

**BÜYÜK AÇIKLIKLI KABLOLU KÖPRÜLERDE TRAFİK  
YÜKLERİNİN MEYDANA GETİRDİĞİ DİNAMİK ETKİLERİN  
İNCELENMESİ**

**Ayşegül CENGİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009**

**ANKARA**

Ayşegül CENGİZ tarafından hazırlanan BÜYÜK AÇIKLIKLI KABLOLU KÖPRÜLERDE TRAFİK YÜKLERİNİN MEYDANA GETİRDİĞİ DİNAMİK ETKİLERİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr.Kurtuluş SOYLUK .....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Tekin GÜLTOP .....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi üniversitesi

Doç.Dr.Kurtuluş SOYLUK .....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi üniversitesi

Prof.Dr.Ali İhsan ÜNAY .....

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Tarih: 24 / 06 /2009

Bu tez ile G.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ayşegül CENGİZ

**BÜYÜK AÇIKLIKLI KABLOLU KÖPRÜLERDE TRAFİK  
YÜKLERİNİN MEYDANA GETİRDİĞİ DİNAMİK ETKİLERİN  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ayşegül CENGİZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2009**

**ÖZET**

Son yirmi yılda kablolu köprülerde büyük açıklıkların geçilmeye başlanmasıyla taşıt-köprü etkileşimi köprü dinamik davranışı açısından büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada taşıt-köprü etkileşiminde önemli parametrelerden biri olan taşıt hızının ve hızda meydana gelen değişimlerin köprü davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü bilgisayar programında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Üç farklı taşıt hızı için dört farklı trafik kombinasyonu oluşturulmuş ve köprünün hıza bağlı dinamik davranışı incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde en büyük tepki kuvvetlerinin genellikle düşük hızlarda meydana geldiği görülmüştür. Ancak taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra açıklık ortasında en büyük tepki kuvvetleri yüksek hızlar altında meydana gelmeye başlamaktadır.

**Bilim Kodu : 911.1.144**  
**Anahtar Kelimeler : Kablolu köprü, taşıt-köprü etkileşimi, hız parametresi**  
**Sayfa Adedi : 122**  
**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK**

**ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS INDUCED BY TRAFFIC  
LOADS ON LONG SPAN CABLE STAYED BRIDGES**

**(M.Sc. Thesis)**

**Ayşegül CENGİZ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCES AND TECHNOLOGY**

**June 2009**

**ABSTRACT**

**Vehicle-bridge interaction has become an important issue for the dynamic response of bridges especially after the achievement of long spans by cable stayed bridges during the last two decades. In this study, the effects of vehicle speed and variations in the speed, which is one of the important parameters of vehicle-bridge interaction, on the response of bridge is analysed. Tatara bridge which is the second largest cable stayed bridge in the world, is considered by 3-D finite element model. Four sets of traffic load combinations are applied for three different vehicle speed values and analyses are conducted for the evaluation of speed induced dynamic responses of the bridge. The largest internal forces in the bridge are generally observed for low speeds. On the other hand, larger responses begin to occur in the mid-span after the vehicles leaves the mid-span of the bridge for higher speeds.**

**Science Code : 911.1.144**  
**Keywords : Cable bridge, vehicle-bridge interaction, speed parameter**  
**Number of Pages : 122**  
**Thesis Supervisor : Assoc.Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK'a, çalışmamın en önemli bölümünü oluşturan bilgisayar modelinin oluşturulmasında ve çalışmamın her aşamasında, çok büyük desteği ve yardımlarını esirgemeyerek, başaramayacağımı düşündüğüm zamanlarda bana verdiği cesaret için İnşaat Yüksek Mühendisi Burak KURTMAN'a, yine çalışmamın her aşamasında yoğun çalışma temposuna rağmen uzun yıllara dayanan dostluğumuzun her anında olduğu gibi bana büyük destek veren dostum Araştırma Görevlisi Eda AVANOĞLU SICACIK'a, hayatımın her aşamasında olduğu gibi çalışmalarım esnasında da bana duydukları güven ve verdikleri büyük manevi destek için çok değerli anneme ve babama, yardımları için Araştırma Görevlisi Şule BAKIRCI ER'e, çalışmamda yer alan çizimler ve düzenlemeler konusunda sürekli yardım aldığım değerli arkadaşım Makina Mühendisi Özlem DİLAVER'e, arkadaşlarım Buket DEMİRÇAKMAK, Seda HACIOSMANOĞLU, Sibel ÖZGEN ve beni destekleyen tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KABLOLU KÖPRÜLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	9
2.1. Kablolü Köprülerin Temel Özellikleri ve Köprü Elemanları. ....	9
2.2. Kablolü Köprü Tipleri.....	14
2.3. Kabloların Düzenlenmesi.....	15
2.4. Ana Kirişin Mesnet Koşulları.....	15
2.5. Kablo Düzlemlerinin Konumları ve Kiriş Tipleri.....	17
2.6. Köprü Elemanlarının Seçimi.....	19
2.6.1. Kablo elemanının seçimi.....	19
2.6.2. Ana kiriş elemanının seçimi.....	19
2.6.3. Kule elemanının seçimi.....	20
2.6.4. Bağlantı elemanlarının seçimi.....	24
3. TAŞIT KÖPRÜ ETKİLEŞİMİ.....	29
3.1. Taşıtlı Köprü Etkileşimi ile İlgili Çalışmalar.....	29
3.2. Köprü Tasarımında Kullanılan Şartnameler.....	29

**Sayfa**

3.3. Taşıt Köprü Etkileşiminin Modellenmesi.....	30
3.3.1. Temel kabuller.....	30
3.3.2. Taşıt modelleri.....	32
3.3.3. Köprü modelleri.....	33
3.4. Taşıt Köprü Etkileşim Problemlerinin Çözüm Yöntemleri.....	34
3.5. Tesir Faktörü ve Hız İlişkisi.....	34
3.6. Taşıt Köprü Etkileşiminde Önemli Parametreler.....	36
3.6.1. Hareketli taşıtların hızlarının etkisi.....	37
3.6.2. Tekerlek ağırlığının etkisi.....	39
3.6.3. Tekerlek rijitliğinin etkisi.....	40
3.6.4. Tekerlek sönümlemesinin etkisi.....	41
3.6.5. Köprü açıklığının etkisi.....	43
3.6.6. Köprü sönümlemesinin etkisi.....	44
3.6.7. Zaman değişiminin etkisi.....	46
3.7. Taşıt Köprü Dinamik Etkileşim Sisteminin Matematik Modeli.....	47
3.7.1. Taşıt ve köprü için hareket denklemleri.....	48
3.7.2. Kiriş elemanı için hareket denklemi.....	50
3.7.3. $t+\Delta t$ anındaki hareket denklemleri.....	51
3.7.4. Taşıtlar için eşdeğer rijitlik denklemi.....	52
3.7.5. Taşıt köprü etkileşim elemanı.....	55
3.7.6. Taşıt köprü etkileşim sistemlerinin eşdeğer rijitlik denklemleri.....	56
4. ÜÇ BOYUTLU KABLOLU KÖPRÜ MODELİ.....	58
4.1. Giriş.....	58



**Sayfa**

4.2. Tatar Kablolu Köprüsü Hakkında Genel Bilgiler.....	58
4.3. Sonlu Elemanlar Modeli.....	61
4.4. HS20-44 Kamyonu Genel Özellikleri.....	73
5. YAPILAN ÇALIŞMA VE ANALİZLER.....	75
5.1. Genel Bilgiler.....	75
5.2. Trafik 1 Yükleme Altında Kablolu Köprü Davranışı.....	76
5.3. Trafik 2 Yükleme Altında Kablolu Köprü Davranışı.....	85
5.4. Trafik 3 Yükleme Altında Kablolu Köprü Davranışı.....	95
5.5. Trafik 4 Yükleme Altında Kablolu Köprü Davranışı.....	105
5.6. Taşıtların Meydana Getirdiği Fren Etkileri.....	114
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	123

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kablolu köprülerin son yıllardaki hızlı gelişimi.....	28
Çizelge 3.1. Taşıt ve köprü deplasmanlarının taşıt hızına bağlı Etkileşimi.....	37
Çizelge 3.2. Köprü ve taşıt deplasmanlarının tekerlek ağırlığına bağlı etkileşimi.....	39
Çizelge 3.3. Taşıt ve köprü deplasmanlarının tekerlek rijitliğine bağlı etkileşimi.....	40
Çizelge 3.4. Taşıt ve köprü deplasmanlarının tekerlek sönümlemesine bağlı etkileşimi.....	42
Çizelge 3.5. Taşıt ve köprünün deplasmanlarının köprü açıklığına bağlı etkileşimi.....	43
Çizelge 3.6. Taşıt ve köprü deplasmanlarının köprü sönümlemesine bağlı etkileşimi.....	45
Çizelge 3.7. Taşıt ve köprü deplasmanlarının zaman değişimine bağlı etkileşimi.....	46
Çizelge 4.1. Köprüdeki mesnetlenme koşulları.....	63
Çizelge 4.2. Zati yükler altında taban reaksiyonları.....	67
Çizelge 4.3. Modal analiz sonuçları özet tablosu.....	70
Çizelge 4.4. Modal kütle katılım oranları.....	71
Çizelge 4.5. Tatar Köprüsüne ait genel bilgiler.....	72
Çizelge 4.5. AASHTO' da yer alan kamyon tipleri.....	73

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Kablolü Köprülerin Temel Elemanları.....	9
Şekil 2.2. Ortotropik plaklı döşemeye sahip kablolü köprünün genel görünüşü.....	11
Şekil 2.3. Tipik boylama şekilleri.....	11
(a). Açık tipteki boylama şekilleri.....	11
(b). Kutu kesitli boylama şekilleri.....	11
Şekil 2.4. Kule kablo bağlantısına göre kablolü köprü tipleri.....	14
(a). Radyal sistem.....	14
(b).Yelpaze Sistem.....	14
(c). Paralel Sistem.....	14
Şekil 2.5. Tipik mesnet koşulları.....	16
(a). Mesnetlenme koşulu 1.....	16
(b). Mesnetlenme koşulu 2.....	16
(c). Mesnetlenme koşulu 3.....	16
Şekil 2.6. Tabli-kule bağlantı tipleri.....	17
(a). Köprü ana ekseninden tabliyeye bağlantı.....	17
(b). İki ayrı eksenenden köprü tabliyesine bağlantı.....	18
Şekil 2.7. Kablo elemanına ait bir kesit.....	19
Şekil 2.8. Tipik ana kiriş görünümleri.....	20
(a). Ana kiriş kesiti.....	20
(b). Ana kiriş elemanından bir görünüm.....	20

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.9. Tipik kule kesitleri.....	20
(a). Kabloların tek merkezden çıktığı köprülerde kule kesiti.....	20
(b). İki düşey kablo düzlemine sahip köprülerde kule sistemi.....	21
(c). İki kulenin birbirine bağlandığı kule çerçeve sistemi.....	21
Şekil 2.10. Kule elemanına ait bir kesit.....	21
Şekil 2.11. Tipik bağlantı detayları.....	22
(a).Kabloların tabliyeye doğrudan bağlantı detayı.....	22
(b). Kuleden çıkan köprü tabliyesine rijit çubuklarla bağlantı detayı.....	22
Şekil 2.12. Tipik kule deplasman profilleri.....	23
(a). Tek kulenin deplasmanı.....	23
(b). Kulenin yatay deplasmanı.....	24
(c). İki kulenin birlikte deplasmanı.....	24
Şekil 2.13. Kablo kesiti.....	25
Şekil 2.14. Kablo ankraj detayı.....	25
Şekil 2.15. Ankrajların kulede yapılması durumu.....	26
Şekil 2.16. Kablolü köprü inşaat şekilleri.....	26
(a). Dengeli konsol yöntemiyle köprü inşaatı.....	26
(b). Köprünün tek tarafının sabitlendiği inşaat yöntemi.....	27
Şekil 3.1. Hareketli tekil yük modeli.....	31
Şekil 3.2. Sabit hızla hareket eden kütle modeli.....	32
Şekil 3.3. Yay sabiti ile desteklenen hareketli kütle modeli.....	33
Şekil 3.4. Taşıtın hız değişimine bağlı maksimum deplasmanları.....	38
Şekil 3.5. Köprünün hız değişimine bağlı maksimum deplasmanları.....	38

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.6. Taşıtın tekerlek ağırlığına bağlı maksimum deplasmanları.....	39
Şekil 3.7. Köprünün tekerlek ağırlığına bağlı maksimum deplasmanları.....	40
Şekil 3.8. Taşıtın tekerlek rijitliğine bağlı maksimum deplasmanları.....	41
Şekil 3.9. Köprünün tekerlek rijitliğine bağlı maksimum deplasmanları.....	41
Şekil 3.10. Taşıtın, tekerlek sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı.....	42
Şekil 3.11. Köprünün, tekerlek sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı.....	43
Şekil 3.12. Taşıtın köprü açıklığına bağlı maksimum deplasmanı.....	44
Şekil 3.13. Köprünün açıklığına bağlı deplasmanı.....	44
Şekil 3.14. Taşıtın köprü sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı.....	45
Şekil 3.15. Köprünün köprü sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı.....	46
Şekil 3.16. Taşıtın zaman değişimine bağlı maksimum deplasmanı.....	47
Şekil 3.17. Köprünün zaman değişimine bağlı maksimum deplasmanı.....	47
Şekil 3.18. Hareketli kütle serisi modeli.....	48
Şekil 3.19. Köprü taşıt etkileşim elemanının analitik modeli.....	49
Şekil 3.20. Kiriş elemanına ait serbestlik dereceleri.....	50
Şekil 3.21. Kiriş elemanına ait moment ve kuvvet dağılımları.....	51
Şekil 4.1. Tatar köprüsü genel görünümü.....	59
Şekil 4.2. Kule kesitleri ve kablo yerleşimi.....	59
Şekil 4.3. Çelik tabliye kesiti.....	60
Şekil 4.4. Öngerilmeli beton tabliye kesiti.....	60
Şekil 4.5. Tatar köprüsü üç boyutlu bilgisayar modeli.....	61
Şekil 4.6. Tatar köprüsü üç boyutlu bilgisayar modeli (Boy kesit).....	62
Şekil 4.7. Çubuk elemanlar ve düğüm noktaları.....	62

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.8. Kablo – Kiriş birleşimi için kullanılan rijit link elemanları.....	63
Şekil 4.9. Mesnetlerin lineer link elemanı ile modellenmesi.....	64
Şekil 4.10. Trafik şeritlerinin tanımlanması.....	65
Şekil 4.11. AASHTO HS 20-44 kamyonu tanımlanması.....	65
Şekil 4.12. Trafik yüklemesinin tanımlanması.....	66
Şekil 4.13. Trafik yüklemesi analiz hali tanımlanması.....	66
Şekil 4.14. Mod:1 (Enine yön modu), Periyot=8.91 sn.....	68
Şekil 4.15. Mod:2 (Boyuna yön modu), Periyot=4.35 sn.....	68
Şekil 4.16. Mod:3 (Eğilme modu), Periyot=3.14 sn.....	68
Şekil 4.17. Mod:4 (Burulma modu), Periyot=2.69 sn.....	69
Şekil 4.18. Mod:11 (Eğilme modu), Periyot=2.37 sn.....	69
Şekil 4.19. Mod:20 (Eğilme modu), Periyot=1.85 sn.....	69
Şekil 4.20. HS20-44 kamyonunun yandan görünüşü.....	73
Şekil 4.21. HS20-44 kamyonunun arkadan görünüşü.....	74
Şekil 4.22. HS20-44 kamyonunun plan görünüşü.....	74
Şekil 4.23. HS 20-44 kamyonuna ait dingil yükleri.....	74
Şekil 5.1. Trafik 1 yük kombinasyonu modeli.....	76
Şekil 5.2. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili.....	77
Şekil 5.3. Trafik 1 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı.....	78
Şekil 5.4. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	79
Şekil 5.5 Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	80

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.6. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi.....	81
Şekil 5.7. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	81
Şekil 5.8. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	82
Şekil 5.9. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	83
Şekil 5.10. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	84
Şekil 5.11. Trafik 2 yük kombinasyonu modeli.....	85
Şekil 5.12. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen deplasman profili.....	86
Şekil 5.13. Trafik 2 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı.....	87
Şekil 5.14. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	88
Şekil 5.15. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	89
Şekil 5.16. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi.....	90
Şekil 5.17. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 5.18. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	92
Şekil 5.19. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	93
Şekil 5.20. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	94
Şekil 5.21. Trafik 3 yük kombinasyonu modeli.....	95

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.22. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen deplasman profili.....	96
Şekil 5.23. Trafik 3 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı.....	97
Şekil 5.24. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	98
Şekil 5.25. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	99
Şekil 5.26. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi.....	100
Şekil 5.27. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	101
Şekil 5.28. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	102
Şekil 5.29. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	103
Şekil 5.30. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	104
Şekil 5.31. Trafik 4 yük kombinasyonu modeli.....	105
Şekil 5.32. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen deplasman profili.....	106
Şekil 5.33. Trafik 4 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı.....	107
Şekil 5.34. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	108
Şekil 5.35. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi.....	109
Şekil 5.36. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi.....	110
Şekil 5.37 Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	110



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.38. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	111
Şekil 5.39. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	112
Şekil 5.40. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.....	113
Şekil 5.41. Frenleme anında köprüde meydana gelen yatay deplasmanlar.....	115
Şekil 5.42. Frenleme anında moment dağılımı.....	116

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$a_n$	Taşıt ivmesi
$B_s$	Köprü açıklığı
$c_v$	Taşıt sönümlemesi
$c_w$	Tekerlek sönüm katsayısı
$f_c$	Taşıt ve köprü elemanı arasındaki temas kuvveti
$E_{eq}$	Elastisite modülü
$E_{tan}$	Tanjant modülü
$g$	Yer çekimi ivmesi
$I$	Tesir faktörü
$\dot{I}$	Kablonun yatay iz düşümü
$k_b$	Balast rijitlikleri
$k_v$	Rijitlik katsayısı
$k_v$	Yay sabiti
$k_w$	Tekerlek rijitlik katsayısı
$L$	Kirişin karakteristik uzunluğu
$m_v$	Tekerlek kütlesi
$M$	Kütle
$M_v$	Taşıttan gelen kütle
$P$	Tekil yük
$P_w$	Köprü ağırlığının meydana getirdiği kuvvet
$q_s$	Yay kütesinin iç direnç kuvveti
$q_e$	Sistemin eşdeğer iç direnç kuvveti
$r_c$	$X_c$ temas noktasındaki yol düzensiliği
$r(x)$	Yüzey düzensizlikleri
$R_d(x)$	Maksimum dinamik tepki

**Simgeler****Açıklama**

$R_s(x)$	Maksimum statik tepki
$S$	Hız parametresi
$v$	Hareketli taşıtın hızı
$v_s$	Hareket hızı
$w_w$	Tekerlek ağırlığı
$x_c$	Taşıtın yer değiştirme mesafesi
$y_m$	Taşıt deplasmanı
$y_b$	Köprü deplasmanı
$\gamma$	Kablo elemanını yoğunluğu
$\sigma$	Kablodaki çekme gerilmesi
$\sigma_1$	Ölü yükten kaynaklanan gerilme
$\sigma_2$	Ölü ve hareketli yükten kaynaklanan gerilme
$\omega$	Köprü frekansı
$\xi$	Köprü sönüm katsayısı
$\Delta t$	zaman değişimi
$\Delta z_n$	Deplasman değişimi
[ ]	Kare matris
$[m_b]$	Köprü elemanı kütle matrisi
$[c_b]$	Köprü elemanı sönümleme matrisi
$[k_b]$	Köprü elemanı rijitlik matrisi
$[K_b]_{t+\Delta t}$	$t+\Delta t$ anında efektif rijitlik matrisi
{ }	Kolon vektörü
$\{f_s\}_t$	Yayıllı kütleyle bağlı direnç kuvvetleri
$\{f_s\}_t$	Yayıllı kütleyle bağlı direnç kuvvetleri
$\{F_b\}_t$	İç direnç kuvvetleri
$\{N_c\}$	İnterpolasyon fonksiyonları içeren vektör
$\{P_b\}$	Dış nodal kuvvet vektörü
$\langle \rangle$	Dizi elemanı

**Kısaltmalar****Açıklama****AASHTO**American association of state highway and  
transportation officials**DAF**

Dinamik katılım faktörü

**DIF**

Dinamik artırma faktörü

## 1.GİRİŞ

Kablolu köprü 19. yüzyıldan itibaren sıkça kullanılmaya başlanan bir köprü türüdür. Kablolu köprüler temel olarak tabliye, ana kiriş, kule, kablo ve ankraj elemanlarından oluşan sistemlerdir. Yakın tarihlere kadar orta açıklıklar için tercih edilirlerken son yirmi yılda hızlı bir gelişim göstererek Sutong Köprüsü gibi 1 088 m merkez açıklığa kadar olan köprüler için uygulanabilir hale gelmişlerdir. Betonarme, çelik ya da bu çalışmaya konu olan Tatar Köprüsünde olduğu gibi betonarme-çelik kompozit olarak dizayn edilebilirler.

İlk inşa edilen kablolu köprülerin çoğu yıkılmış olup, 20. yüzyıla kadar başarılı bir şekilde uygulanamamışlardır. Yıkılma sebepleri, kablolu köprülerin gerçek yapı davranışının yanlış anlaşılmasından ve yapım aşamasındaki bazı hatalardır. Örneğin, kabloları oluşturmak için demir ve zincir gibi uygun olmayan malzemelerin kullanılması ve kullanılan malzemelerin alanlarının genelde yetersiz oluşu, söz konusu sistemlerin büyük ölçüde yıkılmasına neden olmuştur. Bu sistemlerde kullanılan kablolar yapım aşamasında gerginleştirilmemiş ve kablolar görevlerini etkileyen yükler altında ancak bütün sistem büyük ölçüde deformasyon yaptıktan sonra yerine getirmeye başlamışlardır. Böylelikle, kablolu köprülerin fazla esnek olmalarının yanı sıra güvenli olmadıkları sonucuna varılmış ve kablolu köprülerin inşası bırakılmıştır. Kablolu köprülerdeki hatalar üzerine çalışan ve kablolu köprü inşası yerine asma köprüleri öneren Navier olmuştur. Navier'in önerisi ile köprü mühendisliğinde asma köprü inşasına yönelim olmuştur [1].

19. yüzyılın ikinci yarısında kablolu köprüler ünlü köprü mühendisi Roebling tarafından Amerika'da tekrar ele alınmıştır. Roebling'in tasarladığı kablolu köprülerde destek kabloları kullanılarak köprü sistemi desteklenmeye çalışılmıştır. Bu kablolar hem köprünün desteklenmesi için ana kabloları yardımcı olmuş, hem de rüzgardan kaynaklanabilecek titreşimler için tabliyenin en etkili ve ekonomik olarak rijitlenmesini sağlamıştır.

Roebing 1855 yılında dünyadaki ilk demiryolu asma köprüsünü Niagara Nehri üzerinde inşa etmiştir. Bu sistemde toplam yük ana kablo ve destek kabloları arasında bölüşülmüştür. Söz konusu sistem, taşıtların geçebilmesi için gerekli olan rijitliği ve rüzgara karşı köprünün stabilitesini sağlamıştır. Roebing ayrıca Ohia Köprüsünün inşasında da destek kabloları kullanmıştır. Ohia Köprüsünde yol ve hareketli yük ağırlığının yarıya yakını, kulelerin tepelerinden tabliye noktalarına kadar uzanan diyagonal destek kabloları ile taşınmıştır. Destek kabloları, tabliyenin rijitleştirilmesi sağlamış olup, ağır yükler altında ve rüzgar etkisinde köprünün titreşimini kontrol imkanı vermiştir.

Günümüzde, geçmişteki mühendislerin kablolardaki kuvvetleri doğru olarak hesaplayamadıkları ve kabloların sehim ve hiperstatik davranışlarını tam olarak belirleyemedikleri anlaşılmaktadır. Böylelikle kablolu köprüler kullanılmaz bulunmuş ve inşası bırakılmıştır. Ancak 20. yüzyılın başında; gerçek anlamda kablo, yüksek mukavemetli çelik kullanımının başlaması ve yapı teorisindeki diğer gelişmeler kablolardan oluşan sistemlerin yeniden kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır. 19. yüzyılda ünlü mühendis Arnodin tarafından Fransa'da kablolu ve asma köprü karışımı birkaç köprü inşa edilmiştir. Bu sistemlerde diyagonal kabloların kule tepelerinden itibaren uzandıkları bölgelerde düşey askılar kullanılmamıştır. Böylece sistemde ana kirişin deformasyonu azalmış ve kiriş yüksekliğinin daha küçük tutulabilmesi sağlanmıştır. Ancak karma sistem köprüler estetik görünülerinden dolayı pek fazla uygulama alanı bulamamıştır. Asma ve kablolu köprüler ayrı ayrı karma sistem köprülerden daha tatmin edici bulunmuştur.

1950'den sonra Almanya'da Rhine Nehri üzerinde kablolu köprü yapımı tercih edilmiştir. Kablolu köprülerin asma köprüler ile karşılaştırılmasından, kablolu köprülerin 600 m'ye kadar küçük açıklıklar için daha ekonomik olduğu anlaşılmıştır Aynı periyot içerisinde, alman Demag şirketi Dischinger ile işbirliği yaparak 1955 yılında İsveç'teki Strömsund Köprüsü'nü inşa etmiştir. Strömsund Köprüsü ilk modern kablolu köprü olarak kabul edilmektedir.

İlk modern kablolu köprülerin trafik yükleri altında oldukça rijit davranması, estetik olarak hoş görünmesi, ekonomik ve yapımının kolay olması kablolu köprü sistemlerinin uygulama alanını artırmıştır. Yeni sistem kablolu köprüler önce Alman mühendisler arasında, daha sonrada birçok ülkede kabul görmüştür [1].

Köprü titreşimiyle ilgili ilk çalışmalar bir tren yolu köprüsü titreşim probleminin hareket denklemini çıkaran Willis tarafından yapılmıştır. Kütlesiz bir köprüden sabit hızla geçen hareketli bir kütlenin diferansiyel denklemi elde edilmiştir. Willis Denklemi, Stokes tarafından güç serisi açılımları kullanılarak çözülmüştür [2].

Takip eden 60 yılda, denklemin doğruya en yakın çözümü için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Sabit hızla hareket eden yükler altındaki köprünün davranışını Eigen fonksiyonlarını kullanarak açıklayan Timoshenko tarafından araştırmalara klasik katkılar sağlanmıştır. Timoshenko problemi hareketli harmonik kuvvetlerle genişletmiştir. Jeefcot tarafından problem daha komplike hale getirilerek hareketli kütleyle beraber kiriş kütlesi de probleme dahil edilerek iterasyon metoduyla araştırılmıştır. İngiliz tarafından tren yolu köprüsünün lokomotiflerin etkisiyle dinamik davranışı harmonik analizle incelenmiştir. Köprü Dinamiği başlığı Timoshonko tarafından detaylı hale getirilmiştir [3].

1950'lerden sonra, çalışmalar köprü üzerinden geçen hareketli taşıtlar nedeniyle oluşan köprü titreşimine yoğunlaşmıştır. Wen, köprüyü uniform yüklü bir kiriş, taşıtı da iki akslı yaylı bir kütle olarak kabul ederek bir kirişten geçen iki-akslı hareketli yük problemini çözmüştür. Köprünün herhangi bir andaki dinamik yer değiştirmesinin hareketli yükten oluşan anlık statik yer değiştirmesiyle orantılı olduğu yaklaşımını dikkate almıştır. Sundara ve Jagadish köprüyü yaylı kütle taşıt modeli altında ortotropik düzlem olarak idealize etmiştir [4].

Friba basit mesnetli kirişin çeşitli hareketli yüklemeler altındaki titreşimini kapsamlı olarak araştırmıştır. 1970'lerden sonra, bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve analiz teorisinin devrimiyle, ayırık metotlar, özellikle sonlu elemanlar metodu, yapısal

analiz yöntemlerine katılmış ve köprü dinamiğiyle ilgili çalışmaların güçlü ve önemli malzemeleri olmuştur [5].

Diferansiyel denklemlerin analitik çözüm zorluklarının ortadan kalkmasıyla, çalışmalarda daha kesin ve gerçekçi sonuçlara ulaşılması mümkün olmuştur. Köprüler basit kiriş çözümünde hesaba katılmayan burulma etkisinin de hesaba katılabileceği 2 ve 3 boyutlu yapılar olarak modellenmiştir. Çok serbestlik dereceli taşıtların modellenmesi mümkün olmuştur. Yol düzensizlikleri analize dahil edilebilmiştir. Köprü dinamiğinin incelenmesinde farklı taşıt modelleri dikkate alınabilmiştir. Bu taşıt modelleri taşıtın en önemli parçaları olan gövde, tekerler ve süspansiyon sistemlerinden oluşmaktadır.

Tan ve Brameld'in araştırmasında, köprü üst yapısı üç boyutlu kafes olarak idealize edilmiş, 3 boyutlu 7 serbestlik dereceli taşıt modelinin köprüde meydana getirdiği dönme ve eğilme etkileri incelenmiştir. Tekerlekler ve süspansiyon sistemlerin yay sabitleri ve sönümleme katsayıları kombinasyonlarda gösterilmiştir [6].

Gren ve Cebon'un çalışmasında, köprü-taşıtlar ilişkisi yaylar ve sönümleyicilerle desteklenmiş kısmi kütlelerle modellenmiş taşıtla, iterasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Zaman ve ark. kablolu köprülerin trafik yükleri altındaki dinamik davranışının analizi için yapı özdiencine dayalı bir analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Taşıtların konumu ve hız terimlerine bağlı bir zaman integrasyonu başarıyla oluşturularak zaman tanım alanında işlem yapılmıştır [7].

Gua ve Xu ayrıca kablolu köprülerle ilgili çalışmalar yapmıştır. Wong ve arkadaşları tarafından 11 serbestlik dereceli HS20-44 taşıtlar modeli geliştirilmiştir. Non lineer taşıtlar modeli, traktör, dorse, direksiyon-tekerlek-aks seti, traktör-tekerlek-aks seti, trayler-tekerlek aks setini temsil edecek 5 rijit gövdeyi kapsamaktadır. Traktör ve dorse düşey deplasmanlarla, dönme ve eğilme ile ilişkili olarak 3 serbestlik dereceli olarak temsil edilmiştir. Her tekerlek-aks seti için 2 dönme ve düşey deplasman için 2 serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Traktör dorse ekseninden bağlanmıştır. Süspansiyon sistemi yaylar ve sönümleyicilerle tanımlanmıştır. Bu detaylı taşıtlar



modeli ve kafes köprü modeliyle Huang ve Wong, farklı kiriş numaralı ve farklı açıklıklı köprülerin üzerinden geçen farklı taşıtların yarattığı dinamik etkiyi kapsamlı olarak incelemişlerdir. Huang ve ark. ayrıca ince duvarlı eğri kutu kirişli köprülerin kamyon yüklemeleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir [8].

Yol düzensizliklerinin köprü dinamik etkilerine etkisinin çok önemli olduğu yapılan çalışmalarla anlaşılmıştır. Bazen yüzey düzensizlikleri taşıt frekanslarının köprü üst yapısının doğal frekansına yaklaştırarak dinamik yüklerin belirgin şekilde artmasına neden olur. Chompooming ve Yener yol profilinin modellenmesine çalışmıştır, Wong ve Houng, Das ve arkadaşları bir kablolu köprüyle ilgili çalışmalarında yüzey pürüzsüzlüğünü de hesaplarına dahil etmişlerdir [9].

Cheng ve arkadaşları taşıtın köprüden ayrıldığı ve tekrar köprü yüzeyiyle temas ettiği durumu incelemiştir. Yang ve ark. dinamik bağlantılı problemleri çözmek için bazı taşıt-köprü etkileşimi elemanları geliştirmiştir. Taşıt ve köprü için hareket denklemleri yazılmıştır. Taşıt denklemleri Network projesi kullanılarak eğdeğer rijitlik denklemleri oluşturulmuştur. Sonra taşıtın serbestlik derecesi taşıtla temastaki kirişte yoğunlaştırılmıştır [10].

Taşıtların basitleştirilmiş sonlu eleman modellerinde, analitik modelle gerçek köprü davranışı arasındaki tutarsızlıklara neden olan bazı yapısal bileşenler ihmal edilmiştir. Oysa köprünün beton tabliyesi, kirişler ve geçiş elemanlarının çarpma etkisinde doğrudan etkisi vardır. Son dönemlerde artık köprülerin analizi için ticari analiz programları kullanılmaktadır. Bu programlar çok daha karmaşık yapıların modellenmesini sağlamaktadır. Kütle, atalet, ağırlık ve rijitlik merkezi gibi yapısal bileşenler gerçekçi olarak modellenmektedir [11].

ABAQUS, ANSYS, DYTRAN, NASTRAN, ADINA ve LS-DYNA bu programlar arasındadır. Ayrıca RMBridge, LARSA ve SAP2000 Köprü Modülü de analizlerde sıklıkla kullanılan bazı diğer programlardır.

Marzaughi ve ark. , köprü dinamiğini incelemek amacıyla bir LS-DYNA sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Hareketli trafik yükü uygun yük eğrileri olan tekil düğüm noktası kuvvetleriyle birleştirilmiştir. Pozitif yük eğrisi kullanılmıştır, yükün bir düğüm noktasından den diğerine düzenli olarak aktarıldığı kabul edilmiştir. Brady ve arkadaşları tarafından MSC/NASTRAN'da çeşitli geçiş senaryolarına göre dinamik genişletme (arttırma) faktörlerini çalışmak amacıyla bir model oluşturulmuştur [12].

Yapılan çalışmalarda köprü bir kiriş, kafes veya düzlem olarak modellenmiştir. 3 boyutlu modellerde sonlu eleman metodu gibi metotlar kullanılmıştır. Kiriş modeli basitleştirilmiş ancak bu köprünün gerçek yükler, özellikle trafik yükleri altında burulması gösterilememiştir. Plak modeli, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlamakta, ayrıca kiriş modelinde ihmal edilen tabliyedeki burulmaların da dikkate alınmasını sağlamaktadır. Üç boyutlu modeller kütle ve rijitlik dağılımlarını daha gerçekçi olarak gösterebilmektedir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar hareketli kuvvet ve hareketli küttedir. Zaman içindeki gelişmelerle çok kompleks modellerin analizine imkan veren ticari yazılımlar geliştirilmiştir.

Araştırmalar sürekli ve süreksiz metotlar olarak kategorize edilebilir. Sürekli metotlar güç serisi açılımları, harmonik analiz ve modal süperpozisyonları içerir. Süreksiz metotlar arasında sonlu farklar metodu, sonlu elemanlar metodu ve sonlu çubuk sistem metodu bulunmaktadır. Süreksiz metotlar köprünün bütün elemanları dikkate alınarak daha detaylı çalışmalar yapılmasını sağlamaktadır.

Teorik çalışmaları tamamlayıcı olarak, çok sayıda deneysel taşıt köprü etkileşimi çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda iki temel esas vardır. Birincisi analik yöntemlerle doğru olduğu kabul edilen verilerle yapılan çalışmalar, diğeri de köprünün gerçek boyutları esas alınarak hareketli taşıt yüklerinin köprü dinamiği açısından incelenmesidir.

Nowak ve Kim Huran Nehri üzerindeki 2 köprü üzerinde çarpma-tesir faktörü, dağılım faktörü ve çarpışmalardan kaynaklanan tersinir etkileri inceleyen çalışmalar yapmışlardır [13].

Chawdhury ve Roy çok açıklıklı, çok kirişli çelik köprü ve tek açıklıklı beton T-kiriş köprü üzerinde, köprünün hareketli taşıt yükleri altındaki dinamik davranışını incelemek amacıyla bir seri deney yapmışlardır. Çalışmalarında ivme ölçerler ve gerinim ölçerler kullanılmıştır. Gren ve Cebon tarafından Lodden Nehri üzerindeki bir köprü üzerinde çalışmalar yapılmış ve sonuçlarına 1999'da ulaşılabilmektedir. Bu çalışma esnasında bu deney için düzenlenmiş 4 akslı bir taşıt köprü üzerinde hareket ettirilmiştir. Law, Chan ve Zeng taşıt köprü etkileşimini inceleyebilmek için laboratuvar çalışmaları yapmıştır. 2 akslı ağır bir taşıtın geçişi sırasında köprüde meydana gelen eğimle momentleri incelenmiş, zaman-tanım metoduyla dinamik aks kuvvetleri tespit edilmiştir [14-16].

Bütün köprü türlerinin modellenmesinde olduğu gibi kablolu köprülerin modellenmesinde de diğer birçok parametreyle birlikte köprü üzerinde hareket eden taşıtlar ile köprü arasında meydana gelen etkileşim kuvvetleri son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada taşıt-köprü etkileşimi problemlerinin çözümünde dikkate alınması gereken birçok önemli parametreden biri olan hız parametresinin farklı taşıt yüklemeleri altında irdelemesi yapılmıştır. Kablolu köprülerin merkez açıklıklarının son yıllarda önemli artışlar göstermesi, söz konusu köprü sistemlerinin trafik yükleri açısından incelenmesinin önemini arttırmıştır.

Bu amaçla, öncelikle kablolu köprülerin tarihsel gelişim sürecinden kısaca bahsedilmiş, kablolu köprü elemanları ve bu elemanların davranışı hakkında bilgilere genel hatlarıyla ikinci bölümde yer verilmiştir. Üçüncü bölüm taşıt-köprü etkileşimi hakkında bilgilere ayrılmıştır. Taşıtlar ve köprü modelleri bu bölümde tanıtılmıştır. Taşıtlar-köprü etkileşimi incelenirken dikkate alınması gereken önemli parametrelere değinilmiştir. Taşıtlar-köprü etkileşiminin matematik modeline ait formülasyonlar yine bu bölümde verilmiş; taşıta, köprüye ve etkileşim sistemine ait hareket denklemleri elde edilmiştir.

Bu çalışmaya konu olan dünyanın ikinci büyük açıklığa sahip Tatar Kablolu köprüsünün sonlu eleman modeli dördüncü bölümde tanıtılmış, köprünün genel özellikleri, tasarım esasları, hesaplamalarda dikkate alınan parametreler ve modelle ilgili diğer önemli bilgilere yer verilmiştir.

Hız parametresi, taşıt-köprü etkileşim problemlerinin çözümünde dikkate alınan ve bu çalışmanın konusunu oluşturan parametredir. Beşinci bölümde dört farklı taşıt yüklemesi kombinasyonuna ait analiz sonuçları irdelenmiştir. Her kombinasyon için, köprü boyunca elde edilen deplasman profili, köprü açıklık ortası zamana bağlı deplasman değişimi, kule tepe noktası zamana bağlı deplasman değişimi, köprü açıklık ortası zamana bağlı moment değişimi, köprü açıklık ortası zamana bağlı kesme kuvveti değişimi, mesnet bölgesi zamana bağlı kesme kuvveti değişimi, açıklık ortası zamana bağlı burulma kuvveti değişimi, kablo eksenel kuvveti değişimi gibi önemli reaksiyonlar hız parametresine bağlı olarak incelenmiştir.

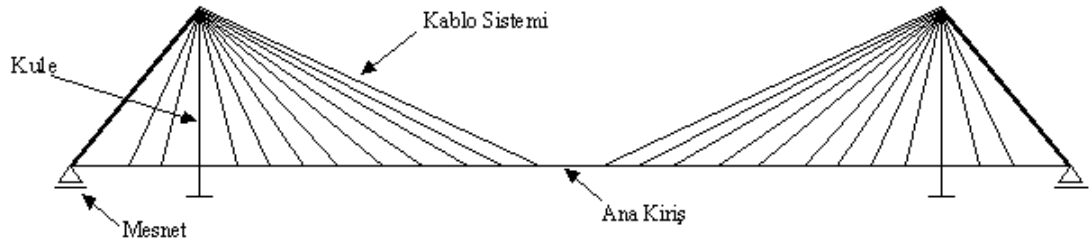
Altıncı bölümde önceki bölümlerde yapılan irdelemeler ve analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aktarılmış ve elde edilen sonuçların bundan sonra konu hakkında yapılacak yeni çalışmalara yol gösterici olması amaçlanmıştır.

## 2. KABLOLU KÖPRÜLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kablo lu Köprülerin Temel Özellikleri ve Köprü Elemanları

En genel ifade biçimi ile köprü, iki ucunda iki kenar ayağa ve varsa orta ayaklara oturan bir tabliyeden ibaret bir sanat yapısıdır. Çoğu kablo lu köprü için yapı sistemi Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi dört temel bileşene ayrılabilir.

- 1- Döşeme ile birlikte çalışan ana kiriş
- 2- Ana kirişi destekleyen kablo sistemi
- 3- Kabloları taşıyan kuleler
- 4- Kabloları düşey veya yatay olarak destekleyen mesnetler



Şekil 2.1. Kablo lu köprülerin temel elemanları

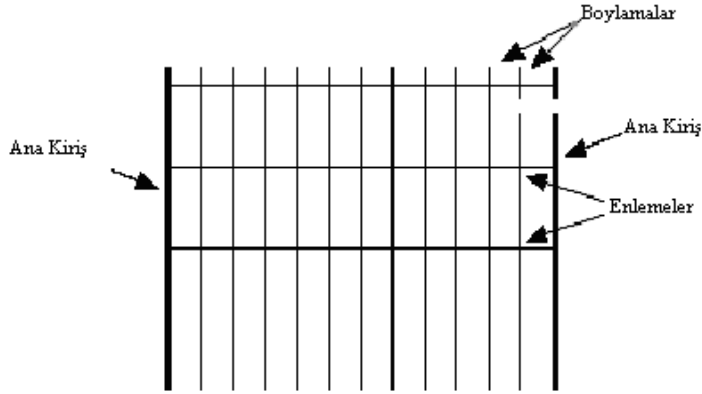
Kablo lu köprüler; kabloların ana kirişe bağlandıkları noktalardan, kablolar ile elastik olarak desteklenen lineer olmayan sistemlerdir. Modern kablo lu köprüler ana kirişlerden, enleme ve boylamalardan, ortotropik tipteki döşemeden ve destekleyici kısımları olan basınca çalışan kuleler ile çekmeye çalışan kablolardan oluşan üç boyutlu sistemlerdir. Üç boyutlu bir yapının en önemli özelliklerinden biri, enine doğrultudaki yapı kısımlarının yapının uzunlamasına doğrultudaki asıl hareketine tam katılımıdır. Böylece yapının atalet momenti önemli derecede artmakta ve kiriş yükseklikleri daha küçük tutulabilmektedir. Ayrıca çelikte de ekonomi sağlamaktadır.

