

## SANDIK KESİTLİ BETONARME KÖPRÜLERİN TAŞIT YÜKÜ ETKİSİNDEKİ YAPISAL DAVRANIŞI

**Enes Miraç KARADAĞ<sup>1\*</sup> , Murat PALA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

<sup>2</sup>Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

Geliş tarihi: 17.03.2021 Kabul tarihi: 10.05.2021

### ÖZET

Bu çalışmada üç gözlü, sandık kesitli ve üç açıklıklı betonarme bir köprü; sonlu elemanlar yöntemiyle SAP2000 programında modellenmiştir. Daha sonra zaman tanım alanında, taşıt yükünün dinamik etkisine göre analiz edilmiştir. Farklı taşıt yükleme durumları için köprü yapısındaki yer değiştirme, köprü birleşim noktalarındaki kesme kuvveti ve eğilme momenti açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Taşıt hızına göre yükleme durumunda köprünün iki ucundan, ters yönlerde, aynı hızlarda birer kamyon geçirilmiştir. Kamyonlara 5 farklı hız değeri tanımlanarak analizler yapılmıştır. Taşıt sayısına göre yükleme durumunda köprünün iki ucundan, ters yönlerde, eşit sayılarda kamyonlar geçirilmiştir. 5 farklı sayıda kamyon köprü üzerinden geçirilerek analiz yapılmıştır. Taşıtlar arası takip mesafesine göre taşıt yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde, ikişer adet kamyon geçirilmiştir. 5 farklı takip mesafesinde kamyonlar geçirilerek analiz yapılmıştır. Analizler sonucu köprü yapısında oluşan deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin farklı trafik koşulları altında zamana göre değişmektedir. Bu değişimlerin taşıt hızı, sayısı ve takip mesafesine bağlı olarak düzenli bir şekilde değişmediği görülmüştür. Grafikler ve şekiller yardımıyla karşılaştırmalar yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Köprü, Sandık kesit, SAP2000, Taşıt yükü

## Structural Behavior of Reinforced Concrete Bridges with Box Girder under the Influence of Vehicle Load

### ABSTRACT

A reinforced concrete bridge with three eyes, box girder and three spans were modeled in SAP2000 program by using finite element method in this study. Afterwards analyzed in the time definition field according to the dynamic effect of vehicle load. For different vehicle loading situations, comparisons were made in terms of displacement in the bridge structure, shear force at the Bridge junction points and bending moment. According to the vehicle speed, in the case of loading, a truck was passed at the same speeds at both ends of the bridge, in opposite directions. 5 different speed values were defined for the trucks and analyzed. According to the number of vehicles, in case of loading, trucks were passed from both ends of the bridge, in opposite directions, in equal numbers. 5 different numbers trucks were passed over on the bridge and analyzed. According to the following distance between vehicles, in the case of loading vehicles; two trucks were passed from the two ends of the bridge, with the opposite directions. Analysis was done by passing trucks at 5 different tracking distances. As a result of the analysis, the deformation, shear force and bending moment values formed in the bridge structure vary according to time under different traffic conditions. These changes did not change regularly depending on vehicle speed, number and tracking distance. Comparisons were made with the help of graphs and figures.

**Keywords:** Bridge, Box girder, SAP2000, Vehicle load

\* e-posta<sup>1</sup>: [emk003.ek@gmail.com](mailto:emk003.ek@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8640-4038> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>2</sup>: [pala@adiyaman.edu.tr](mailto:pala@adiyaman.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3684-9976>

## 1. Giriş

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 ve 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].

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 LFRD yönetmeliklerini benimsemiştir. ASSHTO LRFD, köprülerde kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan davranışını hesaba katar ve farklı köprü çeşitleri 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. ASSHTO LRFD yönetmeliği yük ve dayanım faktörlerini tasarımda esas alır [5]. ASSHTO 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 [6]. Bu çalışmada köprü tasarımı bu yönetmeliklere göre yapılmıştır.

Bu çalışmada değişken kesit olmayan üç gözlü, sandık kesitli ve üç açıklıklı olan betonarme bir köprü modeli incelenmiştir. Köprü, SAP2000 programında sonlu elemanlar metoduna göre üç boyutlu modellenmiştir. ASSHTO yönetmelikleri ve Karayolları Genel Müdürlüğü Yol ve Köprüler Teknik Şartnamesinde kabul gören H30-S24 kamyonu çalışmada baz alınmıştır. 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. Köprü Yapısının SAP2000 Programında Modellenmesi, Taşıt Yüklemesi ve Analizi

### 2.1. Köprü Yapısının Modellenmesi

Sandık kesitli betonarme köprü modeli, SAP2000 V20 paket programında sonlu elemanlar yöntemiyle yönetmeliklere uygun şekilde oluşturulmuştur. Tasarlanan köprü modeli üç açıklıktan oluşmaktadır. Orta açıklık, yan açıklıklardan daha uzun tasarlanmıştır. Köprü yapısına ait mesnet özellikleri ve köprü elemanlarının uzunlukları Şekil 1’de verilmiştir. Köprünün her iki ucunun karayolu ile birleşen noktaları sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprü ayaklarının zeminle birleştiği noktalar ise ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.


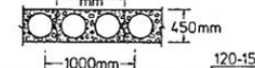
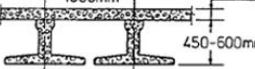



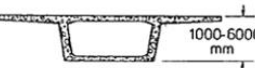
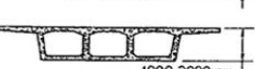
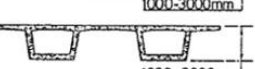


Şekil 1. Köprü modelinin x-z ekseninde görüntüsü, mesnet türleri ve eleman uzunlukları

Sonlu elemanlar yöntemi, bir yapının davranışı hakkında yaklaşık sayısal değerler verir. Yapı elemanının küçük parçalar halinde düğüm noktaları ile bağlanmasıyla bu düğüm noktalarındaki parametreler eleman üzerinden hesaplanabilir [7]

Köprü tabliyesi ve köprü ayakları birleşim noktalarına plastik mafsal 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 mafsal yapıları kullanılabilir [8].

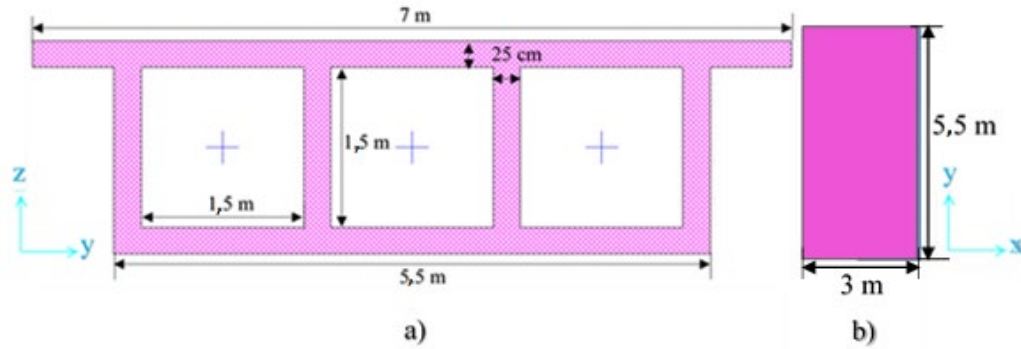
Köprü tabliyesi tipi, çok gözlü kutu kesitli tabliye seçilmiştir. Bu tabliye tipi Şekil 2’de görüldüğü üzere 30-100 metre aralığındaki açıklıklara sahip betonarme köprülerde kullanılmaktadır. Köprü modelinin orta açıklığı 50 metre olduğu için bu kesit türü tercih edilmiştir. Bu kesit türünün imalatı prekast ya da yerinde döküm şeklinde yapılmaktadır. Kesit kalınlığı bu kesit tipinde 1-3 metre aralığında değişmektedir. Dikdörtgen kutu kesitli tabliyeler genellikle raylı sistem köprüleri için uygun görülmüştür. Şekil 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]. Modellenen köprü tabliyesinin kesit özellikleri Şekil 2’deki tablodaki sınır değerleri gözetilerek tasarlanmıştır.

