
- [15] İ.E. Gülhan, “Öngerilmeli betondan sandık kesitli köprülerin yapay sinir ağları ile analizi”, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, 2005.
- [16] Z. Begum, “Analysis and behavior investigations of box girder bridges”, Yüksek lisans tezi, Maryland Üniversitesi, 2010.
- [17] A. Cengiz, K. Soyluk ve E.A. Sıcacık, “Kablolu köprülerde trafik yüklerinin neden olduğu dinamik etkiler”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 1, pp. 243-252, 2011.
- [18] T. Sezdirmez, “Gülburnu Köprüsü’nde zamanla oluşabilecek yer değiştirmeler”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, 2013.
- [19] L.P. Gouda, “Study on parametric behaviour of single cell box girder under different radius of curvature”, Yüksek lisans tezi, National Institute of Technology Rourkela Odisha, 2013.
- [20] Y. Yu, L. Deng, Q. Zou ve C. Cai, “State-of-the-art review of dynamic impact factors of highway bridges”, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 401-408, 2015.
- [21] A. Mubuli, “Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü’nün deprem ve taşıt yükleri altında yapısal davranışının belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016.
- [22] L. An, D. Li, P. Yu ve P. Yuan, “Numerical analysis of dynamic response of vehicle–bridge coupled system on long-span continuous girder bridge”, *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, vol. 6, pp. 186-194, 2016.
- [23] Ö.F. Çift, “Dengeli konsol köprü analizi ve performans değerlendirmesi”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, 2018.
- [24] S. Bostan, “Kutu kesitli karayolu köprülerinde en kesit şeklinin dinamik davranışa etkisi”, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.
- [25] H. Celasun, *Betonarme köprüler ve hesap metotları*. İstanbul: Çağlayan, 1974.
- [26] H. Celasun, “Betonarme yapılar”, *İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Dergisi*, vol. 156, 1980.
- [27] İ. Ekiz, *Çözümlü köprü problemleri*. İstanbul: Çağlayan, 1981.
- [28] N. Taly, *Design of modern highway bridges*. New York: Mc Graw-Hill, 1998.

- [29] S.S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, USA: Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- [30] İ. Esen, “Hareketli Yükler Altındaki Köprülü Kren Kirişlerinin Dinamik (Mukavemet) Analizi”. İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora tezi, 2009.
- [31] M.J.N. Priestley, F. Seible ve G.M. Calvi, *Seismic design and retrofit of bridges*. New York: Wiley, 1996.
- [32] Z.F. Alemdar, “Betonarme Köprü Kolonlarında Plastik Mafsallı Bölgelerinin Modellenmesi”, *İmo Teknik Dergi*, yazı 444, pp. 7279-7286, 2015.
- [33] N.İ. Uluğ, “Öngerilmeli bir köprü tasarımı ve performans değerlendirilmesi”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [34] A. Doğruyol, “Yatay Kavisli Farklı Yarıçaplı Köprülerin Ölü ve Hareketli Yükler Altındaki Gerilme Değişimleri”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek lisans tezi, 2013.