Kablolu sistemlerin temel yapısal karakteristiği; kulelerin tepelerinden ana kirişlere uzanan öngerilmeli ya da sonradan çekme verilmiş kablolar ile, ana kirişlerin bir bütün olarak çalışmasıdır. Çekmeye çalışan kablolardan gelen yatay basınç kuvvetlerinin kiriş tarafından alınması, alt yapıda önemli bir ekonomi sağlamaktadır. Kablolu köprülerdeki kulelerin ve ana kirişin, kabloların neden olduğu büyük eksenel basınç kuvvetleri ile birlikte eğilmeye maruz kalması kablolu köprülerin ayırt edici özelliğidir.

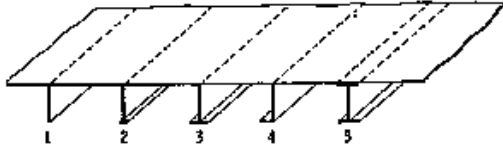
Geleneksel kısa açıklıklı ve kablolar ile desteklenmeyen köprüler, servis yüklerine karşı koyabilecek şekilde projelendirilirler. Bunun yanında ikinci adım olarak söz konusu köprülerin, rüzgar, deprem yükü gibi çevresel yüklere karşı dirençlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Ancak, kablolardan oluşan köprü sistemlerinde çevresel yükler servis yükleri kadar önemlidir.

Döşeme plağı karşılıklı iki dik doğrultuda uzanan enlemeler ve boylamalar ile rijitlenmiş olup; döşeme plağı, enlemeler ve boylamalar ana kirişlerle birleşerek tabliyyeyi meydana getirir. Döşeme plağı örtü elemanı görevini yapar ve rulman yüzeylerini taşır. Ayrıca, sabit ve hareketli yükleri boylamalara, enlemelere ve ana kirişlere iletir. Enlemeler ise ana kirişleri birbirine bağlayarak yük dağıtımını sağlar ve köprünün enine rijitliğini sağlar.

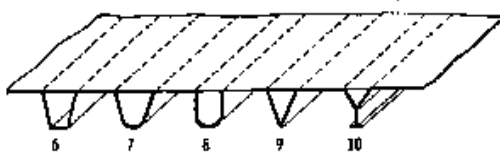
Rijitlenmiş plaklı döşeme davranışı, karşılıklı iki dik doğrultuda farklı özellikleri olan, ortogonal ve anizotropik ya da kısaca ortotropik olarak bilinen plağa benzetilebilir. Bu şekilde tanımlanan köprüler, ortotropik plaklı döşemeye sahip köprüler olarak adlandırılırlar. Şekil 2.2.'de ortotropik plaklı döşemeye sahip bir köprünün genel bir şekli görülmektedir.



Şekil 2.2. Ortotropik plaklı döşemeye sahip kablolu bir köprünün genel görünüşü.



(a)



(b)

Şekil 2.3. Tipik boylama şekilleri

(a). Kutu kesitli boylama şekilleri.

(b). Açık tipteki boylama şekilleri

Ortotropik döşemeler, boylamaların alanlarının farklılığı ve enlemeler arasındaki mesafelerin farklılığı ile birbirlerinden ayrılırlar. Ortotropik döşemelerde kullanılan tipik boylamalar Şekil 2.3.a ve 2.3.b.'de görülmektedir. Şekildeki boylamalar arasındaki temel fark burulmaya karşı olana dirençleridir. Kutu kesitli boylamaların burulma rijitliği, açık tiptekine oranla daha fazladır.

Ortotropik sistemlerin kullanılması ile yeni tip üst yapılar ortaya çıkmıştır. Bu sistemler, kabloların yatay etki kuvvetlerini uzun köprülerde dahi hemen hemen ek malzeme gerektirmeden karşılarlar. Eski tip üst yapılarda yapı elemanları bağımsız hareket ederken, ortotropik döşemelerin kullanılması ile birlikte büyük kesit alanıyla rijitlenmiş plak sadece ana kirişlerin ve enlemelerin örtü elemanı görevini yapmaz; aynı zamanda modern köprülere eski sistemlerde kullanılan rüzgar kirişlerinden daha fazla yatay rijitlik kazandıran yatay plak kirişi olarak çalışır.

Yüksek mukavemetli çelikten oluşan ortotropik plak döşeme kullanılması ile, özellikle son yıllarda, çelik ana kirişli kablolu köprülerin merkez açıklığı artırılmıştır. Kablolu köprülerde sabit yükten kaynaklanan ağırlığı azaltmak amacıyla ortotropik tipteki döşemeler kullanılmaktadır. Bilindiği gibi uzun açıklıklı köprülerde sabit yükten kaynaklanan ağırlık oldukça önemlidir.

Ortotropik sistem, döşemenin kulelerde ve ana açıklığın ortasında sürekliliğini sağlar. Köprü üst yapısının birçok açıklık boyunca sürekliliğinin avantajı vardır ve iyi bir kablolu köprü için gereklidir.

Kuleler genelde birkaç bin ton kadar olan ağır yükleri taşımak zorundadırlar. Bundan dolayı, kutu kesitleri kullanılarak minimum malzemeyle burkulmaya karşı güvenlik sağlanmaya çalışılmaktadır. Kuleler çelikten, betondan veya öngerilmeli betondan yapılabilirler. Çelik kulelerin avantajı hızlı yapımıdır. Bununla birlikte büyük kablolu köprülerde kulelerin betonla inşası, çeliğe oranla %40 ekonomi sağlar.

Kulelerin davranışı; kablolar, döşemeye ve ayaklara bağlantı şekline göre değişir. Bağlantılar eğilme momentini indirgeyecek şekilde yapılabilirler. Kablo ile ana kiriş arasındaki eğimin açısı arttıkça, kablolardaki gerilmeler azalır. Bununla birlikte kulenin yüksekliği arttıkça, kablo uzunlukları ve dolayısıyla aksel deformasyonlar da artar. Kuleler köprü ağırlığını taşımanın yanında rüzgardan veya depremden dolayı oluşacak yatay kuvvetlere de karşı koyabilmelidir. Kule, kablo kuvvetlerini temele itebilecek şekilde projelendirilmelidir ve taşıt yoluna engel olmamalıdır. Kuleler enlemesine ve uzunlamasına doğrultuda farklı şekillerde olabilirler.



Kablolar temel yük taşıyıcı elemanlar olup, kulelere ve ana kirişlere bağlanmıştır. Dolayısı ile kabloların ana kirişlere, kulelere ve altyapıya bağlantısı son derece önemlidir. Kablo bağlantıları yüklerin tam transferini sağlamalıdır ve iklim şartlarına karşı korunmalıdır.

Çekmeye çalışan kablolar için yüksek mukavemetli kabloların kullanılması malzemede ve ağırlıkta ekonomi sağlar. Daha önce belirtildiği gibi kablolar döşemeye birleştirilmişlerdir ve döşemede basınç kuvvetleri oluştururlar. Ekonomik bir köprü için döşeme yüzeyi bu kuvvetleri taşımada yardımcı olmalıdır.

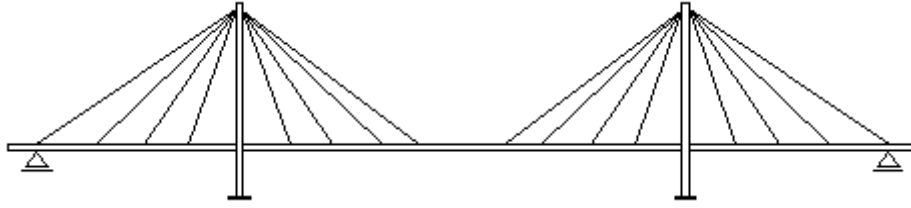
Kablo geometrisi, ana kirişin tipi ve kuleler çok farklı şekillerde olabileceğinden tipik bir kablolu köprünün tanımlanması oldukça zordur. Bunlardan başka kablo düzenlemesine ve sınır şartlarında da farklılıklar olabilir. Kabloların düzenlenişi enlemesine ve uzunlamasına doğrultuda farklılık gösterebilir.

Kablolu köprülerin döşeme sistemine ait ana kirişler, genelde eğilme momentleri ve kablolardan gelen normal kuvvet bileşenleri etkisi altındadırlar. Ana kirişler bu moment ve kuvvetlere bağlı olarak projelendirilmelidirler. Tecrübeler optimum çözümün, ortotropik tipteki döşeme ile ana kirişlerin bir bütün içinde çalışması ile sağlanabileceğini göstermiştir.

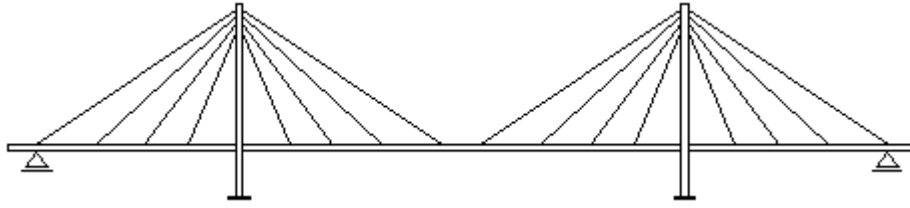
Ana kirişler, genelde kablolar için uygun bağlantılar oluşturacak şekilde kutu kesitli yapırlar. Böylece burulma etkilerine karşı önemli bir rijitlik sağlanmış olur ve köşegen kullanmaya gerek kalmaz. Eğer kablo düzeni tek düzlem olarak inşa edilmiş ise, simetrik olmayan hareketli yüklerden kaynaklanacak burulma momentleri kutu kesitli ana kirişler tarafından alınır ve mesnetlere iletilir. Ana kiriş birlikte çalıştığı döşeme ile birlikte, kablolu köprülere etkiyen dış yüklerin önemli bir bölümüne maruz kalmaktadır. Çünkü toplam trafik yükü ana kirişe ait döşeme üzerine etkimektedir. Ayrıca sabit yüklerden ve yatay kuvvetlerden gelen yükler de kablo sistemine oranla daha çok ana kirişe etkimektedir. Bu bakımdan ana kiriş yükleri transfer edebilmek zorundadır. Tüm elemanları her zaman çekmeye çalışan kablo sisteminin tersine, ana kiriş çekme ve basınç etkilerine maruz kalabilmektedir [1].

## 2.2. Kablolu Köprü Tipleri

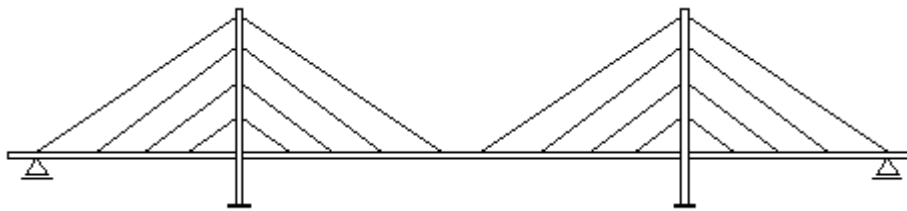
Kablolu köprüler, köprü ana kirişi, kablolar ve kulelerden oluşmaktadırlar. Kabloların kuleyle ana kiriş arasındaki bağlanma şekillerine göre 3 tip kablolu köprü modeli vardır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.4. Kule kablo bağlantısına göre kablolu

(a). Radyal sistem

(b).Yelpaze Sistem

(c). Paralel Sistem

### 2.3 Kabloların Düzenlenmesi

Kablo sistemi için iki temel konfigürasyon vardır, radyal sistem ve paralel sistem. Radyal sistem üçgenlerden meydana geldiği için en çok tercih edilen konfigürasyondur. Paralel sistem dörtgenlerden teşkil edildiği için non-lineer köprü yüklerini karşılayabilmesi için büyük kiriş kesitlerine ve rijitliği büyük kulelere ihtiyaç duyulmaktadır [17].

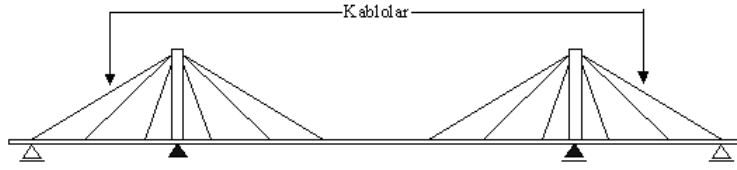
Radyal sistemde, her ne kadar tüm kablo uçlarının tek noktaya bağlanması karışıklığa neden olsa da bütün kablolar Şekil 2.4.a.'da gösterildiği gibi kulenin en tepe noktasında tek bir yerden çıkmaktadır. Bu sorunu engellemek maksadıyla, kablolar Şekil.2.4.b.'de gösterildiği gibi yerleştirilerek yelpaze sistemi geliştirilmiştir.

Çalışmanın konusu olan Tatar Köprüsü de yelpaze sistemiyle modellenmiştir. Kablolar arasındaki mesafenin çok az olması nedeniyle radyal sistem ile yelpaze sisteminin davranışları arasında ciddi farklar yoktur. Şekil 2.4.c.'de görülen Paralel sistemlerin etkin kullanımı da kenar açıklıklarda kabloların köprü ana kirişine bağlandıkları bölgelerde basit mesnetler planlanarak arttırılabilir.

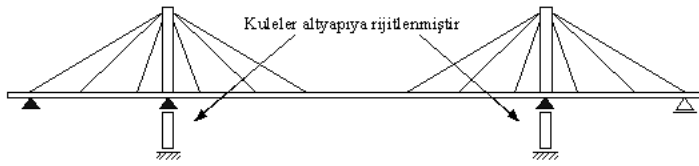
Modern kablolu köprülerde, kablo sistemi genellikle birçok tek kablonun bir araya gelerek meydana getirdiği kablolardan meydana gelmektedir. Bu kabloların birlikte çalışmalarını sağlamak için tekli kabloların çok sık aralıklarla ve çok sayıda olması gerekmektedir. Kabloların kirişe bağlandıkları noktalar arası mesafe genellikle 10-20 m arasındadır.

### 2.4. Ana Kirişin Mesnet Koşulları

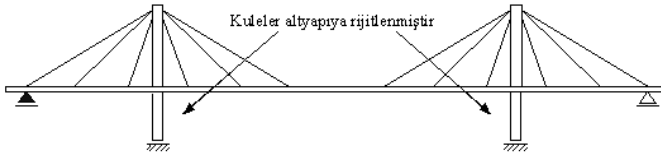
Kablolu köprülerin mesnet koşulları köprünün kendi ağırlığı ve üzerinden geçen taşıtların meydana getireceği düşey yük etkileri dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Şekil 2.5.a.'da en basit mesnetlenme koşulları görülmektedir.[17]



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.5. Tipik mesnet koşulları

(a). Mesnetlenme koşulu 1

(b). Mesnetlenme koşulu 2

(c). Mesnetlenme koşulu 3

Bazı durumlarda mesnet koşulları nedeniyle yatay yükler meydana geldiğinden köprü davranışı değişmektedir. Örneğin Şekil 2.5.b. bir sabit mesnetli ve alt yapıya rijit olarak bağlanmış kulelerden oluşmaktadır.

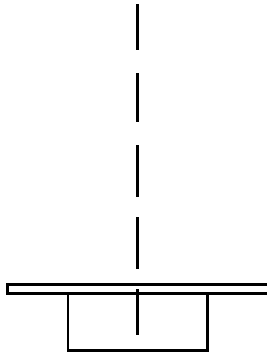
Bu sistem için, sol bitiş kablodaki sünme, kulenin de aynı yönde deplasman yapmasına, burulma ve kesme kuvvetlerinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, trafik yükleri altında hareketli mesnet yönünde bir deplasman meydana

gelmekte ve bu sağ kuleye sağ taraftaki bağlantı kabloları aracılığıyla aktarılmaktadır. Ayrıca ısıl etkilerle kirişte meydana gelen sehim kulenin tepe noktalarında deplasmana, kule ayaklarında da yatay kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Bazı kablolu köprülerde, kirişin sadece kenar ayaklarda düşey yönde kuleler üzerinde serbestçe düşey hareket etmesini sağlayacak mesnetler vardır. Bu sistemler, Şekil 2.5.c. de olduğu gibi köprünün her iki çıkışına da uzunlamasına hareketi sağlayacak mesnetler yerleştirilerek sıcaklık değişimlerinde köprü simetrisinin bozulması engellenebilir. Bu yöntemle düşey kuvvetler, fren etkileri, kulelerin eğilmesiyle zemine aktarılmaktadır. Bu sistem sadece yatay yüklerinin şiddetinin azaltılabileceği durumlarda uygulanabilir.

## 2.5 Kablo Düzlemlerinin Pozisyonları ve Kiriş Tipi

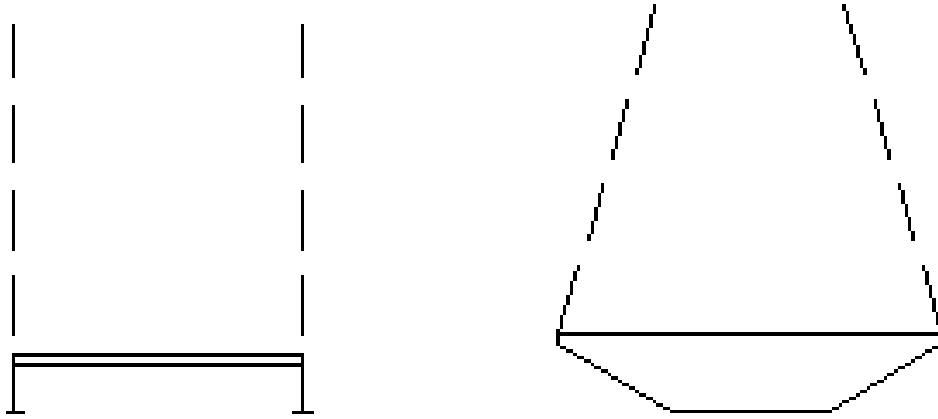
Kablolar tasarım parametrelerine göre farklı şekillerde köprü tabliyesine bağlanabilirler.



(a)

Şekil 2.6.Tabliye-kule bağlantı tipleri

- (a). Köprü ana ekseninden tabliyeye bağlantı
- (b). İki ayrı eksen den köprü tabliyesine bağlantı



(b)

Şekil 2.6. (Devam) Tabliye-kule bağlantı tipleri

(a). Köprü ana ekseninden tabliyeye bağlantı

(b). İki ayrı eksenenden köprü tabliyesine bağlantı

Şekil 2.6.a.'da görülen bir merkez çizgisinden kabloların çıktığı ve tabliyenin kenarlarına bağlandığı tasarım yönteminde sadece düşey yükler karşılanabilir, ancak burulma etkisi karşılanamaz. Burulma etkisiyle oluşabilecek momentleri karşılamak amacıyla kiriş kutu kesitli olarak dizayn edilmektedir. Şekil 2.6.b.'de kablolar doğrudan kirişin kenarlarına bağlanır ve hem düşey kuvvetler, hem de burulma kuvvetleri karşılanır. Köprü kirişi yüksek burulma rijitliğine sahiptir. Kablo bağlantılarının doğrudan köprü kirişine yapıldığı tasarımlarda kiriş kesiti I profil olarak seçilebilmektedir.

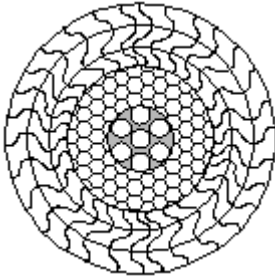
Kabloların kulenin en uç noktasında birleşmesiyle, kiriş prensip olarak her iki taraftan da eşit kablolarla desteklenmektedir. Bu durumda ayrıca bir burulma rijitliğine sahip kirişe ihtiyaç yoktur. Burulma rijitliğinin önem kazandığı çok büyük açıklıklı köprülerde kompozit bir sistem teşkil edilebilir. Bu kompozit sistemler köprü genişliğinin, köprü açıklığına oranının 1/25 ten küçük olduğu köprülerde uygulanabilir [17].

## 2.6. Köprü Elemanlarının Seçimi

### 2.6.1 Kablo elemanının seçimi

Kablolu köprülerin imalatında kullanılacak malzemelerin özel üretilmiş yüksek mukavemetli elemanlar olması gerekmektedir. Normal yapı çeliğinde maksimum 350-500 MPa mukavemet sağlanabilirken soğuk haddelenmiş 5-7 mm çapında çelik kablo tellerinde 1600 MPa kolaylıkla sağlanabilmektedir. Başka bir deyişle, kablo çeliği normal çeliğe göre 3-4 kat daha dayanıklıdır. Kablo çeliği kullanılan imalatlarda normal çeliğin %25-33 ü miktarda çelik kullanmak yeterlidir.

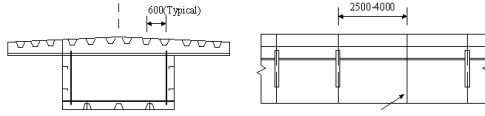
Her bir kablo çeliği 5-7 mm çapında çok sayıda çelik telin bir araya gelmesiyle oluşabileceği gibi daha iyi bir sıkışma ve yoğun bir yüzey sağlamak maksadıyla Şekil 2.7.'de özel şekilli tellerden de oluşabilir [17].



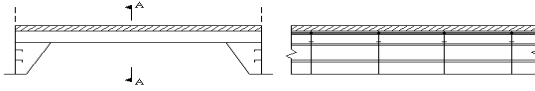
Şekil 2.7. Kablo elemanına ait bir kesit

### 2.6.2. Ana kiriş elemanının seçimi

Çelik köprülerde, ana kiriş Şekil 2.8.a.'da olduğu gibi çelik panellerden oluşmaktadır. Betonarme kirişlerde kesit Şekil 2.8.b.'de olduğu gibi teşkil edilebilir. [17].



(a).



(b)

Şekil 2.8. Tipik ana kiriş görünümleri

(a). Çelik ana kiriş kesiti

(b). Betonarme ana kiriş kesiti

### 2.6.3. Kule elemanının seçimi

Kulelerin şekli temel olarak kablo sistemiyle yakından ilgilidir, çünkü kulenin temel amacı kabloları desteklemektir. Kabloların tek merkezden çıktığı köprülerde Şekil 2.9.a.'daki gibi tek bir çubuk eleman ya da  $\Lambda$  şeklinde dizayn edilebilir. H ve I kesitli kuleler daha çok Paralel ya da Radyal sistemlerde tercih edilirken  $\Lambda$  kule yelpaze sistemde tercih edilmektedir. Kulenin yatay stabilitesinin sağlanması için köprü kirişine ya da altyapıya sabitlenmesi gerekir [17].



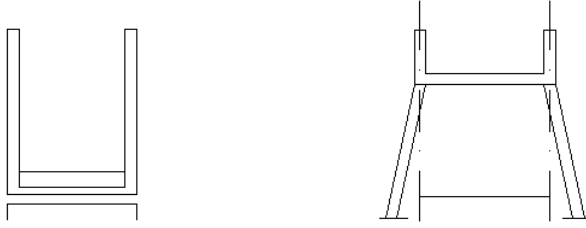
Şekil 2.9. Tipik kule kesitleri

(a). Kabloların tek merkezden çıktığı köprülerde kule kesiti

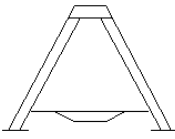
(b). İki düşey kablo düzlemine sahip köprülerde kule sistemi

(c). İki kulenin birbirine bağlandığı kule çerçeve sistemi





(b)

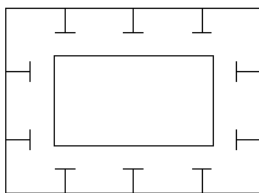


(c)

Şekil 2.9. Tipik kule kesitleri

- (a). Kabloların tek merkezden çıktığı köprülerde kule kesiti
- (b). İki düşey kablo düzlemine sahip köprülerde kule sistemi
- (c). İki kulenin birbirine bağlandığı kule çerçeve sistemi

İki düşey kablo düzlemi olan köprülerde kuleler Şekil 2.9.b.'deki gibi bağımsız iki düşey kolondan oluşabileceği gibi, aralarında yapılacak bir bağlantıyla çerçeve de oluşturabilirler. Şekil 2.9.c. zemin ve mesnet koşulları dikkate alındığında, çerçeve sistem tek bir kulenin davranışına çok yakın davranış gösterecektir. Kule kesiti genellikle tek parçalı dikdörtgen kutu kesittir. Basınç nedeniyle, kesitin dış yüzeyine Şekil 2.10.'teki uzunlamasına rijitleştirici elemanlar yerleştirilmelidir.

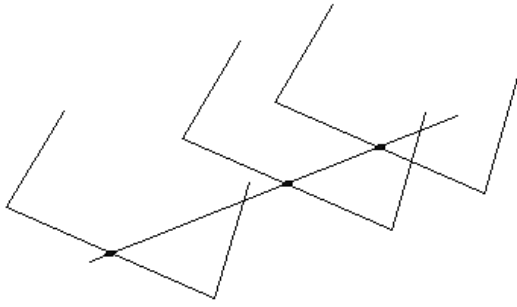


Şekil 2.10. Kule elemanına ait bir kesit

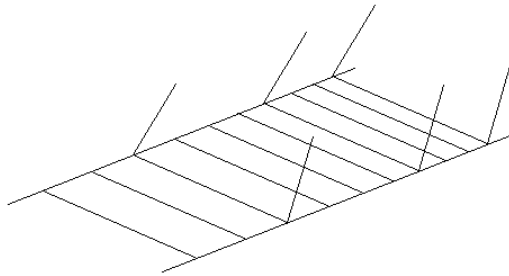
Kulenin küçük burulmalara maruz kaldığı durumlarda diyaframların rijit olmasına gerek yoktur.

Köprü kirişinde tek yönlü trafik yükleri nedeniyle oluşacak burulmaları karşılamak amacıyla, kiriş tasarımı kablo ve kule hesaba katılmadan yapılabilir. Aynı durum rüzgar yükleri içinde geçerlidir.

İki kablo düzlemi olan köprülerde matematiksel model üç boyutlu olmalıdır. İki ana kirişi olan köprülerde model Şekil 2.11.a.'daki gibi ana kirişler arasına bağlantı kirişi tanımlanarak model tamamlanmalıdır.



(a)



(b)

Şekil 2.11. Tipik bağlantı detayları

(a). Kabloların tabliyeye doğrudan bağlantı detayı

(b). Kuleden çıkan köprü tabliyesine rijit çubuklarla bağlantı detayı

Analizlerde çoğu durumlarda kablolar burulmayı karşılayan elemanlar olarak tanımlanır. Gerçekte ise kablolar kendi ağırlıkları altında sehim yaparlar. 150 m ye kadar uzunluğa sahip kablolarda sehim etkisi dikkate alınmamaktadır.

Sehim etkisi analizde hesaba dahil edilirken kabloların gerçek elastisite modülü Eş.2.1'deki gibi düzenlenerek hesaba katılabilir [17].

$$E_{\sigma q} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma^2 a^2}{24} \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right)} \quad (2.1)$$

$\gamma$ : kablo elemanının yoğunluğu

$a$ : kablonun yatay izdüşümü

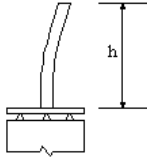
$\sigma_1$ : ölü yükten kaynaklanan gerilme

$\sigma_2$ : ölü yük + hareketli yükten kaynaklanan nihai gerilme

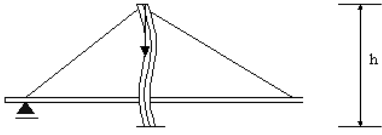
250-300 m kadar kablolar için Eş.2.1'deki sekant modülü  $\sigma_1 = \sigma_2$  kabulüyle aşağıdaki tanjant modülü ile yer değiştirebilir.

$$E_{tan} = \frac{E}{1 + \frac{\gamma^2 a^2 E}{12 \sigma_1^2}} \quad (2.2)$$

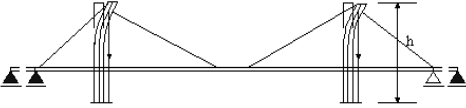
Kulede düşey elemanların davranışları son derece önemli olduğundan kolonun gerçekçi olarak tasarlanabilmesi için kule dizaynında kolonların burkulması hesaplarda dikkate alınmalıdır.



(a)



(b).



(c)

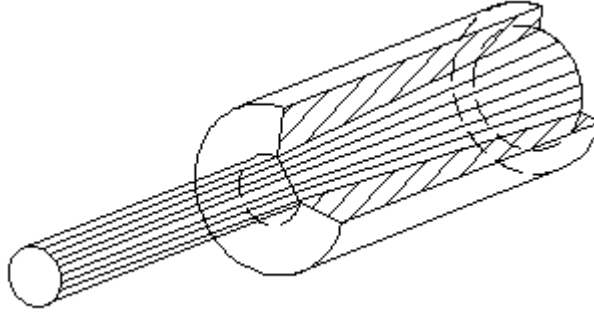
Şekil 2.12. Tipik kule deplasman profilleri

- (a). Tek kulenin deplasmanı
- (b). Kulenin yatay deplasmanı
- (c). İki kulenin birlikte deplasmanı

Şekil 2.12.a. - Şekil 2.12.c.'de farklı kule tiplerine göre deplasman profilleri gösterilmektedir.

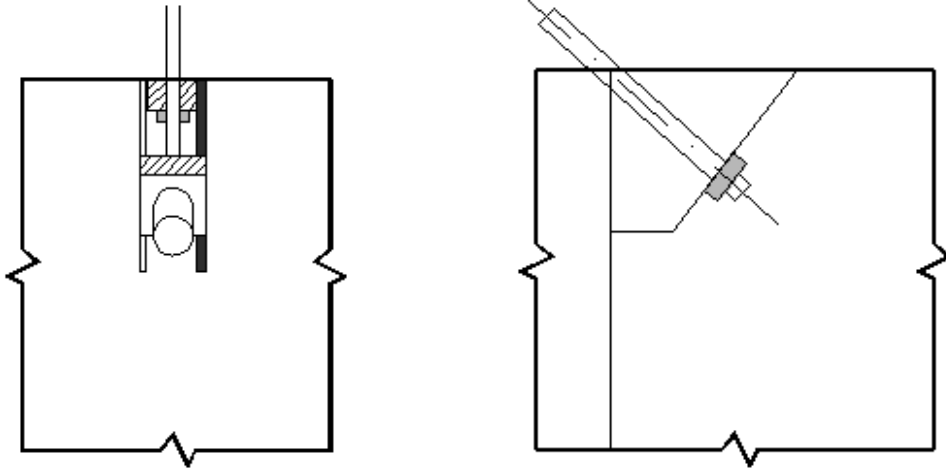
#### 2.6.4 Bağlantı elemanlarının seçimi

Kablolu köprülerde, kablo yüklerinin ana kiriş ve kuleye aktarılabilmesi için özel bağlantılara ihtiyaç vardır. Şekil 2.13.'de kablo bağlantısını sağlayan soket kesiti verilmiştir. Bu bağlantılarda ya kiriş ya da kuledeki bağlantılardan bir taraf sabitlenmeli diğer taraf buna uygun olarak tasarlanmalıdır [17].



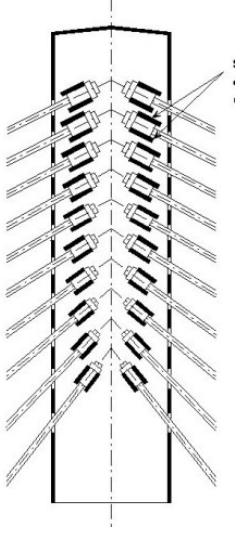
Şekil 2.13. Kablo kesiti

Kablo ankrajları yapılırken kirişten gelen hem yatay hem düşey yükler dikkate alınmalıdır. Kablolar eksantristeye neden olmayacak şekilde ankre edilmelidir. Şekil 2.14.'de bir kablo ankrajı örneklendirilmiştir.



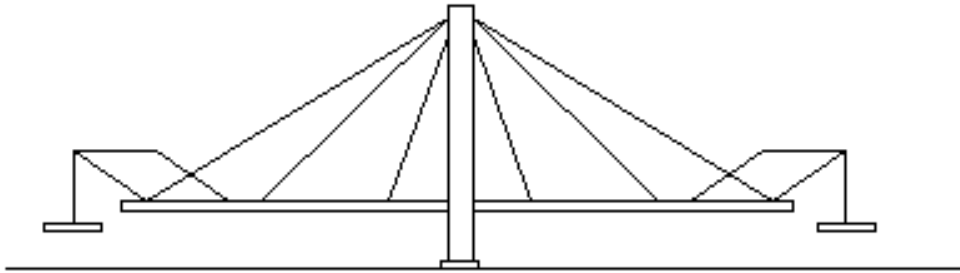
Şekil 2.14. Kablo ankraj detayı

Ankraj kulede yapılacaksa Şekil 2.15.'deki gibi uygulanacaktır.



Şekil 2.15. Ankrajların kulede yapılması durumu

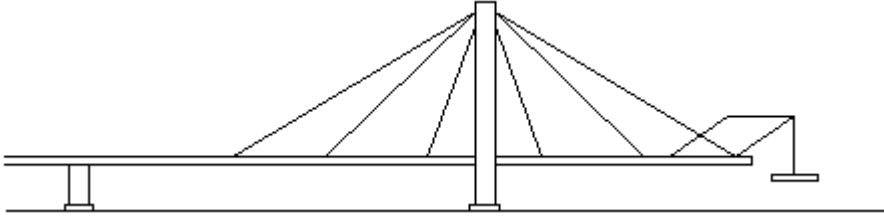
Bir kablolu köprünün başarılı sayılabilmesi için projelendirme kadar imalat da önemlidir. Kablolu köprüler dizayn edilirken ya Şekil 2.16.a.'daki dengeli konsol metodu uygulanmalıdır ya da şekil 2.16.b.'deki köprünün tek tarafı sabitlenip imalata devam edilmelidir [17].



Şekil 2.16.Kablolu köprü inşaat şekilleri

(a). Dengeli konsol yöntemiyle köprü inşaatı

(b). Köprünün tek tarafının sabitlendiği inşaat yöntemi



(b)

Şekil 2.16. (Devam) Kablolu köprü inşaat şekilleri

(a). Dengeli konsol yöntemiyle köprü inşaatı

(b). Köprünün tek tarafının sabitlendiği inşaat yöntemi

Kablolu köprüler son yirmi yılda hızlı bir gelişim göstererek Çizelge 2.1.'de görüleceği gibi 1 088 m açıklıklara kadar uygulanabilir hale gelmiştir. Çalışmaya konu olan Tatar Kablolu Köprüsü 890 m merkez açıklığı ve 1 490 m toplam açıklığıyla dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsüdür.

Çizelge 2.1. Kablo köprülerin son yıllardaki hızlı gelişimi

Sıra	Kablo köprü Adı	Ülke	Merkez açıklık	Yapım yılı
1	<u>Sutong Köprüsü</u>	Çin	1,088 m (3,570 ft)	2008
2	<u>Stonecutters Köprüsü</u> (yapım aşamasında)	<u>Hong Kong</u>	1,018 m (3,340 ft)	2009
3	<u>Tatara Köprüsü</u>	<u>Japonya</u>	890 m (2,920 ft)	1999
4	<u>Normandi Köprüsü</u>	Fransa	856 m (2,808 ft)	1995
5	<u>Nanjing Yangtze Köprüsü</u>	Çin	648 m (2,126 ft)	2005
6	<u>Nanjing Yangtze Köprüsü</u>	Çin	628 m (2,060 ft)	2001
7	<u>Baishazhou Köprüsü</u>	Çin	618 m (2,028 ft)	2000
8	<u>ChingC.M.Jiang Köprüsü</u>	Çin	605 m (1,985 ft)	2001
9	<u>Yangpu Köprüsü</u>	Çin	602 m (1,975 ft)	1993
10	<u>Xupu Köprüsü</u>	Çin	590 m (1,936 ft)	1997
11	<u>Meiko-Chuo Köprüsü</u>	Japonya	590 m (1,936 ft)	1998
12	<u>Rio-Antirio Köprüsü</u>	Yunanistan	560 m (1,837 ft) x3	2004
13	<u>Taoyaomen Köprüsü</u>	Çin	560 m (1,837 ft)	2003
14	<u>Skarnsund Köprüsü</u>	Norveç	530 m (1,739 ft)	1991
15	<u>Queshi Köprüsü</u>	Çin	518 m (1,699 ft)	1999



### 3.TAŞIT KÖPRÜ ETKİLEŞİMİ

#### 3.1. Taşıt Köprü Etkileşimi İle İlgili Çalışmalar

Taşıt köprü- etkileşimi önemi ve zorluğu nedeniyle son 150 yıldır teorik ve deneysel olarak çalışılmaktadır. Hareket eden kütlelerin probleme dahil olması ile etki kuvvetlerinin zamana ve mesafeye bağlı olması problemi zorlaştırmaktadır [17].

#### 3.2. Köprü Tasarımında Kullanılan Şartnameler

Hareketli trafik yüklerinin dinamik etkisi, ne mevcut bir köprü geliştirilirken, ne de yeni bir köprü tasarlanırken göz ardı edilebilir. Darbe faktörü genellikle köprüyle temas eden tekerleklerin dinamik etkisini hesaplarken kullanılır. Bu basit faktör hem köprüünün, hem de taşıtın karakterini içeren fiziksel ve mekanik özellikleri kapsamaktadır. AASHTO’da darbe faktörü tekerlek yükünün statik tepkisinin artışı olarak Eş. 3.1 ile tanımlanır.

$$I = \frac{50}{L+125} \quad (3.1)$$

Burada I, 0,3’ten büyük olmamalıdır. L elemanda en büyük gerilmeyi verecek parçasının uzunluğunun feet cinsinden değeridir[18].

AASHTO’nun dahil olduğu birçok köprü dizayn şartnamesi 40 yıldan beri taşıt trafiği üzerine kurulmuştur. Bu sırada trafik hacmi artmış ve taşıt konfigürasyonları hızla değişmiştir. Değişen ve gelişen trafik yükleri için mevcut şartnamelerin revize edilmesine ihtiyaç vardır [18].

Söz konusu şartnameler içinde en sık kullanılan AASHTO’dur. Kablolu köprülerin tasarımında da birçok parametre gibi taşıt yükleri de AASHTO’dan alınmaktadır. Ancak hiçbir şartnamede en kritik yüklemeleri gösteren özel kombinasyonlara yer verilmemektedir. Yalnızca taşıtlar ve özellikleri tanımlanmakta, kombinasyonların

oluşturulması; ekonomi, güvenlik, kullanılabilirlik gibi önemli özellikler dikkate alınarak köprünün modellenmesi, tasarımı gerçekleştirecek olan mühendislere bırakılmaktadır.

### **3.3. Taşıt Köprü Etkileşiminin Modellenmesi**

Bir köprü ve üzerinde hareket eden taşıt arasındaki ilişki non lineer dinamik bir problemdir. Yapılan araştırmalar taşıttan çok köprünün dinamik yada çarpma tepkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Sadece köprünün tepkilerinin modellendiği durumlarda hareket eden taşıtlar bir ya da bir grup hareketli yük olarak modellenip, köprüye etki ettirilir. Ancak, hızlı tren köprüleri gibi köprülerin modellenmesinde hem köprü hem de taşıt tepkileri tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır [18].

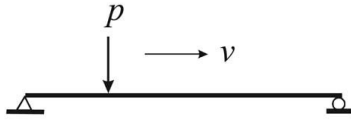
#### **3.3.1. Temel kabuller**

Köprü ile taşıt arasındaki dinamik etkileşim yapı dinamiğinde geniş yer tutmaktadır. Taşıt, genelde bir karayolu taşıtı, özelde ise bir demiryolu taşıtı olarak tanımlanabilir. Teorik yaklaşımla bu iki sistem altyapısı, köprü ve hareketli taşıtlar bazı titreşim frekanslarıyla karakterize edilen iki elastik yapı olarak düşünülebilir. Bu iki sistemin birbiriyle etkileşimi temas kuvvetleriyle sağlanmaktadır (demiryolunda tekerlerin raylara, karayolu köprülerinde tekerlerin tabliyeye temas ettiği noktalarda oluşan kuvvetler). Bu gibi problemler temas kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ve büyüklüklerinin sabit olmaması nedeniyle non lineer ve zamana bağlıdır. Bu iki sistemin birbirleriyle temas kuvvetleri aracılığıyla etkileşimi doğal frekansları ve taşıtların sürüş frekanslarıyla açıklanmaktadır. Bu gibi problemlerde “taşıt” genel bir tanımlamadır. Bu otomobil, kamyon, traktör ya da tren olabilir. Yine aynı şekilde “köprü” de genel bir tanımlamadır.

Aracın tepkisi, sonuç olarak da köprünün tepkisi modellenecekse taşıt köprü etkileşiminin hesaplarda dikkate alınması gerekmektedir. Hızlı tren köprülerinin tasarımında, hareket eden taşıtın maksimum düşey ve yatay ivmeleri trende seyahat eden yolcuların konforunun göstergesi olarak kabul edilebilir. Ayrıca, demiryolu

taşıtlarının demiryolu ile aralarında oluşan düşey ve yatay kuvvetler köprünün trafik yükleri ve deprem etkisindeki davranışı ile ilgili bilgi vermesi açısından da önemlidir.

Birçok durumda özellikle de taşıt kütlesinin köprü kütlesine oranının düşük olduğu durumlarda, daha basit modeller oluşturulabilmesi için taşıtın elastik ve ataletsel etkileri ihmal edilebilir. Tipik bir örnek, hareket halindeki bir taşıtın Şekil 3.1.'deki gibi hareketli tekil yük olarak tanımlandığı durumdur.



Şekil 3.1. Hareketli tekil yük modeli

Köprü taşıt etkileşiminin ihmal edildiği durumlarda hareketli yük modeli sadece büyük sistemin (köprü) tepkisinin hesaplanmasında kullanılabilir.

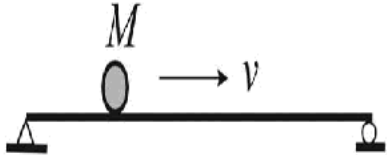
Yapı dinamiği bakış açısıyla bir demiryolu köprüsü ile karayolu köprüsü, üzerlerinden geçen taşıtların yarattığı salınımların kaynaklarının farklılığı nedeniyle birbirinden farklıdır. Bir karayolu köprüsünden geçen taşıtlar rastgeledir, karayolu trafiğini oluşturan araçların köprüde meydana getireceği etki taşıtın aks aralığı, aks açıklığı, hareket hızı, hatta yol durumuna göre değişiklik göstermektedir. Bir demiryolu köprüsünden geçen araçlar ise düzenli aralıklarla geçen ve dizi şeklinde olan araçlardır. Tren düzenli aralıklarla dizilmiş, ardı ardına geçen hareketli yükler dizisi olarak tasarlanabilir. Yüklerin tekrarlı karakteri nedeniyle hareket eden bir tren bazı doğal frekansları, ayrıca hareket hızıyla ilişkili olarak salınım frekansları içerir. Eğer bu frekanslardan biriyle, köprünün titreşim frekansları çakışırsa köprüyle hareketli kütle arasında rezonans meydana gelir ve eğer köprüden ardı ardına geçen demiryolu taşıtları mevcutsa bu durum tekrarlanır [18].