Tipi	Örnek	İnşaat Yöntemi	Açıklık aralığı
Dolu kesitli döşeme		Yerinde döküm (YD)	5-15m (15-50 ft)
Boşluklu döşeme		Prekast ya da Prekast+ YD	6-15m (20-50ft)
Ters-T kirişli		Prekast T + YD döşeme	12-24m (40-80ft)
I-kirişli		Prekast I + YD Döşeme	12-35m (40-120ft)
Çift-T kirişli		Yerinde Döküm	25-40m (80-130ft)
Tek omurgalı (tek gözlü) kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-200m (100-650ft)
Çok gözlü kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-100m (100-330ft)
İki omurgalı (iki kutu kesitli) tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-200m (100-650ft)
Dikdörtgen kutu kesitli tabliye		Prekast ya da yerinde döküm	30-150m (100-300ft)

Şekil 2. Betonarme ve ön gerilmeli köprü tabliyelerinin kesit tipleri [9]

Kesit ölçüleri ayrıntılı biçimde Şekil 3’te verilmiştir. 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.

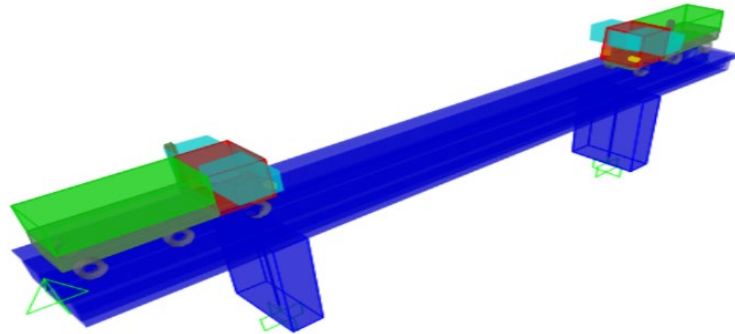
Genellikle betonarme ve ön gerilmeli beton köprülerde köprü ayaklarının kesit tipi; dairesel, dikdörtgen veya boşluklu yapıda olabilir. Bu çalışmada dikdörtgen kesit tipi, köprü ayakları için kullanılmıştır (Şekil 3-b).



Şekil 3. Köprü modelinin kesit özellikleri a) Tabliye kesit özellikleri b) Ayak kesit özellikleri

## 2.2. Taşıt Yüklemesinin ve Yol Güzergahının Tanımlanması

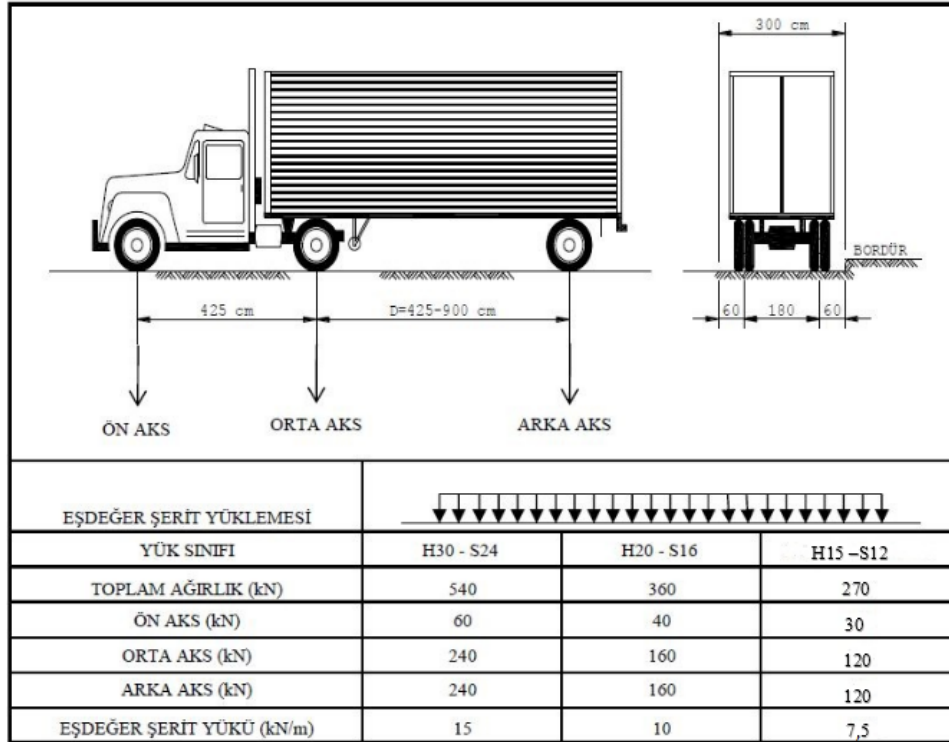
SAP2000 programında köprü üzerindeki yol güzergahı, sadece çubuk elemanlar için tanımlanabilir. Köprü üzerinde farklı yönlerde iki şerit tanımlanmıştır. SAP2000 programında yapılan köprü modelindeki yol güzergahları ve taşıt modellemesi Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Yol güzergahı ve köprüye etki ettirilen taşıtların görünümü

Köprü üzerinde tanımlanan yol güzergahının birden fazla şerit olması durumunda, köprü tabliyesi üzerindeki yolların eksantrisitesinin hesaba katılması daha gerçekçi ve avantajlıdır. Çünkü köprü tabliyesindeki aksel 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 [10]. Yapılan çalışmada tanımlanan yol eksantrisiteleri sıfır kabul edilmiştir.

Köprü yapısına, Şekil 5'te görülen üç çeşit kamyon türü içerisinde H30-S24 kamyonu etki ettirilerek analiz yapılmıştır. H30-S24 kamyonu karayollarında öngörülen en ağır taşıt modelidir. Bu kamyon türü, Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığınca gerekli görülen durumlarda görülmektedir. Bu çalışmada taşıt yükleri, zaman tanım alanında dinamik yük olarak etki ettirileceği için kamyonun dingillerine gelen tekil yükler hesaba katılarak analiz yapılmıştır.



Şekil 5. Kamyon çeşitleri ve yükleme açısından özellikleri [11]

### 2.3. Köprü Analizinin Yapılması

Sandık Kesitli Köprülerin başlıca analiz yöntemleri;

- Richmond Deplasman Yöntemi,
- Elastik Zemine 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, 12-15]. Köprü analizi yapılırken bu analiz yöntemleri kullanılabilir. Fakat taşıt yüklerinin olduğu köprülerin analizinde iki tür analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar hareketli katar yük analiz durumları ve çok adımlı dinamik (doğrudan integrasyon zaman alanı) analiz yöntemleridir [16]. Bu çalışmada köprü yapısı üç boyutlu sonlu eleman olarak modellenmiştir ve analizler zaman tanım alanında, lineer ve doğrudan entegrasyon yöntemi ile yapılmıştır. Zaman tanım alanında taşıt yükleri, köprü tabliyesindeki noktalara 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 [17].

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.