Rezonans durumunda hem köprü hem de taşıtın tepkilerinde köprünün ana açıklığında hareketli taşıtların sürüş kalitesini de etkileyecek büyük değişiklikler beklenebilir. Özellikle demiryolu köprülerinde ve büyük açıklıklı narin köprülerde tasarım aşamasında rezonans durumu engellenmelidir [19]

### 3.3.2. Taşıt modelleri

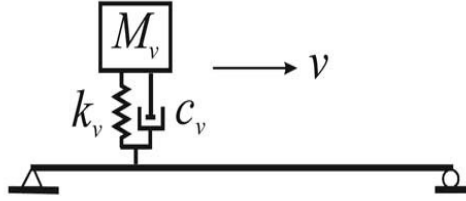
Hareketli tekil yük modeli köprü taşıt etkileşiminin modellenmesinde en basit yöntemdir. Bu modelde her ne kadar temas kuvvetleri ihmal edilse de hareketli yükler altında köprü davranışı yeterli doğrulukta elde edilebilir. Hareketli tekil yük modeli taşıt kütesinin köprü kütesine oranının çok küçük olduğu ve sadece köprü davranışının incelendiği çalışmalarda iyi bir modeldir [18].

Taşıt yükünün ihmal edilemeyeceği durumlarda “hareketli tekil yük” yerine Şekil 3.2.’deki “hareketli kütle” modeli kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Sabit hızla hareket eden kütle modeli

Yüksek hızlı taşıtların söz konusu olduğu durumlarda yüzey pürüzlülüğü ve yoldaki düzensizlikler taşıt köprü etkileşiminde önem kazanmaktadır. En basit taşıt modeli Şekil 3.3.’te görülen yay sabiti ile desteklenen hareketli kütle modelidir.



Şekil 3.3. Yay sabiti ile desteklenen hareketli kütle modeli

Ayrıca küçük yay rijitliği değerleri için hareket etkisiyle salınım modelleri hareketli kütle modeliyle benzer sonuçlar vermektedir. Günümüzde yüksek performanslı bilgisayarlar sayesinde hareketli taşıt-köprü etkileşimi ile ilgili tüm parametreler hesaplara dahil edilerek gerçek köprü davranışına en yakın sonuçlar elde edilmektedir. Geçmişte taşıt tekerleklerinin ve süspansiyon mekanizmalarının elastik etkisi yaylarla tanımlanmıştır.

Daha karmaşık taşıt modellerinin seçilmesi daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlasa da, bazı karmaşıklıklara da neden olmaktadır. Basit bir modelin seçilmesi taşıt hareketleri nedeniyle köprüde meydana gelen dinamik etkilerin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır [18].

### 3.3.3. Köprü modelleri

Taşıtların kaynaklı titreşimlerle ilgili problemlerin çözümü için kullanılan en basit model her iki ucundan mesnetli tek açıklıklı kiriş modelidir. Bu model her türlü köprü için en kullanışlı olanıdır. Modelin basit olması, tasarım aşamasında kolaylık sağlamaktadır.

Kablolu köprülerin hareketli taşıtların etkisindeki dinamik davranışı birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan araştırmalar kablolu köprülerin asma köprülere oranla hareketli yükler altında daha narin olduğunu göstermektedir. Yine bu çalışmaların sonuçları köprüdeki düzensizlikler ve yüzey pürüzlülükleri nedeniyle, hızlı hareket eden taşıtların ani fren yapmaları durumunda meydana gelen

çarpma etkisinin kulelere yakın bölgelerde daha belirgin olduğunu göstermektedir [18].

Yüzey pürüzlülüğü ve imalat sırasında oluşan hataların köprü davranışında son derece önemli olması nedeniyle yapım sırasında işçilik hatalarının en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu etkiler büyük açıklıklara sahip ve fazla trafik yükü taşıyan, narin kablolu köprülerde daha da önem kazanmaktadır [20,21]

### 3.4. Taşıt Köprü Etkileşim Problemlerinin Çözüm Metotları

Taşıt köprü etkileşimi sistemlerinin çözümünde biri köprü, diğeri de taşıt için olmak üzere iki ayrı hareket denklemi yazılabilir. Bu denklemler yazılırken her iki elemanı da ilgilendiren parametreler belirlenerek bir denklem sistemi oluşturulmalıdır. Böylece her iki denklemden birinde diğere ait parametreler yerine koyularak bir çözüme gidilebilir [21].

### 3.5. Darbe Faktörü ve Hız Parametresi

Uygulamalarda, statik hareketli yüklerden kaynaklanan kuvvet ve gerilmeler bir darbe faktörüyle artırılarak hesaplara dahil edilir, darbe faktörü  $I$ ;

$$I = \frac{R_d(x) - R_s(x)}{R_s(x)} \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $R_d(\chi)$  ve  $R_s(\chi)$  köprünün maksimum dinamik ve statik tepkileri olarak tanımlanmaktadır. Basit kirişin davranışında eğilme momenti ve kesme kuvveti etkilidir. Eş. 3.2'de verilen darbe faktörü AASHTO'da önerilen Dinamik Arttırma Faktörü (DIF) ve Dinamik Katılım Faktörü (DAF) ne göre daha oransal ve gelenekseldir. Çünkü hem maksimum dinamik hem de maksimum statik tepkiler köprünün aynı kesiti için hesaplanmaktadır. Bu tepkiler tren yükleri gibi düzenli aralıklarla geçen yükler olabileceği gibi karayollarında rastgele de olabilir. Ayrıca bu yöntemde, bulunan maksimum tepkiler bütün kirişe dağıtılmalıdır. Ancak,

hesaplara katılan darbe faktörü, köprü tasarımında tek kriter olarak değerlendirilmemelidir.

Hareketli yükler altındaki bir köprünün dinamik davranışını etkileyen, taşıtın dinamik özellikleri, köprünün dinamik özellikleri, taşıt hızı ve yüzey düzensizlikleri gibi birkaç faktör vardır. Ancak, başta AASHTO olmak üzere birçok köprü şartnamesinde darbe faktörü örneğin köprü açıklığı, ya da titreşim frekansı gibi tek bir parametreye göre bulunarak hesaplarda kullanılır [21].

$$I = \frac{50}{L+125} \leq 0,3 \quad (3.3)$$

$$I = \frac{15,24}{L+38,1} \leq 0,3 \quad (3.4)$$

Şartnamelerdeki darbe faktörleri iki farklı birim sistemine göre Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'de verilmiştir. Geçmişte yapılan hesaplar daha kısıtlı alanlarda ve daha hafif ve yavaş araçlar dikkate alınarak yapılmıştır. Günümüzde artık çok daha ağır ve hızlı araçlar mevcuttur. Yukarıda verilen eşitlikler pratik uygulamalarda kullanılmakla beraber, iki temel nedenle teorik değildirler. Birincisi, eğer darbe faktörü, köprü açıklığı boyutlu olmasına rağmen, boyutsuz bir büyüklük olarak kabul edilirse, fiziksel bir büyüklük olarak tanımlanamaz. İkincisi, köprünün açıklığı darbe faktörü için tek parametre olarak kabul edilirse, taşıt ve köprünün fiziksel özellikleriyle bağlantılı olarak değerlendirilemez. Aynı durum çok açıklıklı köprülerde de geçerlidir, çünkü farklı açıklıklar olması durumunda tek bir faktörün kullanılması doğru sonuçlar vermeyecektir. Ayrıca buradan bulunacak sonuçlar köprünün modal titreşim şekliyle bağlantılı olmayacaktır [21].

Hareketli taşıtın hızı  $V$  ve girişin karakteristik uzunluğu  $L$ , köprünün titreşim frekansı  $\pi V/L$  alınabilir. Hız parametresi  $S$ , taşıt köprü etkileşimi sisteminin dinamik tepkisini tanımlamada titreşim frekansının köprü frekansı  $\omega$  ye oranı olarak bulunabilir. Eş. 3.5.'de verilen  $S$  birimsiz bir değerdir.

$$S = \frac{\pi V}{\omega L} \quad (3.5)$$

Hız parametresi  $S$ 'nin 0,5 ten küçük olduğu sistemlerde, darbe faktörü; eğilme momentleri ve kesme kuvvetleriyle lineer olarak ilişkilendirilmektedir. Bu formüller bazı arttırma katsayılarıyla çarpılarak sürekli kirişler için de kullanılabilir.  $S$ 'nin bulunmasında köprü açıklığı dikkate alınmaktadır.

Hız parametresi hareketli taşıt yükleri ile ilgili problemlerde hesaplarda dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Köprünün statik ve dinamik davranışlarını gösteren çizimlerden anlaşılmaktadır ki köprü açıklığı veya titreşim frekansına bağlı parametrelerden çok hız parametresine bağlı hesaplar daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda DAF( Dinamik Katılım Faktörü )'ın genellikle hız parametresiyle birlikte arttığı görülmüştür. Hız parametresinin boyutsuz bir büyüklük olması hesaplara dahil edilmesini kolaylaştırmaktadır. Ancak daha öncede belirtildiği gibi tek bir parametre taşıt köprü etkileşimi problemlerinin çözümünde yeterli değildir [21].

### 3.6. Taşıt Köprü Etkileşiminde Önemli Parametreler

Law ve Zhu tarafından çok açıklıklı üniform olmayan sürekli bir köprünün dinamik davranışı, hareketli taşıtların yarattığı yükler ve yoldaki düzensizlikler dikkate alınarak incelenmiştir. Köprü yüksek rijitliğe sahip üniform olmayan yay sabitli bir Beurnoulli-Euler kirişi olarak modellenmiştir. Taşıt bu çalışmada sabit aralıklarla köprü üzerinden geçen bir grup hareketli yük olarak modellenmiştir. Nümerik laboratuvar çalışmaları tek ve iki açıklıklı köprü kirişleri üzerinde yapılmıştır. Köprü girişi tarafındaki ilk açıklıkta, diğer açıklıklarla kıyaslandığında daha küçük dinamik tepkiler gözlenmiştir. Sabit hızlı taşıtların geçişi ve taşıtın karakteristik özellikleri nedeniyle oluşan tepkiler incelenmiştir. Taşıtların fren etkisi büyük frekanslara neden olmaktadır ve bunun tam olarak irdelenebilmesi için köprüye ait çok sayıda titreşim moduna ihtiyaç duyulmaktadır. Bir açıklıktaki fren etkisi diğer açıklıklarında



davranışını etkileyebilecekken, asıl dikkate alınması gereken fren etkilerinin oluştuğu açıklıktaki çarpma etkisinin doğru olarak belirlenmesidir.

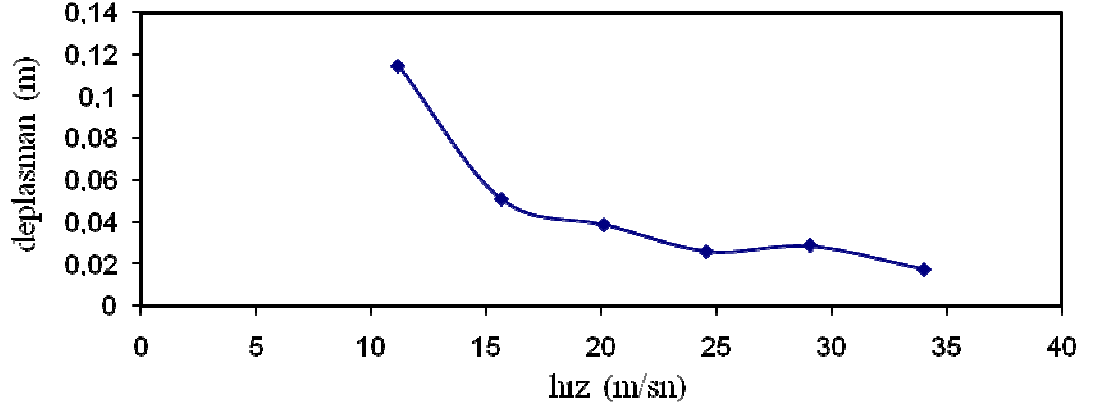
Taşıtın deplasmanı  $y_m$  ve köprünün deplasmanı  $y_b$  bir çok faktörden etkilenmektedir. Köprü faktörlerinden köprü açıklığı ( $B_S$ ) ve köprü sönüm katsayısı ( $\xi$ ) ile tekerlek faktörlerinden tekerlek ağırlığı ( $w_w$ ), tekerlek rijitlik katsayısı ( $k_w$ ), tekerlek sönüm katsayısı ( $c_w$ ) ve hareket hızı ( $v_s$ ) hem taşıtın hem de köprünün deplasmanını etkilemektedir. Ayrıca taşıtın köprü üzerinden geçiş süresi de deplasmanlarda etkilidir [22].

### 3.6.1. Hareketli taşıtların hızlarının etkisi

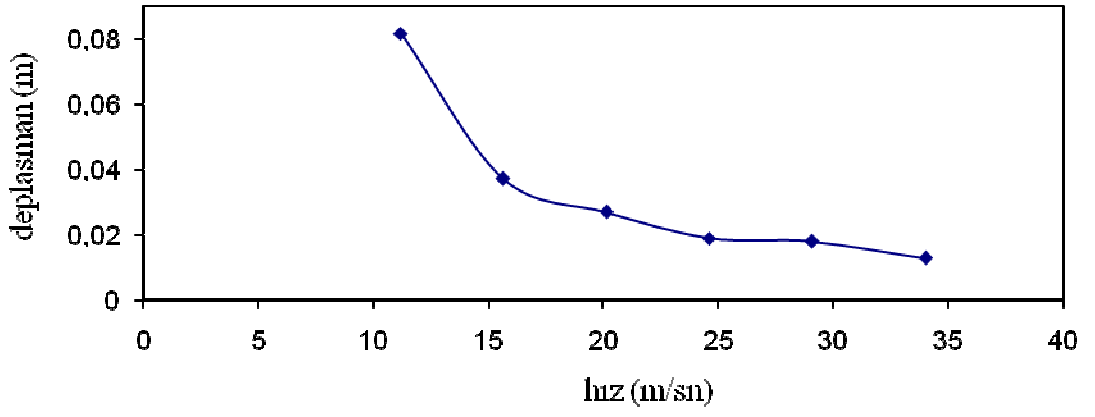
Çizelge 3.1.'de taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile hıza ( $P_w$ ) bağlı etkileşimi görülmektedir. Hareketli yüklerin hızlarının taşıt deplasmanı üzerindeki etkisi Şekil 3.4.'de görülmektedir. Şekil 3.5.'te ise taşıt hızındaki değişimlerin köprü deplasmanı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Her iki şekil irdelendiğinde hızın artışıyla taşıt ve köprünün deplasmanlarında azalma meydana gelmektedir. Hız parametresi bu çalışmanın konusu olduğundan, sonraki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir [22].

Çizelge 3.1. Taşıt ve köprü deplasmanlarının taşıt hızına bağlı etkileşimi

hız, m/sn	$y_w$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , kN
11	0,1146597	0,08148218	57
16	0,05120945	0,03709477	42
20	0,03879799	0,02675352	38
25	0,02602687	0,01873057	35
29	0,02874264	0,01776405	36
34	0,01741018	0,01271595	32



Şekil 3.4. Taşıtın hız değişimine bağlı maksimum deplasmanları



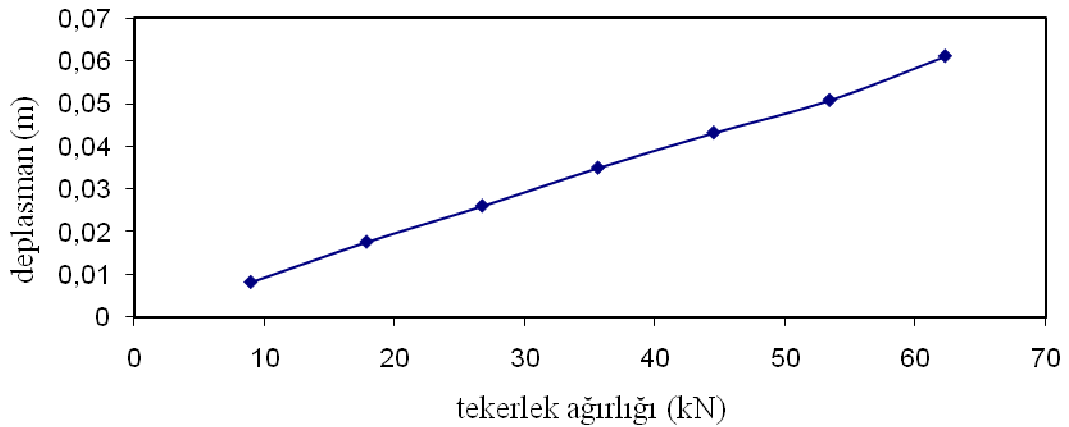
Şekil 3.5. Köprünün hız değişimine bağlı maksimum deplasmanları

### 3.6.2. Tekerlek ağırlığının etkisi

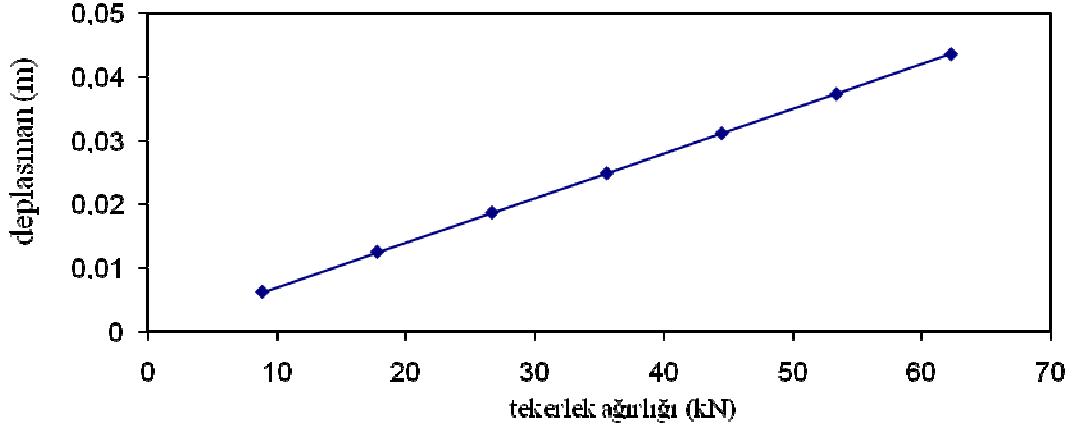
Çizelge 3.2. hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile tekerlek ağırlığına ( $w_w$ ) bağlı etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Şekil 3.6.'da hareketli yük ve köprü deplasmanının taşıt tekerleklerinin artışıyla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Yine Şekil 3.7.'de köprü deplasmanında ve etkileşim kuvvetlerinde taşıt tekerleklerinin ağırlıklarının artışıyla lineer olarak artış gösterdiği anlaşılmaktadır [22].

Çizelge 3.2. Köprü ve taşıt deplasmanlarının tekerlek ağırlığına bağlı etkileşimi

$W_w$ , kN	$y_m$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , kN
8,9	0,0082	0,0062	11,557
17,8	0,0176	0,0125	23,114
26,7	0,026	0,0187	34,673
35,6	0,0349	0,0249	46,23
44,5	0,0431	0,0312	57,823
53,4	0,0507	0,0374	69,343
62,3	0,061	0,0437	80,904



Şekil 3.6. Taşıtın tekerlek ağırlığına bağlı maksimum deplasmanları



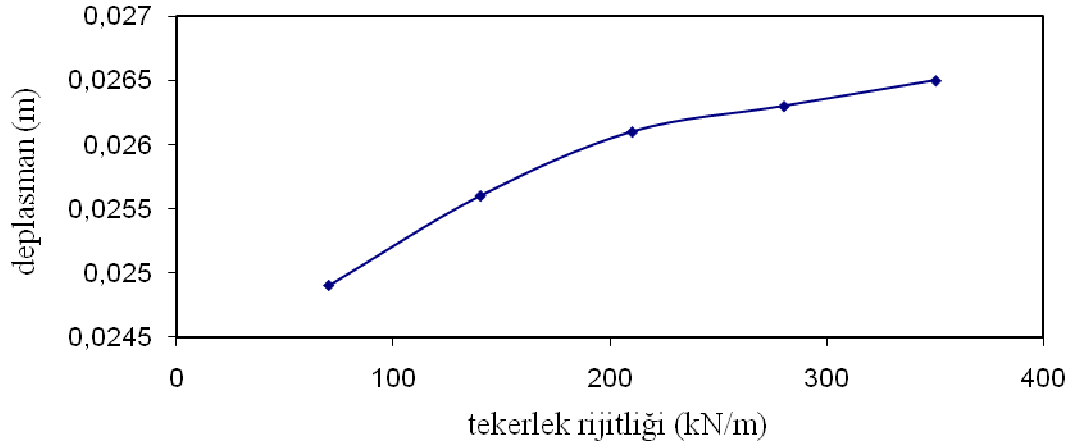
Şekil 3.7. Köprünün tekerlek ağırlığına bağlı maksimum deplasmanları

### 3.6.3. Tekerlek rijitliğinin etkisi

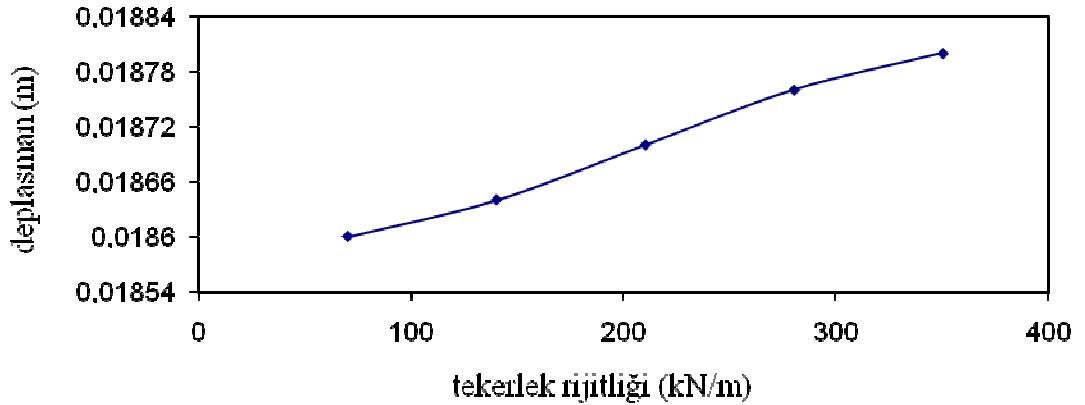
Çizelge 3.4. hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile tekerlek rijitliğine ( $k_w$ )'ye bağlı etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Taşıt deplasmanları taşıt tekerlek rijitlik katsayısıyla non lineer olarak değişmektedir. Bu ilişki hesaplara taşıt hızı ve ivmelerin de katılmasıyla daha karışık hale gelmektedir. Şekil 3.8. köprü deplasmanının tekerlek rijitlik katsayısıyla lineer olarak arttığını göstermektedir. Yine Şekil 3.9. etkileşim kuvvetlerinin rijitlik katsayısıyla lineer olarak arttığını göstermektedir [22].

Çizelge 3.3. Taşıt ve köprü deplasmanlarının tekerlek rijitliğine bağlı etkileşimi

$k_w$ , kN/m	$y_m$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , KN
70,048	0,0249	0,0186	32,055
140,096	0,0256	0,01864	33,361
210,144	0,0261	0,0187	34,672
280,192	0,0263	0,01876	35,987
350,24	0,0265	0,0188	37,308



Şekil 3.8. Taşıtın tekerlek rijitliğine bağlı maksimum deplasmanları



Şekil 3.9. Köprünün tekerlek rijitliğine bağlı maksimum deplasmanları

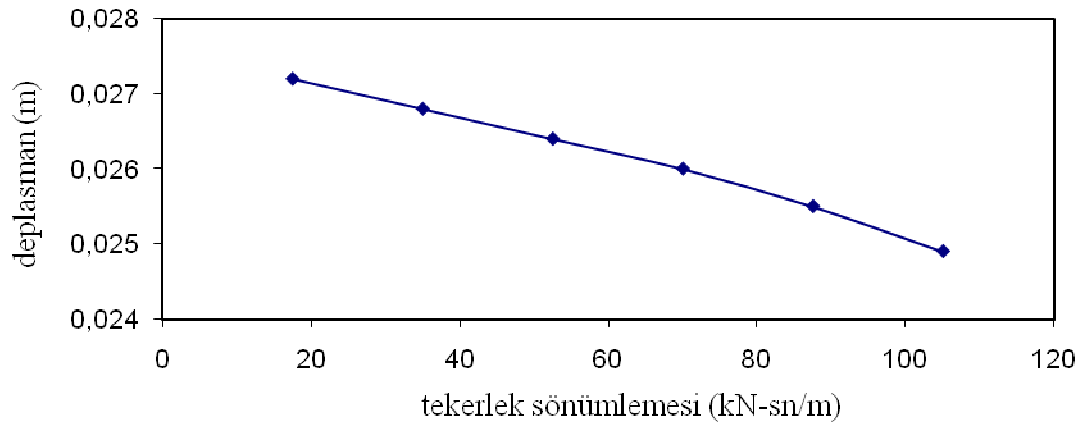
### 3.6.4. Tekerlek sönümlemesinin etkisi

Çizelge 3.4. hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile tekerlek sönümü ( $c_w$ )'ye bağlı etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Şekil 3.10. hareketli taşıt deplasmanının tekerlek sönüm katsayısının artışıyla non lineer olarak değiştiğini göstermektedir. Şekil 3.11 köprü deplasmanının tekerlek sönüm katsayısıyla lineer olarak arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, taşıt sönüm katsayısı ve etkileşim

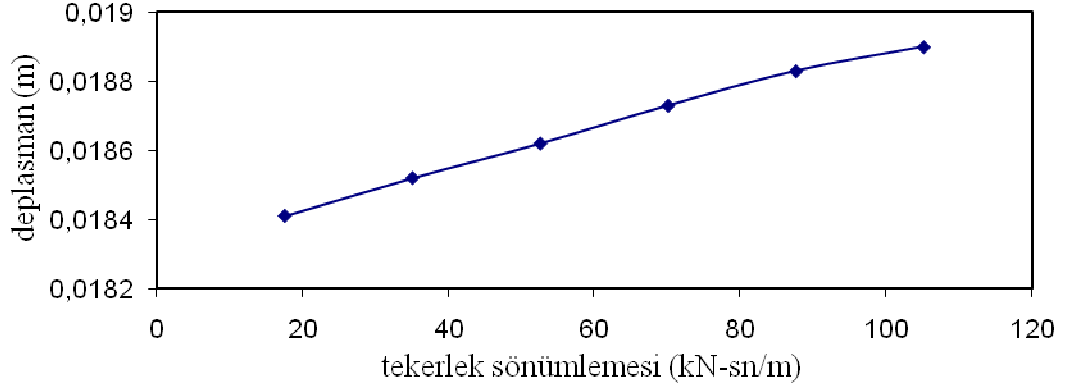
kuvvetleri linear olarak değişmektedir. Şekil 3.12. maksimum köprü ortası deplasmanını göstermektedir [22].

Çizelge 3.4. Taşıt ve köprü deplasmanlarının tekerlek sönümlemesine bağlı etkileşimi

$c_w$ , kN-sn/m	$y_m$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , kN
17,512	0,0272	0,01841	31,563
35,024	0,0268	0,01852	32,595
52,536	0,0264	0,01862	33,632
70,048	0,026	0,01873	34,672
85,600	0,0255	0,01883	35,716
105,072	0,0249	0,0189	36,762



Şekil 3.10. Taşıtın, tekerlek sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı



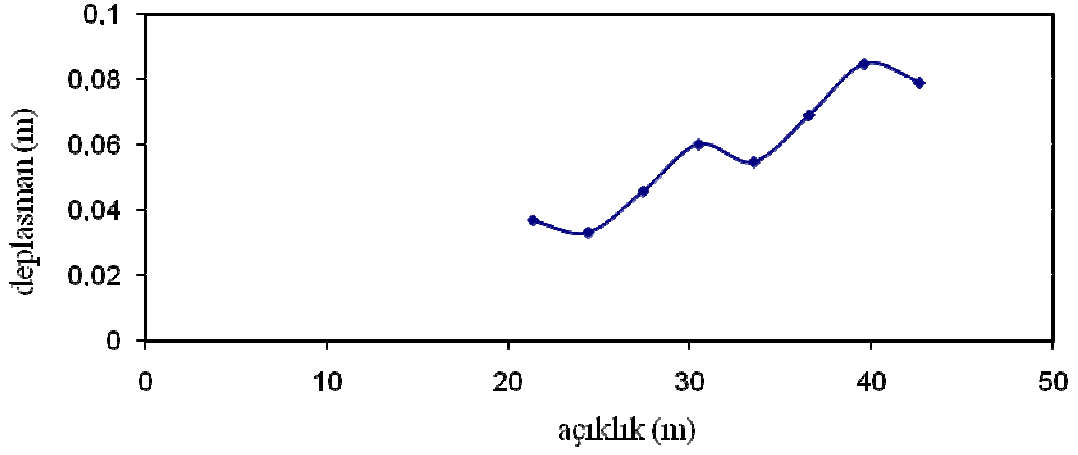
Şekil 3.11. Köprünün, tekerlek sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı

### 3.6.5. Köprü açıklığının etkisi

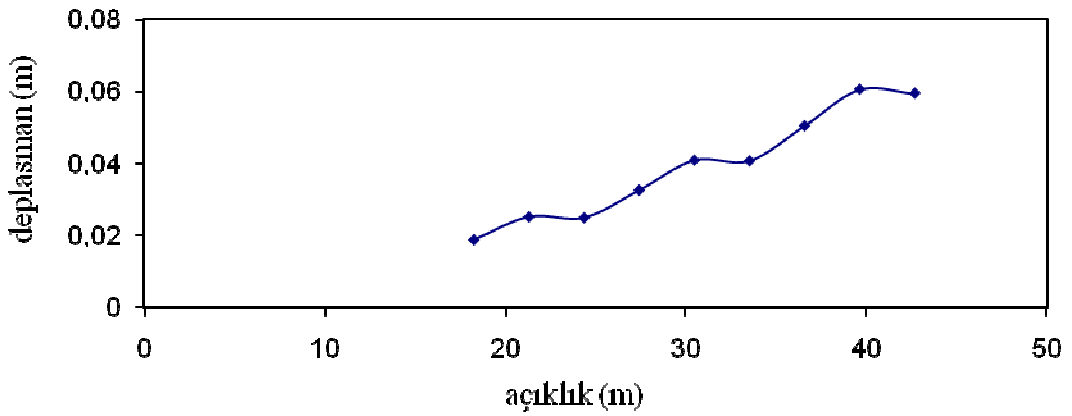
Çizelge 3.5. hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile köprü açıklığına bağlı etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Köprü ve taşıtın deplasmanı köprü açıklığının artışıyla lineer olarak artmaktadır. Bu ilişki taşıtın köprü üzerinde yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Maksimum deplasmanlar köprünün farklı açıklıklarında oluşabilir. Şekil 3.13.'de köprü açıklığının artışıyla etkileşim kuvvetlerinin ve köprü deplasmanının da arttığı görülmektedir [22].

Çizelge 3.5. Taşıt ve köprünün deplasmanlarının köprü açıklığına bağlı etkileşimi

açıklık, m	$y_m$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , kN
18,288	0,02603	0,01873	34,6725
21,336	0,03703	0,0251	37
24,384	0,03329	0,02484	37
27,432	0,04586	0,0325	39,9824
30,48	0,06021	0,0408	43,1638
33,528	0,05482	0,0406	42,9009
36,576	0,06907	0,0503	46,1014
39,624	0,08474	0,0604	49,4064
42,672	0,079	0,0593	48,4456



Şekil 3.12. Taşıtın köprü açıklığına bağlı maksimum deplasmanı



Şekil 3.13. Köprünün açıklığına bağlı deplasmanı

### 3.6.6. Köprü sönümlemesinin etkisi

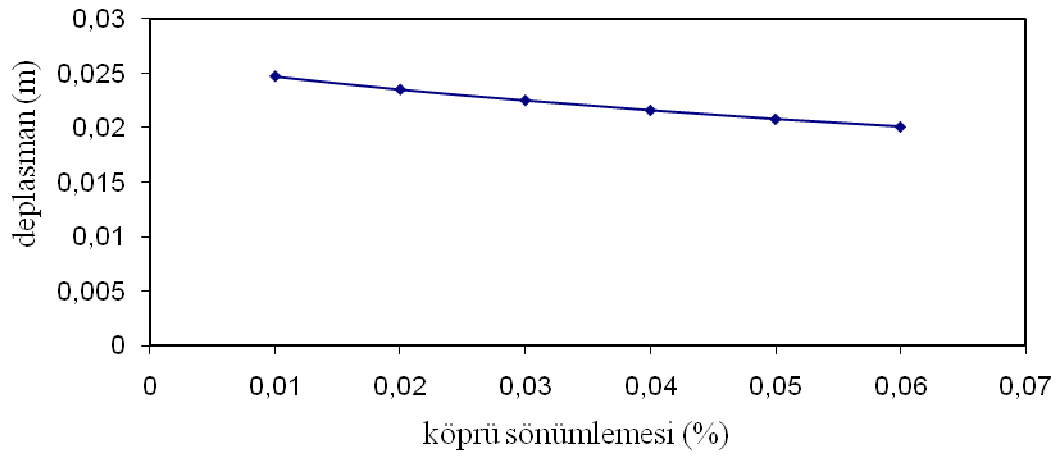
Çizelge 3.6. hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile köprü sönümlemesine ( $\xi$ ) bağlı etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Şekil 3.14. ve 3.15'te köprü sönüm katsayısının artışıyla taşıt ve köprü deplasmanlarının nonlineer olarak azaldığı görülmektedir. Yine etkileşim kuvvetleri de köprü sönümüyle non lineer



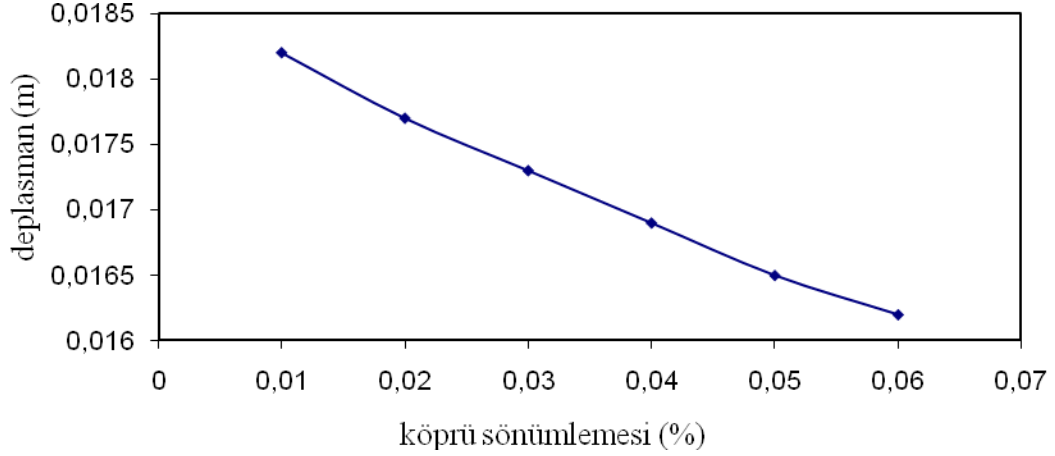
olarak değişmektedir. Büyük sönüm katsayısına sahip köprüler dinamik etkileşim kuvvetleri nedeniyle oluşan titreşimi daha fazla absorbe ederler. Bu sönümlenmeler köprü deplasmanını da küçültmektedirler [22].

Çizelge 3.6. Taşıt ve köprü deplasmanlarının köprü sönümlemesine bağlı etkileşimi

% , $\xi$	$y_w$ , m	$y_b$ , m	$P_w$ , kN
0,01	0,0247	0,0182	34,86
0,02	0,0235	0,0177	33,72
0,03	0,0225	0,0173	33,34
0,04	0,0216	0,0169	32,99
0,05	0,0208	0,0165	32,70
0,06	0,0201	0,0162	32,60



Şekil 3.14. Taşıtın köprü sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı



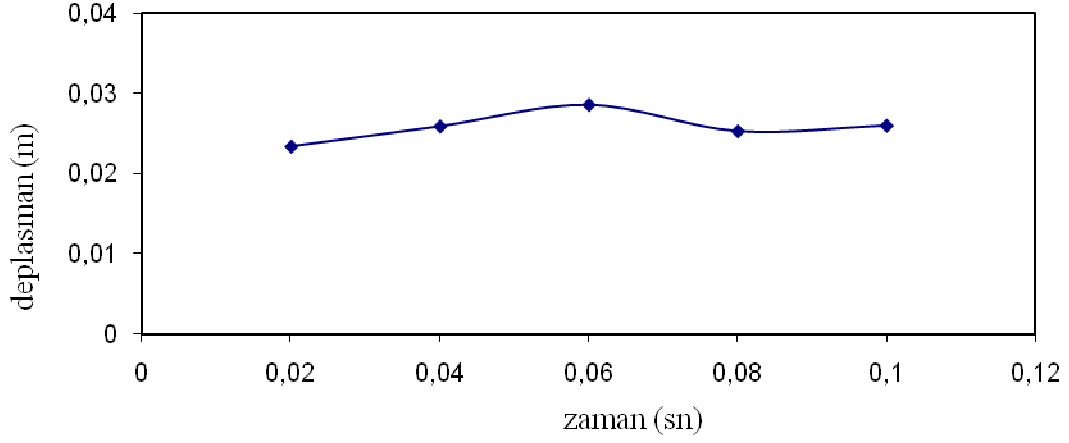
Şekil 3.15. Köprünün köprü sönümlemesine bağlı maksimum deplasmanı

### 3.6.7. Zaman değişiminin etkisi

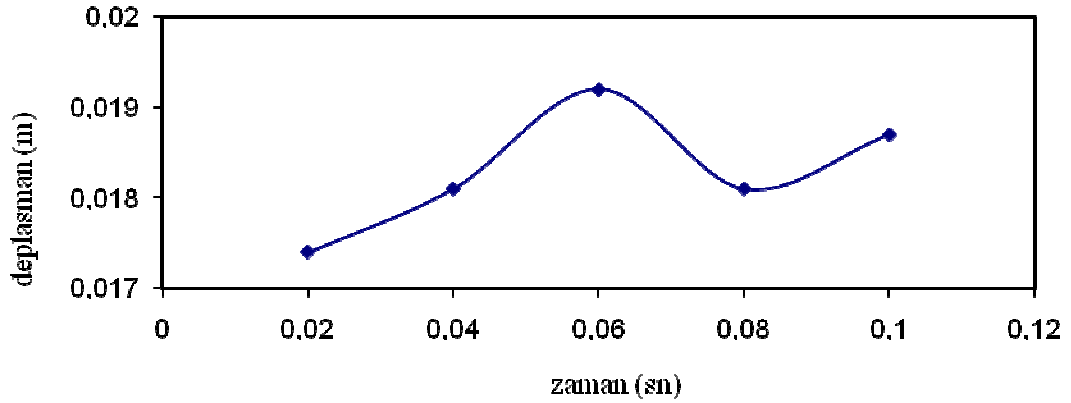
Çizelge 3.7 zaman değişiminin hareketli taşıt deplasmanı ( $y_m$ ) ve köprü deplasmanı ( $y_b$ ) ile etkileşim kuvvetlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 3.16. ve 3.17. birlikte incelendiğinde zaman değişiminin köprü ve taşıt deplasmanı ile etkileşim kuvvetlerinin üzerinde neredeyse hiç etkisinin olmadığı görülmektedir.

Çizelge 3.7. Taşıt ve köprü deplasmanlarının zaman değişimine bağlı etkileşimi

H, saniye	$y_m$ ,m	$y_b$ ,m	Pw,kN
0,02	0,0234	0,0174	38,1
0,04	0,0259	0,0181	37,9
0,06	0,0286	0,0192	40,0
0,08	0,0253	0,0181	35,8
0,1	0,026	0,0187	35,4



Şekil 3.16. Taşıtın zaman değişimine bağlı maksimum deplasmanı



Şekil 3.17. Köprünün zaman değişimine bağlı maksimum deplasmanı

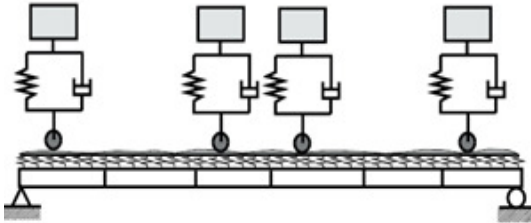
### 3.7. Taşıt Köprü Dinamik Etkileşim Sisteminin Matematik Modeli

Son yirmi yılda dünyada hızlı taşıtların ve büyük açıklıklı köprülerin artışıyla birlikte taşıt köprü etkileşimi kaynaklı köprü dinamik davranışının irdelenmesi önem kazanmıştır. Taşıtın hareketli yük, hareketli kütle veya hareketli yaylı kütle olarak tanımlandığı birçok modelle taşıt köprü etkileşimi incelenmiştir.

Taşıt köprü sisteminin dinamik tepkisi araştırılırken, birincisi köprü ikincisi de taşıt için olmak üzere iki hareket denklemi yazılabilir. Taşıt ve köprünün temas ettiği noktalarda yazılan hareket denklemleri birbiriyle bağlantılı ve non lineerdir. Etkileşim kuvvetlerinin zamana ve mesafeye bağlı olması nedeniyle, temas kuvvetlerinin fonksiyonu olan sistem matrisleri her zaman dilimi için zaman-tanım alanında analizlerle güncellenmeli ve çarpanlarla arttırılmalıdır. Taşıt köprü etkileşim problemlerinin çözümünde öncelikle temas noktalarındaki deplasmanlar için kabuller yapıp, temas kuvvetlerini elde etmek için taşıt hareket denklemleri çözülmelidir. Bulunan temas kuvvetlerinin köprü denklemlerinde yerine konulmasıyla düzeltilmiş temas noktası deplasmanları elde edilebilir [18].

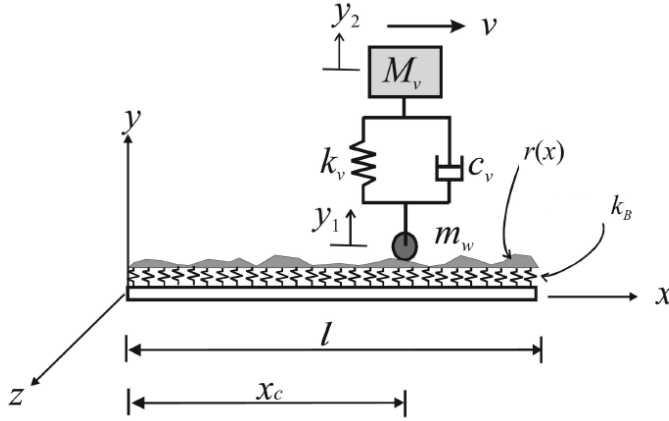
### 3.7.1. Taşıt ve köprü için hareket denklemleri

Hareket denklemi oluşturulurken köprü Şekil 3.18'deki gibi kiriş yapısı olarak ve köprü üzerinden geçen taşıt, sabit  $v$  hızı ile hareket eden hareketli kütle dizisi olarak tanımlanmaktadır [18].



Şekil 3.18. Hareketli kütle serisi modeli

Etkileşim elemanı Şekil 3.19.'da tanımlanmıştır.



Şekil 3.19. Köprü taşıt etkileşim elemanının analitik modeli

Burada  $r(x)$  yüzey düzensizliklerini,  $k_b$  köprü kirişi rijitliklerini ifade etmektedir. Denklem oluşturulurken kiriş elemanının rijitliği, köprü ve taşıtın toplam rijitliğini ifade etmektedir. Başka deyişle, taşıt için ayrıca bir rijitlik düşünülmemektedir. Denklemlerde,  $[ ]$  kare matrisi,  $\{ \}$  kolon vektörünü,  $\langle \rangle$  dizi elemanını,  $(k_v)$  rijitlik katsayısını,  $(C_v)$  sönümlenme katsayısını,  $(m_w)$  tekerlek kütlelerini,  $(M_v)$  taşıttan gelen kütle ( bu değer taşıt kütlelerini yarısı olarak kabul edilecektir ) sembolize etmektedir. Yayılı kütle modeli iki düğüm noktalı sistem olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, iki düğüm noktası statik denge durumundaki deplasmanlarının koordinatları  $\{z\}^T = \langle z_1, z_2 \rangle$  şeklinde tanımlanmaktadır. Noktasal deplasmanlara  $\{z\}^T$  bağlı olarak dış kuvvetler  $\{P_v\}^T = \langle P, 0 \rangle$  ifadesiyle tanımlanırken,  $P$  iki kütleli toplam ağırlığını göstermektedir.  $P = -(M_v + m_w)g$  olup,  $g$  burada yerçekimi ivmesidir. Sistemin hareket denklemi (Bkz.Şekil 3.17) aşağıdaki gibidir;

$$\begin{bmatrix} m_w & 0 \\ 0 & M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_v & -C_v \\ -C_v & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P + f_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Burada  $f_c$  taşıt ve köprü elemanı arasındaki temas kuvvetidir.  $x_c$  taşıtın yer değiştirme mesafesidir.  $\{N_c\}$  temas noktasında köprü düşey deplasmanını belirlemek amacıyla

kübik Hermitian interpolasyon fonksiyonlarını içeren bir vektördür.  $\{N_c\} = \{N(x_c)\}$ .

Temas kuvveti  $f_c$  ;

$$f_c = k_b(\langle N_c \rangle \{U_b\} + r_c - z_1) \geq 0 \quad (3.6)$$

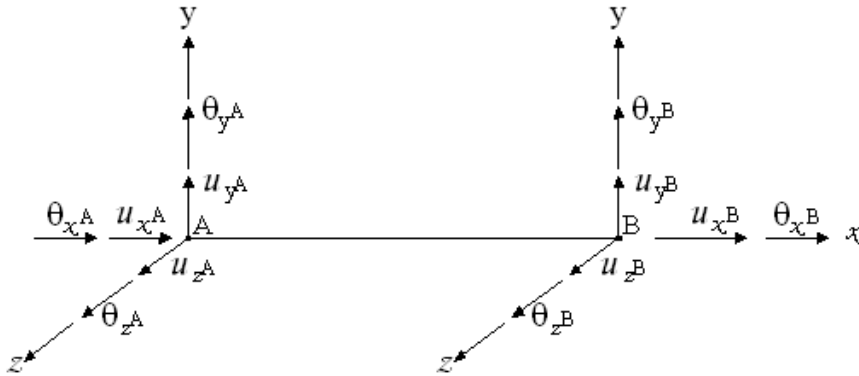
olarak ifade edilmektedir. Burada  $k_b$  köprü kirişi rijitliği,  $r_c$ ,  $x_c$  noktasındaki yüzey düzensizliğini ifade etmektedir. Yaylı kütle ile etkileşim halindeki bir köprü elemanının hareket denklemleri şu şekildedir;

$$[m_b] \{\ddot{U}_b\} + [c_b] \{\dot{U}_b\} + [k_b] \{U_b\} = \{P_b\} - \{N_c\} f_c \quad (3.7)$$

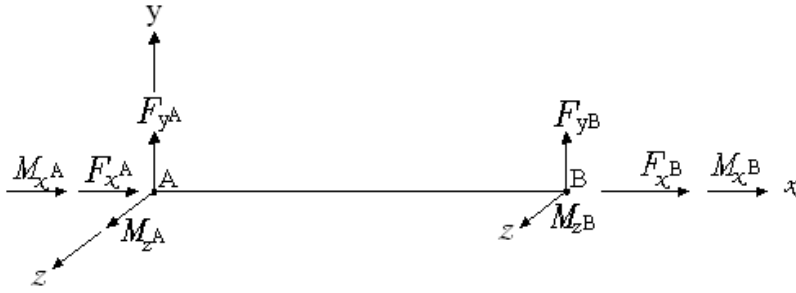
$$f_c = -p + m_w \ddot{z}_1 + M_v \ddot{z}_2 \quad (3.8)$$

Burada  $[m_b]$  köprü elemanının kütle matrisi,  $[c_b]$  köprü elemanının sönümleme matrisi,  $[k_b]$  köprü elemanının rijitlik matrisidir.  $\{P_b\}$  köprü üzerinde hareket eden dış noktasal kuvvetleri temsil etmektedir. Köprü elemanı üç boyutlu kiriş elemanı olarak kabul edilecek olursa, elemanın her düğüm noktası için üçü deplasman, diğer üçü de dönme için olmak üzere altı serbestlik derecesi tanımlanabilir [18].

### 3.7.2. Kiriş elemanı için hareket denklemleri



Şekil 3.20. Kiriş elemanına ait serbestlik dereceleri [18].



Şekil 3.21 Kiriş elemanına ait moment ve kuvvet dağılımları [18].

Şekil 3.20 ve 3.21’de etkileşim elemanının serbestlik dereceleri, kuvvet ve moment dağılımları görülmektedir.

$$[m_b] \{\ddot{U}_b\} + [c_b] \{\dot{U}_b\} + [k_b] \{U_b\} = \{0\} \quad (3.9)$$

### 3.7.3. $t + \Delta t$ anındaki hareket denklemleri

Eş. 3.5 ve Eş. 3.6 taşıt ve köprü arasında meydana gelen temas kuvvetleri nedeniyle birbirleriyle bağlantılı, non lineer ve zamana bağlıdır.

$t + \Delta t$  anında yazılabilecek hareket denklemleri;

$$\{z\}_{t+\Delta t} = \{z\}_t + \{\Delta z\} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_w & 0 \\ 0 & M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} C_v & -C_v \\ -C_v & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} kv+k_b & -kv \\ -kv & kv \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \\ & = \begin{Bmatrix} p + k_b(\langle N_c \rangle \{U_b\} + r_c) \\ 0 \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} - \begin{Bmatrix} q_{s1} \\ q_{s2} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$\{q_s\}_t$  yaylı kütlelerin iç dirençlerini ifade etmektedir.

$$\begin{Bmatrix} q_{s1} \\ q_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} kv + kb & -kv \\ -kv & kv \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix}_t \quad (3.12)$$

$t + \Delta t$  anındaki köprü deplasmanları;

$$\{U_b\}_{t + \Delta t} = \{U_b\}_t + \{\Delta U_b\} \quad (3.13)$$

Eş. 3.6. ve Eş. 3.13'in birlikte çözülmesiyle  $t + \Delta t$  anındaki köprü hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [18];

$$\begin{aligned} & [m_b] \{\ddot{U}_b\}_{t + \Delta t} + [c_b] \{\dot{U}_b\}_{t + \Delta t} + [[kb] + kb\{Nc\}\langle Nc \rangle] \{\Delta U_b\} \\ & = \{Pb\}_{t + \Delta t} - \{Nc\}k_b(rc - z_1)_{t + \Delta t} - [[kb] + kb\{Nc\}\langle Nc \rangle] \{\Delta U_b\}_t \end{aligned} \quad (3.14)$$

#### 3.7.4. Taşıtlar için eşdeğer rijitlik denklemi

Eş. 3.11. ve Eş. 3.14. denklemlerinin birlikte irdelenmesi durumunda anlaşılacağı gibi taşıt ve köprü denklemleri birbiriyle bağlantılıdır. Burada öncelikle Newmark tek adımlı sonlu farklar kuramı kullanılarak eşdeğer rijitlik denklemine dönüştürülecektir. Eşdeğer rijitlik denkleminde yaylı kütlelerin deplasmanları bulunup köprü denkleminde yerine koyulacaktır. Bu şekilde, taşıtın serbestlik derecesi ihmal edilerek yalnızca köprü üzerine yoğunlaşılacaktır [18].

Newmark  $\beta$  metoduna göre  $\beta = 0,25$  ve  $\gamma = 0,5$

$$\begin{aligned} \{\dot{z}\}_{t + \Delta t} &= \{\dot{z}\}_t + \{(1 - \gamma)\{\ddot{z}\}_t + \gamma\{\ddot{z}\}_{t + \Delta t}\}\Delta t, \\ \{z\}_{t + \Delta t} &= \{z\}_t + \{\dot{z}\}_t \Delta t + \{(0,5 - \beta)\{\ddot{z}\}_t + \beta\{\ddot{z}\}_{t + \Delta t}\}\Delta t^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

$t + \Delta t$  anındaki ivme ve hızlar şu şekilde bulunabilir;



$$\{\ddot{z}\}_{t+\Delta t} = a_0\{\Delta z\} - a_2\{\dot{z}\}_t - a_3\{\ddot{z}\}_t,$$

$$\{\dot{z}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{z}\}_t + a_6\{\ddot{z}\}_t + a_7\{\ddot{z}\}_{t+\Delta t} \quad (3.16)$$

Burada;

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\beta\Delta t^2}, & a_1 &= \frac{\gamma}{\beta\Delta t}, & a_2 &= \frac{1}{\beta\Delta t}, \\ a_3 &= \frac{1}{2\beta} - 1, & a_4 &= \frac{\gamma}{\beta} - 1, & a_5 &= \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\gamma}{\beta} - 2 \right), \\ a_6 &= \Delta t(1 - \gamma), & a_7 &= \gamma\Delta t. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Taşıt ivmeleri ve hızları için Eş. 3.16. ve yaylı kütle denklemleri Eş. 3.11. eşdeğer rijitlik denklemini elde etmek için kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} k_v + k_b + a_0 m_w + a_1 c_v & -k_v - a_1 c_v \\ -k_v - a_1 c_v & k_v + a_0 M_v + a_1 c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} p + k_{Br}c + k_b \langle N_c \rangle \{U_b\} \\ 0 \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} - \left( \begin{Bmatrix} qs_1 \\ qs_2 \end{Bmatrix}_t + \begin{Bmatrix} qe_1 \\ qe_2 \end{Bmatrix}_t \right), \end{aligned} \quad (3.18)$$

Burada;

$$\left. \begin{aligned} q_{s1,t} &= -m_w (a_2 \dot{z}_1 + a_3 \ddot{z}_1) - c_v [a_4 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + a_5 (\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2)], \\ q_{s2,t} &= -M_v (a_2 \dot{z}_2 + a_3 \ddot{z}_2) - c_v [a_4 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + a_5 (\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1)]. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Deplasman değişimi  $\Delta z_1$  ve  $\Delta z_2$ , köprünün  $\{u_b\}_{t+\Delta t}$  anındaki deplasmanlarına bağlı olarak bulunabilir.

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{Bmatrix} \\ & = -\frac{1}{D} \begin{Bmatrix} k_v + a_0 M_v + a_1 c_v \\ k_v + a_1 c_v \end{Bmatrix} (p + k_B r_{c,t+\Delta t} + k_B (N_c) \{u_b\}_{t+\Delta t}) \\ & = -\frac{1}{D} \begin{Bmatrix} (q_{s1,t} + q_{s1,t}) a_0 M_v + (\tilde{q}_{s,t} + \tilde{q}_{s,t}) (k_v + a_1 c_v) \\ (q_{s1,t} + q_{s1,t}) (a_0 m_w + k_b) + (\tilde{q}_{s,t} + \tilde{q}_{s,t}) (k_v + a_1 c_v) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$D$ , Eş. 3.19.'da taşıt denklemlerinin determinantını ifade etmektedir.

$$\begin{vmatrix} k_v + k_b + a_0 m_w + a_1 c_v & -k_v - a_1 c_v \\ -k_v - a_1 c_v & k_v + a_0 M_v + a_1 c_v \end{vmatrix} \quad (3.21)$$

ve

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{s,t} &= (q_{s1} + q_{s2})_t \\ \tilde{q}_{s,t} &= (q_{s1} + q_{s2})_t = k_B z_{1,t} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Taşıt köprü etkileşiminin rijitlik denkleminin oluşturulmasında da Newmark  $\beta$  metodu uygulanabildiğinden etkileşim sisteminin çözümü de kolaylaşacaktır.

### 3.7.5. Taşıt köprü etkileşim elemanı

Eş. 3.20. denkleminin ilk satırı kullanılacak olursa  $z_1, \mathbf{t} + \Delta \mathbf{t} = z_1, t + \Delta z_1, \Delta z_1$  için Eş. 2.14.  $\mathbf{t} + \Delta \mathbf{t}$  anındaki yaylı kütlelerin etkileşim kuvvetleri de hesaplara dahil edilerek, taşıt köprü etkileşim sistemi için hareket denklemi;

$$\begin{aligned} & [m_b]\{\ddot{u}_b\}_{t+\Delta t} + [c_b]\{\dot{u}_b\}_{t+\Delta t} + [\hat{k}_b]\{\Delta u_b\} \\ & = (\{p_b\}_{t+\Delta t} + \{p_w\}_{t+\Delta t}) - (\{f_s\}_t + [k_b]\{u_b\}_t), \end{aligned} \quad (3.23)$$

$[k_b]$  sistemin rijitlik matrisi olmak üzere;

$$[\hat{k}_b] = [k_b] + k_b \frac{\alpha_0}{D} [(M_v + m_w)(k_v + \alpha_1 c_v) + \alpha_0 M_v m_w] \{N_c\} \langle N_c \rangle. \quad (3.24)$$

$\{Pb\}_{t+\Delta t}$  yük etkilerini, tekerlek, yüzey düzensizlikleri ve balast rijitliklerine bağlı olarak ifade eder.

$$= k_b \left[ r_{e,t+\Delta t} - (p + k_B r_{e,t+\Delta t}) \frac{1}{D} (k_v + \alpha_0 M_v + \alpha_1 c_v) \right] \{N_c\} \quad (3.25)$$

$\{f_s\}_t$  yaylı kütleyle bağlı direnç kuvvetlerini ifade etmektedir.

$$\{f_s\}_t = k_B \left[ \frac{1}{D} (q_{s1,t} + q_{s1,t}) \alpha_0 M_v + (\tilde{q}_{s,t} + \tilde{q}_{s,t}) (k_v + \alpha_1 c_v) - z_{1,t} \right] \{N_c\} \quad (3.26)$$

Sistemin  $\mathbf{t} + \Delta \mathbf{t}$  anındaki hareket denklemi ,  $\{f_s\}_t = \{0\}$  bulunarak;

$$\begin{aligned} & [m_b]\{\ddot{u}_b\}_{t+\Delta t} + [c_b]\{\dot{u}_b\}_{t+\Delta t} + [k_b]\{\Delta u_b\} \\ & = \{p_b\}_{t+\Delta t} + p \{N_c\} - [k_b]\{u_b\}_t, \end{aligned} \quad (3.27)$$

$p\{Nc\}$  hareketli yük nedeniyle oluşan etkileşim kuvvetlerini sembolize etmektedir. Taşıtın köprüyle etkileşim halinde olmadığı durum için  $t + \Delta t$  anındaki sistem hareket denklemi;

$$\begin{aligned} & [M_b]\{\ddot{U}_b\}_{t+\Delta t} + [C_b]\{\dot{U}_b\}_{t+\Delta t} + [K_b]\{\Delta U_b\}_{t+\Delta t} \\ & = \{P_b\}_{t+\Delta t} - \{F_b\}_t, \end{aligned} \quad (3.28)$$

$\{\Delta U_b\}_{t+\Delta t}$  köprünün  $t + \Delta t$  anındaki toplam deplasmanını,  $\{\Delta U_b\}$  ise  $t$  anından  $\Delta t$  anına kadar ki deplasman artışlarını temsil etmektedir,

$$\{U_b\}_{t+\Delta t} = \{U_b\}_t + \{\Delta U_b\}. \quad (3.29)$$

Dış kuvvetler;

$$\{P_b\}_{t+\Delta t} = \sum_{s=1}^{n.o.s} (\{p_b\}_{t+\Delta t} + \{p_w\}_{t+\Delta t}), \quad (3.30)$$

İç direnç kuvvetleri [17];

$$\{F_b\}_t = \sum_{s=1}^{n.o.s} (\{f_s\}_t + [\hat{k}_b]\{u_b\}_t). \quad (3.31)$$

### 3.7.6. Taşıt köprü etkileşim sistemlerinin eşdeğer rijitlik denklemleri

$t + \Delta t$  anındaki taşıt hızı ve ivmeleri deplasman artışına  $\{\Delta U_b\}$  bağlı olarak çözülebilir.

$$\left. \begin{aligned} \{\ddot{U}_b\}_{t+\Delta t} &= a_0\{\Delta U_b\} - a_2\{\dot{U}_b\}_t - a_3\{\ddot{U}_b\}_t \\ \{\dot{U}_b\}_{t+\Delta t} &= \{\dot{U}_b\}_t + a_6\{\dot{U}_b\}_t + a_7\{\ddot{U}_b\}_{t+\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Eş. 3.32. ile Eş.3.28.'in birlikte çözülmesi sonucunda sistemin rijitlik denklemleri elde edilebilir.

$$[\bar{K}_b]_{t+\Delta t} \{\Delta U_b\} = \{P_b\}_{t+\Delta t} - \{F_b\}_t \quad (3.33)$$

Efektif rijitlik matrisi  $[\bar{K}_b]_{t+\Delta t}$ ,

$$[\bar{K}_b]_{t+\Delta t} = a_0 [M_b] + a_1 [C_b] + [K_b] \quad (3.34)$$

Efektif iç direnç kuvvetleri  $\{F_b\}_t$ ,

$$\{F_b\}_t = \{F_b\}_t + [M_b] (a_2 \{\dot{U}_b\}_t + a_3 \{\ddot{U}_b\}_t) + [C_b] (a_4 \{\dot{U}_b\}_t + a_5 \{\ddot{U}_b\}_t). \quad (3.35)$$

olarak tanımlanmaktadır. Taşıtların ve köprünün modellenmesinde son derece komplike matematik modellere ihtiyaç vardır. Ancak günümüzde gelişmiş bilgisayar programları sayesinde modellerin elde edilmesi ve analitik yöntemlerle taşıt köprü etkileşim problemlerinin çözülmesi mümkün olmaktadır [18].

## **4. ÜÇ BOYUTLU KABLOLU KÖPRÜ MODELİ**

### **4.1. Giriş**

Taşıt-köprü etkileşiminin ve taşıt hızlarının köprü davranışına etkilerinin incelenmesi amacıyla kablolu bir köprünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu amaçla dünyanın ikinci büyük açıklıklı kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü model olarak seçilmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında, Tatar Köprüsü hakkında yazılmış makalelerden ve çeşitli internet kaynaklarından faydalanılmıştır [23].

Sonlu elemanlar modelinin bilgisayar ortamında oluşturulmasında SAP2000 Advanced v.11 (Computers and Structures, Inc.) yapısal analiz programı kullanılmıştır.

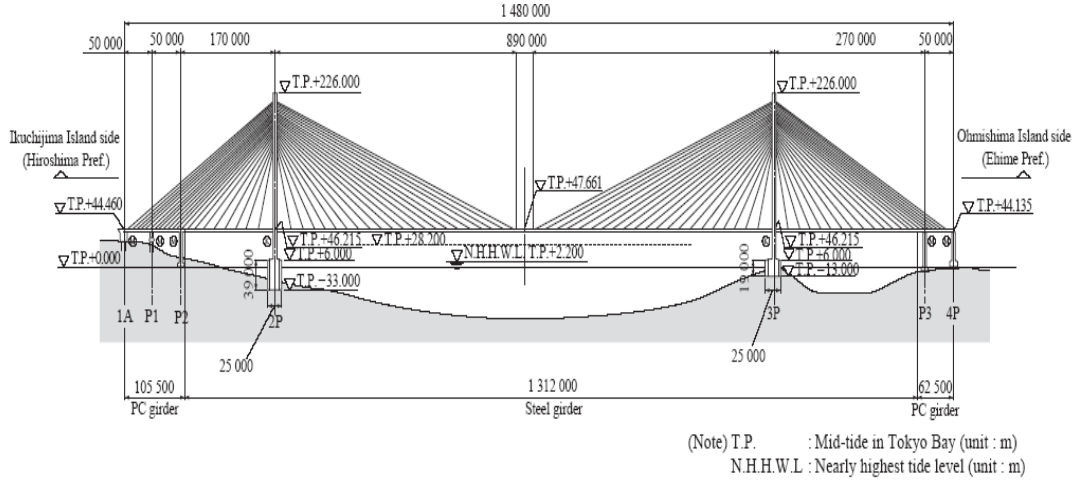
Bu bölümde ilk olarak Tatar kablolu köprüsü hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar modelinin nasıl oluşturulduğu anlatılmış ve köprünün modal analizi yapılarak dinamik davranışı değerlendirilmiştir.

### **4.2. Tatar Kablolu Köprüsü Hakkında Genel Bilgiler**

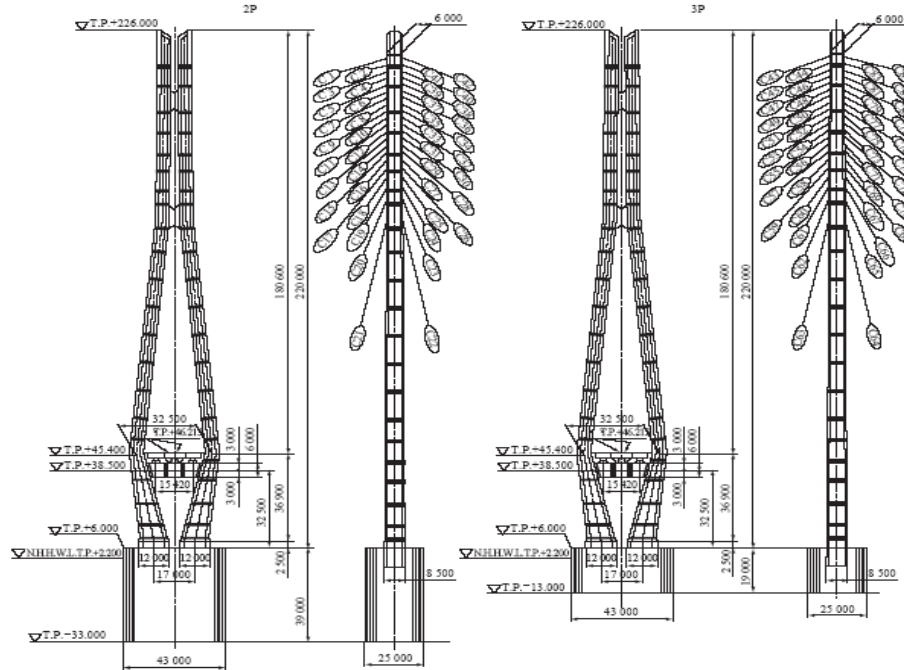
Japonya'nın Ikuchijima adası ile Ohmishima adası arasındaki bağlantıyı sağlayan, toplam uzunluğu 1 480 m ve merkez açıklığı 890 m olan Tatar köprüsü, dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsü durumundadır. Köprü 1999 yılında hizmete açılmıştır.

Tatar Köprüsü yapıldığı yılda dünyanın en uzun kablolu köprü unvanını Fransa'daki Normandiya köprüsünün elinden 34 m farkla almıştır. Şekil 4.1.'de köprünün boykesiti görülmektedir. Kulelerin yüksekliği 220 m olup, ters-Y şeklinde dizayn edilmiştir. İki düzlemde ve 21 seviyeli kablolar kullanılmıştır. En uzun kablo boyu 460 m'dir. Kule kesitleri ve kablo yerleşimi Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Köprünün 1 312 m'lik tabliye kısmı çelik olup, kenar açıklıklarda öngermeli beton tabliye kullanılmış, böylece karşı ağırlıkla denge koşulu sağlanmıştır. Çelik ve öngermeli beton kesitler Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Köprünün toplam platform genişliği 30,6 m'dir. Tabliye kesit yüksekliği ise 2,7 m'dir [23].

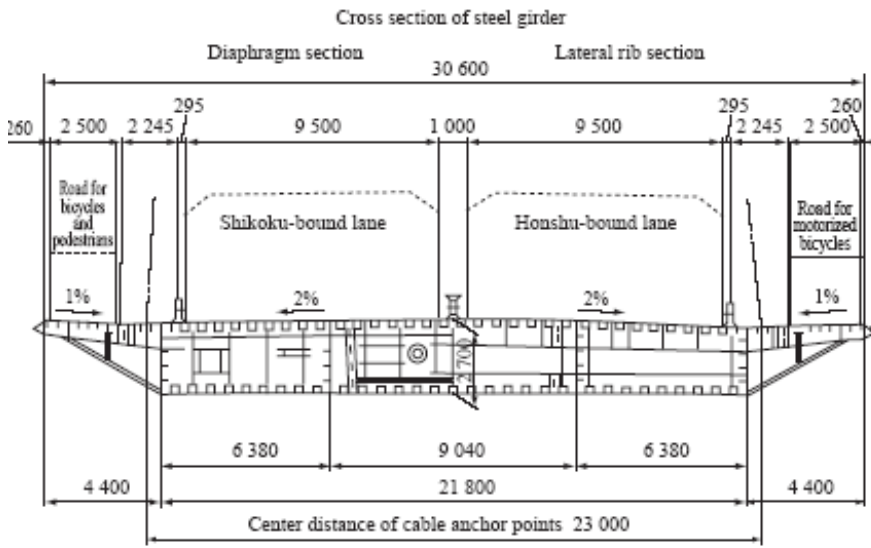


Şekil 4.1. Tatar köprüsü genel görünümü [23].

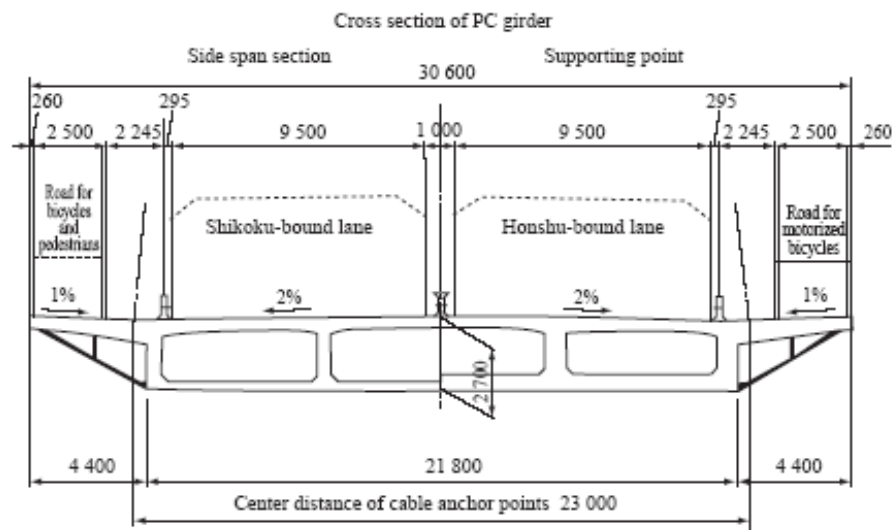


Şekil 4.2. Kule kesitleri ve kablo yerleşimi [23]

Köprü ana tabliyesi dengeli konsol metodu kullanılarak inşa edilmiştir. Köprü kabloları golf topunun yüzeyindeki girinti çıkıntılara benzer şekilde bir malzeme ile kaplanarak, rüzgarlı ve yağmurlu hava koşullarının yaratabileceği titreşimlere karşı koyması amaçlanmıştır. Köprü toplam ağırlığı yaklaşık 37 000 ton'dur.



Şekil 4.3. Çelik tabliye kesiti [23]



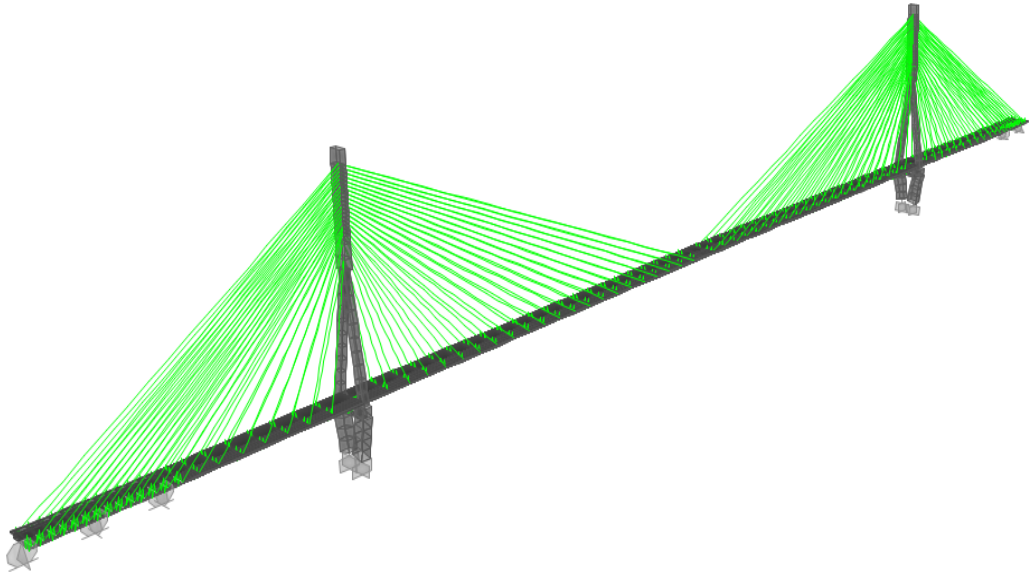
Şekil 4.4. Öngermeli beton tabliye kesiti [23]



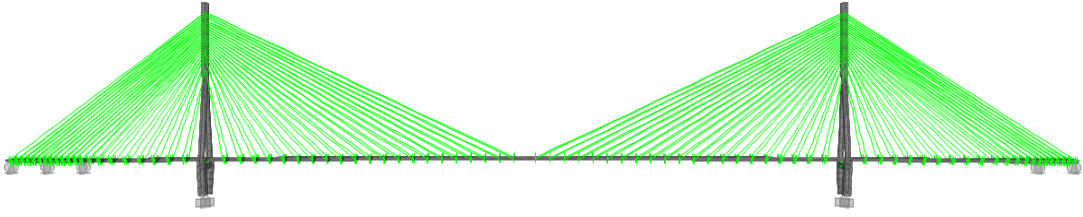
### 4.3. Sonlu Elemanlar Modeli

Bu bölümde köprünün sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model üzerinde köprü-taşıt etkileşiminin incelenmesi amacıyla dinamik taşıt yüklemesi yapılmış ve sonuçları beşinci bölümde tartışılmıştır.

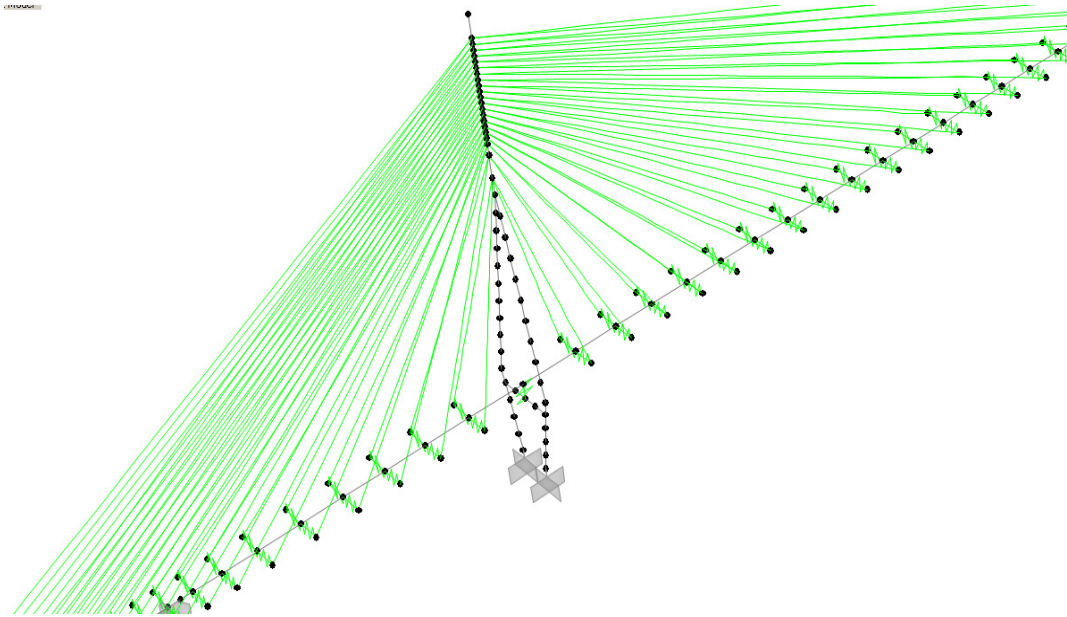
Köprünün 3-boyutlu modeli çubuk elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Malzeme özellikleri tanımlanmış ve tabliye kesitleri SAP2000 programının içinde bulunan CAD modülü ile çizilerek çubuk elemanlarına atanmıştır. Modelde toplam 202 çubuk elemanı, 168 kablo elemanı ve 371 düğüm noktası bulunmaktadır. Köprünün 3-boyutlu modeli Şekil 4.5., Şekil 4. 6. ve Şekil 4.7.'de görülmektedir.



Şekil 4.5. Tatar köprüsü üç boyutlu bilgisayar modeli

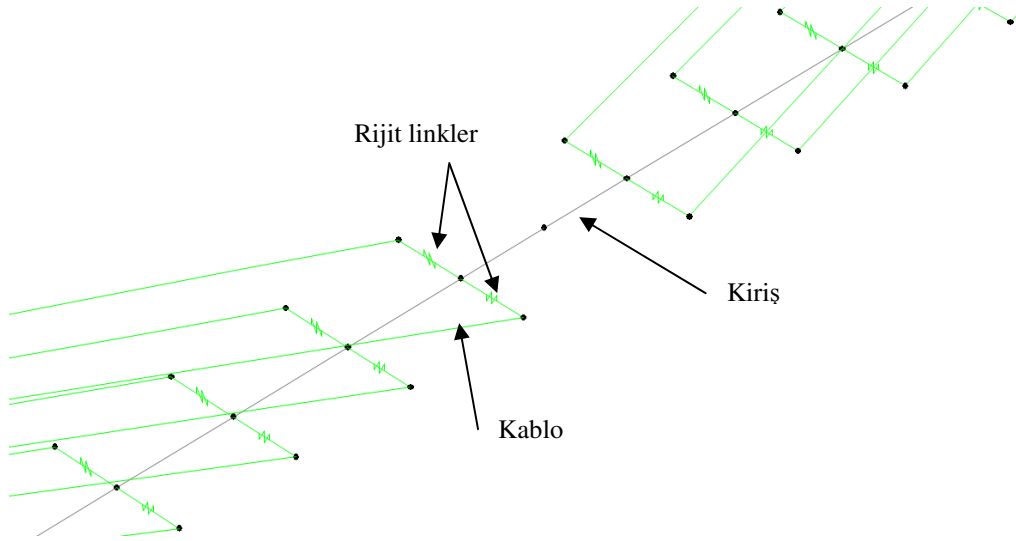


Şekil 4.6. Tatar köprüsü üç boyutlu bilgisayar modeli (Boy kesit)



Şekil 4.7. Çubuk elemanlar ve düğüm noktaları

Kablolar SAP2000 programının içinde hazır bulunan özel kablo elemanları ile modellenmiştir. Modelde ana kirişleri oluşturan çubuk elemanlardan her iki tarafa sanal rijit elemanlar tanımlanarak, kabloların ana kirişe olan bağlantı noktalarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi Şekil 4.8.'deki gibi sağlanmıştır.



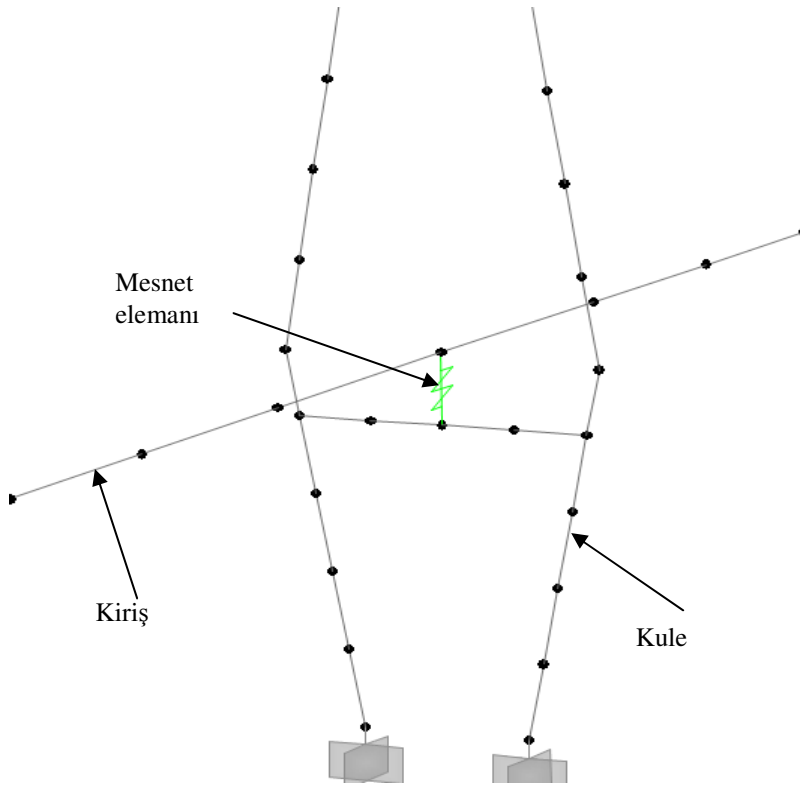
Şekil 4.8. Kablo – Kiriş birleşimi için kullanılan rijit link elemanları

Köprü ana kirişi ile kule arasındaki mesnet, tabliyenin sadece köprü boyuna yönde hareketine izin vermekte olup, düşey yönde ve yatay yönde köprüyü tutmaktadır. Mesnetler köprü boyuna yönde 2 000 t/m lik bir rijitliğe sahiptir. Köprü ana kirişini oluşturan çubuk elemanı ile kule kirişi arasında lineer bir bağlantı elemanı tasarlanmış ve köprü boyuna yönünde 2 000 t/m'lik rijitlik tanımlanmıştır. Diğer yönler ise Şekil 4.9.'daki gibi sabit tutulmuştur. Köprünün diğer ayaklarındaki mesnet koşulları Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Köprüdeki mesnetlenme koşulları

	1A	P1	P2	2P	3P	P3	4P
Düşey doğrultu	S	S	S	S	S	S	S
Köprü enine doğrultusu	S	H	H	S	S	H	S
Köprü boyuna doğrultusu	H	H	H	2000 t/m	2000 t/m	H	H

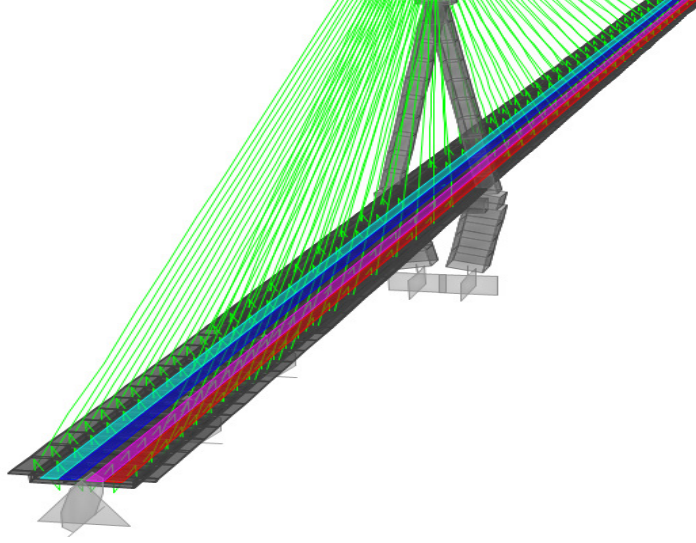
(S: sabit , H: hareketli)



Şekil 4.9. Mesnetlerin lineer link elemanı ile modellenmesi

Köprü modelinin tamamlanmasından sonra köprüye etkileyecek taşıt yüklemesi tanımlanmıştır. Köprüde toplam dört trafik şeridi mevcuttur (Şekil 4.10.). Taşıt yüklemesinde kullanılacak kamyon standart AASHTO HS 20-44 kamyonu olarak seçilmiştir (Şekil 4.11.). Bu kamyonun özelliklerine bölümün sonunda yer verilecektir.

Taşıt-köprü etkileşimi için oluşturulacak yükleme için SAP2000 programında mevcut olan “çok adımlı köprü hareketli yük oluşturma” modülü kullanılmıştır (Şekil 4.12). Burada yüklemede kullanılacak taşıt tipi seçildikten sonra, bu taşıtın hangi şeritten ve köprü boyunca hangi noktadan harekete başlayacağı belirtilmiştir. Tanımlanan taşıtların hangi zaman aralıklarında ve hangi yöne doğru harekete başlayacakları da bu bölümle tanımlanmıştır. Son olarak taşıtların hızları belirtilmiştir. Burada hız birimi olarak m/s seçilmiştir.