### 3. Farklı Taşıt Yükleme Durumlarında Köprü Analizi

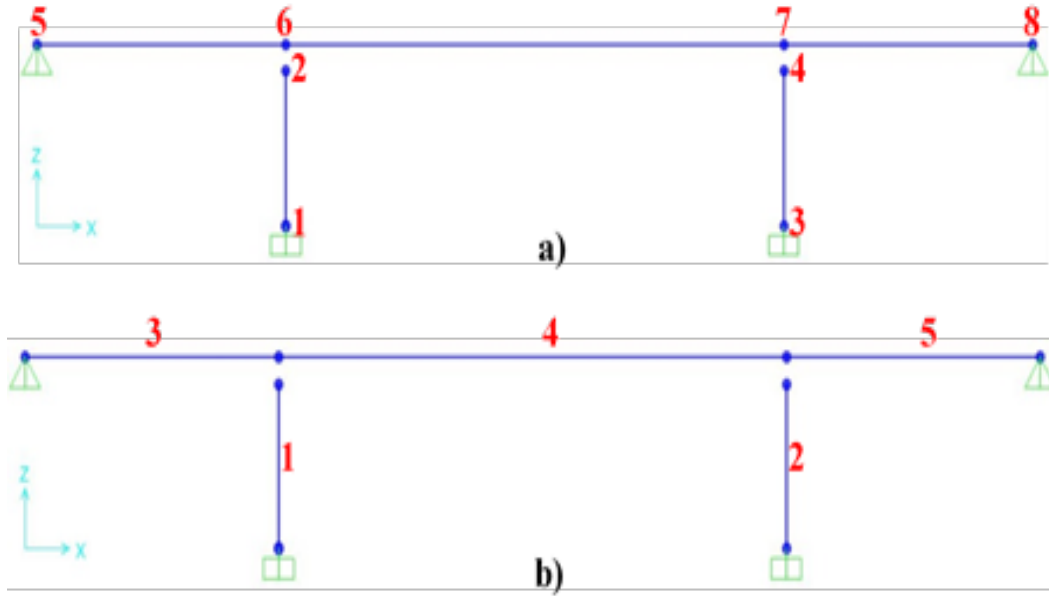
Taşıt hızının değişimine göre yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde, birer adet H30-S24 kamyonu, 5 farklı hız değerinde geçirilmiştir. Taşıt sayısına göre yükleme durumlarında; köprünün iki ucundan, ters yönlerde, H30-S24 kamyonu, eşit sayılarda ve 10 metre takip mesafesi

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 mesafelerinde geçirilmiştir. Taşıt yükleme durumlarında belirlenen hız değerleri, taşıt sayıları ve takip mesafesi değerleri Çizelge 1’de verilmiştir. Analizler sonucu köprü yapısında oluşan deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1. Taşıt yükleme durumları

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

Analizler sonucu, köprü yapısında meydana gelen değişimlerin karşılaştırılabilmesi için köprü modelindeki birleşim noktaları ve elemanları numaralandırılmış (Şekil 6).



Şekil 6. a) Köprü elemanları birleşim noktalarının numaralandırılması b) 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 karşılaştırma yapılan 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 belirli konumlarında, z ekseninde oluşan deformasyonlar negatif yöndedir. 2’nci, 4’üncü, 6’ncı ve 7’nci noktalarda z ekseninde oluşan yer değiştirmeler eşittir. Bu noktalarda oluşan x ekseninde 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 noktaları dönmeye serbest bırakıldığı için bu noktalarda dönme değerleri karşılaştırılmıştır. 5’inci ve 8’inci noktalardaki dönme değerleri mutlak olarak eşit ama farklı yöndedir.

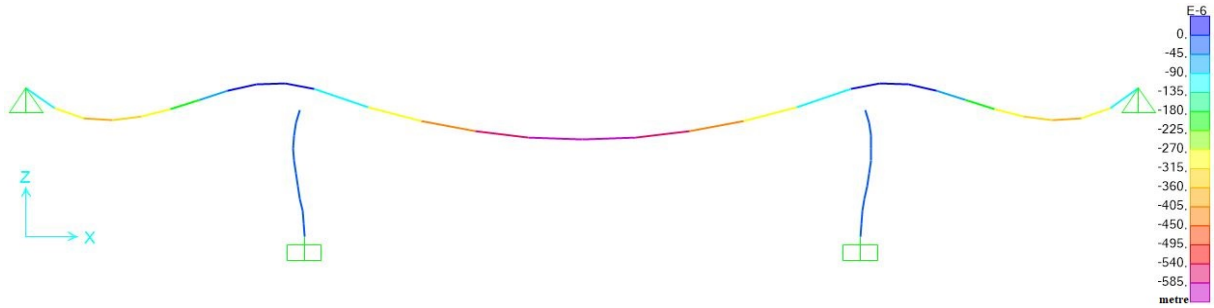


### 3.1. Taşıt hızına göre yükleme durumları

#### 3.1.1. Deformasyon açısından karşılaştırma

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

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 7).

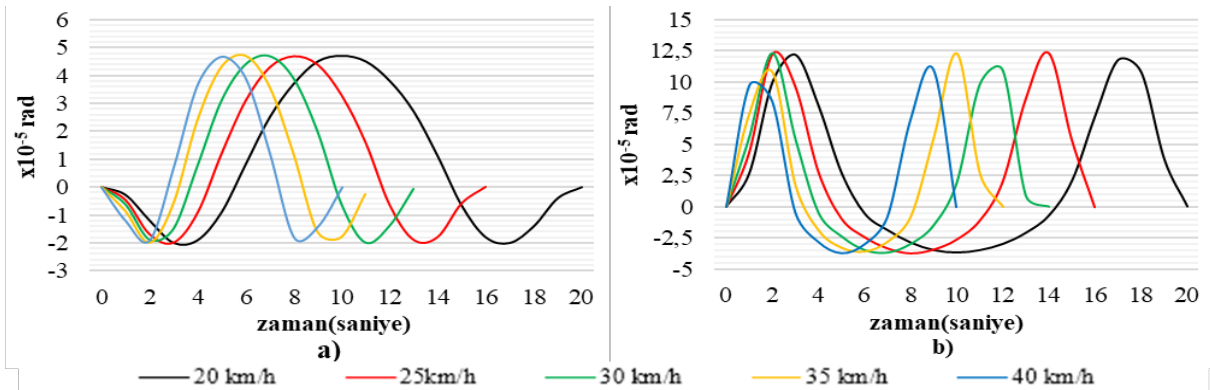


Şekil 7. Köprü yapısında, tüm taşıt hızlarına göre yükleme durumlarında z ekseninde oluşan en büyük yer değiştirmeler

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  $4,7 \times 10^{-5}$  radyan olarak köprü'nün 2'nci, 4'üncü, 6'ncı ve 7'nci noktalarında gerçekleşmiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 8-a). Kamyonlar orta açıklığın ortasında olduğu anlarda bu değer görülmüştür.

Köprü'nün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri beş yükleme durumu için de farklılık göstermiştir. Kamyonlar köprü tabliyesine temas ettiğinde köprü'nün 5'inci ve 8'inci noktalarındaki en büyük dönme değerleri, daha hızlı kamyon yüklemelerinde azalmıştır. Fakat değerler birbirine çok yakındır. En büyük değer  $12,3 \times 10^{-5}$  radyandır. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 8-b). En büyük değerler kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında görülmüştür.