Şekil 4.10. Trafik şeritlerinin tanımlanması

**General Vehicle Data**

**Vehicle Name** HSn-44

**Floating Axle Loads**

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

**Usage**

Lane Negative Moments at Supports  
 Interior Vertical Support Forces  
 All other Responses

**Min Dist Allowed From Axle Load**

Lane Exterior Edge 0.3048  
 Lane Interior Edge 0.6096

**Miscellaneous Parameters**

Use BD 37/01 (2002) for Uniform Load Length Effects  
 Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only  
 Straddle Reduction Factor

**Loads**

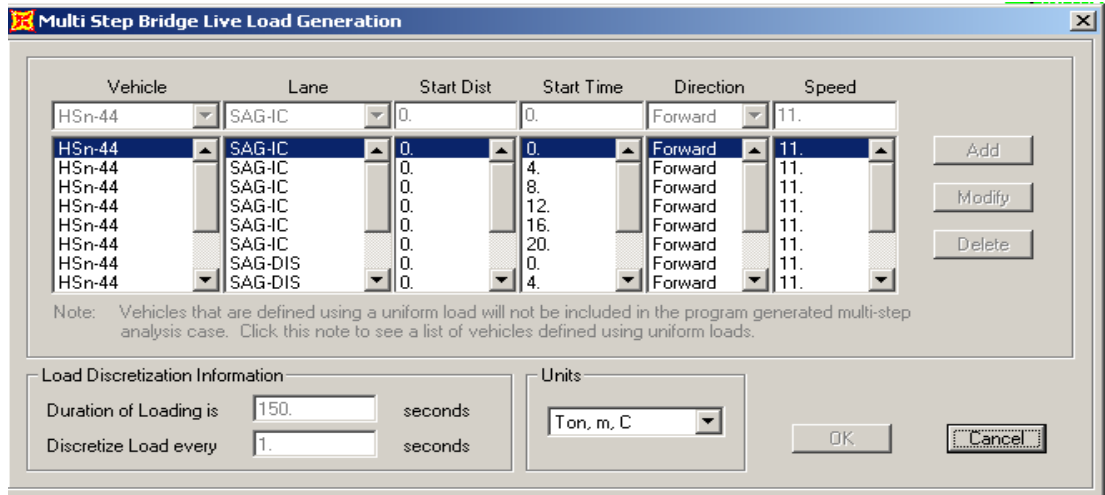
Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	3.6287	Two Points	1.8288
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	3.6287	Two Points	1.8288
Fixed Length	4.2672		0.	Fixed Width	3.048	14.515	Two Points	1.8288
Variable Length	4.2672	9.144	0.	Fixed Width	3.048	14.515	Two Points	1.8288

Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

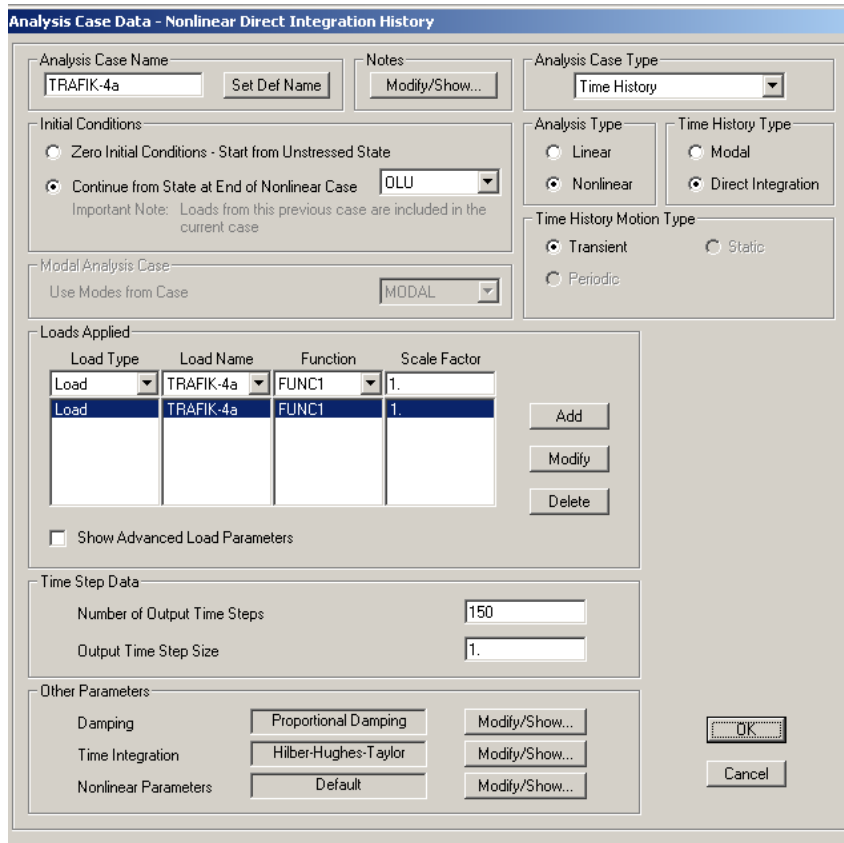
Units: Ton, m, C

OK Cancel

Şekil 4.11. AASHTO HS 20-44 kamyonu tanımlanması



Şekil 4.12. Trafik yüklemesinin tanımlanması



Şekil 4.13. Trafik yüklemesi analiz hali tanımlanması

Taşıt dinamik yüklemesi, zaman tanım aralığında nonlinear olarak analiz edilmiştir. Nonlinear analiz seçilmesinin sebebi kablo elemanlarının nonlinear davranış göstermelerinden kaynaklanmaktadır. Burada zaman tanım aralığı analiz tipi olarak doğrudan integrasyon seçilmiştir. Taşıt dinamik yüklemesi analizi, köprü zati yüklemesi ardından başlatılarak köprünün zati yükler altında yapmış olduğu deformasyonlar sonucu değişen rijitliği de göz önüne alınmıştır. Zaman adımı 1,0 sn olarak seçilmiştir. Burada daha küçük zaman aralıkları seçilmesi analiz sonuçlarının daha gerçeğe yakın çıkmasını sağlamakla beraber analiz süresini de uzatmaktadır.

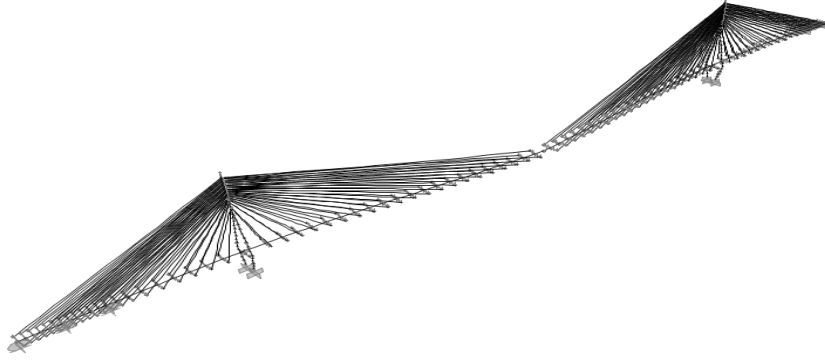
Çizelge 4.2.'de köprünün zati yükler altında meydana getirdiği taban reaksiyonları görülmektedir. Burada hesaplanan köprü toplam ağırlığı 39 416 ton'dur. Bu değer köprünün yaklaşık toplam ağırlığı olan 37 000 ton değerine yakındır.

Çizelge 4.2. Zati yükler altında taban reaksiyonları

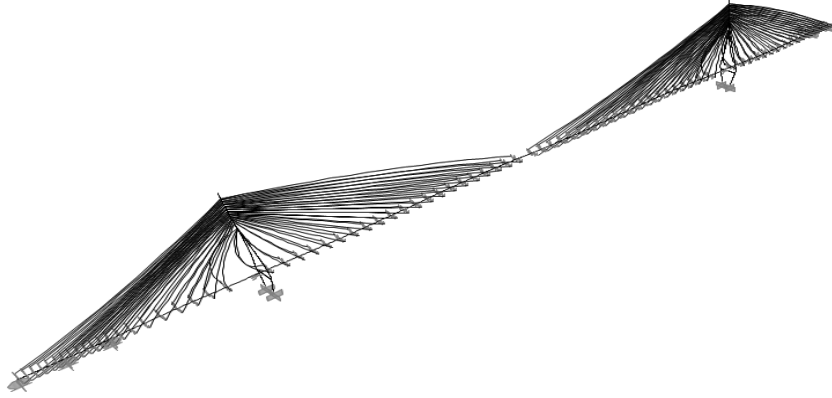
Output	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	Text	Text	Ton	Ton	Ton	Ton-m	Ton-m	Ton-m
OLU	NonStatic	Max	432.2994	5.684E-12	39416.0774	-9.168E-10	-27592141.2	3.082E-09
OLU	NonStatic	Min	432.2994	5.684E-12	39416.0774	-9.168E-10	-27592141.2	3.082E-09

Köprünün modal analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ve doğal periyotlardan bazıları Şekil 4.14.-Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Modal analiz sonuçlarının özet tablosu da Çizelge 4.3.'te sunulmuştur. Çizelge 4.4. ise modal kütle katılım oranları gösterilmiştir. Buradan da gözlemleneceği üzere, 30 modlu yapılan analizde köprü boyuna yönde kütle katılım oranı yüzde 90 olmakta, köprü enine yönünde ise yüzde 40 mertebesinde kalmaktadır.

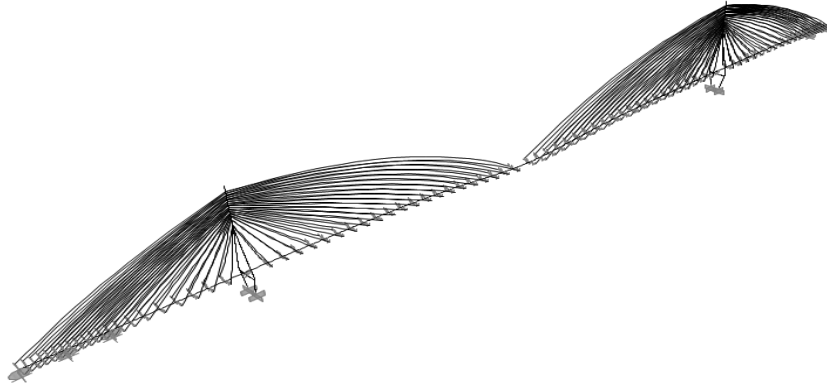
Mod 4 ile mod 11 arasındaki modların hepsi burulma modları olduğundan ve periyotları da birbirine çok yakın olduğundan burada gösterilmemiştir.



Şekil 4.14. Mod:1 (Eğilme yönü), Periyot=8.91 sn

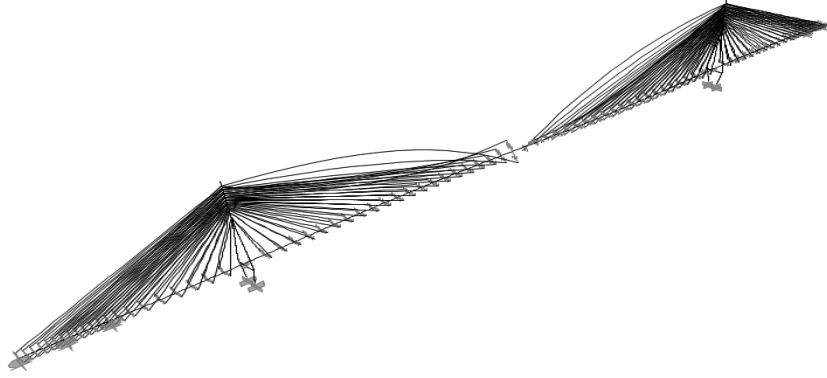


Şekil 4.15. Mod:2 (Boyuna yönü), Periyot=4.35 sn

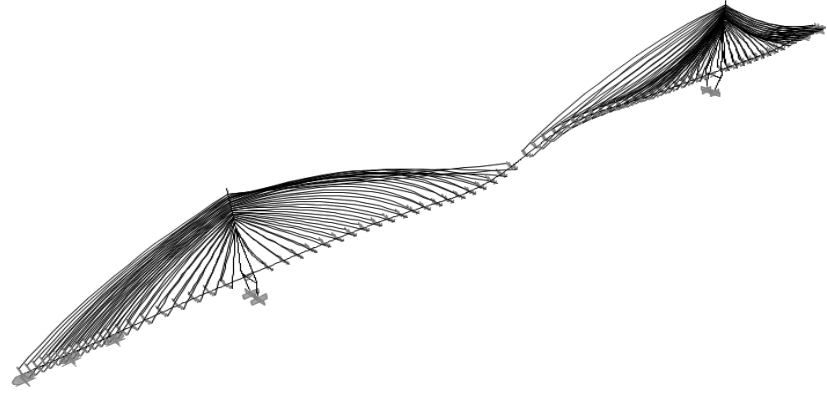


Şekil 4.16. Mod:3 (Eğilme yönü), Periyot=3.14 sn

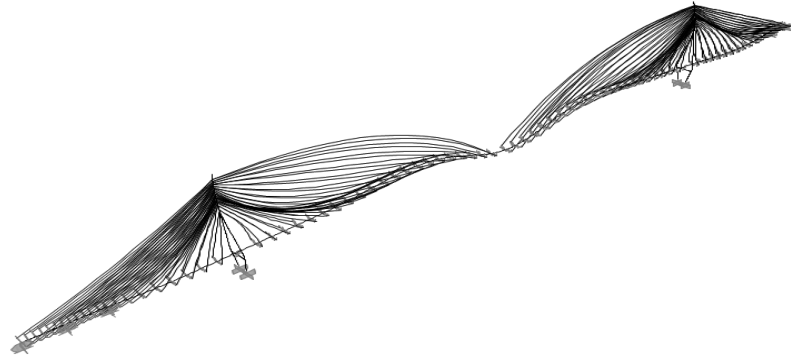




Şekil 4.17. Mod:4 (Burlulma modu), Periyot=2.69 sn



Şekil 4.18. Mod:11 (Eğilme modu), Periyot=2.37 sn



Şekil 4.19. Mod:20 (Eğilme modu), Periyot=1.85 sn

Çizelge 4.3. Modal analiz sonuçları özet tablosu

Basamak metin	Bas.No. birimsiz	Periyot saniye	Frekans Cyc/saniye	Dai.Fre. rad/saniye	Eigenvalue rad <sup>2</sup> /sn <sup>2</sup>
Mode	1	8.91	0.112	0.705	0.497
Mode	2	4.36	0.229	1.441	2.077
Mode	3	3.14	0.319	2.004	4.014
Mode	4	2.69	0.372	2.338	5.464
Mode	5	2.63	0.380	2.386	5.693
Mode	6	2.58	0.387	2.433	5.919
Mode	7	2.55	0.393	2.468	6.093
Mode	8	2.53	0.395	2.480	6.152
Mode	9	2.47	0.405	2.546	6.483
Mode	10	2.44	0.410	2.578	6.646
Mode	11	2.38	0.421	2.643	6.985
Mode	12	2.36	0.424	2.666	7.106
Mode	13	2.33	0.429	2.696	7.268
Mode	14	2.21	0.453	2.845	8.093
Mode	15	2.19	0.456	2.868	8.222
Mode	16	2.07	0.482	3.031	9.186
Mode	17	2.06	0.486	3.052	9.316
Mode	18	1.95	0.513	3.225	10.398
Mode	19	1.93	0.517	3.249	10.556
Mode	20	1.85	0.542	3.405	11.597
Mode	21	1.84	0.545	3.422	11.709
Mode	22	1.81	0.551	3.462	11.986
Mode	23	1.78	0.562	3.533	12.485
Mode	24	1.71	0.584	3.672	13.484
Mode	25	1.70	0.589	3.699	13.683
Mode	26	1.64	0.608	3.822	14.609
Mode	27	1.58	0.631	3.967	15.738
Mode	28	1.57	0.636	3.996	15.965
Mode	29	1.49	0.671	4.214	17.760
Mode	30	1.47	0.681	4.277	18.293

Çizelge 4.4. Modal kütle katılım oranları

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	8.912962	9.391E-20	0.220963	9.391E-20	0.220963
MODAL	Mode	2	4.359545	0.897716	6.234E-15	0.897716	0.220963
MODAL	Mode	3	3.136038	0.000258	2.178E-15	0.897974	0.220963
MODAL	Mode	4	2.688025	3.168E-16	0.000054	0.897974	0.221017
MODAL	Mode	5	2.633254	1.079E-16	0.003751	0.897974	0.224769
MODAL	Mode	6	2.582613	3.11E-15	0.000535	0.897974	0.225304
MODAL	Mode	7	2.545454	1.172E-16	0.012149	0.897974	0.237453
MODAL	Mode	8	2.533271	7.92E-20	0.002284	0.897974	0.239737
MODAL	Mode	9	2.467736	4.935E-15	0.088795	0.897974	0.328532
MODAL	Mode	10	2.437203	1.668E-15	0.025781	0.897974	0.354313
MODAL	Mode	11	2.377419	0.000812	4.946E-15	0.898785	0.354313
MODAL	Mode	12	2.357009	6.957E-17	0.010061	0.898785	0.364374
MODAL	Mode	13	2.33068	7.427E-16	0.000104	0.898785	0.364478
MODAL	Mode	14	2.208673	2.649E-14	0.00205	0.898785	0.366528
MODAL	Mode	15	2.191203	1.328E-14	0.000007463	0.898785	0.366535
MODAL	Mode	16	2.073087	5.088E-15	0.000848	0.898785	0.367383
MODAL	Mode	17	2.058557	1.683E-15	0.000015	0.898785	0.367398
MODAL	Mode	18	1.948483	3.808E-15	0.000218	0.898785	0.367616
MODAL	Mode	19	1.933918	1.605E-15	0.000023	0.898785	0.36764
MODAL	Mode	20	1.845079	0.001069	1.29E-13	0.899854	0.36764
MODAL	Mode	21	1.836233	1.514E-14	0.001061	0.899854	0.368701
MODAL	Mode	22	1.814827	3.419E-16	0.000103	0.899854	0.368804
MODAL	Mode	23	1.778229	1.209E-13	0.023765	0.899854	0.392569
MODAL	Mode	24	1.71106	2.849E-15	0.007467	0.899854	0.400036
MODAL	Mode	25	1.698564	2.494E-13	0.000055	0.899854	0.400091
MODAL	Mode	26	1.643904	2.736E-13	0.000232	0.899854	0.400324
MODAL	Mode	27	1.583832	7.508E-15	0.000005338	0.899854	0.400329
MODAL	Mode	28	1.57254	9.474E-14	0.002066	0.899854	0.402395
MODAL	Mode	29	1.49095	0.002276	8.959E-14	0.90213	0.402395
MODAL	Mode	30	1.469065	3.297E-15	0.000088	0.90213	0.402484

Çizelge 4.5.'te Tatar köprüsüne ait kesit ve malzeme özellikleri verilmiştir. Model oluşturulurken mümkün olduğunca gerçek değerlere yakın değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Tatar Köprüsüne ait genel bilgiler [23]

Eleman		Açıklama
Yol adı		Onomichi-İmbari Güzergahı
Köprü adı		Tatar Köprüsü
Köprü tipi		Üç açıklıklı kompozit kablolu köprü
Köprü açıklığı		L = 1 480 m
Açıklık boyu		L = 270 + 890 + 320 m
Tasarım hareketli yükü		B (AASHTO)
Yol özelliği		Kategori : 1 / Sınıf : 3
Tasarım hızı		80 km/s
Şerit sayısı		2 + 2 = 4
Kule	şekil	Ters Y
	yükseklik	220 m
	kesit boyutları	Tabanda : 12*8,5 m Kule tepesinde : 6*6 m
Ana kiriş	Şekil	Çelik kısım: 3-hücreli çelik kutu kesit Öngerme beton kısım:3-hücreli betonarme kutu kesit
	Kiriş yüksekliği	H = 2,7 m
	Kiriş genişliği	30,6 m
Kablo yerleşim şekli		Yelpaze sistem
Çelik elemanlar	Kule	SS400, SM490Y, SM570
	Ana kiriş	SS400, SM490Y
Betonarme standart tasarım gerilmesi		0,24 ton/cm <sup>2</sup>
Müsaade edilebilir kablo gerilmesi		0,64 ton/cm <sup>2</sup>

#### 4.4. HS20-44 Kamyonu Genel Özellikleri

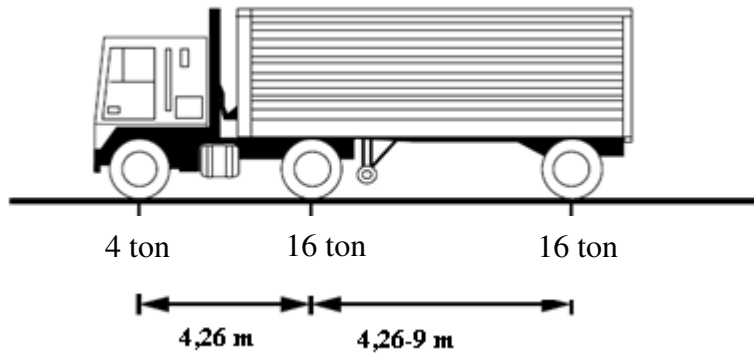
Yol ve köprü tasarımında en çok başvurulan şartname AASHTO'dur. AASHTO'da tanımlı çok sayıda kamyon mevcuttur. Bu kamyonların listesi Çizelge 4.6.'da verilmiştir. HS sınıfı kamyonlar H sınıfı kamyonlara oranla daha ağır taşıtlardır.

Çizelge 4.6. AASHTO'da yer alan kamyon tipleri

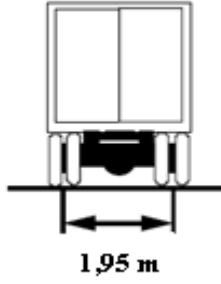
Eski kamyon tipi	Revizyon tarihi	Mevcut kamyon tipi
H 15	1944	H 15-44
H 20	1944	H 20-44
H 15-S 12	1944	HS 15-44
H 20-S16	1944	HS 20-44

Bu çalışmada mevcut en ağır kamyon yüklemesi olan HS 20-44 seçilmiş, böylelikle en elverişsiz yükleme altında köprü davranışı irdelenebilmiştir. HS 20-44 kamyonu SAP2000'de HSn-44 olarak modifiye edilerek tanımlanmıştır. Yükleme tipi köprü modülünden seçilerek tasarım yapılmaktadır. Bu nedenle taşıt için yeni bir matematik model oluşturulmasına ihtiyaç duyulmamaktadır.

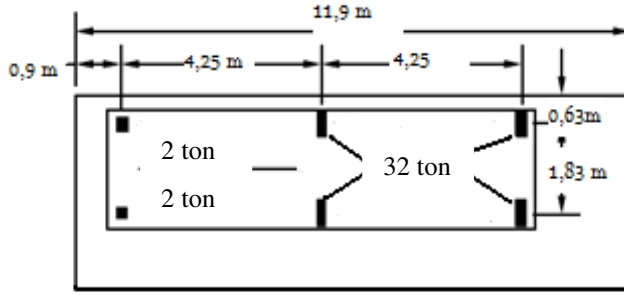
HS 20-44 kamyonunun genel görünüşleri Şekil 4.20. - 4.22.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. HS20-44 kamyonunun yandan görünüşü

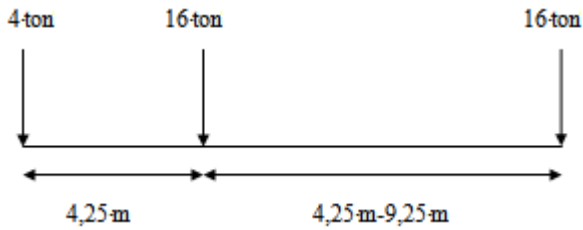


Şekil 4.21. HS20-44 kamyonunun arkadan görünüşü



Şekil 4.22. HS20-44 kamyonunun plan görünüşü

HS 20-44 kamyonunun dingil yükleri Şekil 4.23'te görülmektedir. Bu çalışmada dört farklı trafik yüklemesinde de en elverişsiz yüklemelerin elde edilmesi amacıyla bütün taşıt modelleri için HS 20-44 kamyonu tercih edilmiştir. Bu sayede köprünün en ağır taşıtlardan kaynaklanan yükler altındaki davranışı incelenebilmiştir [24] .



Şekil 4.23. HS 20-44 kamyonuna ait dingil yükleri

## 5. YAPILAN ÇALIŞMA VE ANALİZLER

### 5.1 Genel Bilgiler

Tatara köprüsü 1 480 m açıklığa sahip, gidiş yönünde iki ve dönüş yönünde iki olmak üzere toplam dört şeritli, dünyanın ikinci büyük kablolu köprüsüdür. Bu çalışmada kablolu bir köprünün modellenmesinde ve taşıt köprü etkileşim problemlerinin çözümünde en önemli etkenlerden biri olan köprü üzerinden geçen hareketli taşıtların hızlarının köprü dinamik davranışına etkisi irdelenmiştir.

Taşıt köprü etkileşimi, hız parametresi açısından incelenirken daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla Trafik 1(trafik 1a, trafik 1b, trafik 1c), Trafik 2 (trafik 2a, trafik 2b, trafik 2c), Trafik 3 (trafik 3a, trafik 3b, trafik 3c) ve Trafik 4 (trafik 4a, trafik 4b, trafik 4c) olmak üzere dört farklı trafik yüklemesi kombinasyonu oluşturulmuş ve 40 km/s, 80 km/s ve 120 km/s hızları için analizler yapılmıştır.

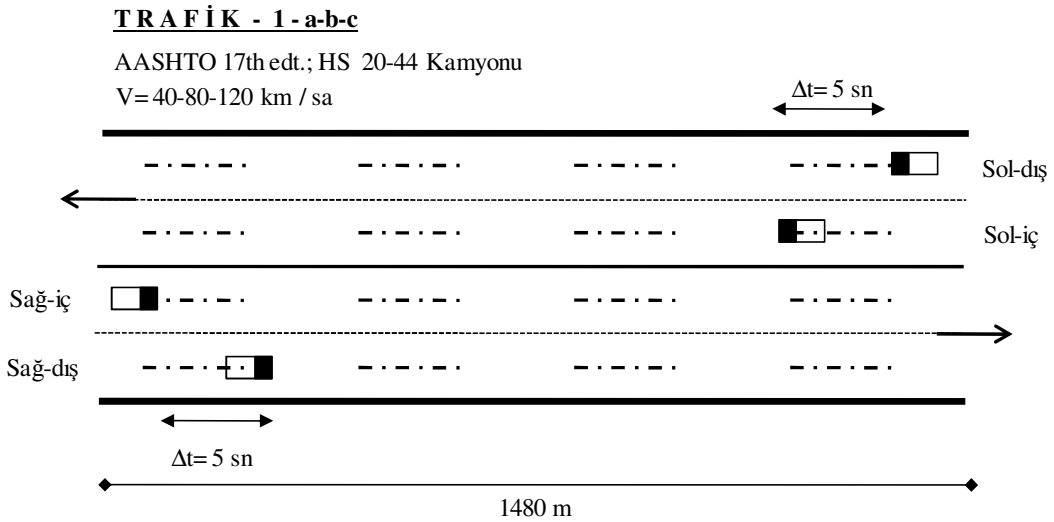
Köprü boyunca meydana gelen deplasman profili, köprü açıklık ortası zamana bağlı deplasman değişimi, kule tepe noktası zamana bağlı deplasman değişimi, açıklık ortası zamana bağlı momenti değişimi, açıklık ortası zamana bağlı kesme kuvveti değişimi, kule mesnet bölgesi zamana bağlı kesme kuvveti değişimi, açıklık ortası zamana bağlı burulma moment değişimi, en uzun kablodaki zaman bağlı eksenel kuvvet değişiminin incelenebilmesi için analizler yapılmıştır. Bu reaksiyonlar irdelenerek taşıt hızı ve hız değişimlerinin taşıt köprü etkileşimi açısından önemi anlaşılmasına çalışılmıştır.

Analizler yapılırken köprünün kendi ağırlığından kaynaklanan sabit yüklerine trafik yükleri de dahil edilmiş, ancak analiz sonuçları şekillere aktarılırken sadece köprünün taşıtların hız değişimlerine bağlı dinamik davranışları dikkate alınmıştır. Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar şekiller yardımıyla detaylı olarak anlatılmıştır. Burada “a” yük kombinasyonu 40 km/s, “b” yük kombinasyonu 80 km/s ve “c” yük kombinasyonu 120 km/s hızları için oluşturulan kombinasyonlardır.

Tatara köprüsünün tasarım hızı 80 km/s'dir. Bu hız yönetmeliklerde müsaade edilen hız sınırıdır. Ancak trafik koşulları dikkate alındığında taşıtların daima tasarım hızıyla hareket etmeleri mümkün olmadığından bu çalışmada farklı hızlar için köprü davranışı incelenmiştir.

Analiz süresi 150 sn olarak seçilmiştir. Bu süre en düşük hızla yani 40km/s hızla hareket eden taşıtın köprüye girişi ile köprüden ayrılışı arasındaki süreye en yakın değerdir ve köprü'nün toplam açıklığının (1 480 m) en düşük taşıt hızına (40 km/s=11 m/sn) bölünmesiyle elde edilmiştir.

## 5.2 Trafik 1 Yükleme Altında Kablolü Köprü Davranışı

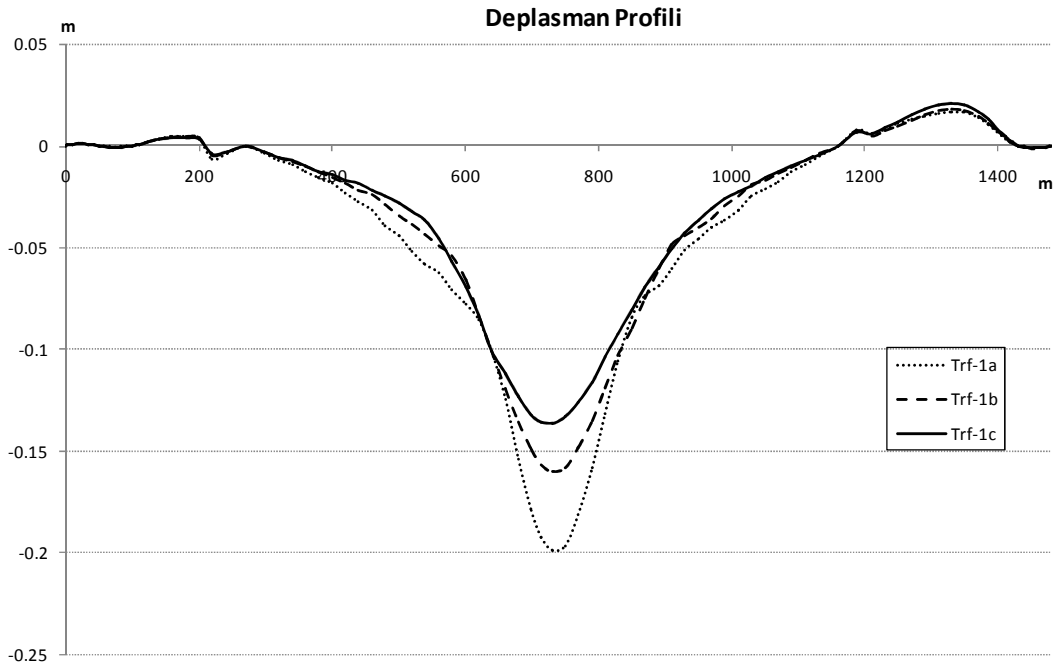


Şekil 5.1. Trafik 1 yük kombinasyonu modeli

Trafik 1 yüklemesinde Şekil 5.1'de gösterildiği gibi köprü'nün gidiş yönünde iki ve dönüş yönündeki iki şeridinden 5 sn zaman aralığıyla birer adet AASHTO'da tanımlanan en büyük kamyon modeli olan ve karakteristik özellikleri dördüncü bölümde detaylı olarak verilen HS20-44 kamyonu trafik 1a, trafik 1b ve trafik 1c yükleme durumları için geçirilmiş ve taşıt köprü etkileşim problemlerinin çözümünde bilinmesi gereken önemli reaksiyonlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve analiz sonuçları şekillere aktarılmıştır.



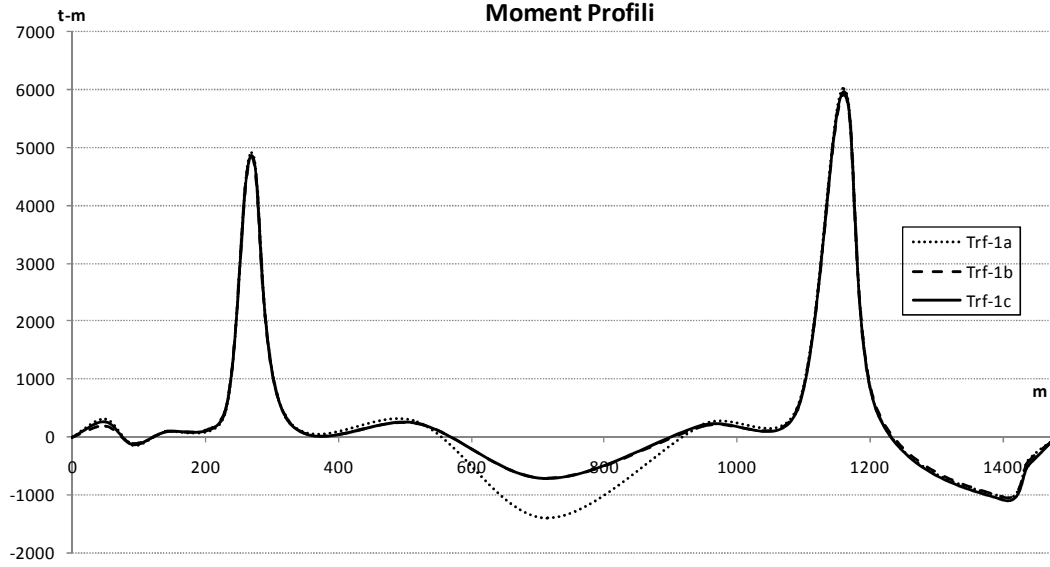
Köprünün açıklığı ve konumu dikkate alındığında, taşınması beklenen trafik yükü trafik 1 yük kombinasyonundan daha fazla olacaktır. Ancak bu yük kombinasyonu hız parametresinin köprü dinamik davranışına etkisinin irdelenmesi bakımından uygun bir yük kombinasyonudur. Her şeritten geçen tek bir taşıtın köprü üzerindeki hareketi ve hareket hızındaki değişim, taşıt hızının köprü davranışı üzerindeki etkisinin görülmesi açısından yol gösterici olmaktadır.



Şekil 5.2. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili

Şekil 5.2’de trafik 1 yük kombinasyonu üç farklı hız için modellenmiş ve bu kombinasyonların köprü boyunca meydana getirdiği maksimum deplasmanların köprü boyunca değişimi gösterilmiştir. Düşük hızla hareket eden taşıtların meydana getirdiği maksimum deplasmanlar şekildenden anlaşılacağı gibi, yüksek hızla hareket eden taşıtlara göre daha fazladır. Bu farklılıklar özellikle açıklık ortasında daha da belirginleşmektedir. Açıklık ortasında trafik 1a yüklemesinin meydana getirdiği deplasman 0,20 m mertebelerindeyken trafik 1b yüklemesinde 0,16 m ve trafik 1c yüklemesi altında 0,13 m dir. Kenar açıklıklarda deplasmanlar birbirine

yakın ve açıklık ortasında meydana gelen deplasmanlara oranla daha küçük değerdedir.

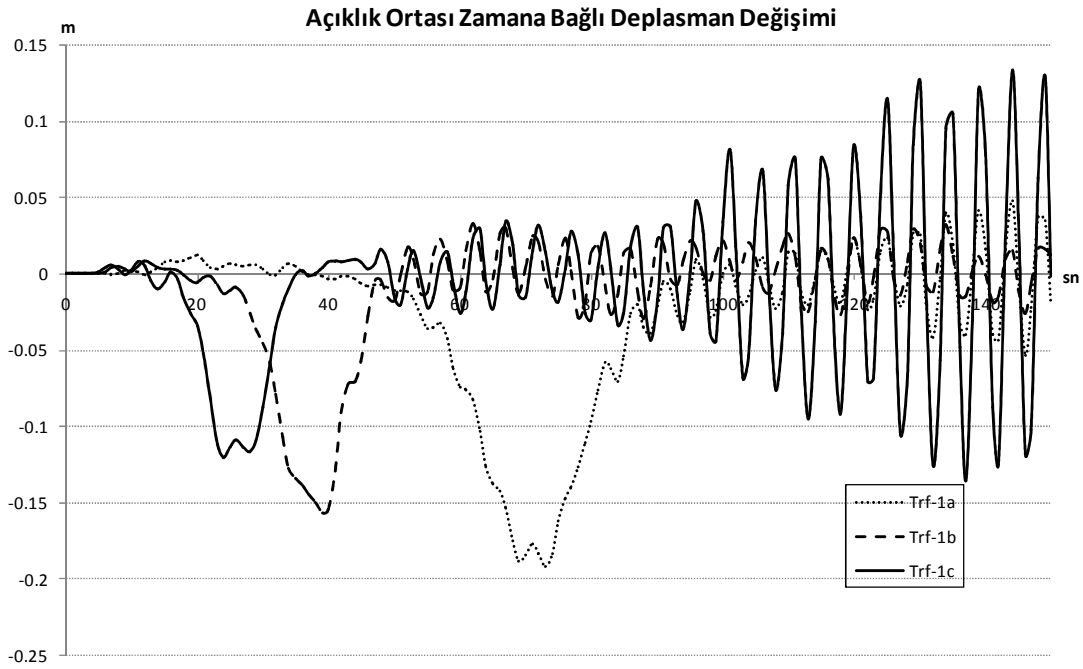


Şekil 5.3. Trafik 1 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı

Şekil 5.3'te köprü boyunca moment dağılımı verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi açıklık ortasında en büyük momentler trafik 1a yüklemesi altında meydana gelmektedir. Trafik b ve trafik 1c yüklemelerinin açıklık ortasında meydana getirdiği momentler birbirine son derece yakın değerlerdir. Kule bölgelerindeki moment değerleri bütün yüklemeler de birbirine çok yakındır ve 5000-7000 ton-m mertebelerindedir. Kulelerin rijit yapısı gereği bu momentler köprü sabit yüklerinde meydana gelen değerlerle hemen hemen aynıdır. Bu nedenle trafik yüklerinin etkisi irdelenirken dikkate alınması gereken momentler açıklık ortası momentleridir.

Köprünün açıklık ortasında meydana gelen zamana bağlı deplasman değişimleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Açıklık ortasındaki en büyük deplasman trafik 1a yüklemesi durumunda oluşmaktadır ve yaklaşık 0,20 m mertebelerindedir. Trafik 1b ve trafik 1c yüklemelerinde bu değer 0,13-0,15 m ye düşmektedir. Ancak burada dikkati çeken önemli bir nokta vardır. Açıklık ortasında en büyük deplasman trafik 1a yüklemesi altında meydana gelmesine rağmen, taşıtların açıklık ortasından ayrılmasından sonra,

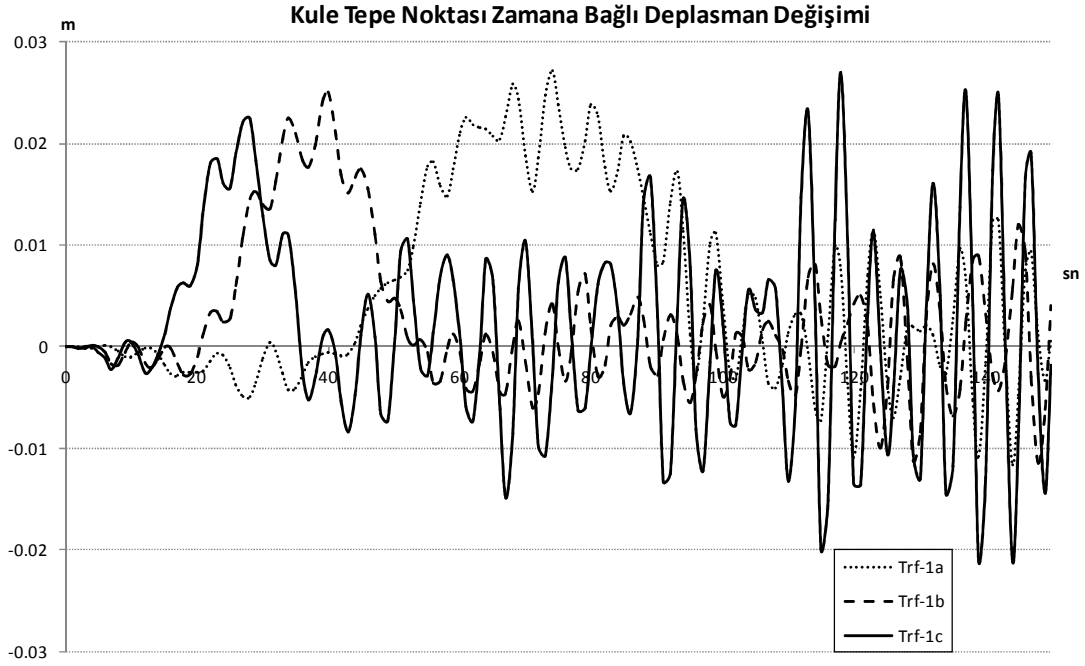
açıklık boyunca meydana gelen en büyük deplasman değişimlerine trafik 1c yüklemesi neden olmaktadır. Burada meydana gelen pozitif ve negatif deplasmanlara neden olan tersinir yüklemeler, zamanla köprünün ana açıklığını oluşturan çelik elemanlarda yorulmalara neden olabilir. Bu önemli detay tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.4. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

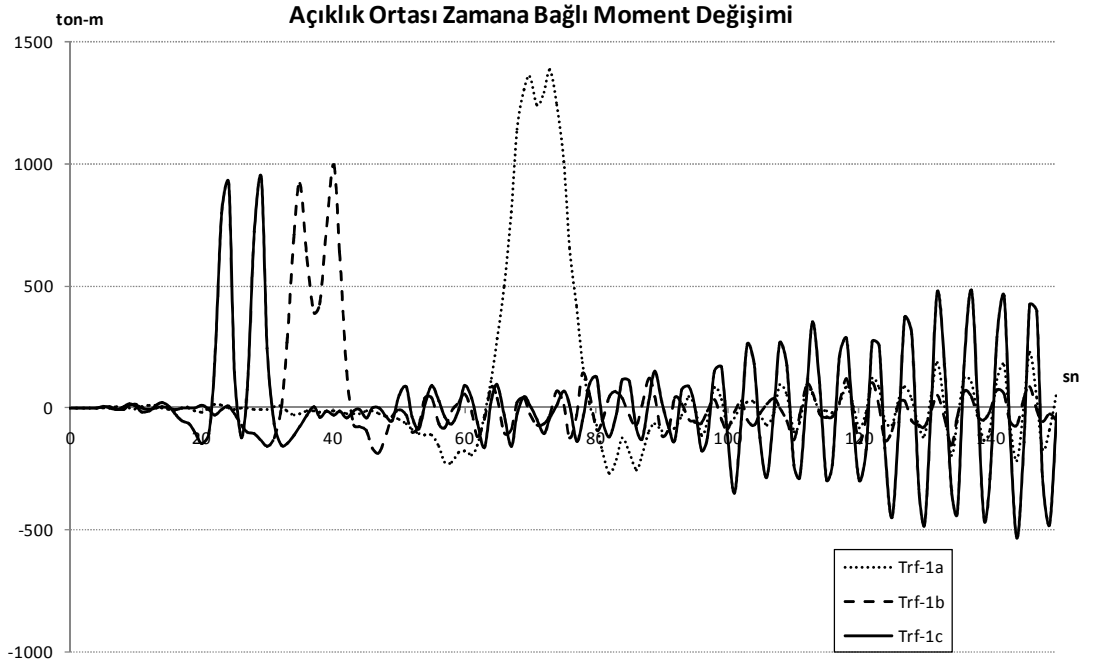
Trafik 1a, trafik 1b ve trafik 1c yüklemeleri altında her iki kulenin tepe noktalarında meydana gelen deplasman değişimleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Kulenin son derece rijit yapısı nedeniyle her üç yükleme altında da birbirine çok yakın ve oldukça küçük kabul edilebilecek 0,02 m düzeyinde deplasmanlar oluşmaktadır. En büyük deplasman değişimleri taşıt hızlarının en yüksek olduğu trafik 1c yüklemesi altında meydana gelmektedir. Taşıt sayısının dolayısıyla da taşıt yükünün az olması deplasmanların az olmasına neden olmaktadır. Bu yüklemeler arttıkça deplasmanlarda artacaktır. Şekilde dikkati çeken bir diğer nokta da, trafik 1a yüklemesinin kulenin en uzun süre deforme durumda kalmasına neden olan yükleme olduğudur. Köprü tasarımında da en önemli etkenlerden birisi kablolarla uygulanacak

germe kuvvetleridir. Kulenin bir yöndeki uzun süreli deplasmanı kablo germe kuvvetlerinin düşmesine neden olacaktır. Bu durum kablo davranışını sonuç olarak da köprünün davranışını olumsuz etkileyecektir.

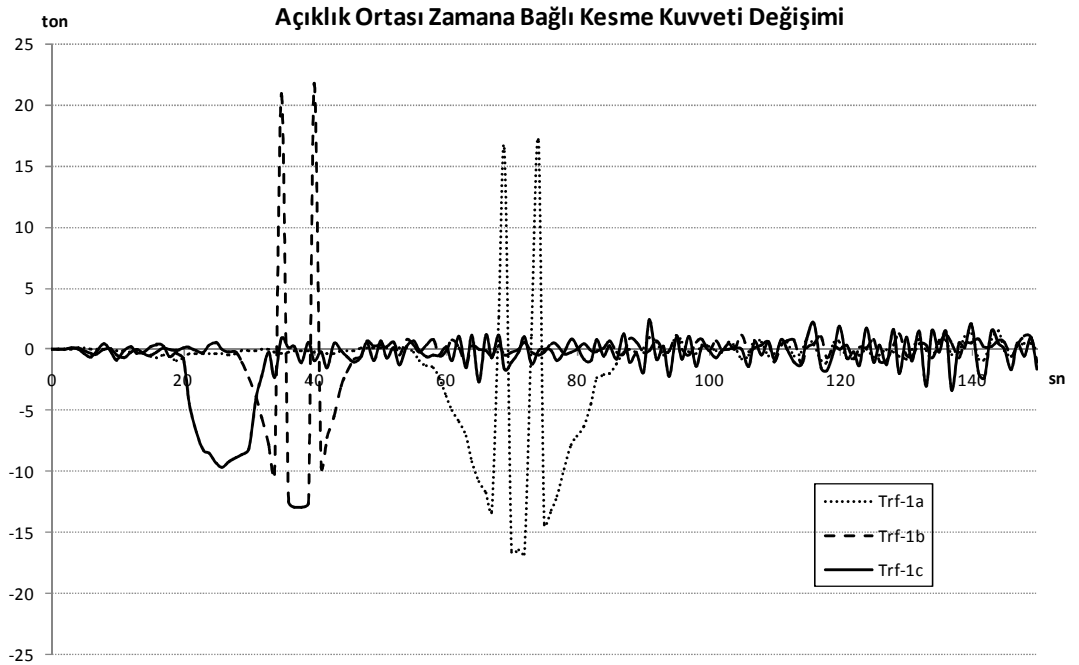


Şekil 5.5 Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Trafik 1a, trafik 1b ve trafik 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen moment değişimleri Şekil 5.6'da irdelenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi en büyük açıklık momentleri trafik 1a yüklemesi altında meydana gelmektedir ve yaklaşık olarak 1 400 ton-m mertebesinde. Trafik 1b ve trafik 1c yüklemeleri ise birbirine çok yakın momentler oluşturmaktadır ve bu momentler 1 000 ton-m civarındadır. Zamana bağlı en büyük moment değişimleri en yüksek hızla hareket eden trafik 1c yüklemesi altında meydana gelmektedir. Taşıtların açıklık ortasından ayrılmasından sonra, açıklık boyunca trafik 1a ve trafik 1b yüklemeleri altında moment değişimleri birbirine çok yakın seyretmektedir. Köprü üzerinde hareket eden taşıt hızlarının en fazla etkilediği reaksiyonlardan biri açıklık momentidir.

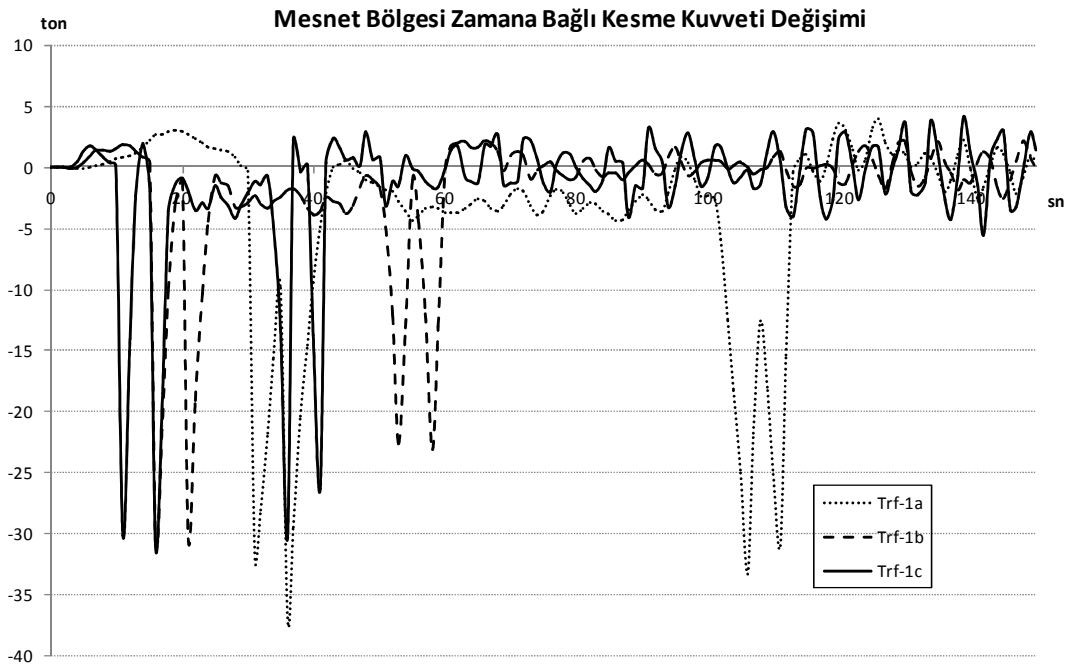


Şekil 5.6. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.7. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

En büyük kesme kuvveti değişimi, Şekil 5.7’de görüldüğü gibi köprünün tasarım hızı olan 80km/s hızda yani trafik 1b yüklemesi altında meydana gelmektedir. Trafik 1a yüklemesindeki kesme kuvveti değişimi de yine trafik 1b yüklemesine yakındır. En küçük kesme kuvvetlerinin trafik 1c yüklemesi altında yani en hızlı taşıt kombinasyonunda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Açıklık ortası kesme kuvvetleri de açıklık ortası deplasmanları gibi taşıtın hızı azaldıkça yani taşıtın köprü üzerinde kalış süresi arttıkça artmaktadır. Açıklık ortası kesme kuvvetlerindeki zamana bağlı değişim taşıtlar açıklık ortasını geçtikten sonra hızla azalmaktadır.

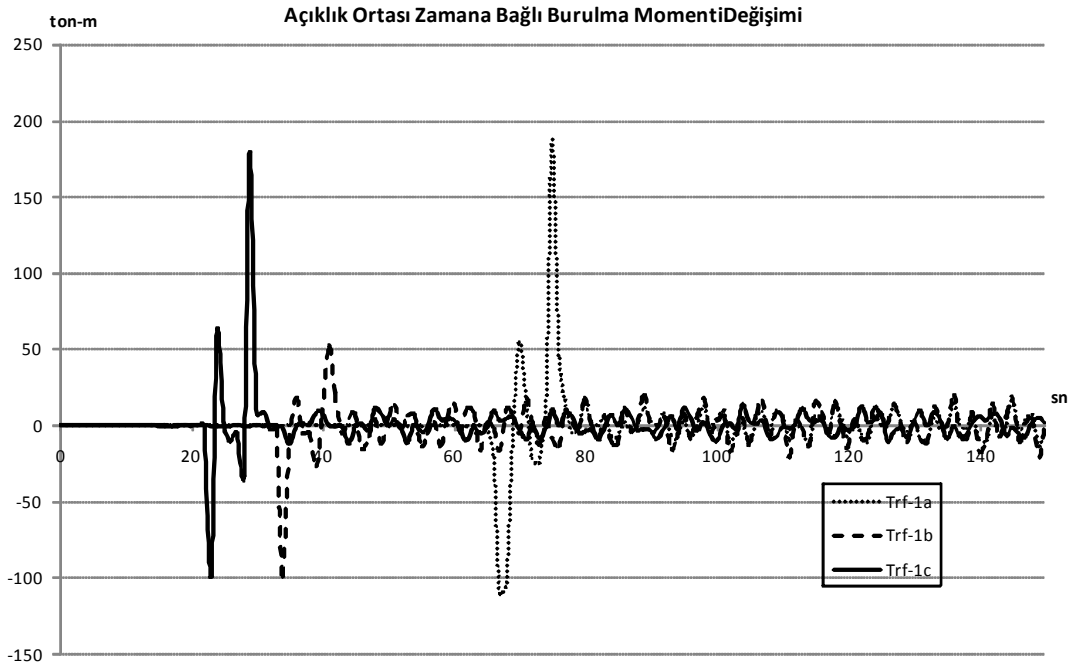


Şekil 5.8. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

Trafik 1a yüklemesi Şekil 5.8’den anlaşılacağı gibi mesnet bölgelerinde en büyük kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Açıklık ortası kesme kuvvetleri en fazla 15 ton mertebelerindeyken mesnet bölgelerinde bu değer 40 tona çıkmaktadır. Bir önceki şekille karşılaştırıldığında büyük kesme kuvvetlerinin kulelere yakın mesnet bölgelerinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Kesme kuvvetlerinin köprü dinamik davranışına etkisi irdelenirken açıklık ortasında oluşanlardan çok

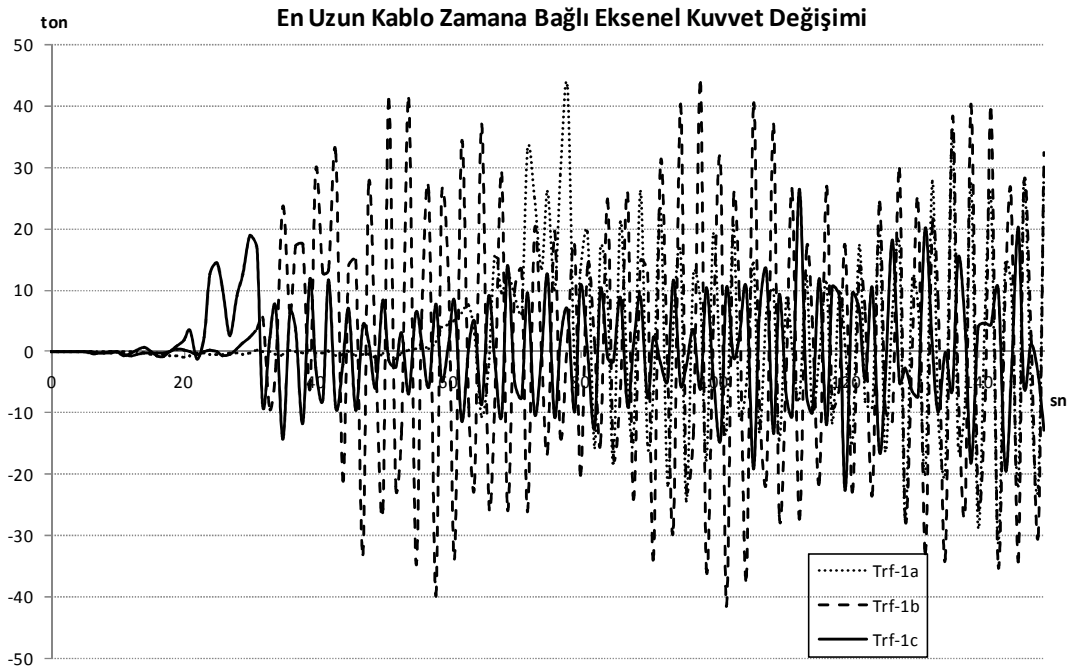
kulelere yakın mesnet bölgelerinde meydana gelen kesme kuvvetleri dikkate alınmalıdır.

Gidiş ve dönüş olmak üzere her iki yönde de iki şeritten birer kamyonun geçtiği simetrik bir yükleme altında açıklık ortasında büyük burulma momentlerinin oluşması beklenmemektedir. Şekil 5.9 incelendiğinde trafik 1a ve trafik 1c yüklemeleri altında zamana bağlı meydana gelen burulma momentlerinin birbirine yakın ve yaklaşık 180 ton-m düzeyinde olduğu görülmektedir. Bu değer trafik 1b yüklemesi altında meydana gelen 50 ton-m burulma momentne oranla daha büyüktür. Trafik 1b yüklemesinde, yani Tatar Köprüsünün tasarım hızında burulma momentleri düşük çıkmaktadır. Ancak, taşıtların hızlarının tasarım hızının üstüne çıkması ya da altına düşmesi durumunda burulma momentlerindeki artış dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Her üç yükleme durumunda da taşıtlar açıklık ortasını geçtikten sonra burulma momentleri son derece küçük değerlere inmektedir.



Şekil 5.9. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi

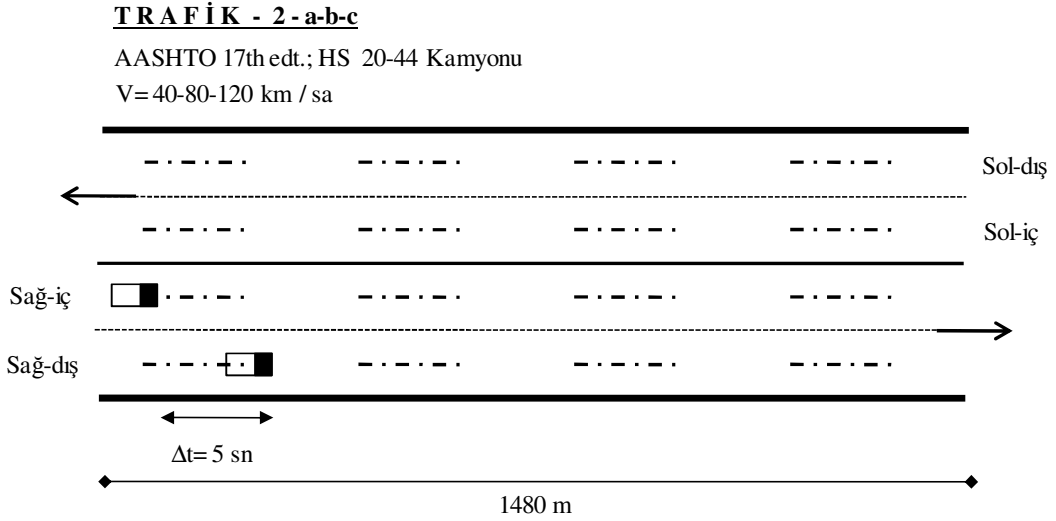
Kablolarda meydana gelen aksel kuvvet değişimlerinin trafik 1a ve trafik 1b yüklemeleri altında birbirine yakın değerler olduğu, bu değerin ise  $\pm 40$  ton mertebelerinde olduğu, trafik 1c yüklemesi altında ise aksel kuvvet değişimlerinin daha küçük ve  $\pm 10$  ton mertebelerinde olduğu Şekil 5.10'da görülmektedir. Taşıt hızındaki artışla kablolarda meydana gelen aksel kuvvetlerin daha düşük hızlara sahip taşıtlara göre dört kat daha az aksel kuvvetlere neden olduğu anlaşılmaktadır. Köprüdeki taşıt sayısı arttıkça bu değer taşıt hızındaki değişimle paralel olarak değişim gösterecektir. Kabloların aksel kuvvetlerindeki düşüş kabloların davranışını olumsuz etkileyecektir. Kablolar köprünün yük taşıma kapasitesinde önemli elemanlardır ve belirli bir germe kuvveti altında çalışmaları gerekmektedir. Köprü tasarımı yapılırken köprüden geçecek taşıtların hızlarının birbirinden farklı olacağı dikkate alınarak kablolarla uygulanacak öngerme kuvvetleri belirlenmelidir.



Şekil 5.10. Trafik 1a, 1b ve 1c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen aksel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi

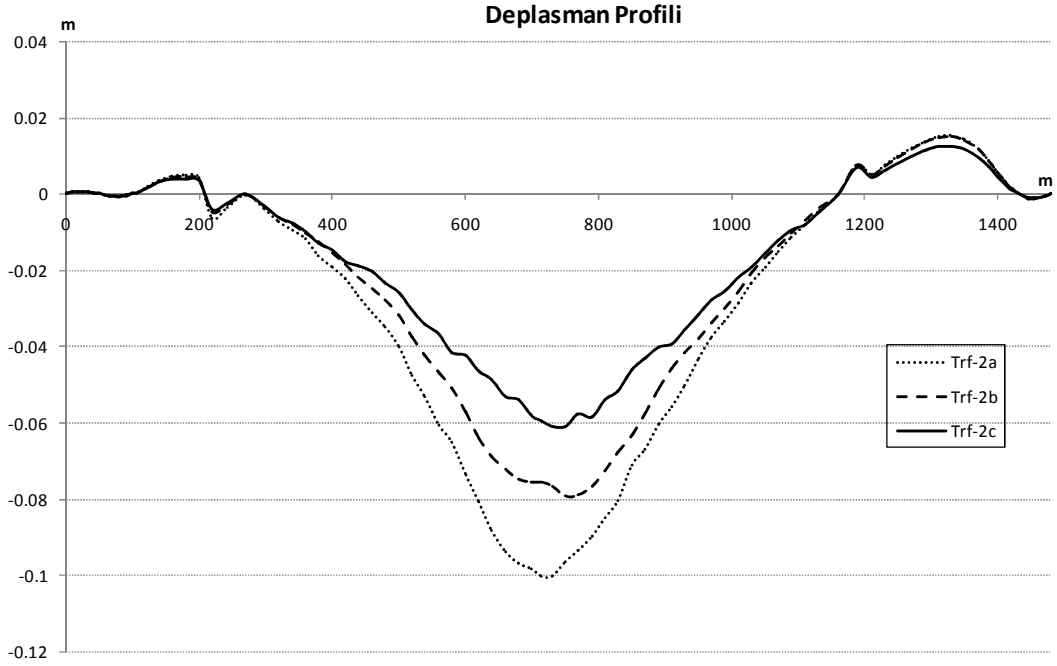


### 5.3. Trafik 2 Yüklemesi Altında Kablolü Köprü Davranışı



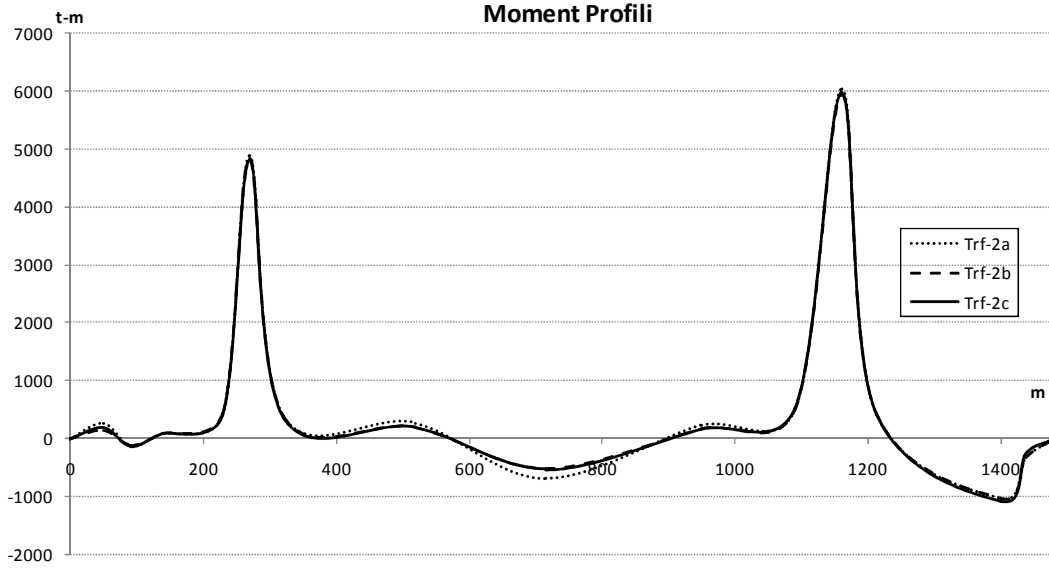
Şekil 5.11. Trafik 2 yük kombinasyonu modeli

Trafik 2 yüklemesinde trafik 1 yüklemesinden farklı olarak Şekil 5.11’de gösterildiği gibi köprünün yalnızca gidiş yönünde iki şeridinden 5sn zaman aralığıyla birer adet HS20-44 kamyonu geçirilmiş ve köprünün tek yönünün trafik yüklerini taşıması durumunda köprünün dinamik davranışında bir önceki duruma göre ciddi değişiklikler olup olmadığı irdelenmeye çalışılmıştır. Trafik 2 yüklemesinde köprünün bir önceki yükleme altındaki davranışından farklı olması beklenen davranışı burulma momentlerindeki değişimdir. Bu yükleme durumunda tek yönde trafik olması, taşıtların aynı hızlarda hareket etmelerine rağmen sayılarının, dolayısıyla da köprüye aktardıkları yüklerin azalmasına neden olmaktadır. Taşıt sayısı azalsa da köprünün aynı şekilde davranması beklenmektedir. Ancak sayısal değerlerde yükteki değişime bağlı değişimler olacaktır.



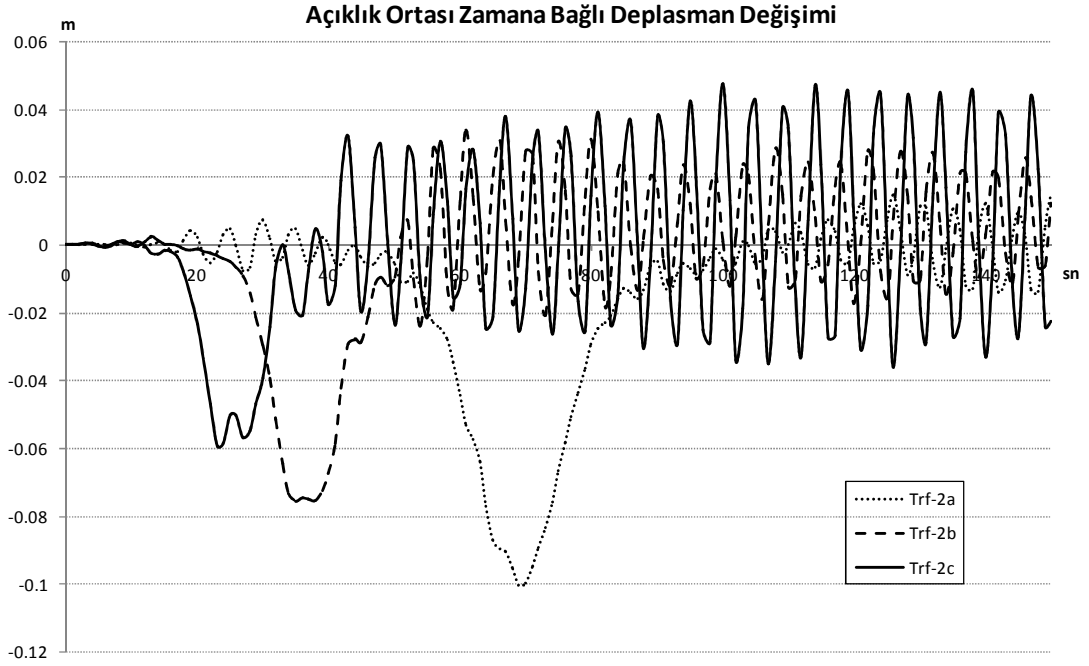
Şekil 5.12. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili

Şekil 5.12’de üç farklı hız için köprünün yalnızca gidiş yönünden 5sn aralıklarla geçen iki kamyonun köprü açıklığı boyunca meydana getirdiği maksimum deplasmanlar gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi trafik 1 yüklemesinde olduğu gibi burada da düşük hızla hareket eden taşıtların meydana getirdiği deplasmanlar taşıtların köprü üzerinde kalış sürelerinin fazla olması nedeniyle yüksek hızla hareket eden taşıtlara göre daha fazladır. Köprünün davranışı her iki yükleme durumunda da aynı iken elde edilen sayısal değerler değişmiştir. Örneğin köprü boyunca trafik 1a yüklemesinin meydana getirdiği maksimum deplasman 0,20 m mertebelerinde iken bu değer trafik 2a yüklemesinde yarıya inmekte ve 0,10 m ye düşmektedir. Taşıt sayısını azalması köprü davranışını değil bu davranış sonucunda elde edilen sayısal değerleri etkilemektedir.



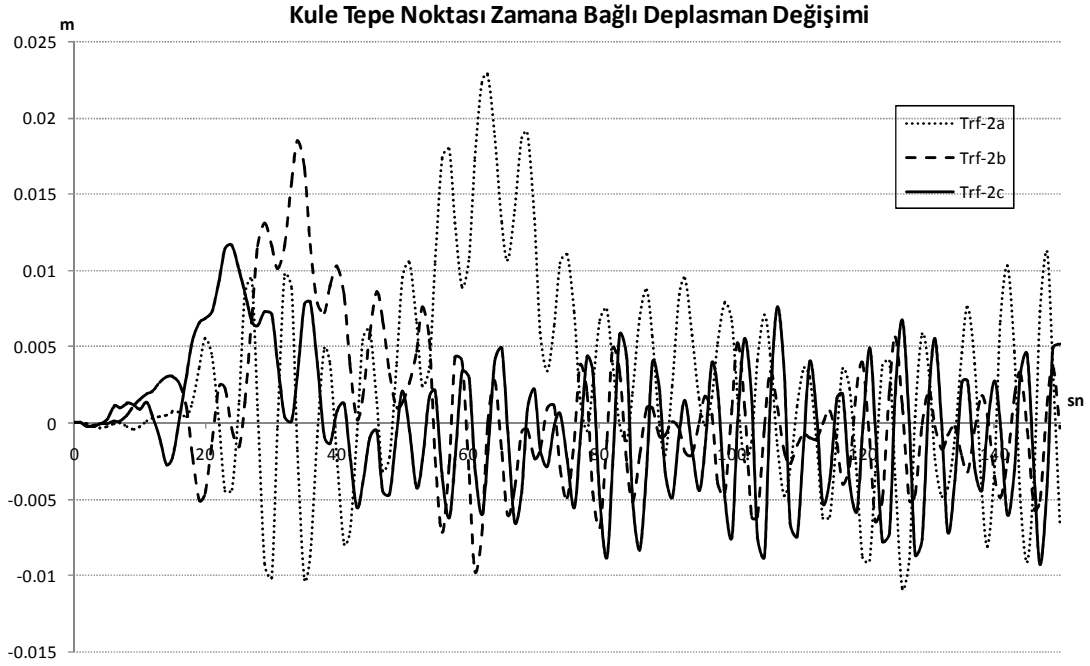
Şekil 5.13. Trafik 2 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı

Trafik 2 yüklemesi durumunda taşıt sayısının az olmasından dolayı Şekil 5.13'te görüldüğü gibi birbirine çok yakın moment dağılımları izlenmektedir. Moment dağılımı köprünün sabit yüklerinden kaynaklanan moment dağılımıyla hemen hemen aynıdır. Ancak şekil dikkatle irdelendiğinde yine en büyük açıklık ortası momentinin trafik 2a yüklemesi durumunda meydana geldiği görülmektedir ve bu değer yaklaşık olarak 600 ton-m mertebelerindedir. Trafik 2b ve 2c de meydana gelen momentler birbirine çok yakın değerlerdir. Kule bölgelerinde meydana gelen momentlerde taşıt hızlarının etkisi son derece küçüktür. Bunun nedeni kulelerin son derece rijit olarak tasarlanmış olmasıdır.



Şekil 5.14. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Köprünün açıklık ortasında en büyük deplasmanların düşük hızla hareket eden taşıtlar tarafından oluşturulduğu Şekil 5.14'ten anlaşılmaktadır. Ancak burada dikkati çeken önemli bir nokta vardır. Açıklık ortasında en büyük deplasman trafik 2a yüklemesi altında meydana gelmesine rağmen, zaman içerisinde en büyük deplasman değişimleri trafik 2c yüklemesi altında oluşmaktadır. Taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra köprüde meydana getirdikleri deplasmanlar incelendiğinde en büyük deplasman değişimlerine trafik 2c yüklemesinin neden olduğu görülmektedir. Taşıt sayısı azalsa da köprünün genel davranışı değişmemiştir. Yalnızca maksimum deplasmanlar yarıya inerek 0,10 m mertebelerine gerilemiştir.

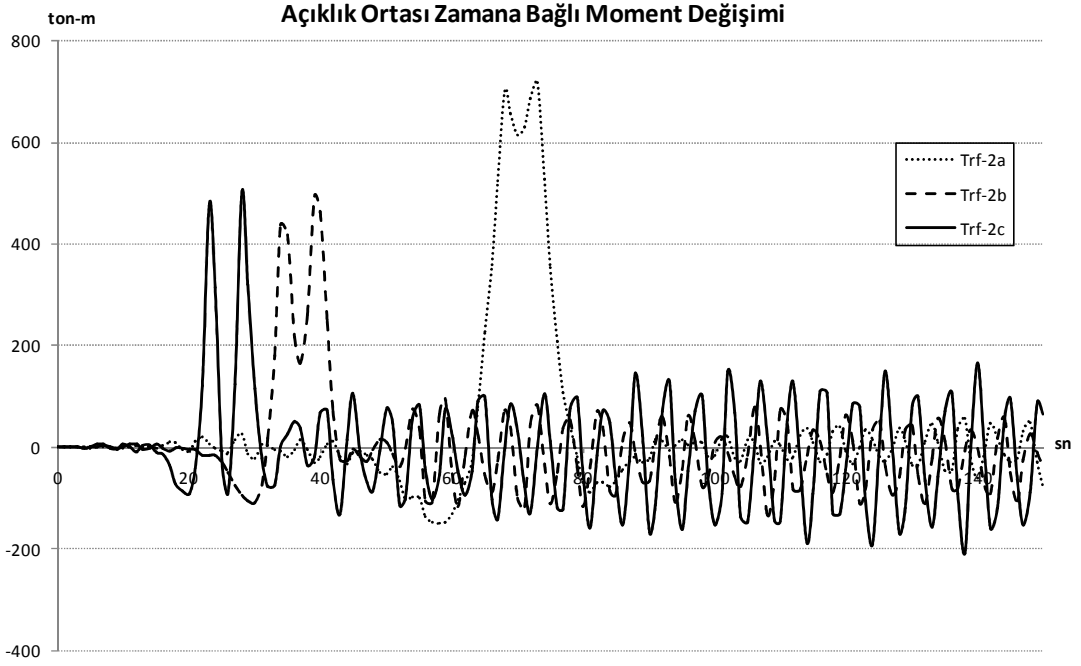


Şekil 5.15. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

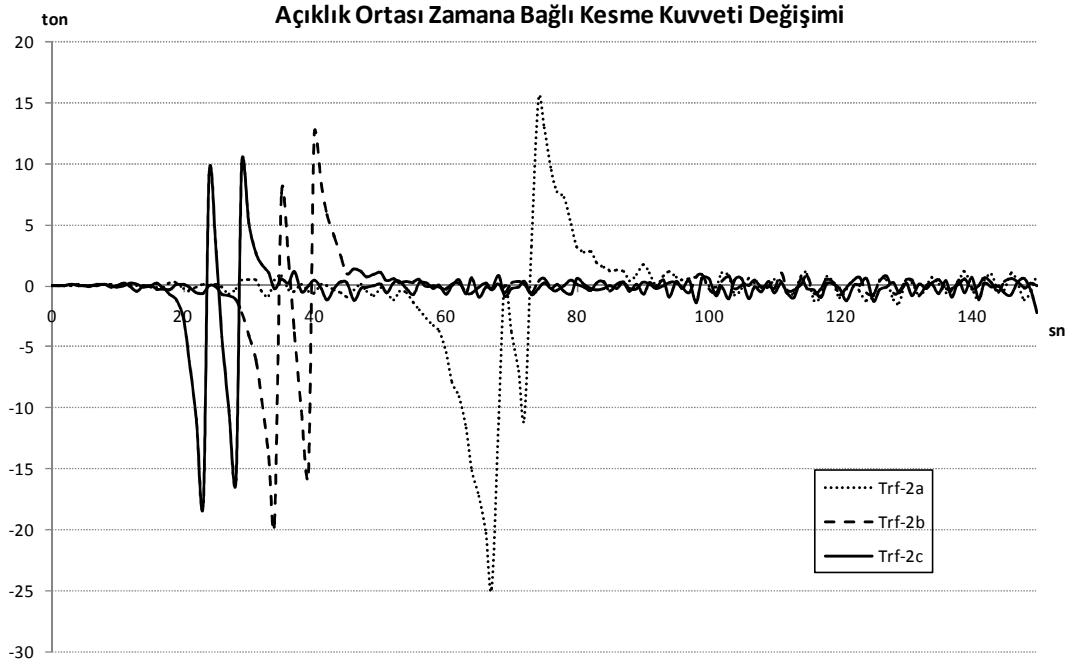
Kule tepe noktası deplasmanları Şekil 5.15'te görüldüğü gibi taşıt hızının azalmasıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Bu yükleme durumunda en büyük deplasmanlar trafik 2a yüklemesi altında meydana gelmektedir. Kule rijit bir yapıya sahip olduğundan taşıt sayısındaki küçük değişimler kulenin davranışını büyük oranda etkilememektedir. Hatta kulede meydana gelen deplasmanlar trafik 1 yüklemesindeki deplasmanlarla hemen hemen aynıdır ve 0,02 m mertebelerindedir. Ancak göz önüne alınması gereken en önemli durum bu yüklemelerde taşıt sayısının, dolayısıyla taşıt yüklerinin son derece düşük olması nedeniyle kule deplasmanları küçük çıkmaktadır. İleride yapılacak diğer yüklemelerde taşıt sayısı arttıkça ve taşıt hızları değiştikçe kule deplasmanının da dikkate alınması gerekebileceği düşünülmektedir.

Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen moment değişimleri Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi en büyük açıklık momentleri trafik 2a yüklemesi altında meydana gelmektedir. Açıklık ortasındaki en büyük momentler trafik 1a yüklemesinin yarısı mertebelerine düşmekte ve yaklaşık

700 ton-m olmaktadır. Taşıtların açıklık ortasından ayrılmasından sonra açıklık ortasında trafik 2a, trafik 2b ve trafik 2c yüklemelerinden kaynaklanan moment değişimleri birbirine çok yakın seyretmekle birlikte, en büyük moment değişimleri trafik 2c yüklemesinden kaynaklanmaktadır.

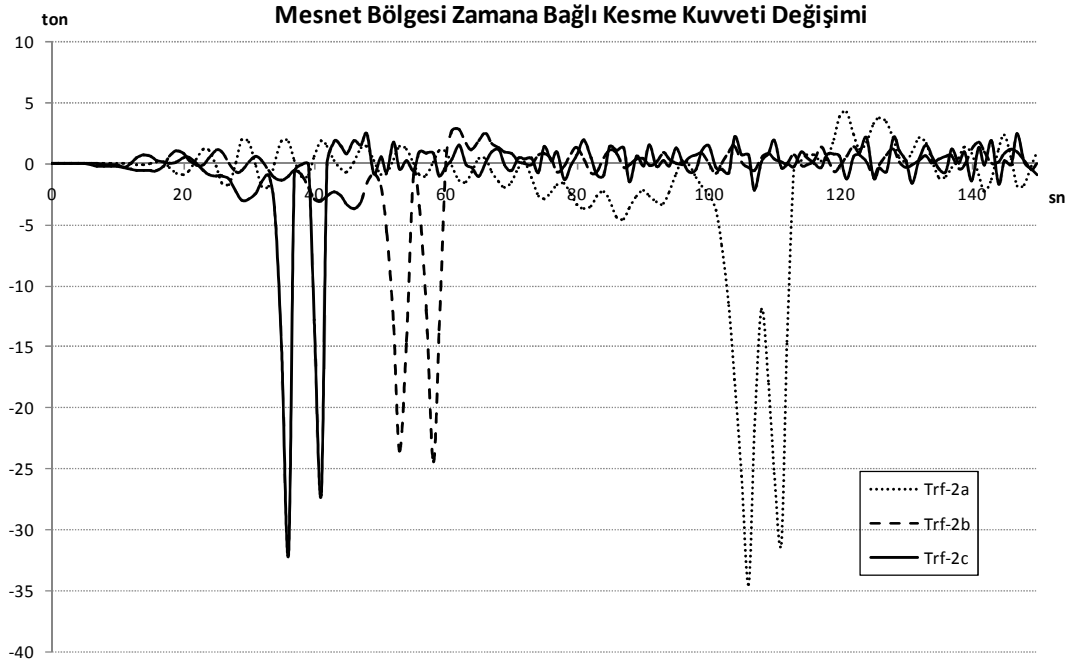


Şekil 5.16. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.17. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

Trafik 2 yüklemesi altında taşıtların açıklık ortasında meydana getirdiği kesme kuvvetleri ve bu kuvvetlerin zamana bağlı değişimi Şekil 5.17’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi taşıtların açıklık ortasından geçtikleri andaki en büyük kesme kuvvetlerine neden olan yük kombinasyonu trafik 2a yüklemesidir. Kesme kuvveti bu anda 25 ton seviyelerine çıkmaktadır. Trafik 2b ve trafik 2c yüklemeleri altında açıklık ortasındaki kesme kuvvetleri değişimi birbirine çok yakın ve yaklaşık olarak 20 ton mertebesinde. Taşıtlar açıklık ortasından geçtikten sonra açıklık ortası zamana bağlı kesme kuvvetleri değişimi her üç yükleme durumunda da birbirine çok yaklaşmaktadır.

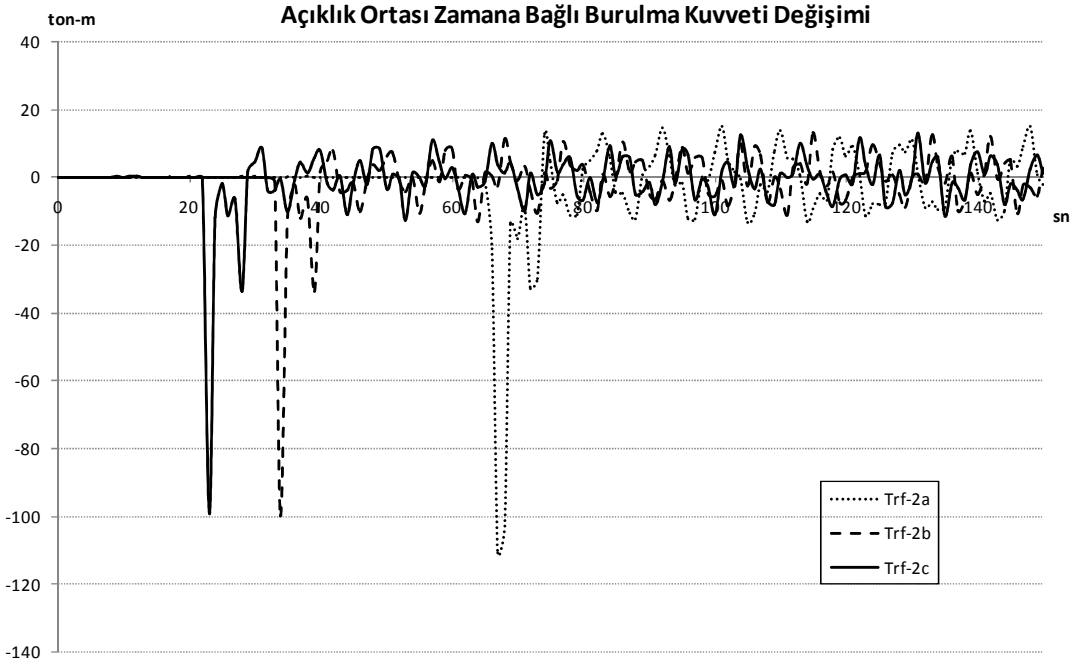


Şekil 5.18. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

Bir önceki analizde trafik 2 yük kombinasyonlarının açıklık ortasında meydana getirdikleri kesme kuvveti değişimleri irdelenmiştir. Ancak Şekil 5.18'den anlaşılacağı gibi büyük kesme kuvvetleri kulelere yakın mesnet bölgelerinde oluşmaktadır. Kesme kuvvetleri irdelenirken açıklık ortasında oluşanlardan çok kulelere yakın mesnet bölgelerinde meydana gelen kuvvetler dikkate alınmalıdır. Trafik 2a yüklemesi açıklık ortasında maksimum 25 ton kesme kuvvetine neden olurken mesnet bölgesinde bu değer 35 ton mertebelerine çıkmaktadır.

Trafik 2 yüklemesi altında taşıtların mesnet bölgelerinden uzaklaşmasıyla bu bölgelerdeki kesme kuvveti değerleri de son derece küçük çıkmaktadır. Ancak bu durum bu yükleme için geçerlidir. Taşıt yükünün artmasıyla hıza da bağlı olarak dikkate alınması gereken kesme kuvvetleri oluşacaktır.