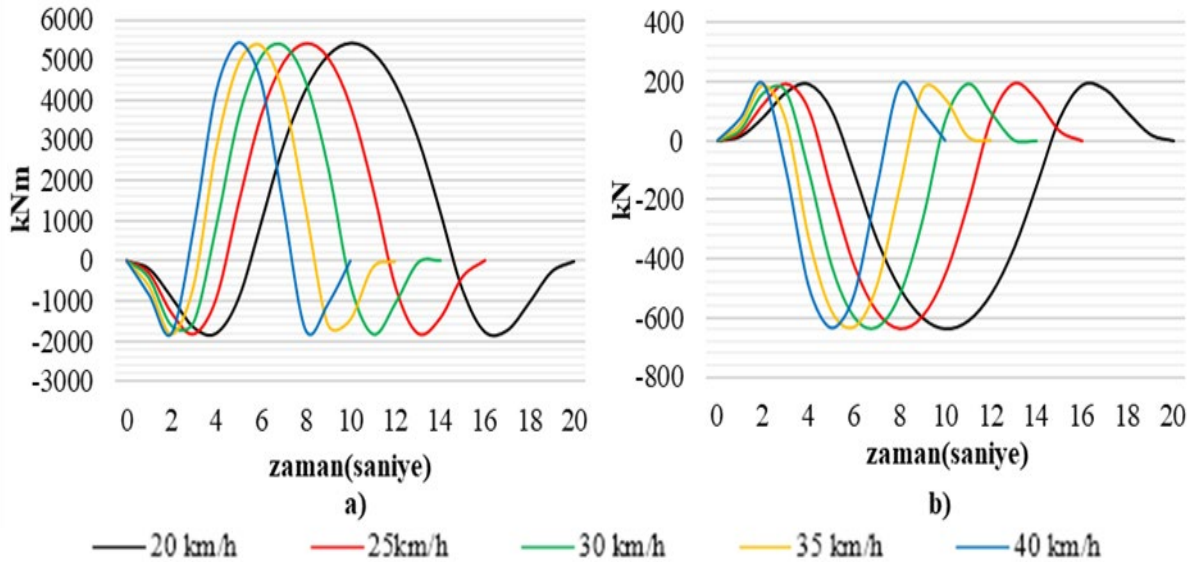


Şekil 8. Köprü yapısında y eksenindeki dönmeler a) 2'nci ve 6'nci noktalarındaki dönme b) 5'inci noktadaki dönme

### 3.1.2. Moment ve kesme kuvveti açısından karşılaştırma

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.

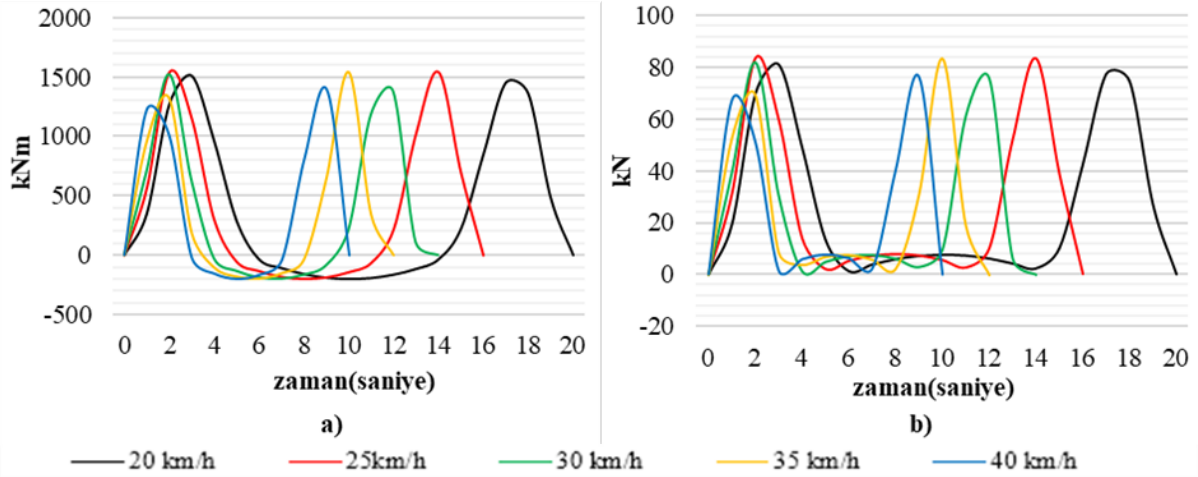
Köprü ayaklarında eğilme momenti ve kesme kuvvetinin maksimum olduğu noktalar, ayakların tabliyeyle birleştiği noktalardır. Kamyon hızları arttıkça mutlak en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri neredeyse değişmemiştir. Mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değeri 20 km/h hızdaki kamyonların tanımlandığı yükleme durumunda görülmüştür ve eğilme momenti değeri 5424,18 kNm olarak, kesme kuvveti değeri ise 636,08 kN olarak görülmüştür (Şekil 9). 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 9. Köprü ayağındaki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) 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 10). Kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında mutlak en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri görülmüştür.



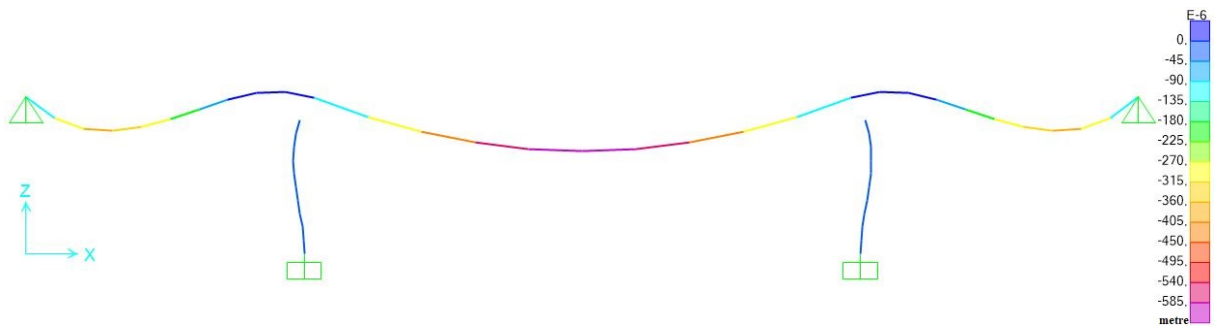


Şekil 10. Köprü tabliyesindeki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) Kesme kuvveti

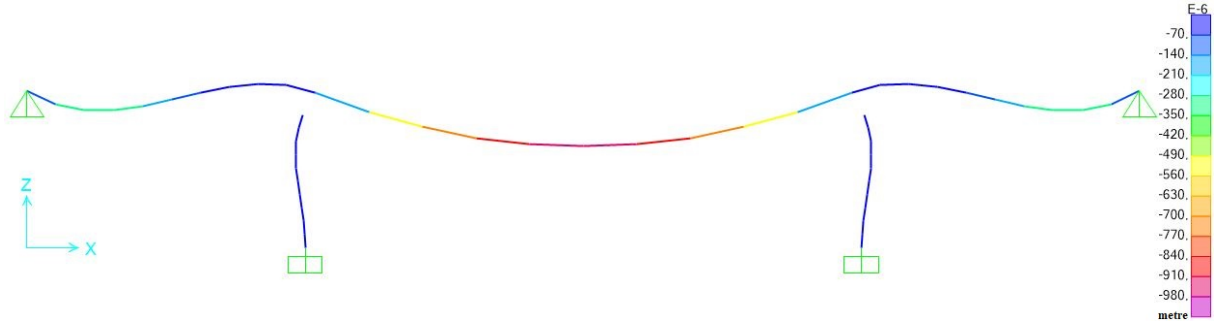
### 3.2. Taşıt sayısına göre yükleme durumu

#### 3.2.1. Deformasyon açısından karşılaştırma

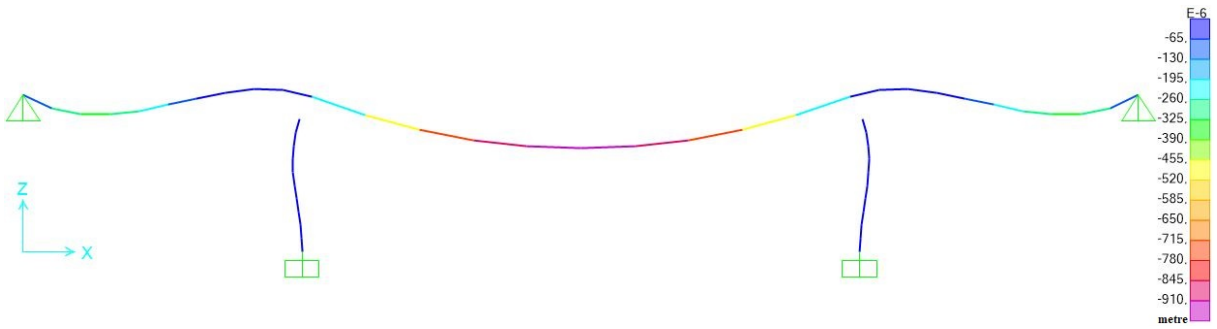
Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirmeler, kamyon sayılarına göre değişmiştir. En büyük yer değiştirme değerleri, orta açıklığın ortasında görülmüştür. Bu değerler araç sayısına göre yükleme durumlarında; 2 araç için 0,0591 cm, 4 araç için 0,0972 cm, 6 araç için 0,0936 cm, 8 araç için 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 öngörülmüştür. 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 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15’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.



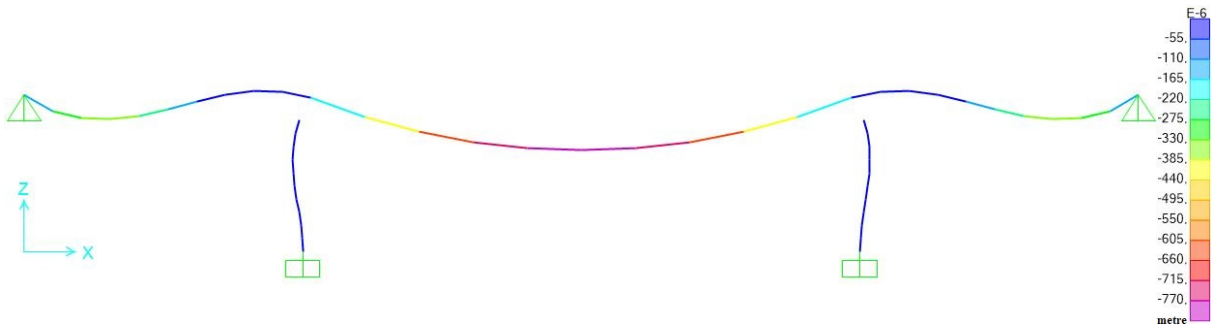
Şekil 11. Köprü üzerinden 2 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



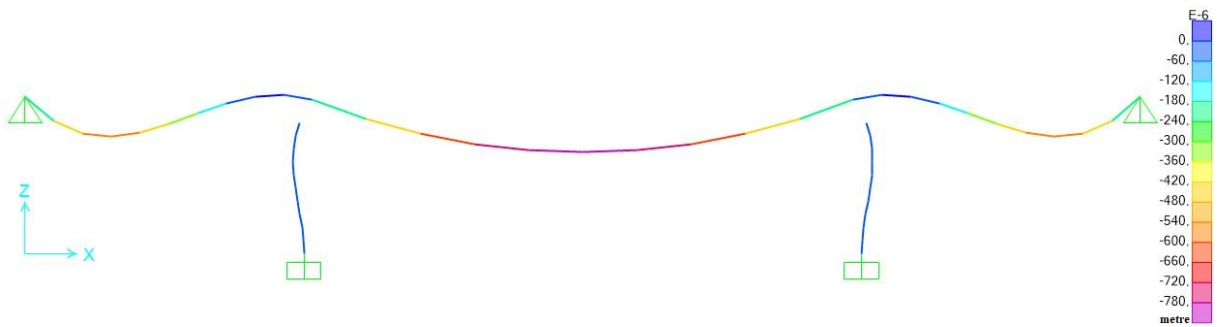
Şekil 12. Köprü üzerinden 4 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 13. Köprü üzerinden 6 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



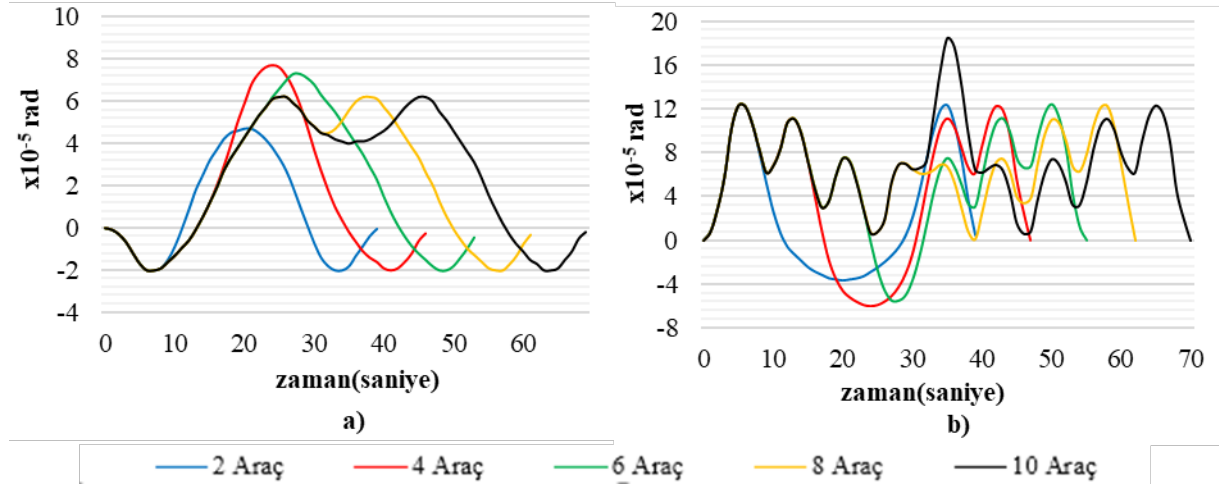
Şekil 14. Köprü üzerinden 8 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 15. Köprü üzerinden 10 araç geçirildiğinde köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

Köprü ayaklarında ve tabliyesinde y ekseninde mutlak en büyük dönme  $7,7 \times 10^{-5}$  radyan olarak köprü'nün 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 eksenindeki mutlak maksimum dönme değeri, kamyon sayısına bağlı düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 16-a).

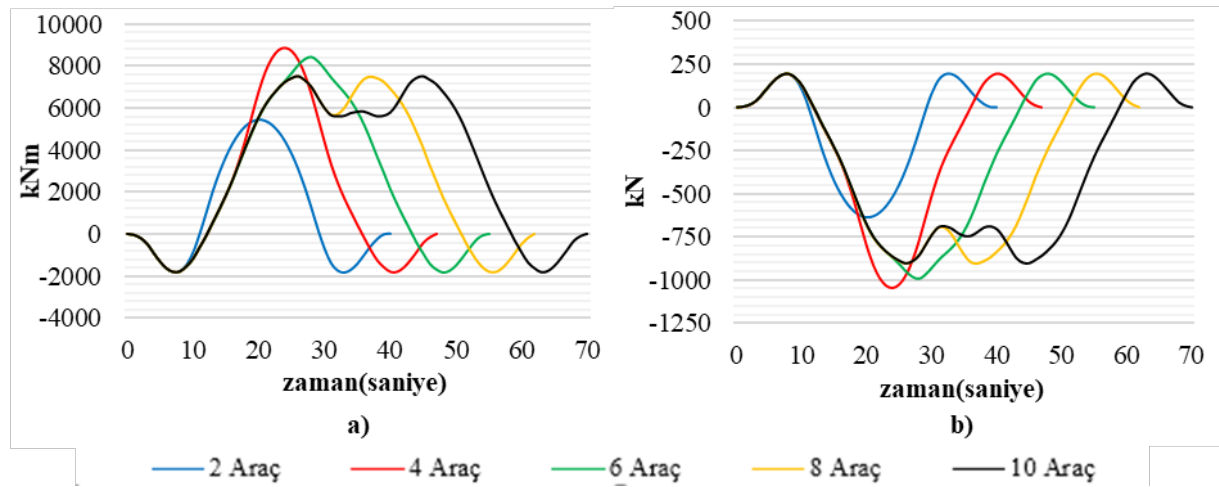
Köprünün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri, 2 araç, 4 araç, 6 araç ve 8 araç geçirildiği yükleme durumları için aynıdır. Fakat 10 araç geçildiğinde bu değer artmıştır. En büyük değer  $18,4 \times 10^{-5}$  radyandır. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 16-b). Bu değerler kamyonların köprüye giriş ve çıkış anlarında görülmüştür. Kamyonların, yan açıklık üzerinde köprünün karayolu ile birleşen noktasına yakın olduğu anlarda mutlak maksimum yer değiştirme değerleri görülmüştür.