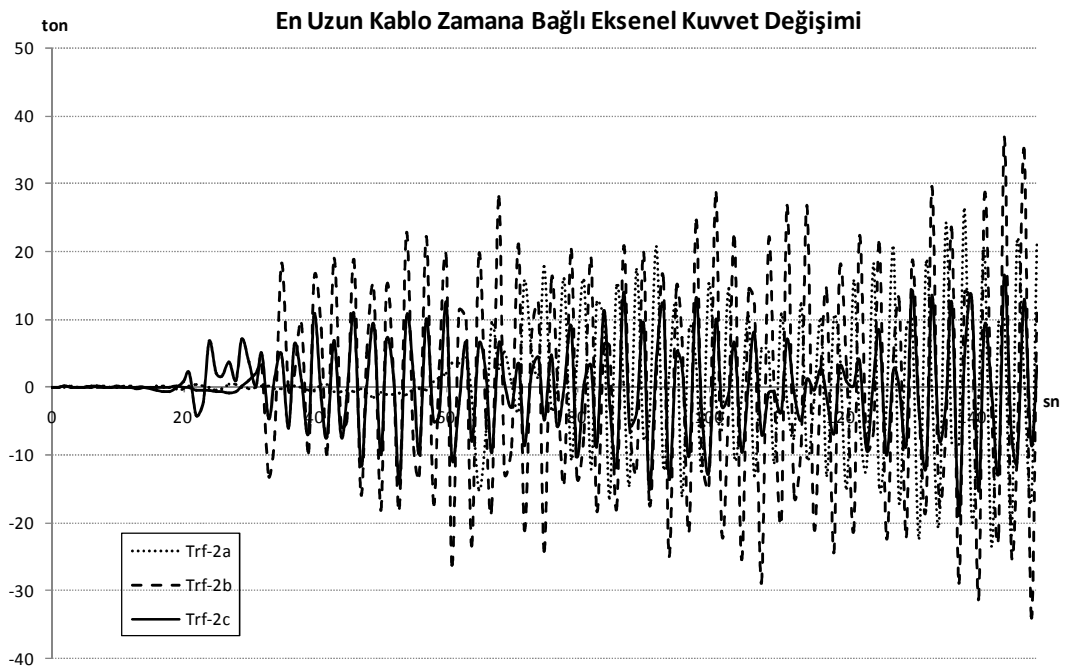


Şekil 5.19. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi

Açıklık ortasında trafik 2 yüklemesi nedeniyle meydana gelen burulma momentleri birbirine çok yakın değerlerdedir. Ancak, trafik 2a yüklemesinde elde edilen değerler diğer iki yüklemeye oranla biraz daha yüksek çıkmakta ve yaklaşık olarak 110 ton mertebesinde olmaktadır. Şekil 5.19'da taşıtlar açıklık ortasından geçtikten sonra köprüde yarattıkları burulma momentlerinin küçük mertebelere indiği ve birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Burada trafik yüklemesinin yalnızca gidiş yönünden iki şeritli olması nedeniyle burulma momentlerine ait maksimum değerler, negatif işaretli olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu negatif maksimum değerler, trafik yüklemesinin hem geliş hem de gidiş yönünde ikişer şerit olarak verildiği trafik 1 yüklemesi ile elde edilen negatif burulma momentlerine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun yanında trafik yüklemesinin her iki yönden verilmesine bağlı olarak, trafik 1 yüklemesinde ayrıca pozitif işaretli maksimum burulma momentleri ortaya çıkmıştır.

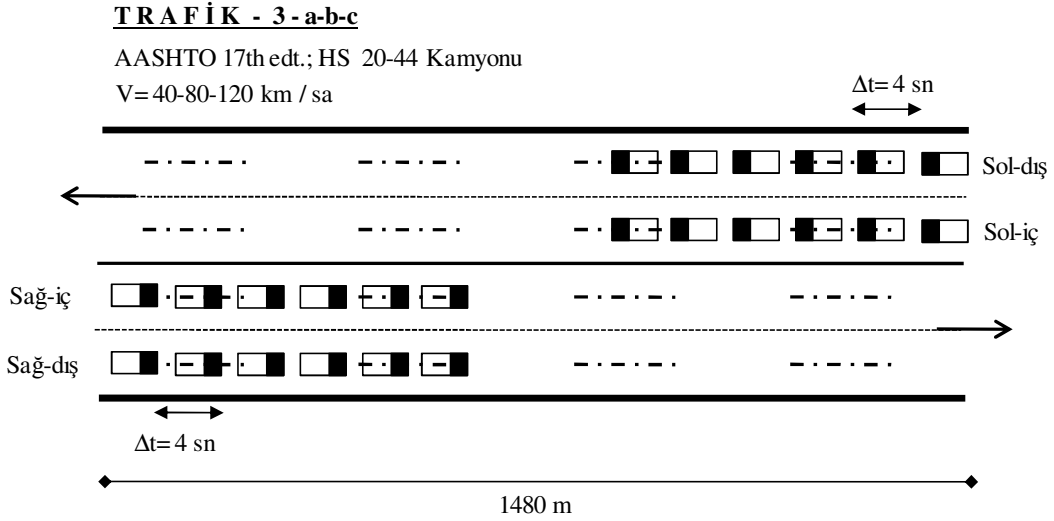
Kablolarda meydana gelen eksenel kuvvet değişimlerinin trafik 2a ve trafik 2b yüklemeleri altında birbirine yakın değerler olduğu, trafik 2c yüklemesi altında bu eksenel kuvvet değişimlerinin daha küçük olduğu Şekil 5.20'de görülmektedir. Taşıtlar

hızlarının artmasıyla köprüde meydana getirdikleri dinamik etkilerin azaldığı düşünülmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir nokta taşıtların köprüde meydana getirdikleri reaksiyonların, taşıtlar köprüden ayrıldıktan sonra da bir süre devam ettiği. Ayrıca tersinir yüklemeler çelik kablo elemanlarında zaman içinde yorulmaya neden olacaktır. Çelikteki yorulma tasarım aşamasında önemle üzerinde durulması gereken noktalardan biridir.



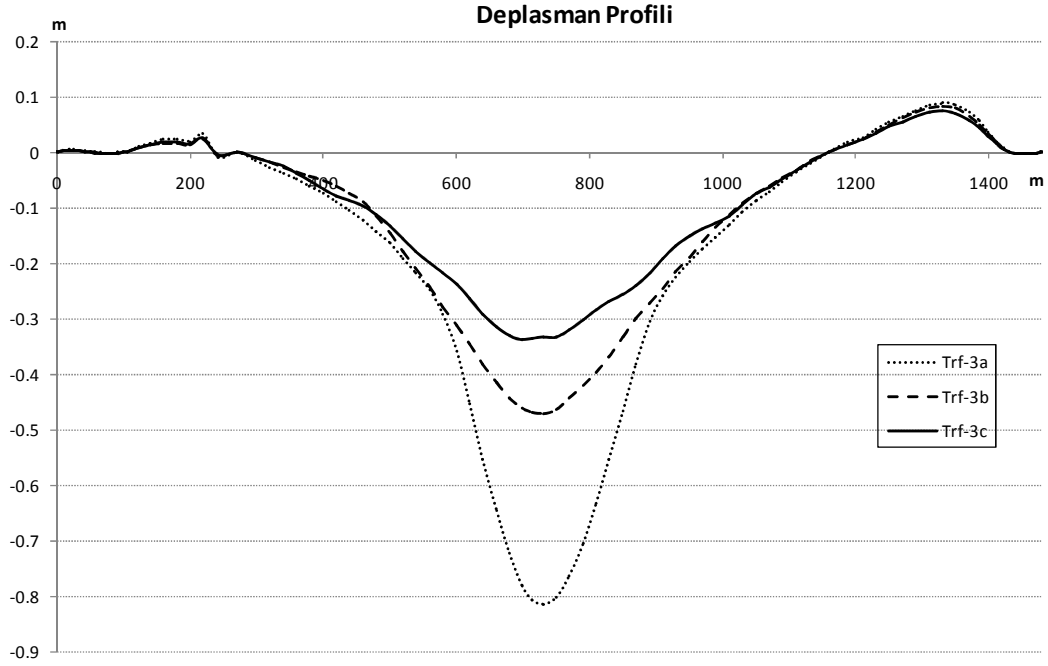
Şekil 5.20. Trafik 2a, 2b ve 2c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

### 5.4 Trafik 3 Yükleme Altında Kablolü Köprü Davranışı



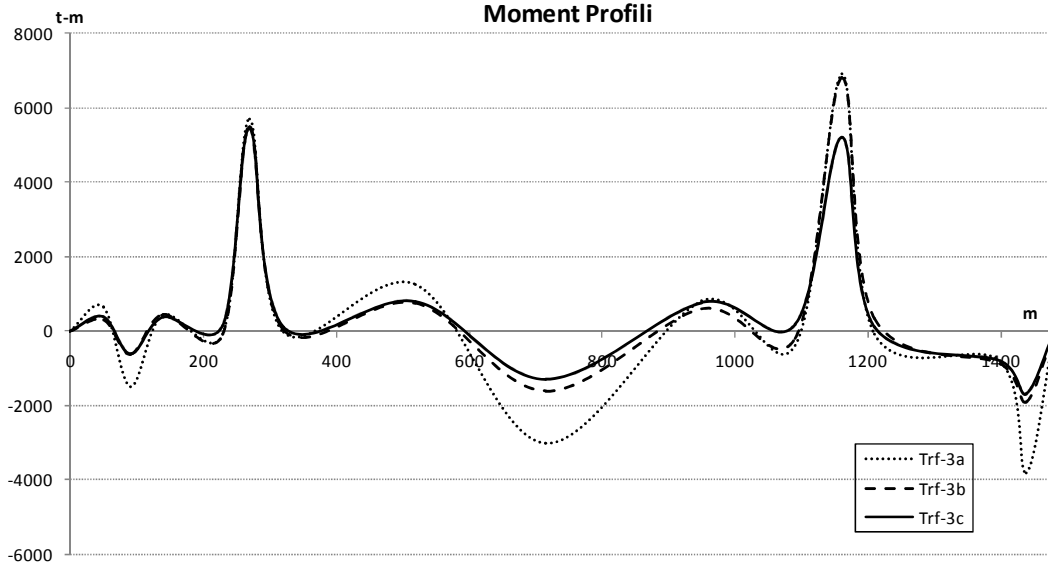
Şekil 5.21. Trafik 3 yük kombinasyonu modeli

Trafik 3 yüklemesi Şekil 5.21’de görüldüğü gibi model köprüünün gidiş yönünde iki ve dönüş yönündeki iki şeridinden 4 sn zaman aralığıyla altışar adet HS20-44 kamyonunun geçirildiği ve köprü davranışı hakkında önemli bilgiler verecek bir yükleme kombinasyonudur. Köprüünün hareketli taşıt yükleri altındaki davranışı trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde irdelenmiştir. Burada ise trafik yüklerinin artırılmasıyla ve yükleme tipinin değiştirilmesiyle yeni sonuçlara ulaşılması amaçlanmıştır. Trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde taşıtların modellenmesinde en basit taşıt modeli olarak kabul edilen hareketli tekil kütle modeli kullanılmışken, trafik 3 yüklemesinde belirli zaman aralıklarıyla ard arda taşıtların geçirilmesi hareketli tekil kütlelerden oluşan hareketli kütle serisi elde edilmiştir. Trafik 3 yüklemesinde taşıt sayısının artışıyla taşıt yüklerinin de ciddi oranda artacağı dikkate alındığında, hız ve yükleme parametreleri birlikte irdelenebilecektir. Analiz sonuçlarından anlaşılacaktır ki tek taşıt yükü altındaki köprü davranışıyla taşıt serilerinin meydana getirdiği dinamik davranış büyük benzerlik göstermektedir. Ancak taşıt yüklerinin artışıyla reaksiyonların sayısal değerleri artmaktadır.



Şekil 5.22. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili

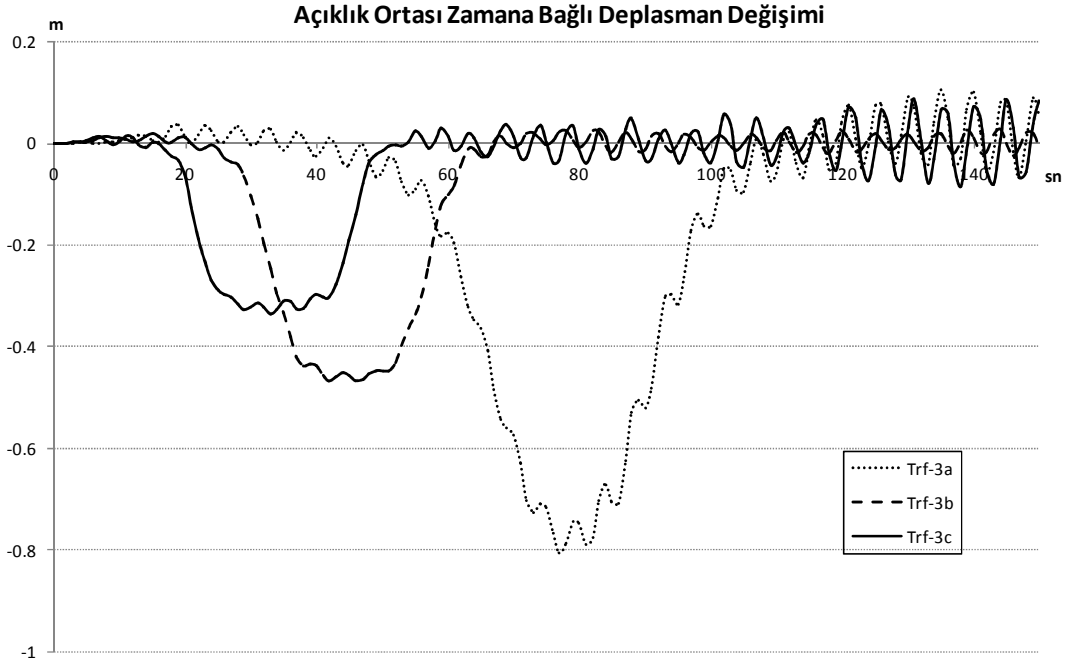
Trafik 3 yüklemesinde trafik 1a, trafik 1b ve trafik 1c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili Şekil 5.22’de verilmiştir. Taşıt sayısı ve yük kombinasyonları değiştirilse de şekilden açıkça anlaşılmaktadır ki taşıt hızı azaldıkça ve taşıtın köprü üzerinde kalış süresi arttıkça köprü boyunca meydana gelen deplasmanlar da artmaktadır. Trafik 1 ve trafik 2 yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen en büyük deplasmanlar en fazla 0,20 m değerlerine ulaşırken, bu değer trafik 3 yüklemesi altında yaklaşık 0,80 m ye çıkmaktadır ki, bu önceki yüklemelere göre çok ciddi bir değişimdir. Ayrıca yine şekil irdelendiğinde görülmektedir ki büyük deplasmanlar köprünün ana açıklığında meydana gelmektedir. Kenar açıklıklardaki deplasman değerleri açıklıktaki değerlere oranla son derece küçüktür.



Şekil 5.23. Trafik 3 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı

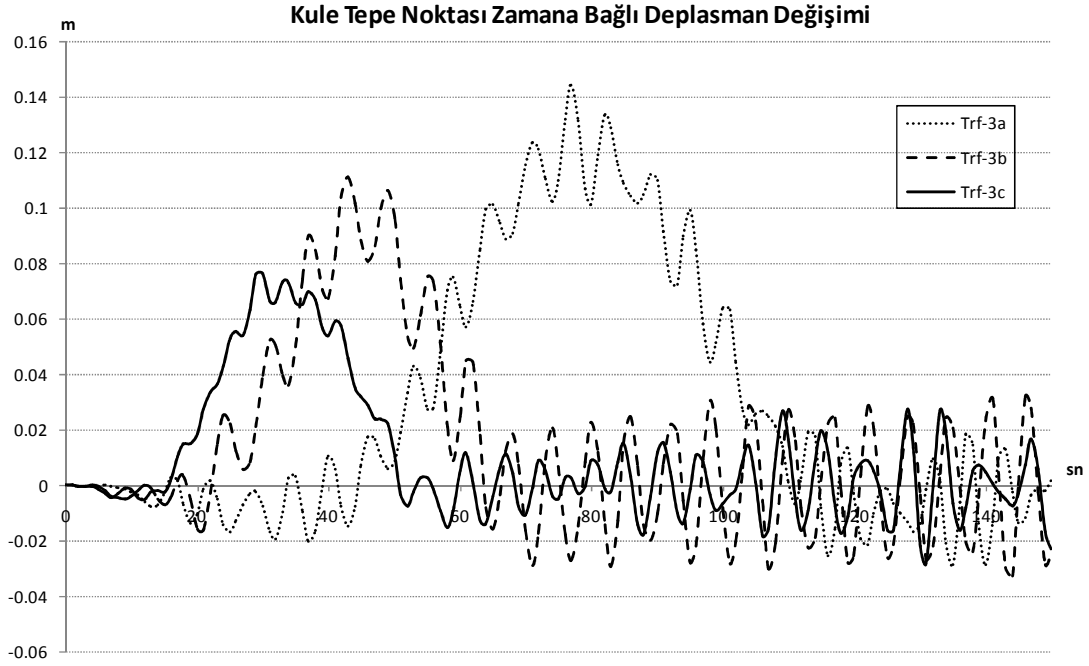
Burada da moment dağılımı şekil olarak diğer şekillerle benzerlik göstermektedir. Ancak taşıt sayısının en fazla olduğu yükleme tipi trafik 3 yüklemesi olduğundan elde edilen sayısal değerler diğer yüklemelere göre fazladır. En büyük moment değerlerinin özellikle mesnet bölgelerinde ve açıklık ortalarında oluştuğu ve trfaik 3a yüklemesi altında meydana geldiği Şekil 5.23'ten kolaylıkla anlaşılmaktadır.

Köprü boyunca meydana gelen moment profili, deplasman profilinde olduğu gibi köprü sabit yüklerinden meydana gelen moment değerlerinin toplam moment değerlerinden çıkarılmasıyla yalnızca trafik yüklerinden meydana gelen momentler için oluşturulmuştur. Şekil 5.23 incelendiğinde en büyük moment değerlerinin trafik 1a yüklemesi altında elde edildiği görülmektedir. Trafik 1b ve 1c yüklemesi durumunda moment değerleri birbirine çok yakın olmaktadır.



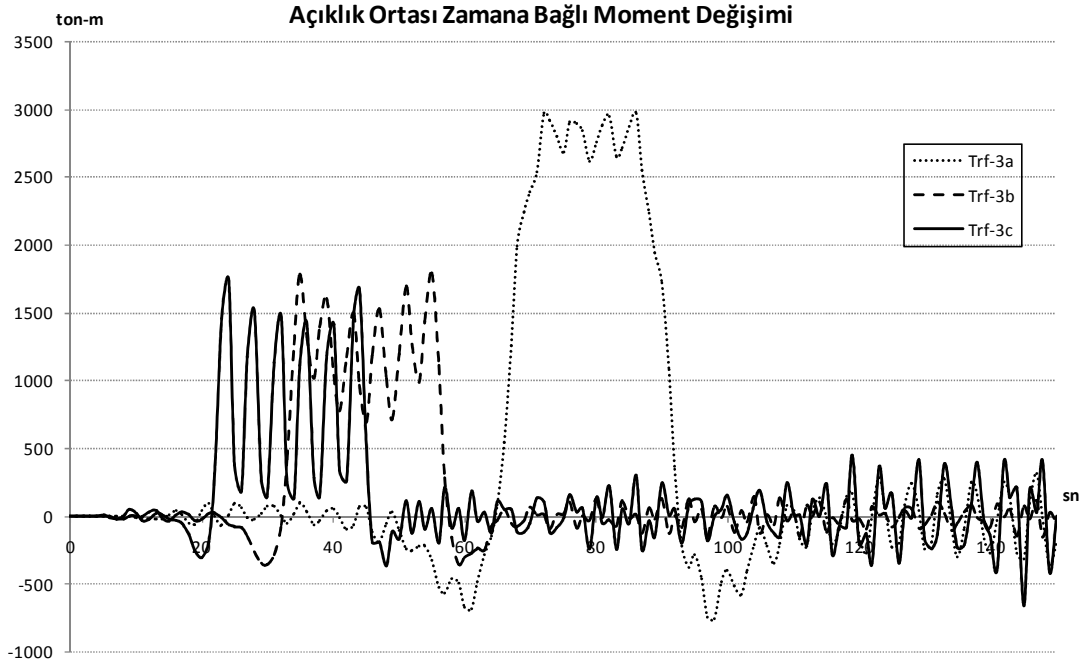
Şekil 5.24. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Trafik 3 kombinasyonunda köprünün açıklık ortasındaki en büyük deplasmanların trafik 3a yüklemesi tarafından yaratıldığı Şekil 5.24'te görülmektedir. Taşıtların açıklık ortasından ayrılmasıyla deplasmanlar hızla küçük değerlere düşmekte ancak zaman içinde yeniden artış göstermektedir. Dikkati çeken bir nokta da trafik 3a yüklemesi altında meydana gelen maksimum deplasman değerinin trafik 3b ve trafik 3c yüklemeleri altındaki değerlerin iki katını geçtiğidir. Aynı yükler altındaki köprüde meydana gelen deplasmanlar arasındaki bu ciddi fark taşıt hızının önemini ön plana çıkarmaktadır. Açıklık ortası deplasmanları trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde 0,10 m - 0,20 m mertebelerinde iken trafik 3 yüklemesinde taşıt sayısının dolayısıyla da taşıt yüklerinin artışıyla 0,80 m mertebelerine ulaşmaktadır. Yani taşıt hızı ve taşıttan gelen yükler birlikte dikkate alınması gereken iki önemli parametredir.



Şekil 5.25. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Kule tepe noktası deplasmanları Şekil 5.25'te görüldüğü gibi taşıt hızlarının azalmasıyla ters orantılı olarak artış göstermektedir. En büyük deplasmanlar trafik 3a yüklemesi altında meydana gelmektedir. Kulenin son derece rijit yapısı nedeniyle trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde kule deplasmanları ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde çıkmıştır. Ancak göz önüne alınması gereken en önemli durum bu yüklemelerde taşıt sayısının, dolayısıyla da taşıt yüklerinin son derece düşük olması nedeniyle kule deplasmanlarının küçük çıkmasıdır. Trafik 3 yüklemesinde taşıt sayısı, dolayısıyla taşıt yükleri arttıkça ve taşıt hızları değiştikçe kule tepe noktası deplasmanları da önceki yüklemelere oranla ciddi artış göstererek 0,20 m mertebelerine çıkmaktadır. Taşıt yükünün fazla olduğu yükleme durumları için modelin oluşturulmasında kule deplasmanları önemli bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Ayrıca önceki yükleme durumlarında da değinildiği gibi kulenin uzun süre deforme kalmasına neden olan yükleme tipi burada da trafik 3a'dır. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi kabloların aksenal kuvvetlerinde ve yük taşıma kapasitelerinde düşüğe neden olacaktır. Taşıt yüklerinin artışının deplasmanları da arttıracığı dikkate alındığında, tasarımda bu durum üzerinde önemle durulmalıdır.



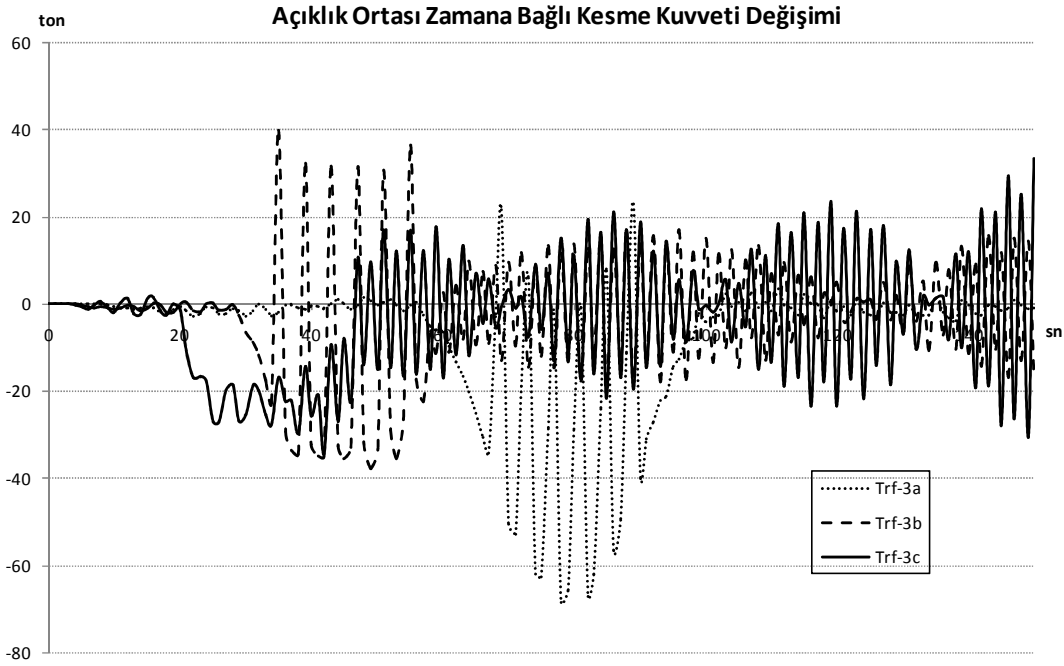
Şekil 5.26. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi

Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen moment değişimleri Şekil 5.26’da verilmiştir. En büyük açıklık momentleri trafik 3a yüklemesi altında meydana gelmektedir. Açıklık ortası geçildikten sonra bu bölgede trafik 3a, trafik 3b ve trafik 3c yüklemeleri altında moment değişimleri birbirine çok yakın seyretmektedir. Açıklık momenti değeri trafik1 ve trafik2 yüklemelerinde en fazla 300 ton-m ile 600 ton-m düzeylerinde iken diğer reaksiyonlar gibi açıklık momentleri de taşıt sayısı ve yüklerinin artışıyla büyüyerek trafik 3 yüklemesi altında 3 000 ton-m mertebelerine çıkmaktadır. Taşıt hızlarının değişiminin en yüksek oranda etkilediği reaksiyonlardan birisi, yapılan irdelemelerden anlaşıldığı gibi moment değişimleridir.

Açıklık ortası kesme kuvvetlerinin değişimi, trafik 3 yüklemesi için trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinden farklı olarak tekrarlı yük serilerinin geçişi şeklinde olduğundan kesme kuvveti değişimi de farklılık göstermektedir. Şekil 5.27’de görüldüğü gibi açıklık ortası kesme kuvvetleri de en yüksek değerlerine trafik 3a yüklemesi altında ulaşmakta ve yaklaşık olarak 65 ton olmaktadır. Şekil irdelendiğinde fark edilen bir



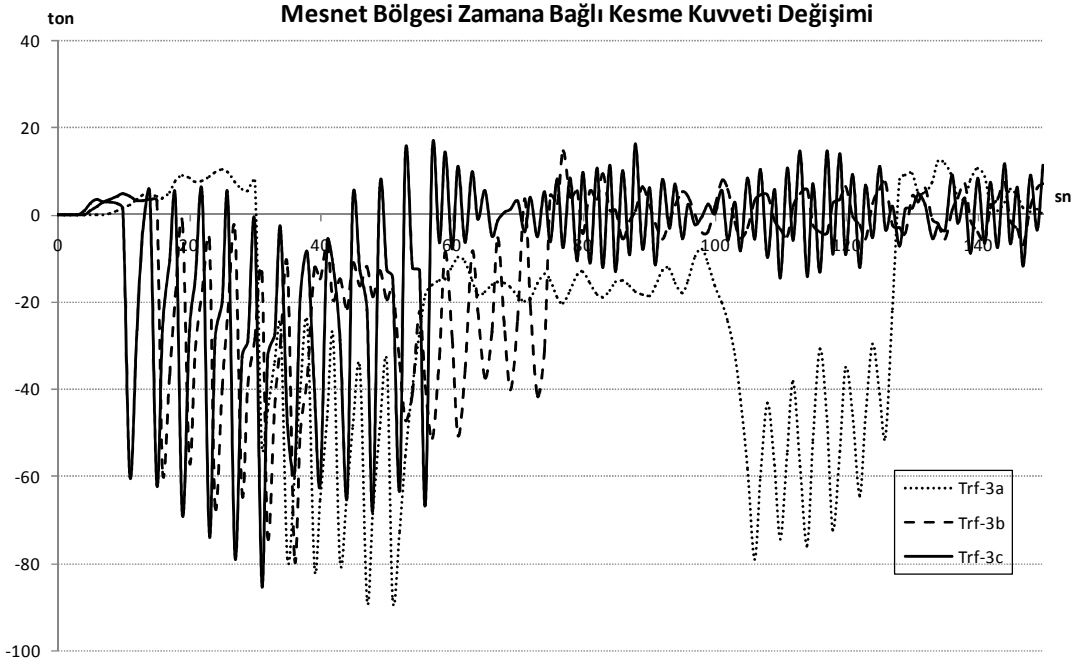
diğer nokta kesme kuvvetlerinin değişimidir. Zaman içinde kesme kuvvetleri sürekli bir artış ve azalış göstermekte ve tersinir yüklemelere neden olmaktadır. Taşıtların hızı azalıp, köprü üzerinde kalış süreleri arttıkça açıklık ortası kesme kuvveti değerleri de artmaktadır.



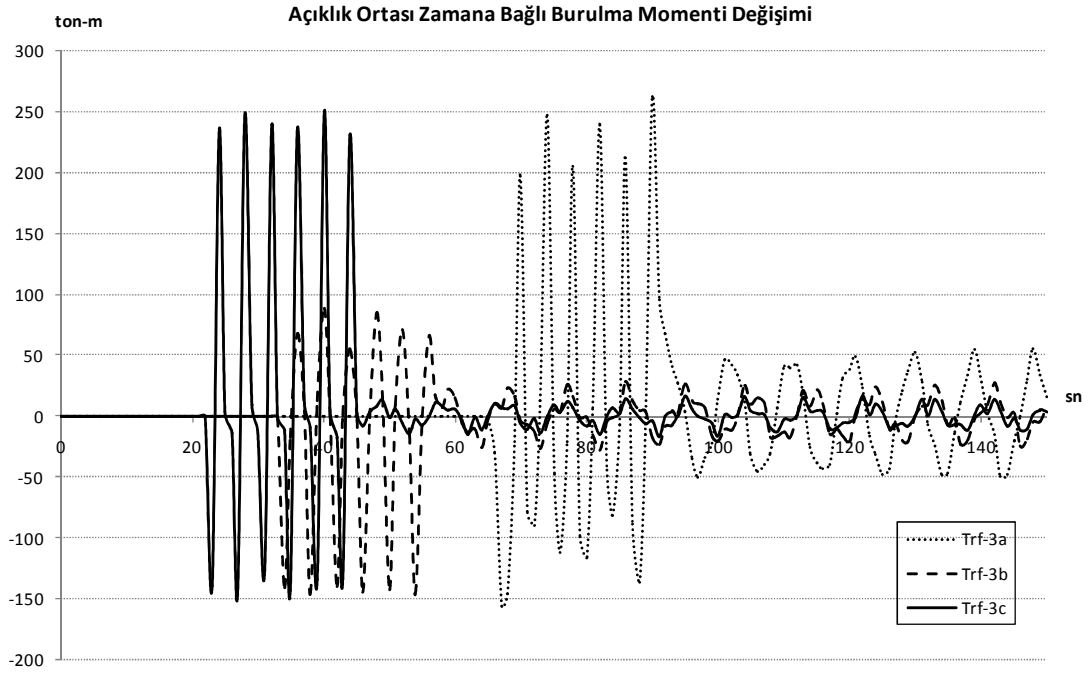
Şekil 5.27. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

Önceki yüklemelerde olduğu gibi trafik 3 yüklemesi durumunda da asıl dikkate alınması gereken mesnet bölgelerinde oluşan kesme kuvvetleridir. Trafik 3a yüklemesi Şekil 5.28'den anlaşılacağı gibi mesnet bölgelerinde en büyük kesme kuvvetlerinin oluşmasına neden olan yüklemeye tipidir ve bu yüklemeye durumunda şekilde okunan en büyük kuvvetler yaklaşık olarak 85 ton mertebesindedir. Ancak diğer yüklemeler altındaki maksimum kuvvetler de bu değere yakındır. Yine bu yüklemeye grubunda zamana bağlı tersinir kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Şekilde dikkati çeken diğer bir nokta da taşıtların hareketlerinin başlangıcında kule bölgesinde üç yüklemeye için de birbirine yakın kesme kuvvetleri oluşurken, zaman içinde bu değerlerin küçülmesi olmuştur.

Modelleme açısından dikkate alınması gereken kesme kuvveti değerleri, mesnet bölgesi kesme kuvvetleri olmalıdır. Ancak, taşıt sayısındaki artışa ve taşıt hızına bağlı olarak açıklık ortası kesme kuvvetleri de modelleme açısından önemli olabilmektedir.

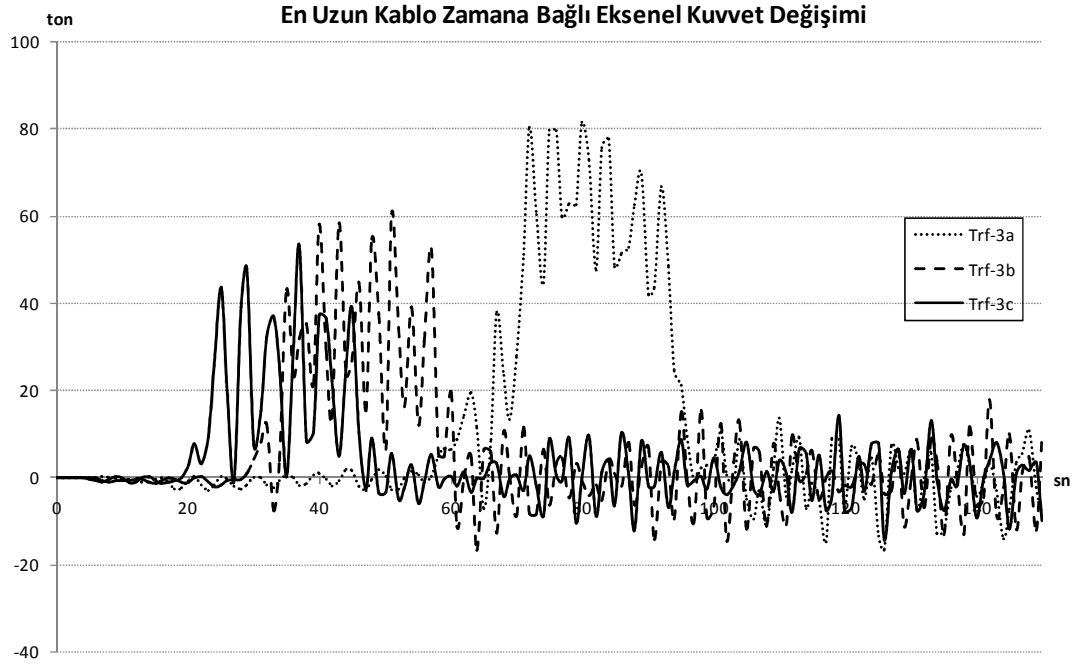


Şekil 5.28. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.29. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi

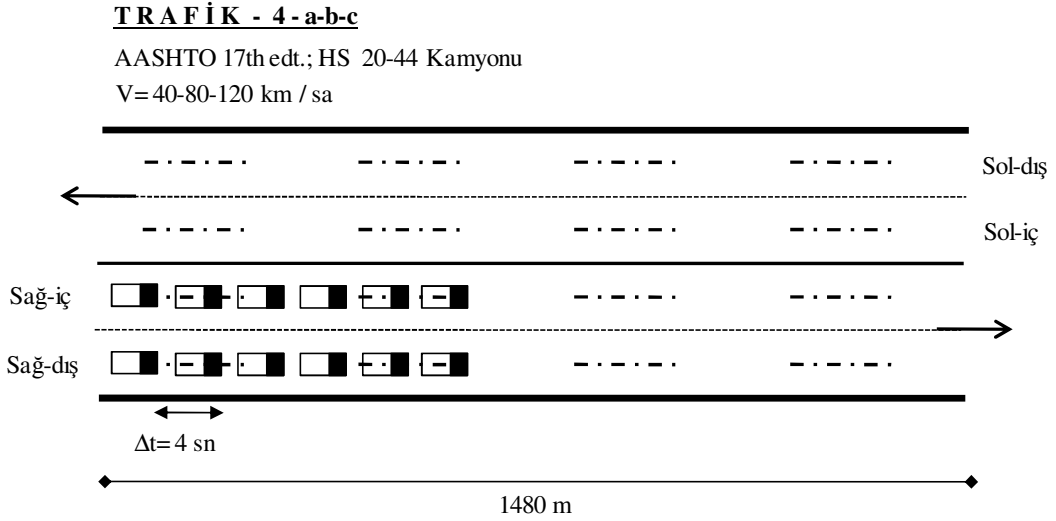
Trafik 3a ve 3c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen pozitif burulma momentleri birbirine çok yakın değerlerdedir ve yaklaşık olarak 250 ton mertebelerindedir. Trafik 3b yüklemesi nedeniyle meydana gelen pozitif burulma momentleri diğer iki yüklemeye göre daha düşüktür ve 100 ton mertebesindedir. Ancak her üç yükleme için de negatif burulma momentleri yine birbirine yakın olup, yaklaşık 150 ton mertebesindedir. Burulma momentlerinin en küçük çıktığı yüklenme durumu model köprünün tasarım hızı olan 80km/s'e karşılık gelen yüklenme durumudur. Taşıtların, köprüden sürekli olarak bu tasarım hızında geçmeyeceği düşünüldüğünde, burulmaların bütün yüklenme durumlarında kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasını sağlayacak kesitler teşkil edilmelidir. Şekil 5.29'dan anlaşılacağı gibi taşıtlar açıklık ortasından ayrıldıktan sonra açıklık ortasında meydana gelen burulma momentleri her üç yüklenme durumu için birbirine çok yakın değerler almaktadır. Taşıtların ve dolayısıyla taşıtların yükleri arttıkça bu değerlerde belirli bir oranda artış görülmektedir.



Şekil 5.30. Trafik 3a, 3b ve 3c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

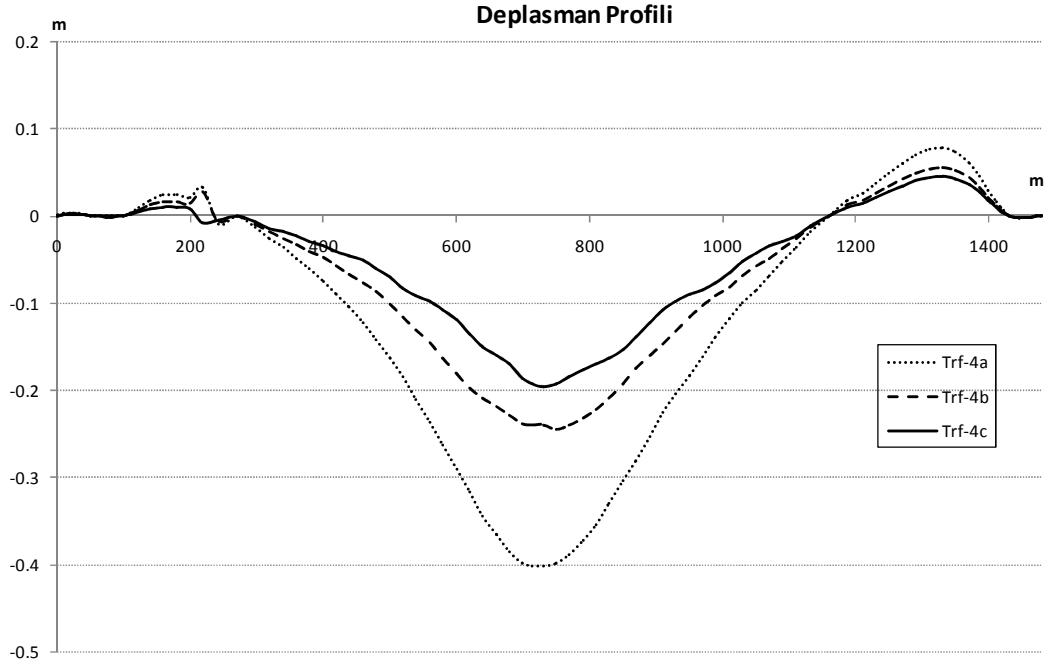
En uzun kablodaki eksenel kuvvet değişiminin en belirgin ve en büyük olduğu yükleme trafik 3a yüklemesidir. Bu değer trafik 3a yüklemesinde 80 ton seviyesinde iken, trafik 3b ve trafik 3c yüklemelerinde birbirine çok yakın olup, 60 ton mertebelerindedir. Taşıtların hızı azaldıkça diğer bir deyişle taşıtların köprüde kalış süreleri arttıkça kabloda meydana gelen eksenel kuvvetler de büyümektedir. Aynı anda taşıtların büyük çoğunluğunun açıklık ortasında bulunduğu andaki eksenel kuvvetler en büyük değerlerdir. Şekil 5.30'da da görüldüğü gibi açıklık ortasında bulunan taşıt sayısı azaldıkça kablo eksenel kuvvet değerlerinde de büyük azalmalar görülmektedir. Açıklık ortasından taşıtların uzaklaşması neticesinde her üç yükleme altında meydana gelen kablo eksenel kuvveti değerleri birbirine çok yaklaşmakta ve taşıtların açıklık ortasında bulunduğu durum için çıkan değerlere göre çok küçülmektedir.

### 5.5 Trafik 4 Yüklemesi Altında Kablolu Köprü Davranışı



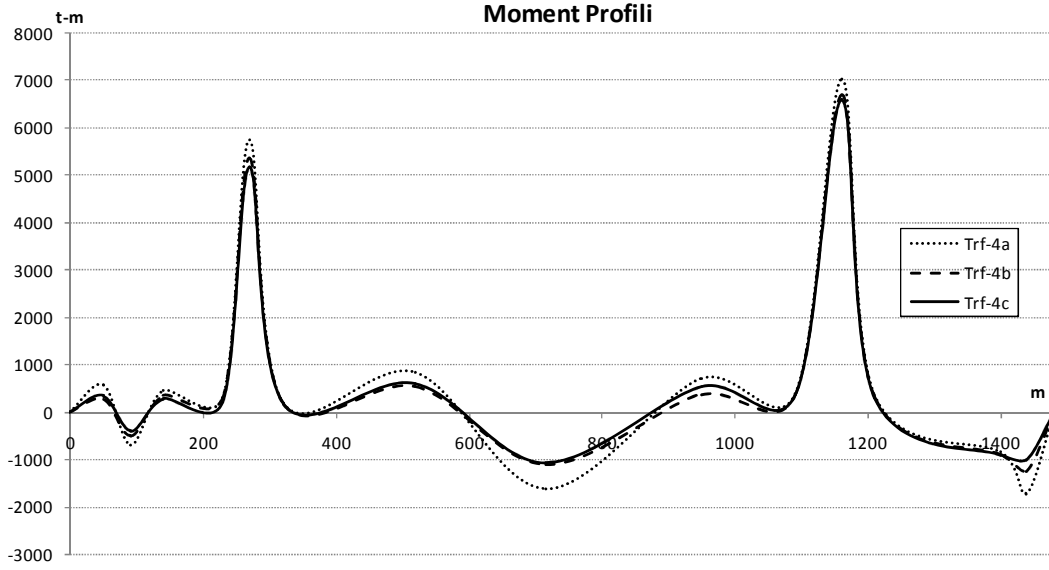
Şekil 5.31. Trafik 4 yük kombinasyonu modeli

Şekil 5.31’de görüldüğü gibi Trafik 4 yüklemesinde köprünün yalnızca gidiş yönündeki iki şeridinden 4sn zaman aralığıyla altışar adet HS20-44 kamyonu geçirilmiş ve köprünün bu yükleme altındaki davranışı önceki yükleme durumlarıyla karşılaştırılarak, tasarımda dikkate alınması gereken noktalar belirlenmeye çalışılmıştır. Trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde taşıtlar en basit taşıt modeli olan hareketli tekil kütle modeli ile temsil edilirken, trafik 3 ve trafik 4 yüklemesinde belirli zaman aralıklarıyla ard arda taşıtların geçirilmesi nedeniyle hareketli kütle serisi olarak tanımlanmıştır. Trafik 4 yüklemesinde de trafik 3 yüklemesinde olduğu gibi taşıt sayısı ve dolayısıyla taşıt yükü fazla olduğundan taşıt yükünün ve taşıt hızlarının köprü dinamik davranışına etkisi birlikte analiz edilebilir. Bu yükleme trafik 2 yükleme durumuyla benzerlik göstermektedir. Ancak, buradaki taşıt sayısı trafik 2 yüklemesine göre oldukça fazladır. Bu yükleme durumunda köprünün yalnızca bir yönünde trafik yükleri bulunduğu için, köprünün bazı reaksiyonlarında simetrik yüklemelere göre değişiklikler beklenmektedir.