**Şekil 16.** Köprü yapısında y eksenindeki dönmeler a) 2'nci ve 6'ncı noktalarındaki dönme b) 5'inci noktasındaki dönme

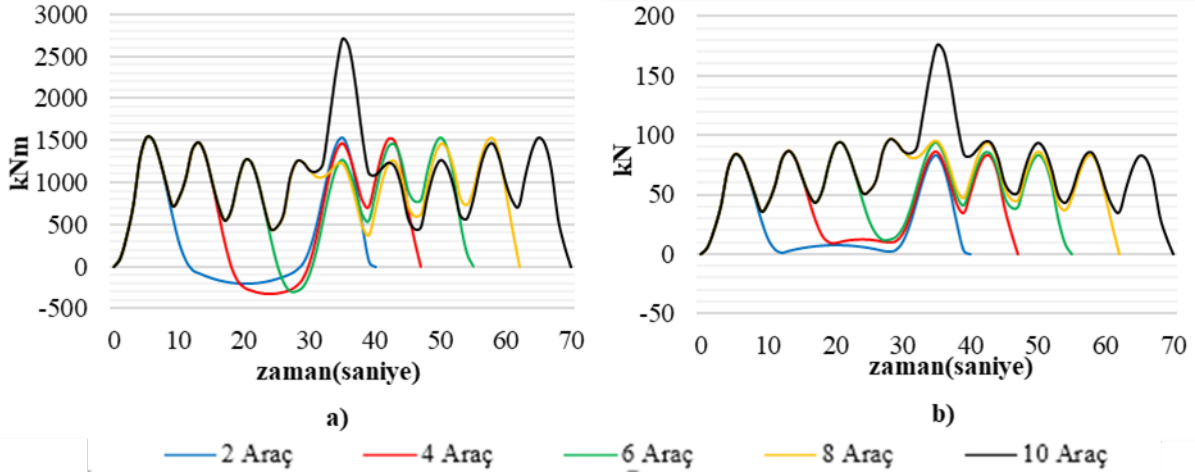
### 3.2.2. Moment ve kesme kuvveti açısından karşılaştırma

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 17).



**Şekil 17.** Köprü ayağındaki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) 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 18).

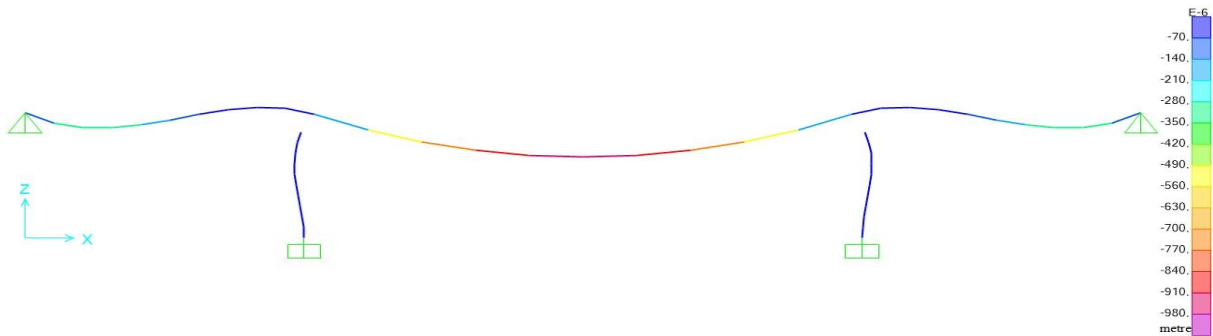


Şekil 18. Köprü tabliyesindeki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) Kesme kuvveti

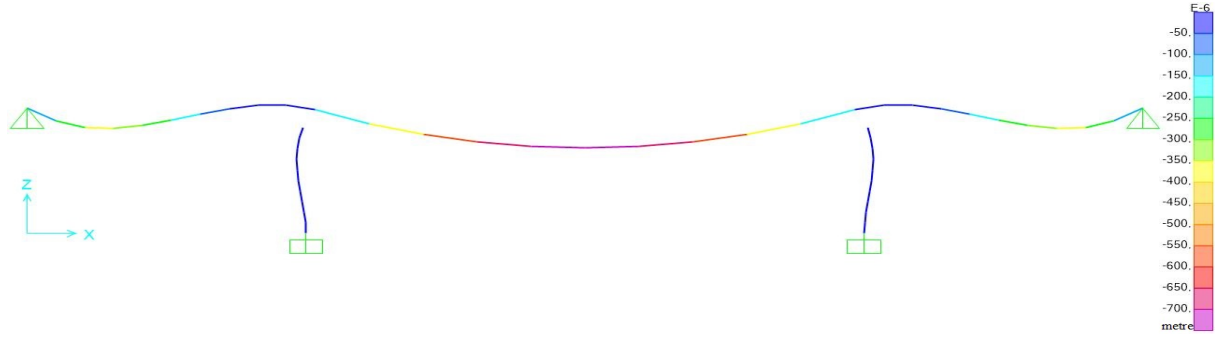
### 3.3. Araç takip mesafesine göre yükleme durumları

#### 3.3.1. Deformasyon açısından karşılaştırma

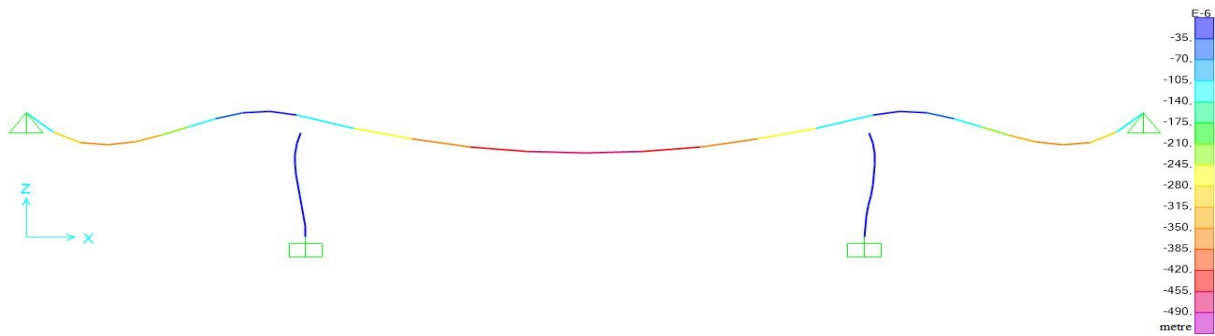
Köprü yapısında z eksenindeki en büyük yer değiştirmeler araç takip mesafelerine göre değişmiştir. En büyük yer değiştirme değerleri orta açıklığın ortasında görülmüştür. Bu değerler araç takip mesafesine göre yükleme durumlarında 10 metre takip mesafesi için 0,0972 cm, 20 metre takip mesafesi için 0,0725 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 öngörülmüştür. Yan açıklıkların ortasında; z eksenindeki en büyük yer değiştirme değerleri tüm durumlar için birbirine yakındır. Şekil 19, Şekil 20, Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23'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.



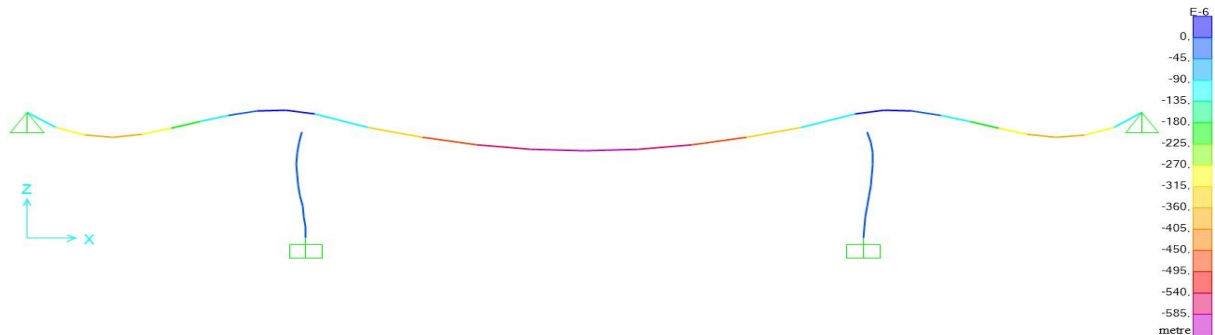
Şekil 19. Araç takip mesafesi 10 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



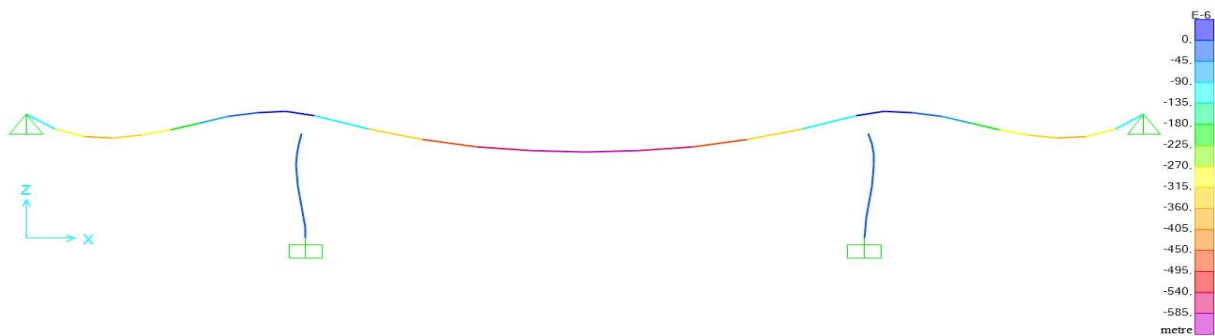
Şekil 20. Araç takip mesafesi 20 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 21. Araç takip mesafesi 30 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler



Şekil 22. Araç takip mesafesi 40 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

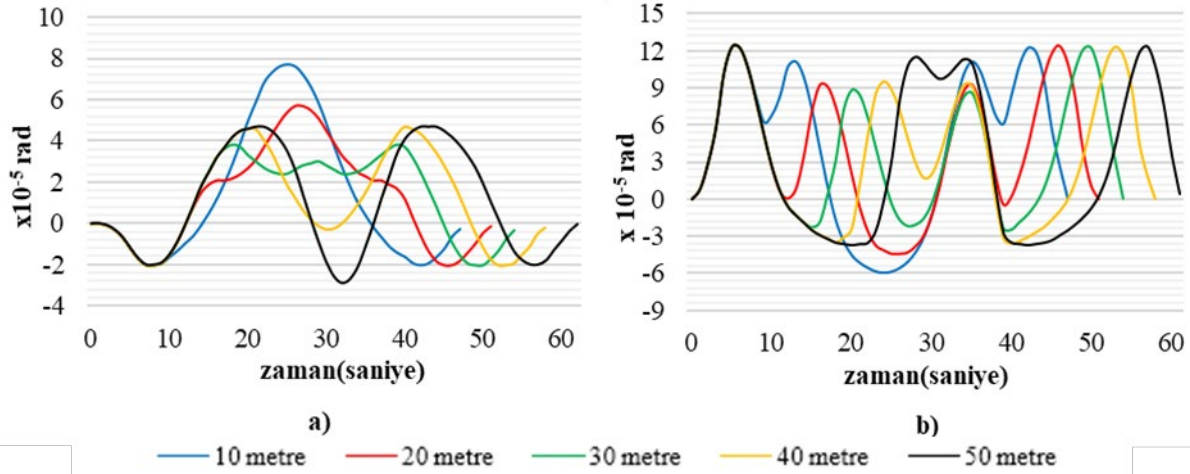


Şekil 23. Araç takip mesafesi 50 metre olduğunda köprü yapısında, z eksenindeki yer değiştirmeler

Köprü ayaklarında ve tabliyesinde y ekseninde mutlak en büyük dönme  $7,7 \times 10^{-5}$  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 eksenini

yönündeki mutlak maksimum dönme değeri, araç takip mesafesinin artmasına bağlı olarak düzenli bir artış veya azalış göstermemiştir. Her iki yönde de dönme olmuştur (Şekil 24-a).

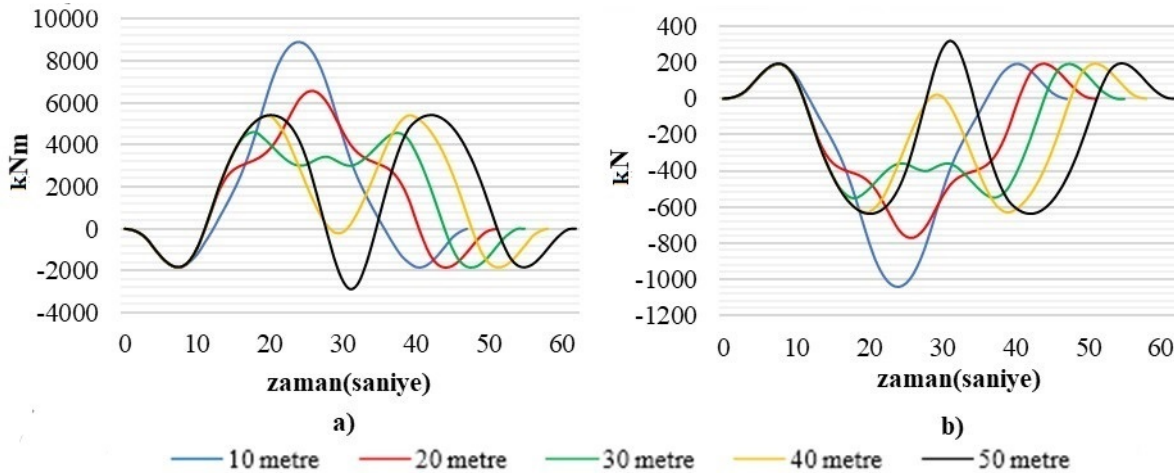
Köprünün 5'nci ve 8'inci noktalarındaki mutlak maksimum dönme değerleri, araç takip mesafesine göre yükleme durumları için aynıdır. En büyük mutlak maksimum dönme değeri  $12,3 \times 10^{-5}$  radyandır (Şekil 24-b).



Şekil 24. Köprü yapısında y ekseninde dönmeler a) 2'nci ve 6'nci noktalarındaki dönme b) 5'inci noktasındaki dönme

### 3.3.2. 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 mesafesi yükleme durumunda olup eğilme momenti değeri 8887,93 kNm ve kesme kuvveti değeri ise 1042,61 kN'dur (Şekil 25).

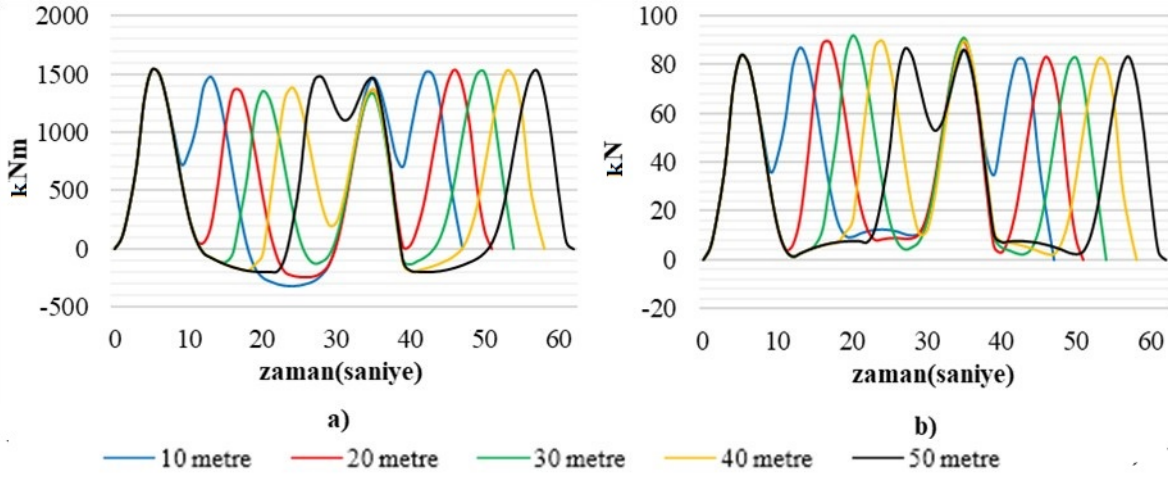


Şekil 25. Köprü ayağındaki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) Kesme kuvveti

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 26-a)



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 26-b).



Şekil 26. Köprü tabliyesindeki eğilme momenti ve kesme kuvveti a) Eğilme momenti b) Kesme kuvveti

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada sandık kesitli betonarme bir köprünün; taşıt yükü etkisinde köprü yapısında meydana gelen deformasyonlar, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri incelenmiştir. Köprü üzerinden geçirilen taşıtların hızları, adetleri ve taşıtlar arasındaki araç takip mesafelerine göre yükleme durumları oluşturulmuştur. İncelenen değerler karşılaştırılarak grafiklerle ve şekillerle ifade edilmiştir. Yapılan bu karşılaştırmaların sonuçları bu bölümde verilmektedir.

- Köprüde z ekseninde en büyük yer değiştirmeler, köprü açıklıklarında görülmüştür. Değerler açıklık ortasına doğru büyümüştür. En büyük değer orta açıklığın ortasında görülmüştür.
- Köprü ayaklarında en büyük eğilme momenti değerleri tabliye ile birleşim noktasında görülmüştür. Bu değer köprü ayağının ortasına doğru azalmakta fakat zeminle birleşim noktasına doğru artmıştır.
- Köprü ayaklarında mutlak en büyük kesme kuvveti değeri ayakların her noktasında aynıdır.
- 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 noktadaki 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 değer artacağı ön görülmüştür.
- Taşıt sayısına göre yükleme durumlarında köprü ayaklarında, köprü üzerinden 2 araç geçirilmesi durumunda en büyük eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri diğer koşullara göre çok daha düşüktür. Köprü üzerinden 4 araç geçirilmesi durumunda ise diğer koşullardan çok daha fazla değerler görülmüştür. Köprü tabliyesinde ise köprü üzerinden 10 araç geçirilmesi koşulu için değer çok fazlayken diğer koşullarda değerler çok yakındır.
- 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.

Literatürde sandık kesitli betonarme köprüler için farklı trafik koşullarında zaman tanım alanında taşıt yükü için yapılan analizlerin olduğu çalışmalara rastlanmamıştır. Fakat öngörülen beton köprüler ve asma köprüler için yapılan çalışmalara rastlanmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü için 3 farklı taşıt yükleme durumu oluşturularak zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. İki yönden on ikişer adet 30 tonluk kamyonların köprü üzerinden geçirildiği yükleme durumunda, en büyük yer değiştirmenin olduğu köprü ortasındaki z eksen yönündeki yer değişime değerlerinin, kamyon hızlarına göre düzenli bir şekilde değişmediği görülmüştür. Yer değiştirme değerlerinin zamana göre değişimi grafiklerle gösterilmiştir [17]. Farklı türde köprüler üzerine çalışılmasına rağmen yer değişime değerlerinin taşıt hızına göre değişimi benzerlik göstermiştir. Sandık kesitli köprü için yapılan çalışma ile taşıt sayısı ve takip mesafesine göre farklı taşıt yükleme durumları oluşturularak farklı açılardan da sonuçlar ortaya koyulmuştur.

Literatürde en elverişsiz koşulda köprüde oluşan maksimum ve minimum etkilerin görülebildiği hareketli yük analizine dair çalışmalar vardır. Yapılan çalışmalarda köprüde oluşan kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerleri incelenmiştir. Bu çalışmayla kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin zamana göre değişimi farklı taşıt yükleme durumları için ortaya koyulmuştur.

**Kaynaklar**

- [1] Tümertekin E. Ulaşım coğrafyası. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları; 1987.
- [2] Ekiz İ. Sandık kesitli köprülerin hesap metotları ve bilgisayar uygulaması. Yüksek lisans tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi; 1976.
- [3] Celasun H. Sandık Kesitli Kirişlerin Hesabı-BEF Analojisi. İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Dergisi 1978;4.
- [4] Polat Z. Depreme Dayanıklı Köprü Mühendisliğinde Kavramsal Tasarım. Köprü Sempozyumu, İstanbul; 2018.
- [5] Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD; 1998.
- [6] Introduction to LRFD-Load and Load Distribution, Federal Highway Administration, FHWA.
- [7] Yağoobi W. Kutu Kesitli Ardgerilmeli Köprülerin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi; 2020.
- [8] Alemdar ZF. Betonarme Köprü Kolonlarında Plastik Mafsallı Bölgelerinin Modellenmesi. İmo Teknik Dergi 2015; yazı. 444:7279-7286.
- [9] Priestley MJN., Seible F., Calvi GM. Seismic design and retrofit of bridges. New York: Wiley; 1996.
- [10] Gülhan İE. Öngerilmeli Betondan Sandık Kesitli Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi. Yüksek lisans tezi. Kayseri: Erciyes Üniversitesi; 2005.
- [11] Uluğ Nİ. Öngerilmeli Bir Köprü Tasarımı ve Performans Değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2008.
- [12] Celasun H. Betonarme Köprüler ve Hesap Metodları. İstanbul: Çağlayan Yayınları; 1974.
- [13] Celasun H. Betonarme Yapılar. İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Yayınları 1980;156.
- [14] Ekiz İ. Çözümlü Köprü Problemleri. İstanbul: Çağlayan Yayınları; 1981.
- [15] Taly N. Design of Modern Highway Bridges. New York; Mc Graw-Hill Publication; 1998.
- [16] S. Bostan, "Kutu kesitli karayolu köprülerinde en kesit şeklinin dinamik davranışa etkisi", Yüksek lisans tezi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi; 2019.
- [17] Mubuli A. Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsünün Deprem ve Taşıt Yükleri Altında Yapısal Davranışının Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi; 2016.