Şekil 5.32. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili

Trafik 4 yüklemesi altında, köprü üzerinde farklı hızlarla hareket eden taşıtların yarattıkları deplasman değişimleri irdelenmiş ve köprü boyunca meydana gelen maksimum deplasman profili Şekil 5.32’de verilmiştir. Taşıt sayısı ve yük kombinasyonları değiştirilse de şekilden açıkça anlaşılmaktadır ki taşıt hızı azaldıkça ve taşıtın köprü üzerinde kalış süresi arttıkça köprü boyunca meydana gelen deplasmanlar da artmaktadır. Köprünün yalnızca tek yönünün dolu olması deplasman profilini değiştirmemiş, sadece trafik 3 yüklemesinde meydana gelen deplasmanları yarıya indirgemıştır. Trafik 3 yükleme durumunda trafik 3a yüklemesinde köprü boyunca elde edilen maksimum deplasman yaklaşık 0,80 m iken trafik 4a yüklemesinde 0,40 m seviyesine inmiştir.

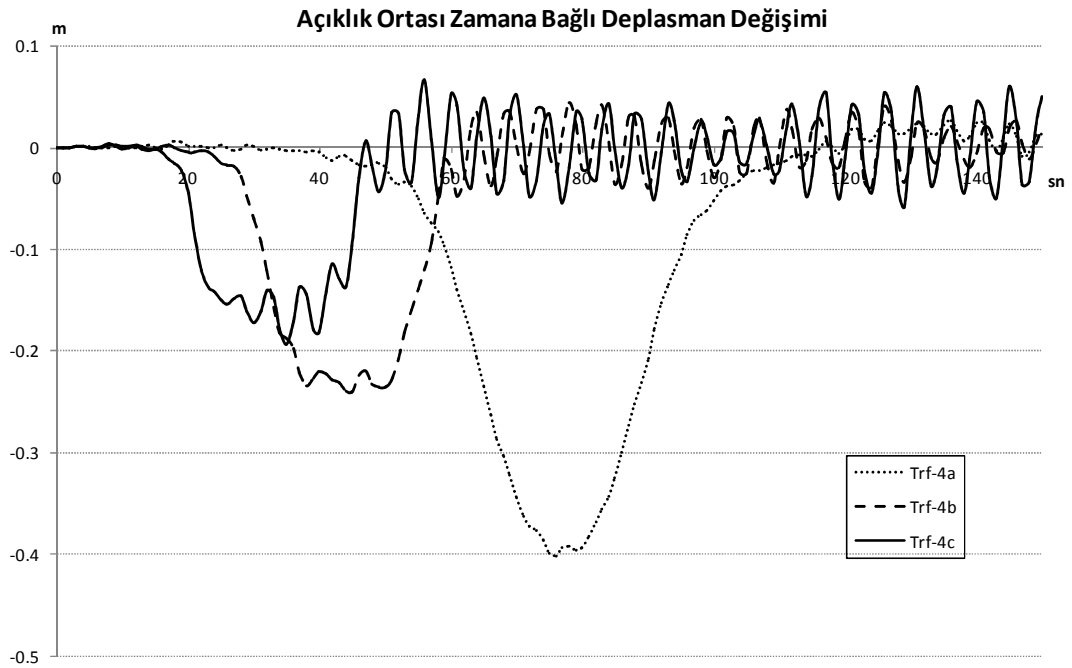


Şekil 5.33 Trafik 4 yüklemesi durumunda köprü boyunca moment dağılımı

Trafik 4 yüklemesi altında da köprü davranışı diğer yükleme tipleriyle benzerlik göstermektedir. Ancak sayısal değerler trafik 3 yüklemesine göre yaklaşık olarak yarıya inmektedir. Kule bölgesi moment değerleri 5 800 - 7 000 ton-m mertebelerindedir. Kulenin rijit yapısı nedeniyle bu değerler köprünün sabit yükleri altında elde edilen değerlere oldukça yakındır. Dikkate alınması gereken asıl momentler burada da açıklık ortası momentleridir. Bu yükleme tipinde en büyük açıklık ortası momentine trafik 4a yüklemesi neden olmaktadır ve bu değer 1 700 ton-m mertebelerindedir. Trafik 4b ve 4c yüklemelerinde elde edilen değerler birbirine çok yakındır.

Trafik 4 yüklemesi altındaki köprünün açıklık ortasında meydana gelen en büyük deplasmanlarının düşük hızla hareket eden taşıtlar tarafından yaratıldığı, yani en kritik yüklemenin bu analiz için trafik 4a olduğu Şekil 5.34'te görülmektedir. Köprüden ayrılan taşıtların yarattığı deplasmanlar taşıtların köprü üzerinde bulunduğu andakilere göre oldukça küçüktür ve deplasman değişimleri zamana bağlı olarak her üç yükleme için de birbirine yaklaşmaktadır. Açıklık ortası deplasmanları trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde 0,10 m - 0,20 m mertebelerinde iken trafik 3 yüklemesinde taşıt sayısının dolayısıyla da taşıt yüklerinin artışıyla 0,80 m

mertebelerine ulaşmıştır. Trafik 4 yüklemesinde ise taşıt sayısının trafik 3 yükleme durumundakine göre yarıya inmesiyle, deplasman değerleri de maksimum 0,40 m değerlerine düşmüştür. Taşıt hızlarındaki değişimler analizlerde çıkması beklenen deplasman profilinin şeklini etkilemezken, önceden de belirtildiği gibi trafik yüklerinin artmasıyla veya azalmasıyla bağlantılı olarak nümerik değerler değişiklik göstermektedir.

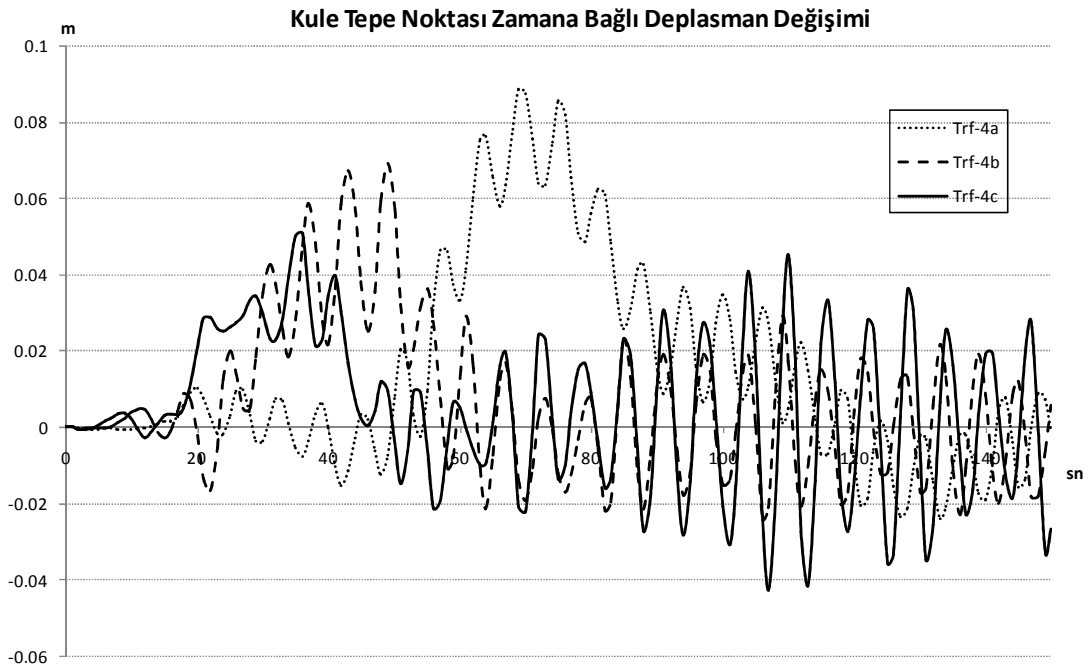


Şekil 5.34. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında köprünün açıklık ortasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Trafik 4 yük kombinasyonu altında kule tepe noktası deplasmanları Şekil 5.35'te görüldüğü gibi taşıt hızı azaldıkça artış göstermektedir. En büyük deplasmanlar trafik 4a yüklemesinde meydana gelmektedir. Ancak zamana bağlı en büyük kule tepe noktası deplasman değişimlerine trafik 4c yüklemesi neden olmaktadır. Kulenin son derece rijit yapısı nedeniyle trafik 1 ve trafik 2 yüklemelerinde kule deplasmanları taşıt sayısının, dolayısıyla taşıt yüklerinin son derece düşük olması nedeniyle düşük çıkmıştır. Trafik 3 yüklemesinde taşıt sayısı, dolayısıyla taşıt yükleri arttıkça ve taşıt hızları değiştikçe kule tepe noktası deplasmanları da önceki yüklemelere oranla ciddi artış göstererek, 0,20 m mertebelerine çıkmıştır. Trafik 4 yüklemesinde ise bilindiği

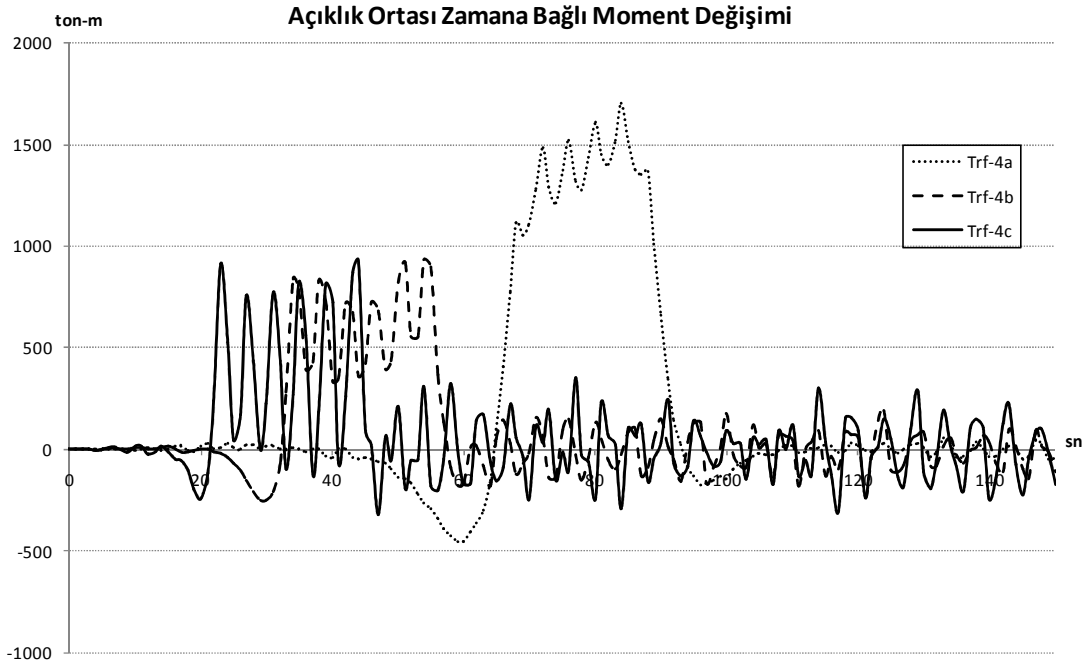


gibi taşıt sayısı trafik 3 yüklemesinin yarısına düşmekte, buna bağlı olarak da kule deplasmanları 0,10 m seviyesine inmektedir. Kule elemanlarının trafik yükleri dikkate alınarak tasarlanması kablo aksel kuvvetlerinin durumu açısından son derece önemlidir. Bu nedenle tıpkı Tatar Köprüsünde olduğu gibi tüm kablolu köprülerde, kuleler kablo aksel kuvvetlerinde düşüşe neden olmayacak rijitlikte tasarlanmalıdır.

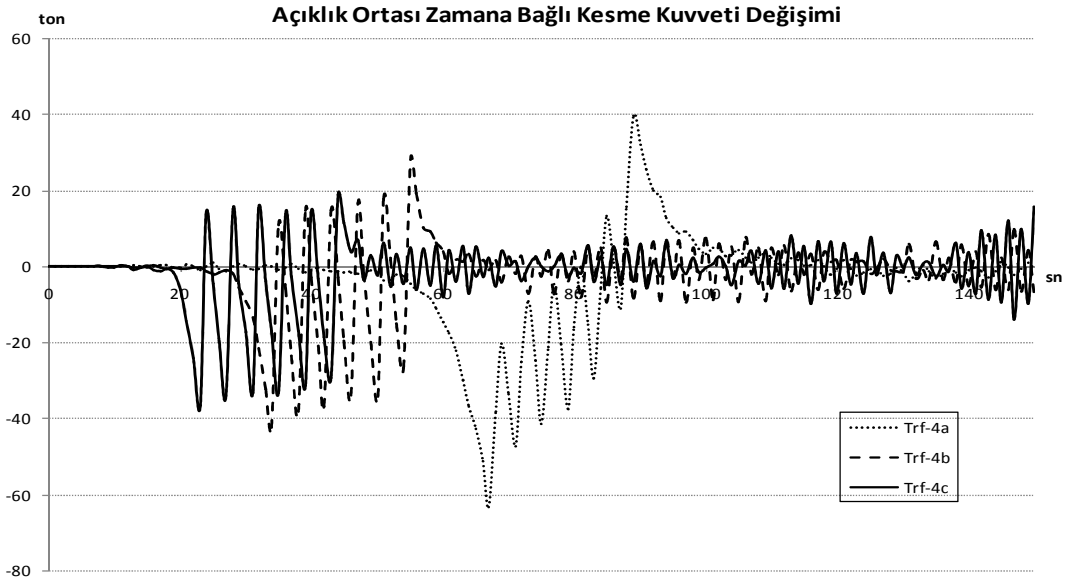


Şekil 5.35. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında kule tepe noktalarında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı değişimi

Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen moment değişimleri Şekil 5.36'da verilmiştir. Burada da yine en büyük açıklık momentleri önceki yüklemelerde olduğu gibi düşük hızla hareket eden taşıtların meydana getirdiği yüklemeler altında, yani trafik 4a yükleme durumunda gerçekleşmektedir. Daha önce yapılan bütün analizlerde olduğu gibi burada da taşıt yüklerinin açıklık ortasından ayrılmasıyla moment değerleri ve momentlerdeki değişim hızla azalmakta ve zamana bağlı olarak giderek birbirine yaklaşmaktadır. Açıklık momenti trafik 3a yüklemesi altında 3 000 ton-m mertebelerinde iken, trafik 4a yüklemesi altında taşıt sayısının yarıya inmesiyle 1 500 ton-m'ye düşmektedir.

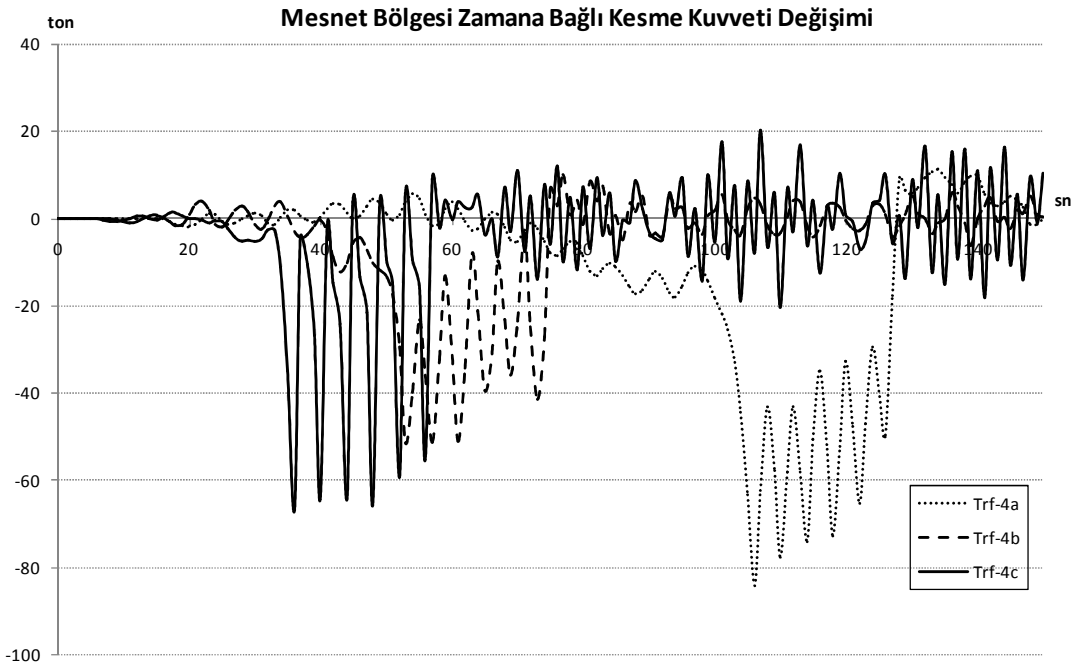


Şekil 5.36. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen momentlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.37 Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

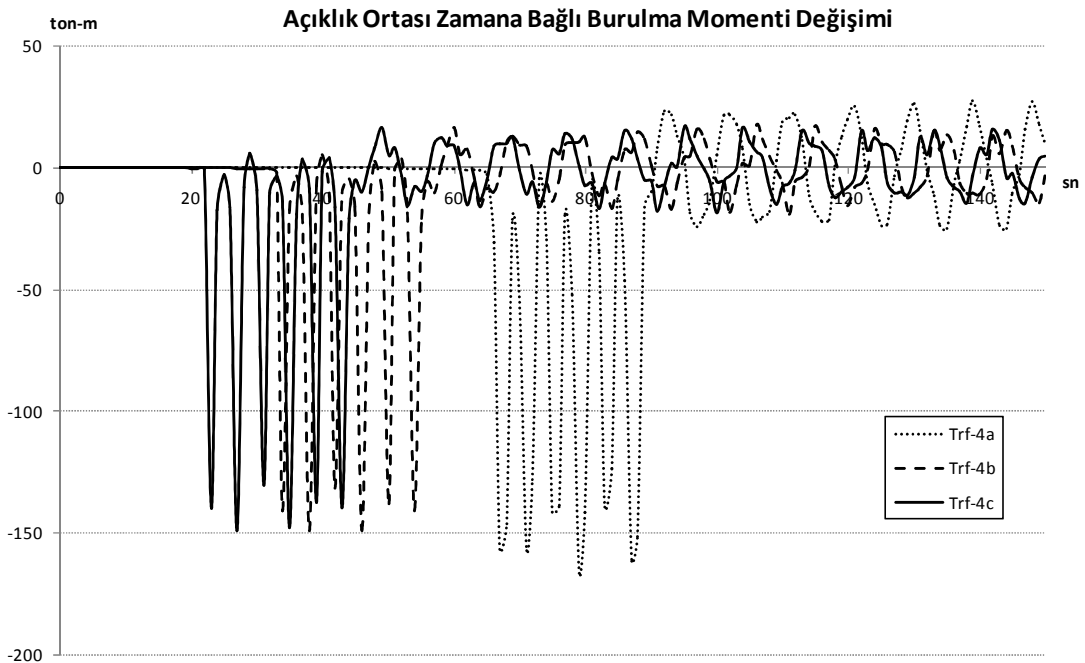
Trafik 4 yüklemesinde açıklık ortası kesme kuvvetlerinin en büyük olduğu yükleme tipi trafik 4a yüklemesidir ve yaklaşık olarak 60 ton mertebelerindedir. Şekil 5.37’de görüldüğü gibi trafik 4b ve trafik 4c yüklemeleri altında açıklık kesme kuvvetleri birbirine yakın değerlerde iken trafik 4a yüklemesi daha büyüktür. Yine taşıtların açıklık ortasından ayrılmasıyla açıklık ortasında meydana gelen kesme kuvvetlerinde ve kuvvet değişimlerinde önemli oranda azalma gözlemlenmektedir. Ancak zaman içinde başlangıçta azalan kuvvet değişimlerinde küçük artışlar meydana gelmektedir.



Şekil 5.38. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında kule mesnet bölgesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

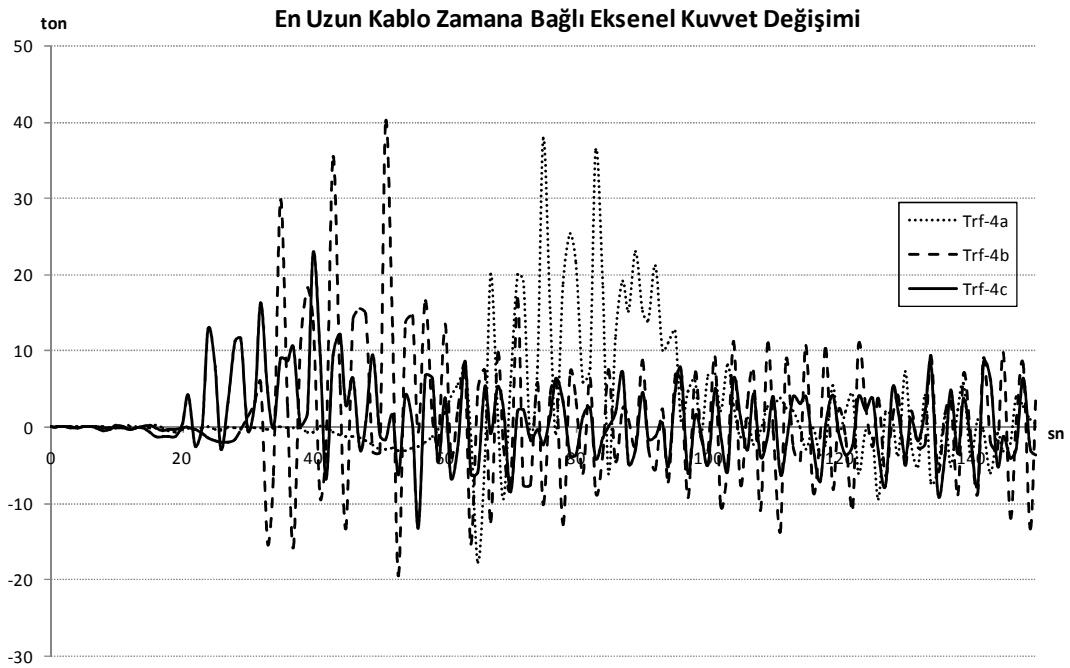
Mesnet bölgesi kesme kuvvetlerinin açıklık ortası kesme kuvvetlerine göre daha büyük değerler aldığı ve mesnet bölgelerinde oluşan kesme kuvveti değerlerinin tasarım aşamasında daha ön planda olması gerektiği önceki analiz sonuçları irdelenirken tespit edilmiştir. Aynı durum trafik 4 yüklemesi için de geçerlidir ve Şekil 5.38’de bu durum açıkça anlaşılmaktadır. Taşıtlar mesnet bölgesinden uzaklaştıkça kesme kuvvetleri azalmakta ancak zaman içerisinde artış ve azalışlar tekrarlı olarak izlenmektedir.

Trafik 4 yüklemesi, köprünün yalnızca tek yönünün taşıt trafiği taşıdığı yüklem kombinasyonudur. Kablolü köprüler gibi narin köprüler için dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biri de burulma momentleridir. Tek yöndeki trafik yükü arttıkça burulma momentleri de artış gösterecektir. Şekil 5.39 irdelendiğinde trafik 4 yüklemesi altında açıklık ortasındaki burulma momentleri taşıtların hızlarından neredeyse bağımsız olarak birbirine çok yakın değerlerdir. Burada hız parametresi burulma momentlerinin oluşumunda fazla bir etkiye sahip değildir. Köprünün burulma davranışında yükler ve yüklerin konumu en ön plandaki parametrelerdir. Burada trafik yüklemesinin yalnızca gidiş yönünden iki şeritli olması nedeniyle burulma momentlerine ait maksimum değerler, negatif işaretli olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu negatif maksimum değerler, trafik yüklemesinin hem geliş hem de gidiş yönünde ikişer şerit olarak verildiği trafik 3 yüklemesi ile elde edilen negatif burulma momentlerine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun yanında trafik yüklemesinin her iki yönden verilmesine bağlı olarak, trafik 3 yüklemesinde ayrıca pozitif işaretli maksimum burulma momentleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.39 Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında açıklık ortasında meydana gelen burulma momentlerinin zamana bağlı değişimi

Şekil 5.40'ta görüldüğü gibi en uzun kablodaki en büyük eksenel kuvvet trafik 4b yüklemesinde meydana gelmektedir. Ancak, trafik 4a yüklemesinde elde edilen değerler de trafik 4b yüklemesindekilere oldukça yakındır. Bu değerler pozitif yönde 40 ton ve negatif yönde 20 ton mertebelerindedir. En küçük eksenel yük değişimleri trafik 4c yüklemesinde izlenmektedir. Taşıtların hızı ne kadar yüksek olursa kablolarla meydana gelen eksenel kuvvette o oranda azalmaktadır. Köprünün davranışında en önemli rollerden birine sahip kabloların tasarımında hız parametresi dikkate alınması gereken en önemli parametreler arasında bulunmaktadır. Kablo eksenel kuvvetlerinde hıza ve zamana bağlı büyük artış ve azalışların olması istenmeyen bir durumdur.



Şekil 5.40. Trafik 4a, 4b ve 4c yüklemeleri altında en uzun köprü kablosunda meydana gelen eksenel kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

## 5.6. Taşıtların Meydana Getirdiği Fren Etkileri

Taşıtların taşıt-köprü etkileşimi üzerindeki etkisi irdelenirken, fren etkilerinin hıza bağlı olarak modellenip modellenemeyeceğinin incelenmesi gerekmektedir. Ancak fren etkilerinin matematik modelinin oluşturulması son derece karmaşık bir konu olduğundan, yaklaşık sonuçlar elde edilmesi amacıyla AASHTO-LRFD 3.6.4.'de basit matematiksel bir yaklaşım yapılmıştır. Bu yaklaşımda frenleme kuvvetleri, taşıt hızından bağımsız olarak, taşıtın köprüye aktardığı düşey yüklerin Eş.5.1 ve Eş.5.2 ile, belirli oranda küçültülerek, köprüye yatay statik yük olarak verilmesiyle elde edilmekte ve iki eşitlikten elde edilen sonuçların sayısal olarak büyük olanı tasarım fren yükü olarak kullanılmaktadır. kullanılır.

$$P_{BR1} = ( \text{Tasarım taşıt ağırlığı} ) \times \%25 \quad (5.1)$$

$$P_{BR2} = ( \text{Tasarım taşıt ağırlığı} \times 0,05 ) + \text{şerit yükü} \quad (5.2)$$

Bu çalışmada fren etkisinin modele ne şekilde katıldığına anlaşılabilmesi açısından basit bir uygulama yapılmıştır. Frenleme etkilerinin köprü davranışı üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi amacıyla trafik 2 yüklemesi için frenleme kuvvetleri hesaplanmıştır. Daha önceden bilindiği gibi trafik 2 yüklemesinde köprünün yalnızca gidiş yönünde iki şeridinden 5 sn zaman aralığıyla birer araç geçirilmektedir. Frenleme kuvvetleri hesaplanırken yönetmeliklerde istenen şekilde köprünün gidiş yönündeki her iki şeridi dolu kabul edilmiş ve bu durumda taşıta fren yükleri verilmiştir. Yapılan uygulamaların daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla aşağıdaki basit örnek problem çözülmüştür. Yapılan işlemler neticesinde fren yükü 27,8 ton olarak bulunmuştur. Kamyonun ağırlık merkezinin yol yüzeyine mesafesi ile tabliye ağırlık merkezinin yol yüzeyine mesafesi toplanarak moment kolu 2,9 m olarak bulunmuş ve toplam moment 83,23 ton-m olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.41'de frenleme durumunda köprü yatay deplasmanları verilmiştir.

Fren etkilerinin hesabının daha kolay anlaşılabilmesi için işlem basamakları aşağıda verilmiştir;

Fren etkilerinin hesaplanmasında köprünün trafik yükü taşıyan bütün şeritleri dolu sayılacaktır. Trafik 2 yükleme durumunda köprünün iki şeridi trafik yükü taşıdığından şerit sayısı 2 alınacaktır.

Tasarım taşı yükü : 32 ton ( HS20-44 )

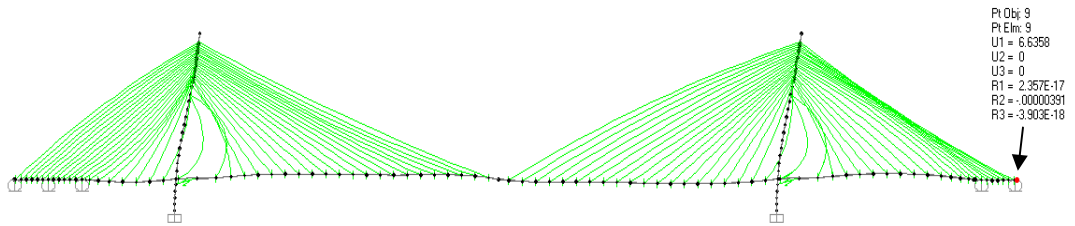
Şerit yükü : 1,5 ton/m

Şerit sayısı : 2

$$\begin{aligned} P_{BR1} &= ( \text{Tasarım taşı ağırlığı} ) \times \%25 \\ &= ( 32 \times 2 ) \times \%25 \\ &= 16 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{BR2} &= ( \text{Tasarım taşı ağırlığı} \times 0,05 ) + \text{şerit yükü} \\ &= ( 32 \times 2 \times 0,05 ) + ( 1,5 \times 2 \times 8,5 ) \\ &= 28,7 \text{ ton ( Seçilen fren yükü )} \end{aligned}$$

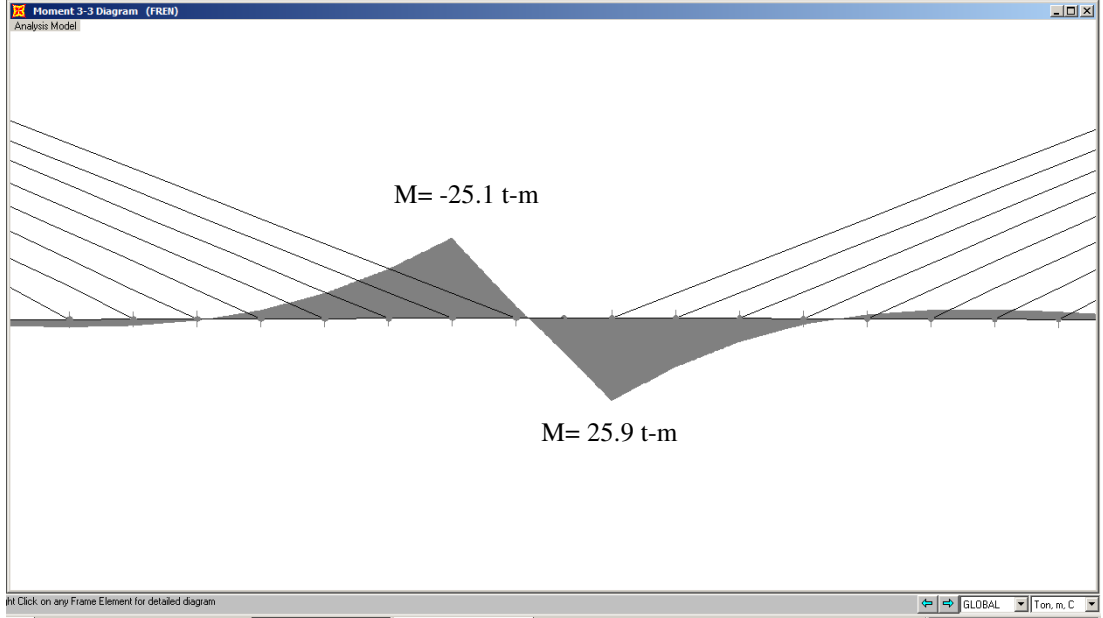
$M = 28,7 \times 2,9 = 83,23$  ton-m olarak elde edilmektedir. Bulunan moment tüm köprüye dağıtıldığında son derece küçük değerler elde edilmektedir. Fren yapan taşı sayısı arttıkça bu değer dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.41. Frenleme anında köprüde meydana gelen yatay deplasmanlar

Şekil 5.42'de yine frenleme durumunda köprü açıklık ortasında meydana gelen moment değerleri görülmektedir. Burada fren yükleri hız parametresinden bağımsız olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle yalnızca bir yükleme için analiz yapmanın

yeterli olacağı düşünülmüştür. Fren yükleri taşıt ağırlığı olarak hesaplandığından farklı hızlar için ayrı ayrı analiz yapılmamıştır.



Şekil 5.42. Köprü boyunca moment dağılımı



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada köprü tasarımında dikkate alınması gereken taşıt köprü etkileşim sistemlerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Bütün köprü tiplerinin modellenmesinde olduğu gibi kablolu köprülerin modellenmesinde de diğer birçok parametreyle birlikte köprü üzerinde hareket eden taşıtlar ile köprü arasında meydana gelen etkileşim kuvvetleri son derece önem taşımaktadır.

Hız parametresinin taşıt köprü etkileşimindeki önemini irdelemek amacıyla bu çalışmada, dünyanın ikinci büyük açıklığa sahip kablolu köprüsü olan Tatar Köprüsü model olarak seçilmiştir. Köprü SAP 2000 v.11 (Computer and Structures, Inc.) programında üç boyutlu olarak gerçek tasarım parametreleri ve boyutlarına uygun olarak modellenmiştir. Daha sonra köprü taşıt etkileşiminde hız parametresinin önemini irdelemek amacıyla dört farklı trafik yükleme kombinasyonu oluşturulmuş ve bu trafik kombinasyonları altında köprünün dinamik davranışı incelenmiştir. Bu yapılırken açıklık deplasmanı, açıklık momenti, kesme kuvvetleri değişimi, burulma momentleri, kule deplasmanı gibi birçok reaksiyon incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Taşıt köprü etkileşimi, hız parametresi açısından incelenirken daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla trafik 1 (trafik 1a, trafik 1b, trafik 1c), trafik 2 (trafik 2a, trafik 2b, trafik 2c), trafik 3 (trafik 3a, trafik 3b, trafik 3c) ve trafik 4 (trafik 4a, trafik 4b, trafik 4c) olmak üzere dört farklı trafik yüklemesi kombinasyonu oluşturulmuş ve 40km/s, 80km/s ve 120km/s hızları için analizler yapılmıştır. Trafik 1 ve trafik 3 yüklemelerinde köprünün bütün şeritleri trafik yükü taşımaktadır. Trafik 2 ve trafik 4 yüklemelerinde yalnızca gidiş yönünde iki şeritten trafik yükleri geçirilmiştir.

Analizler yapılırken köprünün kendi yüklerinden kaynaklanan sabit yüklerine trafik yükleri de dahil edilmiş, ancak analiz sonuçları şekillere aktarılırken sadece köprünün taşıtların hız değişimlerine bağlı dinamik davranışı dikkate alınmıştır.

Köprünün açıklığı ve konumu dikkate alındığında, taşınması beklenen trafik yükü trafik 1 yük kombinasyonundan daha fazla olacaktır. Ancak bu yük kombinasyonu hız parametresinin köprü dinamik davranışına etkisinin irdelenmesi bakımından uygun bir yük kombinasyonudur. Her şeritten geçen tek bir taşıtın köprü üzerindeki hareketi ve hareket hızındaki değişim, taşıt hızının köprü davranışı üzerindeki etkisinin görülmesi açısından yol gösterici olmaktadır.

Dört ayrı yükleme kombinasyonu için yapılan analiz sonuçlarının birlikte irdelenmesi neticesinde elde edilebilecek en önemli sonuçlardan birisi, hız parametresinin köprü dinamik davranışında etkili olan en önemli parametrelerden biri olduğudur. Taşıt-köprü etkileşimi problemlerinin çözümünde hız parametresi kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Taşıt ve köprü arasındaki etkileşim kuvvetleri genellikle taşıtların hızları azaldıkça artış göstermektedir. Bunun nedeni olarak taşıt hızlarının azalmasıyla taşıtların köprü üzerinde kalış sürelerinin artması ve dolayısıyla yüklerin köprüye daha uzun etki etmesi gösterilebilir. Bir köprünün davranışının kesin olarak analiz edilebilmesi için önceki bölümlerde bahsedilen bir çok parametre aynı anda analiz edilmelidir. Aksi halde tasarımda ciddi hatalar meydana gelebilir.

En büyük tepki kuvvetleri genellikle düşük hızlarda meydana gelmesine rağmen, taşıtların köprü açıklık ortasından ayrılmasından sonra, en büyük tepki kuvvetleri yüksek hızlarda elde edilebilmektedir. Bu aşamada ortaya çıkan pozitif ve negatif tepki kuvvetlerine neden olan tersinir yüklemeler, zamanla köprünün merkez açıklığını oluşturan çelik elemanlarda yorulmalara neden olabilir. Bu önemli detay tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

Köprünün davranışında en önemli rollerden birine sahip kabloların projelendirilmesinde hız parametresi dikkate alınması gereken en önemli parametreler arasında bulunmaktadır. Kablo eksenel kuvvetlerinde hıza ve zamana bağlı büyük artış ve azalışların olması istenmeyen bir durumdur. Çalışmada dikkate alınan bazı yük grupları için kulelerde uzun süreli deformasyonlar ortaya çıkmıştır. Bu durum kabloların eksenel kuvvetlerinde ve yük taşıma kapasitelerinde düşüşe

neden olacaktır. Bu bakımdan kule elemanlarının trafik yükleri dikkate alınarak tasarlanması kablo eksenel kuvvetlerinin durumu açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle kablolu köprülerde, kuleler kablo eksenel kuvvetlerinde düşüşe neden olmayacak rijitlikte tasarlanmalıdır.

Çalışma sonuçları göstermektedir ki kombinasyon ne şekilde değiştirilirse değiştirilsin, köprünün dinamik davranışında hız parametresi dikkate alınmalıdır. Yapılan analizler bundan sonra köprü dinamiğiyle ilgili başka çalışmalar için yol gösterici olacaktır. Araştırmacılar tarafından birçok farklı parametre, burada elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca bu çalışmada kısaca fren etkilerine de değinilmiştir. Ancak mevcut uygulamalarda fren etkileri taşıt hızından bağımsız olarak hesaplanmakta ve tasarıma dahil edilmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda bu durum irdelenip, fren etkilerinin taşıt hızına bağlı olarak nasıl modelleneceği konusu incelenmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Soyluk, K., “Kablolu köprülerin stokastik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 1-5, 78-87 (1997).
2. Willis, R. Et al. “Experiment for determining the effect produced by causing weight to travel over bars with different velocities”, **Cast Iron and Malleable Iron**, London, 57-64 (1951).
3. Timoshenko, S. P., “Forced vibration of prismatic bars”, **D. Van Nostrand Co.**, Russia, 147-158 (1908).
4. Timoshenko, S. P., “On the forced vibration of bridges”, **Philosph Magazine**, 6: 43 (1912).
5. Timoshenko, S. P., “History of the strength of meterials” **D. Van Nostrand Co.**, New York, 22-48 (1941).
6. Jeefcot H. H., “On the vibration of beam under the action of moving loads”, **Philosph Magazine**, 7(8) : 66-97 (1929).
7. Inglis, C. E., “A mathhematical treaties on vibration in railway bridges”, **The University Press**, Cambridge, 123-134 (1934).
8. Wen, R. K., “Dynamic response of beams transgressed by two axle loads”, **Journal of Engineering Mechanics**, 86 : 91-111 (1961).
9. Fry’ba, L., “Vibration of solids and structure under moving loads”, **Noordhoff International Publ.**, Prague, 16-23 (1973).
10. Tan, Braneld, “Traverse vibration and stability of a beam subjected to moving mass loads”, PhD, **Arizona State University**, 254-258 (1998).
11. Gren, Cebon, “Computer Analysis of structural framework” **Collins Co.**, London 34-67 (1977).
12. Gua, X., “Moving load on a flexibly supported Timoshenko beam”, **International Journal of Solids Structure**, 4 : 353-370 (2001).
13. Huang, et. al, “Dynamic behavior of cantilever bridges”, **Journal of Engineering, ASCE**, 88 : 27-43 (1998).
14. Chawdhury,Roy, “Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles”, **Computers&Structures**, 86 : 556-572 (2008).

15. Law, Chan, Zeng “Dynamic amplification factors in cable stayed bridges”, *Journal of Sound and Vibration*, 282 : 805-830 (2005).
16. Fry’ba, L., “Dynamic calculation of bridge structure”, *Acta Technica CSAV*, 9: 67-95 (1964)
17. Internet : The European Steel Design Programme (ESDEP), “Lecture Notes”, <http://www.fgg.uni-lj-si/kmk/ESDEP/master/wg15b/10800.htm> (2009).
18. Yang, Y. B., Yau, J. D., Wu, Y.S., “Vehicle-bridge interaction dynamics”, Interaction Dynamics Problems, *World Scientific*, Taiwan, 155-149 (2004).
19. Kwasniewski, L., Li, H., Wekezer, J., Malachowski, J., “Finite element analysis of vehicle-bridge interaction”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 42: 950-959 (2006).
20. Bruno, D., Greco, F., Lanetti, P., “Dynamic impact analysis of long span cable-stayed bridges under moving loads”, *Engineering Structures*, 30: 1160-1177 (2008).
21. Au, F. T. K., “Impact study of cable-stayed bridges under railway traffic using various models”, *Journal of Sound and Vibration*, 240 (3): 447-465 (2001).
22. Li, H., “Dynamic response of highway bridges subjected to heavy vehicles”, PhD, *North Dakota University*, North Dakota, 22-32 (2006).
23. Yabuna, M., Fujiwara, T., Sumi., K., Nose, T., Suzuki, M., “Tatara Bridge”, *IHI Engineering*, 1-17 (1999).
24. AASHTO, “American Association of state highway and transportation officials, *Standard Specification For Highway Bridge*, thirteen edition, Washington (1983)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CENGİZ,Ayşegül  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 01.06.1979 Kırıkkale  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 402 32 91  
Faks : 0 (312) 417 07 30  
e-mail : [aysegulcngz@hotmail.com](mailto:aysegulcngz@hotmail.com).

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği Bölümü	2009
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü	2001
Lise	Kırıkkale Anadolu Lisesi	1997

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2009	Milli Savunma Bakanlığı	İnşaat Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce